

TRASFORMATORI

Un trasformatore è un dispositivo capace di modificare i valori di tensioni e corrente in entrata in modo che in uscita risultino alterati. I trasformatori più diffusi sono appunto quelli di **potenza**, che variano la tensione tra ingresso e uscita a parità di potenza. Sono dispositivi che consentono inoltre il trasferimento di potenza tra due componenti, senza un contatto elettrico diretto. Chiaramente hanno ampio utilizzo nel trasporto di energia elettrica, ossia aumentando la tensione di linea nei cavi elettrici, ne diminuiscono la corrente e quindi si ha una perdita minima.

VALORI CARATTERISTICI (DI TARGA) DI UN TRASFORMATORE

Sulla targa di un trasformatore in genere sono riportati i valori di:

1. Tensione e corrente nominali **primarie**, in genere coincidono con quelle di ingresso. (I_{1n} , V_{1n})
2. Tensione e corrente nominali **secondarie**, in genere coincidono con quelle di uscita. (I_{2n} , V_{2n})
3. Potenza apparente nominale (S_n)

$$S_n = V_{1n} \cdot I_{1n} = V_{2n} \cdot I_{2n}$$

4. Frequenza nominale (f_n)

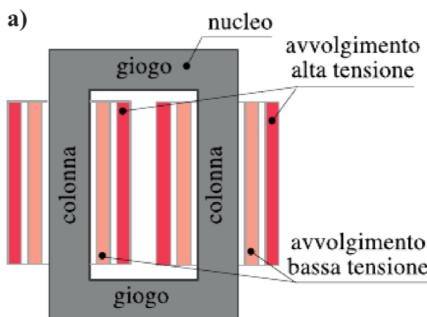
5. **RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE** (n, z), ossia il rapporto:

$$n = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = \frac{I_{2n}}{I_{1n}}$$

V_{1n}	tensione nominale primaria [V]
V_{2n}	tensione nominale secondaria [V]
I_{1n}	corrente nominale primaria [A]
I_{2n}	corrente nominale secondaria [A]
P_n	potenza nominale [VA]
f_n	frequenza nominale [Hz]
n	rapporto di trasformazione

PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Un trasformatore è composto da due unità principali, ossia il **nucleo** (l'anello metallico) e gli **avvolgimenti**. Osserviamo un modo per accoppiare le componenti in modo da massimizzare l'efficienza del trasformatore:



- I "lati" orizzontali del nucleo sono chiamate **giogo**, mentre quelle su cui si avvolgono le spire sono dette **colonne**.
- Si hanno due coppie di avvolgimenti concentrici, composte ciascuna da un avvolgimento ad **HY** (HIGH VOLTAGE) e uno **LV** a contatto con il nucleo.
 1. AVVOLGIMENTI CONCENTRICI → Massimizza il flusso concatenato
 2. LV INTERNO → Riduce le sollecitazioni dielettriche del nucleo
- Il nucleo è laminato (in vari modi) per ridurre le correnti parassite

⚠ Un altro modo prevede una colonna centrale con unico avvolgimento, ma non è conveniente economicamente poiché richiede più metallo (III)

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

I trasformatori sfruttano i principi di induzione di Faraday - Lenz e la legge di Hopkinson. Ovviamente funzionano solo in **CORRENTE ALTERNATA**, per cui anche il flusso avrà la sua corrispondente fasoriale:

$$\Phi(t) = \Phi_M \sin(\omega t + \psi) \rightarrow \bar{\Phi}$$

$$\bar{E} = -j\omega \bar{\Phi}_c$$

$$\sum_k N_k \bar{i}_k = R \bar{\Phi}$$

⚠ In sostanza è un circuito magnetico composto da due avvolgimenti

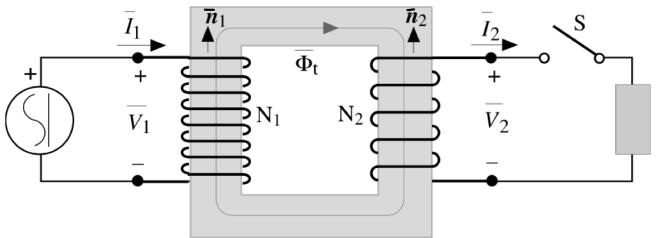
FARADAY - LENZ

HOPKINSON

TRASFORMATORE IDEALE

In un trasformatore ideale si consideravano:

- RILUTTANZA NULLA ($\mathcal{R} = 0$, $\rightarrow \infty$)
- ZERO PERDITE PER ISTERESI / PARASSITE
- ACCOPPIAMENTO PERFETTO ($K = 1$)
- RESISTENZA INTERNA DEI FILI TRASCURABILE ($R = 0$)



Chiamiamo N_1 il circuito primario e N_2 il secondario, inoltre chiamiamo:

$\bar{\Phi}_T$ = Flusso totale che attraversa il nucleo.

Scriviamo i flussi per ciascun solenoide (flusso nel nucleo per il numero di spire)

$$\bar{\Phi}_{C_1} = N_1 \bar{\Phi}_T$$

$$\bar{\Phi}_{C_2} = -N_2 \bar{\Phi}_T$$

Il segno (-) deriva dal fatto che $\bar{\Phi}_T$ e' discorde col flusso che produrrebbe V_2 , per le correnti che ho scelto arbitrariamente

$$\dot{E}_1 = j\omega \bar{\Phi}_{C_1} = j\omega N_1 \bar{\Phi}_T$$

$$\dot{E}_2 = -j\omega \bar{\Phi}_{C_2} = -j\omega (-N_2 \bar{\Phi}_T) = j\omega N_2 \bar{\Phi}_T$$

Il meno deriva dal fatto che N_2 di fatto si comporta come un generatore (RIF. NON ASS.) che vogliono il meno in faraday - lenz.

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_T$$

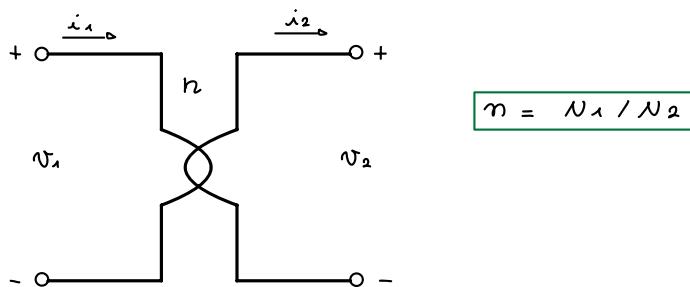
$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 = j\omega N_2 \bar{\Phi}_T$$

Applichiamo ora la legge di Hopkinson, $\sum_k N_k I_k = \bar{\Phi} \cdot \mathcal{R}$, si ottiene così:

$$N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_T = 0$$

Si ottengono così le leggi per un **TRASFORMATORE IDEALE**:

FUNZIONAMENTO A VUOTO

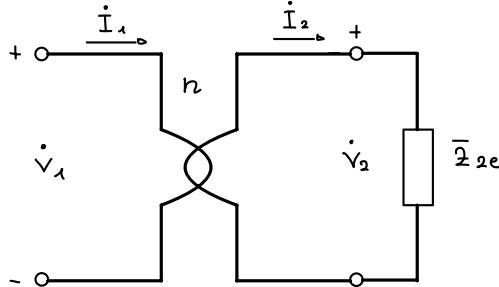


$$\dot{V}_1 = m \dot{V}_2$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{n} \dot{I}_2$$

$$\underline{S}_2 = \dot{V}_2 \dot{I}_2^* = \dot{V}_1 \dot{I}_1^*$$

FUNZIONAMENTO A CARICO



$$\bar{Z}_{2e} = \dot{V}_2 / \dot{I}_2$$

$$\bar{Z}_{1eq} = n^2 \bar{Z}_{2e}$$

Cio' significa che una impedenza posta sul 2° viene vista dal 1° come moltiplicata per un fattore pari a n^2 .

NOTAZIONE: è un simbolo per indicare il trasformatore (dato che serve n , non come è fatto al suo interno)

TRASFORMATORE REALE

Le condizioni di non idealità si presentano quando una delle precedenti ipotesi non è soddisfatta; in genere i trasformatori di potenza non sono ideali ma presentano le seguenti complicazioni.

RILUTTANZA NON NULLA

In caso di $R \neq 0$ abbiamo che la legge di Hopkinson non è più $\Re \bar{\Phi} = 0$, ma bisogna considerare una corrente di magnetizzazione ($I_{1\mu}$), ossia una corrente che polarizza il nucleo. Nello specifico si rappresenta come un induttore in parallelo nel circuito primario che "ruba" una parte della corrente per magnetizzare (reattanza di magnetizzazione X_0).

FUNZIONAMENTO A VUOTO ($I_2 = 0$)

Considerando X_0 e $I_{1\mu}$, possiamo scrivere Hopkinson:

$$N_1 \dot{I}_{1\mu} = \Re \bar{\Phi}_T$$

a questo punto X_0 viene attraversata da $\bar{\Phi}_T$, quindi produce una fem indotta pari a \dot{V}_1 :

$$\dot{V}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_T = j\omega \left(\frac{N^2}{R} \right) \dot{I}_{1\mu} = jX_0 \dot{I}_{1\mu}$$

FUNZIONAMENTO A CARICO (corto circuito)

Applichiamo nuovamente Hopkinson:

$$\cdot N_1 \dot{I}_1 - N_2 \dot{I}_2 = \Re \bar{\Phi}_T = N_1 \dot{I}_{1\mu}$$

dai cui ovviamente:

$$\cdot \dot{I}_1 = \dot{I}_{1\mu} + \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_{1\mu} + \dot{I}_{12} \quad (\dot{I}_{12} = n \dot{I}_2)$$

$$\cdot \dot{V}_1 = n \dot{V}_2$$

Viene dissipata solo potenza reattiva (non ci sono resistenze) che serve per creare il flusso che scorre nel nucleo.

PERDITE NEL NUCLEO NON NULLE

Sono inclusi i casi di isteresi e correnti parassite, che vanno a dissipare potenza attiva.

Si schematizzano come un'impedenza posta nel circuito 1°.

In questo caso la potenza dissipata è sia attiva (dovuta alle correnti parassite) che reattiva (per isteresi).

Dato che $\dot{I}_1 = \dot{I}_{12} + \dot{I}_{10}$ e che \dot{I}_{12} voglio che sia in fase con \dot{I}_2 , ciò significa che \dot{I}_1 sarà sfasata rispetto a \dot{I}_2 e quindi che parte della potenza è stata dissipata. Seguono le equazioni dello schema fasoriale:

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_{1a} + \dot{I}_{1\mu}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_{12} = \dot{I}_{10} + \frac{1}{n} \dot{I}_2$$

$$\dot{V}_1 = n \dot{V}_2$$

R_{10} e X_{10} costituiscono l'impedenza a vuoto (o di magnetiz.).

ACCOPPIAMENTO NON PERFETTO

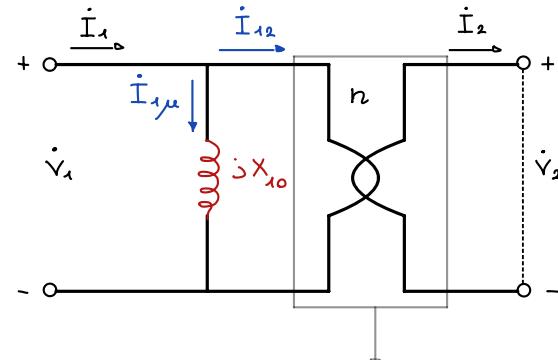
Ne consegue che in entrambi gli avvolgimenti si ha un flusso disperso, rappresentato da un induttore nel filo su cui si ha una caduta di tensione dovuta alle induttanze ($L_{1\text{dis}} = \frac{N_1 \bar{\Phi}_{1\text{dis}}}{\dot{I}_1}$, analogo L_2) per cui:

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{n} \dot{I}_2$$

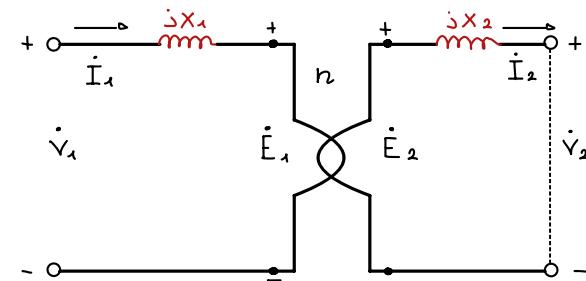
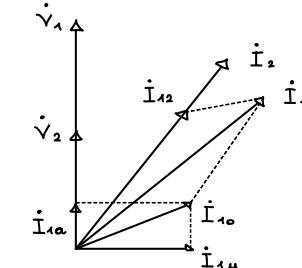
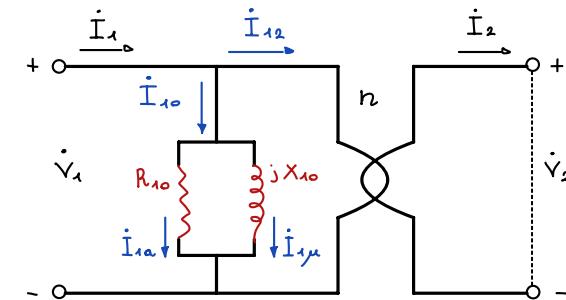
$$X_1 = \omega L_{1\text{dis}}$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + jX_1 \dot{I}_1$$

$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 jX_2$$



QUESTO È UN TRASFORMATORE IDEALE PER CUI VALGONO LE RELAZIONI TROVATE PRIMA



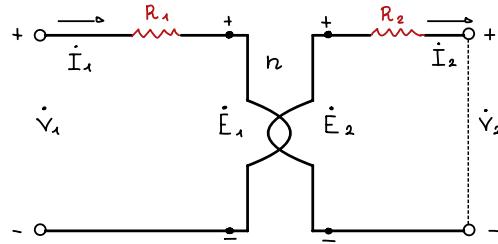
CONDUTTORI CON RESISTIVITÀ

In tal caso basta aggiungere due resistenze R_1, R_2 con equazioni analoghe al caso di accoppiamento imperfetto.

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{n} \dot{I}_2$$

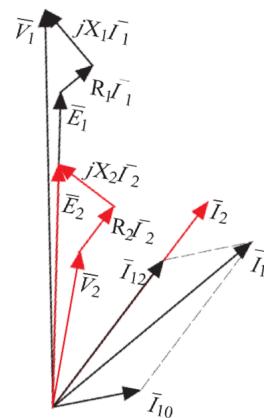
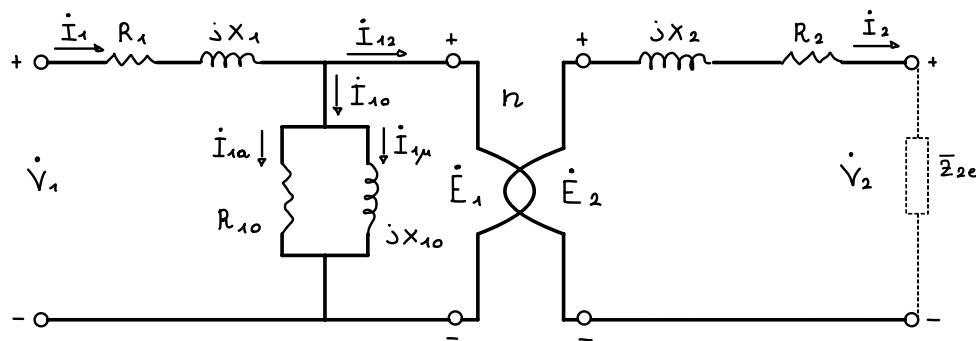
$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1$$



MODELLO DI TRASFORMATORE REALE (CIRCUITO EQUIVALENTE)

Consideriamo un trasformatore privo di qualsiasi idealità e rappresentiamolo graficamente, analiticamente e in diagramma fasoriale.



$$\dot{E}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_T$$

$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 - (R_2 + jX_2) \dot{I}_2 = \bar{Z}_{2e} \dot{I}_2$$

$$\dot{E}_2 = j\omega N_2 \bar{\Phi}_T$$

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + (R_1 + jX_1) \dot{I}_1$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_2 + \bar{Z}_{2e}}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_{12} = \dot{I}_{10} + \frac{1}{n} \dot{I}_{12}$$

FUNZIONAMENTO A VUOTO

Il funzionamento a vuoto implica che la corrente sul circuito secondario sia nulla e, di conseguenza, trascureremo tanto $I_2 = 0$. In tali condizioni si ha che la potenza erogata dal trasformatore è nulla, mentre quella assorbita dal primario coincide con le perdite nel ferro.

Il funzionamento a vuoto si può ottenere con $\dot{I}_{10} \gg \dot{I}_1$ (due o tre ordini di grandezza), in modo che:

$$\dot{I}_1 \approx \dot{I}_{10} \quad \text{e} \quad \dot{I}_2 = 0$$

a questo punto scriviamo le equazioni sul 1°:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 = m \dot{E}_2 = m \dot{V}_{20}$$

$$\dot{I}_{10} = \frac{\dot{V}_{10}}{\bar{Z}_{10}} \quad P_{10} = \dot{P}_{fe} = \dot{V}_1 \dot{I}_{10}^* \cdot \cos \varphi_{10}$$

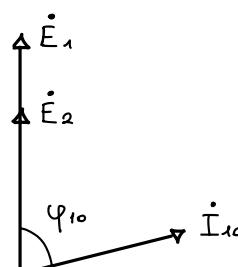
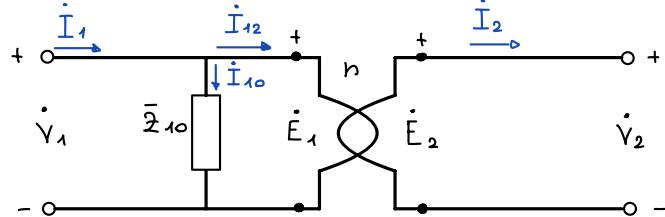
Per convenzione si usa esprimere le perdite con i valori % di i_{10} e P_{10} : (S_n = Potenza apparente)

$$i_{10} \% = \frac{I_{10}}{I_{1n}} \cdot 100$$

$$P_0 \% = \frac{P_{10}}{S_n}$$

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_0 \%}{i_{10} \%}$$

⚠️ A vuoto l'unica corrente che passa anche a vuoto è i_{10}



FUNZIONAMENTO IN CORTO CIRCUITO

Il funzionamento in cortocircuito fornisce gli strumenti per il calcolo delle perdite negli avvolgimenti,

\bar{z}_{12} sono le X_2 e R_2 riportate al primario:

$$(R_{12} = m^2 R_2, L_{12} = m^2 L_2)$$

Si considera trascurabile la \bar{z}_{10} (poiché essendo $\bar{z}_{10} \gg \bar{z}_1, \bar{z}_{12}$ in parallelo diventa piccola).

A questo punto ho un'unica impedenza:

$$\bar{z}_{1c} = \bar{z}_1 + \bar{z}_{12}$$

da cui trovo le R_{1c}, X_{1c} del circuito equivalente:

$$\cos \varphi = \frac{P_n}{I_n V_n}$$

$$R_{1c} = Z_{1c} \cos \varphi \quad L_{1c} = Z_{1c} \sin \varphi$$

PROVE SUL TRASFORMATORE

Sono utilizzate per determinare i parametri del **CIRCUITO EQUIVALENTE**, attraverso circuiti di misura che alimentano il trasformatore:

PROVA A VUOTO

Il trasformatore è alimentato alla tensione nominale, misuro tensione, corrente e potenza assorbita da cui trovo i parametri del circuito equivalente:

$$Y_1 = Y_{1n} \quad ; \quad I_1 = I_{10} \quad ; \quad m = \frac{Y_1}{Y_2}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_n}{Y_1 I_1} \quad R_{10} = \frac{1}{Y_{10} \cos \varphi} \quad X_{10} = \frac{1}{Y_{10} \sin \varphi}$$

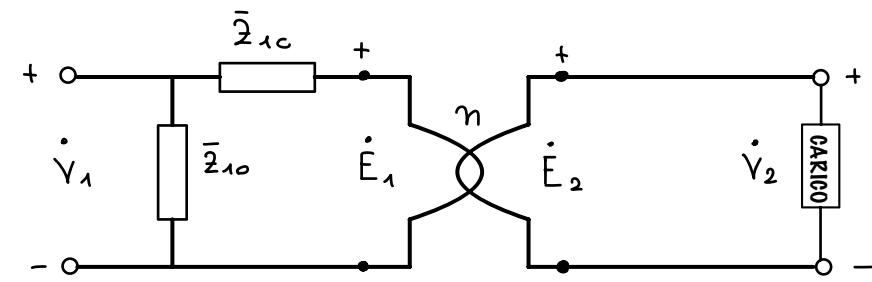
PROVA IN CORTO CIRCUITO

Il trasformatore è alimentato a tensione ridotta ($V_1' < V_{1n}$), in modo che:

$$I_1 = I_{cc} \quad ; \quad R_{1c} = Z_{1c} \cos \varphi \quad ; \quad X_{1c} = Z_{1c} \sin \varphi$$

CIRCUITO EQUIVALENTE SEMPLIFICATO

A questo punto si può scrivere un circuito semplice con cui lavorare in caso di trasformatore reale. I parametri del circuito equivalente si trovano con le prove viste prima:



OSSERVAZIONE

Quasi sempre sono sufficienti i calcoli sul trasformatore ideale dato che non c'è un errore significativo di approssimazione.

ESERCIZI SU TRASFORMATORI MONOFASE

① Consideriamo un trasformatore ideale con i seguenti dati di targa: $S_n = 50 \text{ kVA}$ $V_{1n} = 10 \text{ kV}$ $V_{2n} = 200 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$.

Il trasformatore è alimentato con V_n ed il carico è una serie $R-L$ ($R = 10 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$). Calcolare:

- Corrente assorbita al primario
- Potenza apparente trasferita al secondario
- Sfasamento tra tensione e corrente primarie

$$\bar{Z}_{2e} = (10 + j3,14) \Omega \quad Z = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} = 50$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{1eq}} = \frac{V_{1n}}{Z^2 \bar{Z}_{2e}} = 0.38 \text{ A}$$

$$S_n = V_{1n} \cdot I_1 = 3,82 \text{ kVA}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} = 0.304 \text{ rad}$$

② Considerare il seguente trasformatore di cui sono noti i valori di targa e le misure su prove a vuoto e di corto. Trovare i parametri del circuito equivalente riferito al primario.

$$S_n = 50 \text{ kVA}$$

$$V_{1n} = 11 \text{ kV} \quad V_{cc} \% = 4 \% \quad i_0 \% = 1,3 \%$$

$$V_{2n} = 220 \text{ V} \quad P_{cc} \% = 1,8 \% \quad P_0 \% = 0,35 \%$$

1. PROVA A VUOTO

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = 4,56 \text{ A}$$

$$i_0 \% = \frac{I_{10}}{I_{1n}} \rightarrow I_{10} = 0,056 \text{ A}$$

$$P_0 \% = \frac{V_n I_{10} \cos \varphi}{V_{1n} I_{1n}} \rightarrow \cos \varphi = 0,269$$

$$Z_{10} = \frac{V_{1n}}{I_{10}} = 186,44 \text{ k}\Omega$$

$$R_{10} = Z_{10} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} = 691,43 \text{ k}\Omega \quad L_{10} = Z_{10} \cdot \frac{1}{\sin \varphi} = 193,29 \text{ k}\Omega$$

2. PROVA DI CORTOCIRCUITO

$$V_{cc} \% = \frac{V_{cc}}{V_{1n}} \rightarrow V_{1cc} = 440 \text{ V}$$

$$P_{cc} \% = \frac{V_{cc} \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi}{V_{1n} I_{1n}} \rightarrow \cos \varphi_c = 0,45$$

$$Z_{1c} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}} = 96,8 \text{ k}\Omega$$

$$R_{1c} = Z_{1c} \cdot \cos \varphi = 43,56 \text{ k}\Omega \quad L_{1c} = Z_{1c} \cdot \sin \varphi = 86,45 \text{ k}\Omega$$

Il trasformatore ora alimenta un carico di $\bar{Z}_c = 1 + 0,2j$, calcolare P , Q , S_{CAR} :

1. Portiamo il carico al 1°

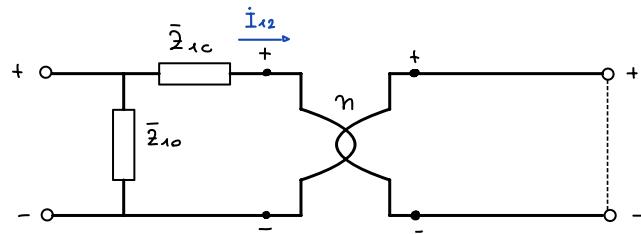
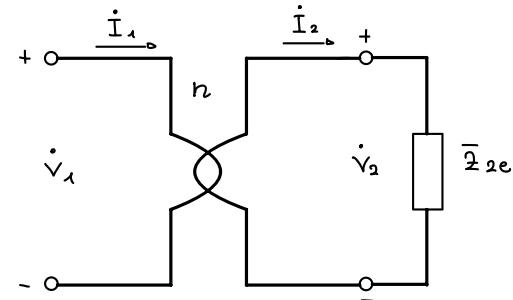
$$\bar{Z}_{eq CAR} = Z^2 \bar{Z}_c = (2500 + j500) \Omega$$

$$I_{12} = \frac{V_{1n}}{\bar{Z}_{1c} + \bar{Z}_{eqc}} = (4,11 - j0,95) \text{ A}$$

$$\dot{E}_1 = n \dot{I}_1 = (205,32 - 47,34j) \text{ A}$$

$$\dot{E}_1 = V_n - \bar{Z}_{1c} \cdot \dot{I}_{12} = 10,744e^{-j0,03} \text{ V}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_{1,2} = 214,88 e^{-j0,03} \text{ V}$$



$$S_2 = E_2 I_2 = 45,27 \text{ kVA}$$

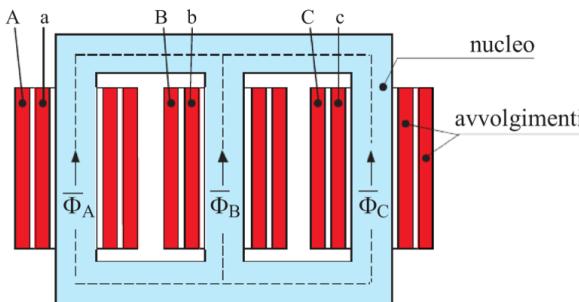
$$P_{1c} = R_{1c} I_{12}^2 = 774 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{1c}} = 97,95 \%$$

TRASFORMATORI TRIFASE

Sono trasformatori costituiti da un nucleo con 3 colonne, su ciascuna delle quali è presente una coppia di avvolgimenti che costituiscono il 1° e il 2°.

I flussi che attraversano il nucleo sono tre; in un sistema simmetrico ed equilibrato si ha ovviamente le stesse leggi valide per i generatori.

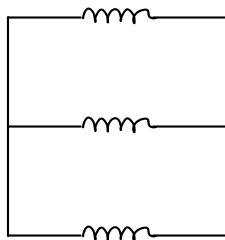


COLLEGAMENTI TRA TRASFORMATORI

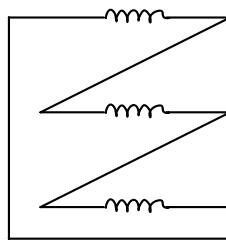
Nei trasformatori il collegamento può risultare un polo nel culo poiché si hanno vari modi in cui il 1° e il 2° si possono collegare (entrambi a stella, uno a s e uno a T, ...).

⚠ La stella è indicata con **Y** nel 1° e **y** nel 2°, mentre il **Δ** con **D** e **d**.

COLLEGAMENTO A STELLA



COLLEGAMENTO A TRIANGOLO



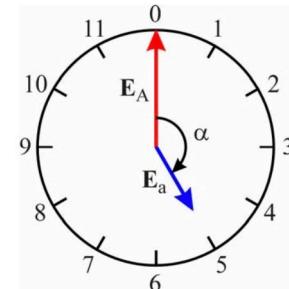
Risulta evidente quindi che 1^o e 2^o a seconda del collegamento possono essere sfasati di un angolo detto **spostamento angolare**, ossia "sfasamento in ritardo della tensione secondaria rispetto alla primaria (sia di fase che di linea)."

⚠ Gli spostamenti angolari sono sempre MULTIPLI DI 30°.

Il numero intero che moltiplica 30 è identificativo del **GRUPPO DI COLLEGAMENTO** e si schematizza bene con le ore sulle lancette di un orologio, ossia i numeri da 0 a 11. La EA sta sulle 12:00, mentre quella del secondario sta sul numero che identifica il gruppo.

I gruppi frequentemente utilizzati sono:

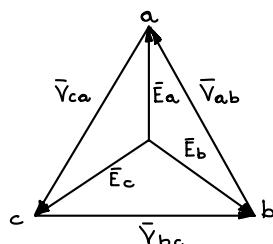
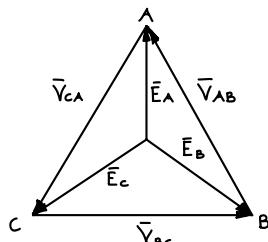
- 0 → $\alpha = 0^\circ$
- 5 → $\alpha = 150^\circ$
- 6 → $\alpha = 180^\circ$
- 11 → $\alpha = 330^\circ$



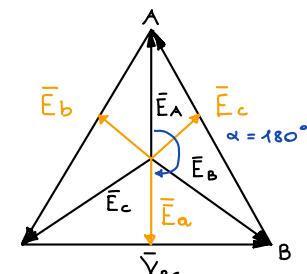
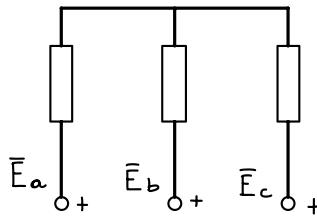
GRUPPO DI TRASFORMATORI $\text{Y}-\text{y}$ (Y_{yo} e $\text{Y}_{\text{y}6}$)

In questo collegamento le tensioni di fase 1^a e 2^a sono in fase per cui il rapporto di trasformazione risulta uguale a quanto visto fin' ora ($m = N_1 / N_2$). Invertendo le connessioni del 2^{av}, le tensioni risultano in opposizione, ossia moltiplicate per 6. Il trasformatore appartiene al gruppo $\text{Yy}6$.

GRUPPO Y_{yo}



GRUPPO $\text{Yy}6$



COLLEGAMENTO TRIANGOLO - STELLA (Dy11, Dy5)

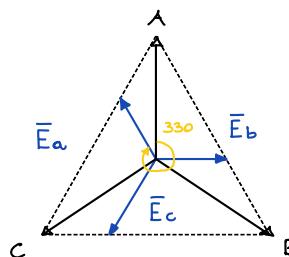
Nel collegamento Dy chiaramente si ha uno sfasamento che dipende dal n° assegnato, i più comuni sono il gruppo 11 ($\alpha = 330^\circ$) e il 5 ($\alpha = 150^\circ$), ciò che accade è che:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = m \quad \text{ma} \quad \frac{V_{AB}}{\Delta} = \sqrt{3} V_{ab} \quad (\text{Trasformo } \Delta \text{ in } *)$$

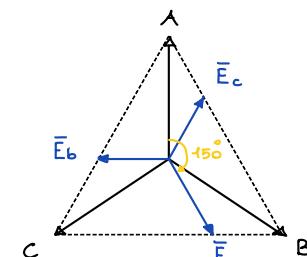
$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3} E_a} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$$

$$m = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{N_1}{N_2}$$

GRUPPO Dy11



GRUPPO Dy6



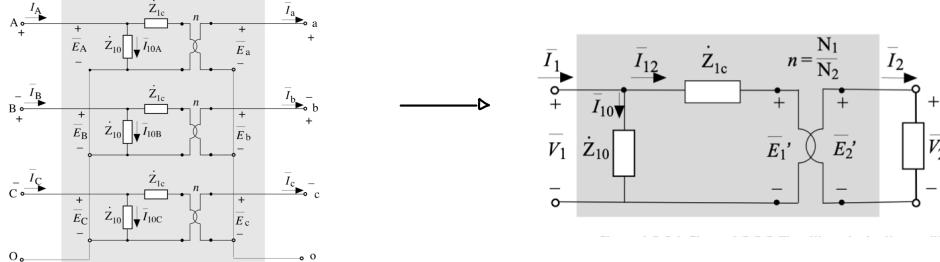
CIRCUITO EQUIVALENTE

Come nel trasformatore monofase, anche il trifase può essere trasformato nel suo equivalente elettrico.

Se infatti il monofase era descritto da un doppio bipolo, il 3fase si descrive con tre doppi bipoli identici, considerando sia le porte 1^{are} che 2^{are} collegate a stella (ossia come nei generatori trifase dovevo portare tutto a stella, anche qui è così').

⚠️ In un sistema simmetrico ed equilibrato si riduce tutto al **trasformatore equivalente monofase**, che ha V_{1n} = tensioni primarie messe a *

$$P_n = \frac{1}{3} P_n^{\text{TRI}} \quad (\text{stessa cosa per le potenze dissipate } P_{Fe}, P_{Cu}, \dots)$$



DATI DI TARGA

La targa di esempio riporta che il primario è collegato a Δ , con una tensione max di 24 KV; accanto a queste c'è il **LIVELLO DI ISOLAMENTO**; indica che la tenuta all'isolamento industriale è 50 KV mentre a impulso atmosferico è 125 KV.

Il secondario ha $*$ e $V_{max} = 3,6 V$ con livello di isolamento che indica la sola **tenuta alla tensione di prua a frequenza industriale (8 KV)**.



PERDITE DI POTENZA

Vediamo tre parametri che aiutano a capire l'efficienza del trasformatore:

1. PERDITE NEL RAME

$$P_{Cu} = R_{1c} I_1^2 = R_{2c} I_2^2$$

2. PERDITE NEL FERRO

$$P_{Fe} = V_1^2 / R_{10}$$

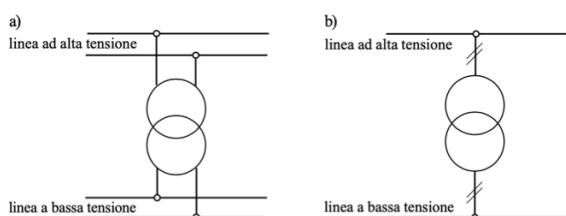
RENDIMENTO DEL TRASFORMATORE

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

SIMBOLI PER TRASFORMATORI

Il 1° simbolo è usato in **schemi trifilari**, ossia che indicano tutte le parti; il 2° ha impiego in sistemi **unifilari**, in cui le linee elettriche 1^a e 2^a sono rappresentate da una sola linea.

⚠ I trattini indicano il n° di conduttori.



AUTOTRASFORMATORE

E' un dispositivo costituito da un singolo avvolgimento, con un terminale intermedio che fa sì che la tensione venga partita tra i due avvolgimenti N_2 e $N_1 - N_2$. (**Partitore induttivo**)

E' vantaggioso poiché consente di risparmiare materiale; tuttavia è meno sicuro poiché il 1^o e 2^o **NON SONO ISOLATI**, perciò un qualsiasi problema al primario si ripercuote sul secondario.

VARIAC

E' un autotrasformatore toroidale con un selettore che permette di variare il punto di presa di tensione c e quindi produrre una tensione variabile al secondario.

