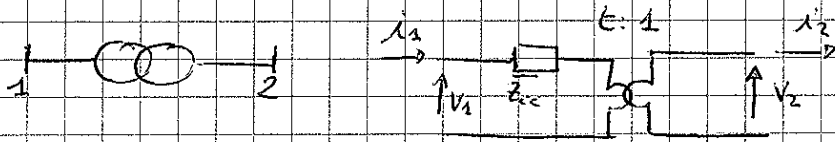


IL TRASFORMATORE

trasformatore a 2 avvolgimenti



Devono essere note S_N , V_{N1} , V_{N2} , $V_{cc\%}$, P_{cc}

$$t = \frac{V_{N1}}{V_{N2}} \quad |Z_{cc}| = \frac{V_{cc\%}}{100} \frac{V_{N1}^2}{S_N} \quad R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 I_{N1}^2} \quad \text{con } I_{N1} = \frac{S_N}{\sqrt{3} V_{N1}}$$

ma segue che $R_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \frac{S_N^2}{V_{N1}^2}} = \frac{P_{cc}}{S_N} \frac{V_{N1}^2}{S_N}$

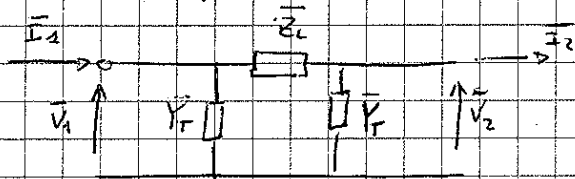
$R_{cc, pu}$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

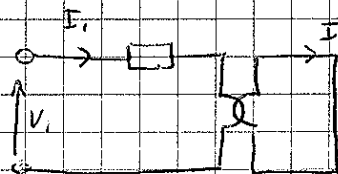
in genere $R_{cc} \ll X_{cc}$ ed il rapporto

$\frac{X_{cc}}{R_{cc}}$ cresce all'aumentare della teglia del trafo

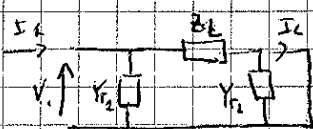
Circuito equivalente a π



In condizioni di cortocircuito e secondario



$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_1}{Z_{cc}} \quad \bar{I}_2 = t \bar{I}_1 = t \frac{\bar{V}_1}{Z_{cc}}$$



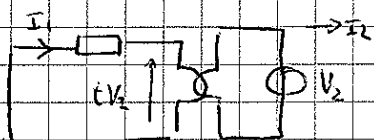
$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_1}{Z_L} \quad \bar{I}_1 = \bar{V}_1 \left(\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_{cc}} \right)$$

$$\bar{Z}_c = \frac{Z_{cc}}{t}$$

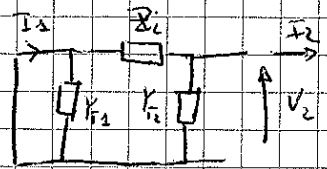
equivalente a due \bar{I}_2 traverse

$$\frac{1}{Z_{cc}} = Y_{Y1} + \frac{1}{Z_L} \Rightarrow \left[Y_{Y1} + \frac{1}{Z_{cc}} = \frac{t}{Z_{cc}} = \frac{1-t}{Z_{cc}} \right]$$

Cortocircuito con $t=1$ e $\text{coto } 1$



$$\bar{I}_1 = - \frac{t \bar{V}_2}{Z_{cc}} \quad \bar{I}_2 = t \bar{I}_1 = - \frac{t^2}{Z_{cc}} \bar{V}_2$$



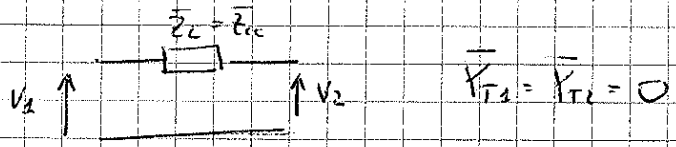
$$\bar{I}_1 = -\frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_L} \quad \bar{I}_2 = -\bar{V}_2 \left(Y_{12} + \frac{1}{\bar{Z}_L} \right)$$

Confrontando \bar{I}_1 si ha $\bar{Z}_L = \frac{\bar{Z}_{cc}}{t}$

Confrontando \bar{I}_2 si ha $+\frac{t^2 \bar{V}_2}{\bar{Z}_L} = +\bar{V}_2 \left(Y_{12} + \frac{1}{\bar{Z}_L} \right)$

$$\bar{Y}_{12} = \frac{t^2}{\bar{Z}_{cc}} - \frac{t}{\bar{Z}_{cc}} = \frac{t(t-1)}{\bar{Z}_{cc}}$$

Si può notare che se $t=1$ il circuito equivalente a π diventa

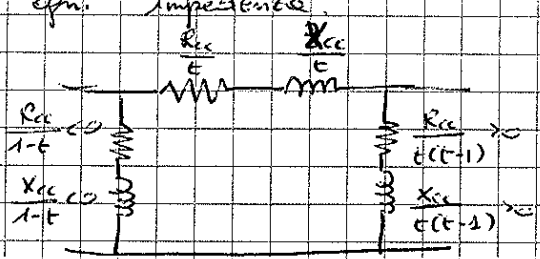


$$\bar{Z}_{cc} = R_{cc} + j X_{cc}$$

$\begin{matrix} R_{cc} & X_{cc} \\ \text{---} & \text{---} \\ \text{---} & \text{---} \end{matrix}$

Ora indichiamo il circuito a π evidenziamo parte reale e immaginaria

di ogni impedenza



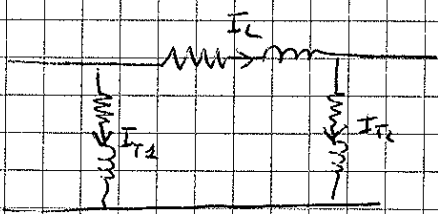
$$\frac{1}{\bar{Y}_{11}} = \frac{\bar{Z}_{cc}}{1-t}$$

$$\frac{1}{\bar{Y}_{12}} = \frac{\bar{Z}_{cc}}{t(t-1)}$$

se $t > 1$ si ha che $\text{Re}(\bar{Y}_{12}) < 0$ $\text{Im}(\bar{Y}_{11}) < 0$

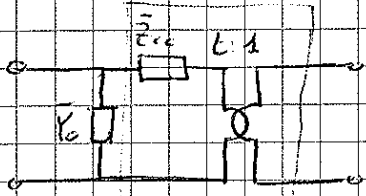
se $t < 1$ si ha che $\text{Re}(\bar{Y}_{12}) < 0$ e $\text{Im}(\bar{Y}_{12}) < 0$

La resistenza negativa è possibile perché i bipoli non rappresentano nulla di fisico. Noi usiamo e valutiamo solo ciò che accade ai morsetti del trasformatore. Il circuito a π è un modello che si fa vedere solo cosa accade ai morsetti non cosa accade all'interno.

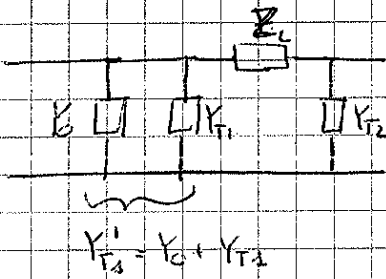


$$\Delta P = \frac{R_{cc}}{t} I_{cc}^2 + \frac{R_{cc}}{1-t} I_{12}^2 + \frac{R_{cc}}{t(t-1)} I_{21}^2 = R_{cc} I_1^2$$

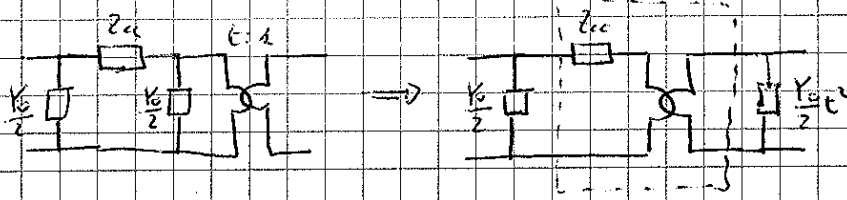
Se consideriamo anche il ramo di magnetizzazione



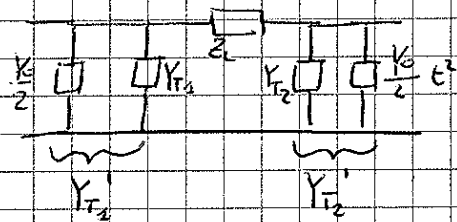
e si può posizionare Y_0 nel circuito equivalente a π



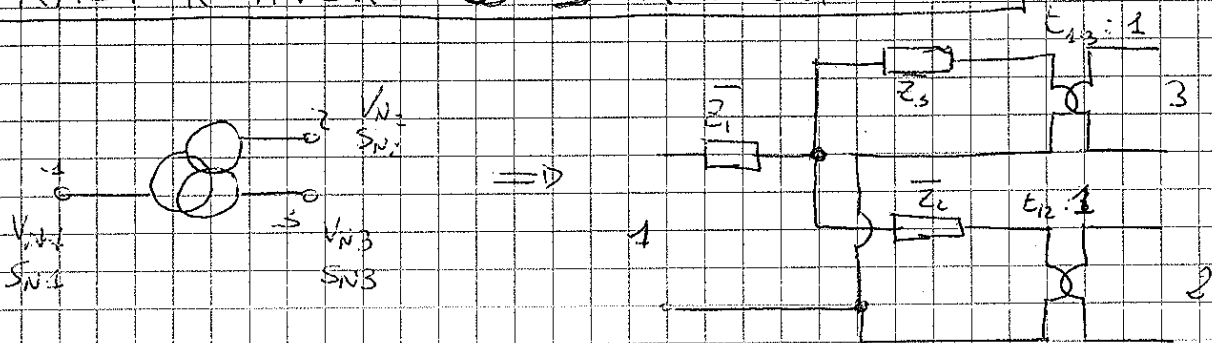
Alcuni software utilizzano il seguente modello dell'induttanza di magnetizzazione



il circuito equivalente a π diventerà



TRASFORMATORE A 3 AVVOLGIMENTI



$$e_{13} = \frac{V_{N1}}{V_{N3}}$$

$$e_{12} = \frac{V_{N1}}{V_{N2}}$$

Z_1 perduto per effetto Joule
flusso disperso

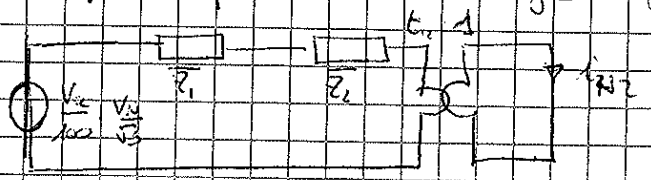
Si fanno 3 prove di corto circuito

- Prova corto-circuito avvolgimenti 1-2

- Av 1 alimentato
- Av 2 in corto circuito
- Av 3 a vuoto

Si ottiene ma_{12} % ed ma_{12}

Bisogna capire e cosa fa riferimento la V_{c12} .



$$I_{N2} = \frac{S_{N2}}{\sqrt{3} V_{N2}}$$

$$I_{N1} = \frac{I_{N2}}{t_{12}} = \frac{S_{N2}}{\sqrt{3} V_{N2}} \cdot \frac{V_{N2}}{V_{N1}} < \frac{S_{N2}}{\sqrt{3} V_{N1}}$$

perché in generale $S_{N1} > S_{N2}$ (v. ha anche avvolgimento 3)

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{12} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 &= \frac{V_{c12}}{100} \cdot \frac{V_{N1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{I_{N1}} = \\ &= \frac{V_{c12} \cdot V_{N1}^2}{100 S_{N2}} \end{aligned}$$

$$R_{12} = \frac{P_{c12}}{3 I_{N1}^2} = \frac{P_{c12}}{S_{N2}} \cdot \frac{V_{N1}}{S_{N2}} \quad \text{La potenza base è } S_{N2}$$

$$X_{12} = \sqrt{\bar{Z}_{12}^2 - R_{12}^2}$$

- Prova corto circuito avvolgimento 1-3

$\left. \begin{array}{l} \text{Avv 1 alimentato} \\ \text{Avv 2 a vuoto} \\ \text{Avv 3 in corto circuito} \end{array} \right\} \text{ Nota } V_{c23} \text{ e } P_{c13} \Rightarrow \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3$

- Prova corto circuito avvolgimento 2-3

$\left. \begin{array}{l} \text{Avv 1 a vuoto} \\ \text{2 alimentato} \\ \text{3 in corto circuito} \end{array} \right\} V_{c13} \text{ e } P_{c23} \Rightarrow \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3$

S_1 fa sistema lineare

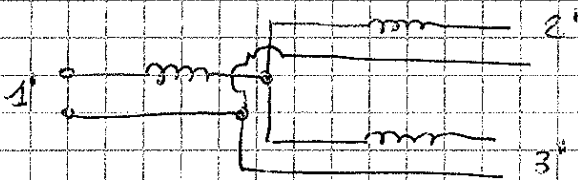
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 = \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3 = \bar{Z}_{13} \\ \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 = \bar{Z}_{23} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \bar{Z}_1 = \frac{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{13} - \bar{Z}_{23}}{2} \\ \bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} - \bar{Z}_{13}}{2} \\ \bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_{13} + \bar{Z}_{23} - \bar{Z}_{12}}{2} \end{array} \right.$$

Se trascuriamo le perdite per effetto Joule

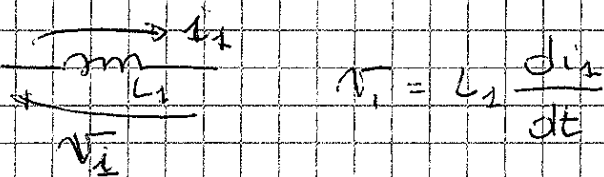
$$X_1 = \frac{X_{12} + X_{13} + X_{23}}{2} \quad X_2 = \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2} \quad X_3 = \frac{X_{13} + X_{23} - X_{12}}{2}$$

Sicuramente $X_{ij} > 0$ perché rappresentano il flusso disperso con avvolgimento a vuoto.

Talvolta capita che qualche $X_{ij} < 0$. (esemp. o: $X_1 < 0$)

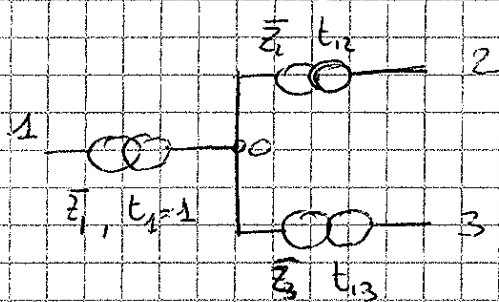


Le reattanze negative indicano che in alcune rami del circuito le reattanze si comportano come capacità. Nel dominio del tempo non posso sostituire L con C !!



$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

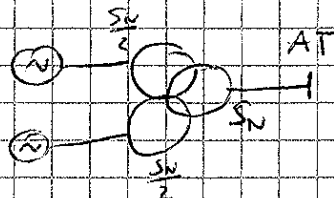
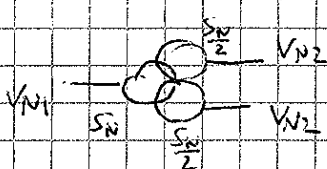
Nota: il circuito equivalente non rappresenta una eccitazione all'interno del trafo, ma solo come si comporta visto dall'esterno.



Possiamo rappresentare il trasformatore a 3 avvolgimenti in questo modo. Poi possiamo rappresentare ogni trafo a 2 avvolgimenti con il circuito equivalente a π .

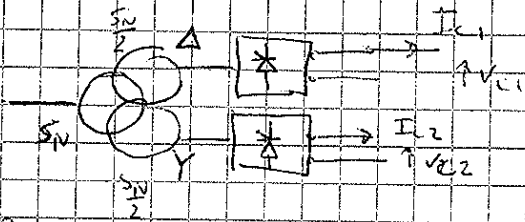
I trasformatori a 3 avvolgimenti vengono utilizzati - per ridurre i costi rispetto a 2 trafo a 2 avvolgimenti.

$$\text{Se } S_{N2} = S_{N3} \text{ e } V_{N1} = V_{N3} \text{ e } S_{N1} = 2 S_{N2}$$

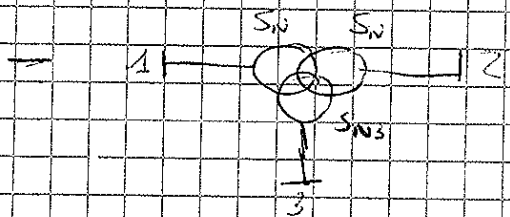


Si possono accoppiare alla rete 2 generatori uguali.

- realizzazione di convertitori AC/DC a transistori a 12 impulsi.



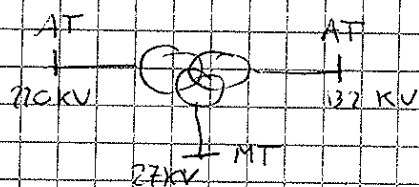
Se il polo DC si può avere la connessione in serie ($I_1 = I_2$, $V_c = V_1 + V_2$) esempio nelle linee HVDC (high voltage direct current) i convertitori possono essere collegati in parallelo tramite induttanza $I_c = I_1 + I_2$ e $V_c = V_1 + V_2$ esempio: convertitori per la trazione elettrica.



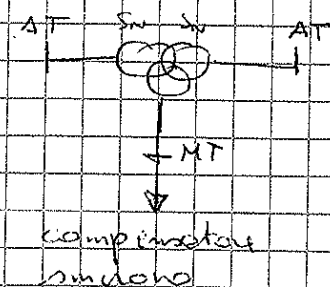
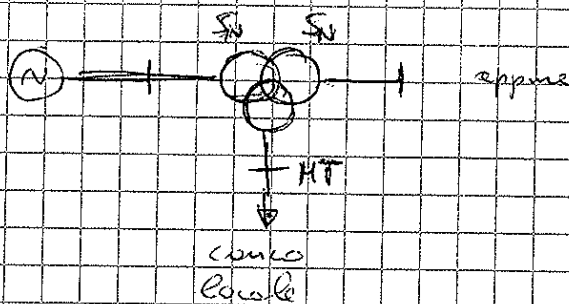
$$S_{N1} = S_{N2} = S_N$$

$$S_{N3} \ll S_N$$

Un esempio di questa tipologia è l'interconnessione di due reti AT aventi diverse V_N , mentre il 3° avvolgimento viene usato per alimentare una rete MT.



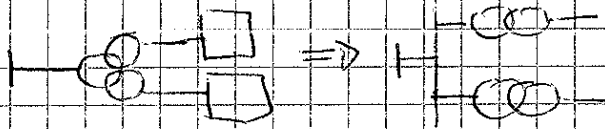
Un altro esempio è



(MS senza neutro fuso)
 $P_G = 0$ $Q_G \neq 0$

Nel trasformatore a 3 avvolgimenti le V_{k12} , V_{k13} e V_{k23} devono essere scelte in base alle tipologie di uscite:

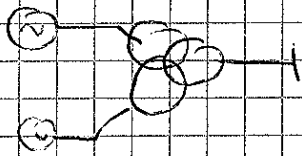
- Nei convertitori AC/DC il ~~convertitore~~ ^{trafo} a 3 avvolgimenti deve avere il comportamento più simile possibile a 2 trafo a 2 avvolgimenti:



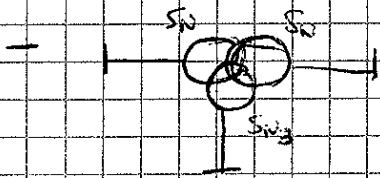
Così vogliono che $|X_1| \ll |X_2| = |X_3|$

In termini di V_k vuol dire $V_{k23} \approx 2V_{k12} = 2V_{k13}$ - in termini fisici vuol dire disaccoppiare i due avvolgimenti.

- Caso dei 2 generatori è simile a quello dei convertitori AC/DC.

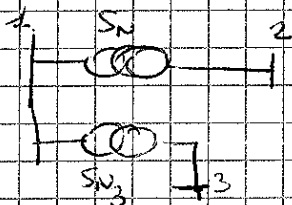


Vogliono che i due avvolgimenti siano il più disaccoppiati possibile.

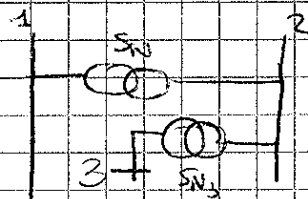


- 1) Alimentare carico locale
- 2) ~~generare~~ Convertitore anulare

Casi limite:



$$|X_1| \ll |X_2|$$



$$|X_2| \ll |X_1|$$