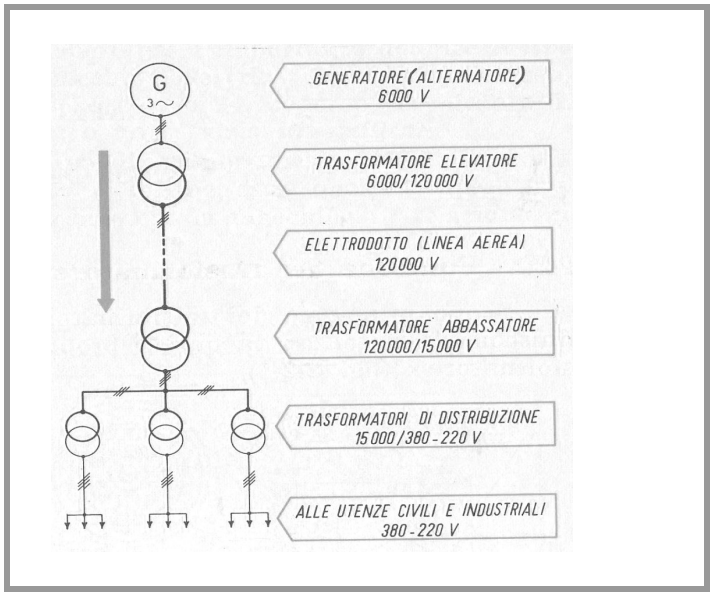
IL TRASFORMATORE
(Capitolo 8 rivisto e approfondito)

ARGOMENTO	PAGINA
Cos'è un trasformatore	**2**
Trasformatore ideale e reale	**5**
Trasformatore ideale (definizione)	**6**
Trasformatore reale (definizione)	**7**
TRASFORMATORE IDEALE Trasformatore ideale a vuoto (costruzione del diagramma vettoriale)	**10**
Trasformatore ideale sotto carico (costruzione del diagramma vettoriale)	**18**
TRASFORMATORE REALE Trasformatore reale a vuoto (costruzione del diagramma vettoriale)	**25**
Trasformatore reale sotto carico (costruzione del diagramma vettoriale)	**31**
Circuito equivalente primario di un trasformatore	**40**
Circuito equivalente secondario di un trasformatore	**45**
DATI DI TARGA o dati nominali di un trasformatore	**48**
Bilancio delle POTENZE ATTIVE di un trasformatore	**58**
Bilancio delle POTENZE REATTIVE di un trasformatore	**62**
Potenza apparente	**66**
RENDIMENTO	**67**
Trasformatore in CORTOCIRCUITO	**69**

IL TRASFORMATORE

COS'È UN TRASFORMATORE E A COSA SERVE

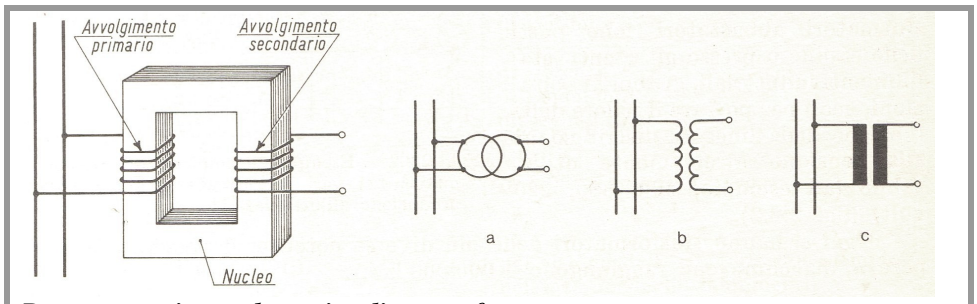
Il trasformatore è una macchina elettrica statica, cioè priva di organi in movimento, **destinata a funzionare** esclusivamente con correnti variabili nel tempo e tipicamente in **corrente alternata**.
Rileviamo esplicitamente che il trasformatore **non può funzionare in continua** (cioè con tensioni unipolari e costanti) perché la corrente costante non produce variazioni di flusso elettromagnetico, quindi non dà luogo a quei fenomeni di mutua induzione sui quali la macchina si basa.
Il trasformatore consente di modificare i due fattori della potenza, cioè la tensione e la corrente, mantenendo inalterata la loro frequenza.
Data una determinata potenza, se si fa aumentare la tensione, la corrente si riduce proporzionalmente e viceversa.
Proprio nell'attitudine a modificare le ampiezze della corrente e della tensione applicate ad esso risiede la funzione principale del trasformatore, quella per la quale la macchina è stata creata.



Attualmente la distribuzione dell'energia elettrica avviene sotto forma di corrente e tensione alternate, proprio perché, grazie al trasformatore, è possibile realizzare gli innalzamenti e gli abbassamenti di tensione che si rendono indispensabili nel corso della produzione e della distribuzione dell'energia elettrica.
Per loro natura i generatori di potenza elettrica possono fornire tensioni non elevatissime (per esempio 6000V), mentre per abbassare il livello di corrente e quindi ridurre la sezione dei cavi, è opportuno che, nella prima fase del trasporto di energia, la tensione sia quanto più elevata possibile. Ecco intervenire quindi i trasformatori elevatori che innalzano la tensione a livelli dell'ordine (per esempio) di **230000Vo 400000V**. Nelle fasi successive del trasporto energetico è invece opportuno ridurre la tensione, il che si fa con i trasformatori riduttori.

Il trasformatore è essenzialmente formato da due avvolgimenti elettricamente indipendenti, le cui spire sono generalmente di sezione diversa e in numero diverso.
E' detto "**primario**" l'avvolgimento al quale sono applicate **la tensione e la corrente di ingresso**, l'avvolgimento cioè collegato al generatore.

E' chiamato invece "***secondario***" l'avvolgimento dal quale sono ***prelevate la tensione e la corrente di uscita***, l'avvolgimento cioè collegato all'***utilizzatore***.
Gli avvolgimenti primario e secondario sono avvolti, senza contatto elettrico attorno a un **nucleo ferromagnetico**, formato da lamierini isolati elettricamente gli uni dagli altri.



Rappresentazione schematica di un trasformatore
a, b, c: simboli circuitali

Il circuito primario assorbe dal generatore una corrente alternata magnetizzante, che crea nel nucleo un flusso, variabile nel tempo. Questo flusso magnetico, **concatenandosi** con l'avvolgimento **secondario, produce, nel secondario stesso, delle forze elettromotrici indotte**.
Si realizza così (se il secondario non è aperto) un **trasferimento di energia dal circuito primario al circuito secondario**, senza contatti elettrici né fra i due avvolgimenti, né fra ciascun avvolgimento e il nucleo.

LE SCHEMATIZZAZIONI PER LO STUDIO DEL TRASFORMATORE: TRASFORMATORE REALE 0 INDUSTRIALE e TRASFORMATORE IDEALE

In un trasformatore reale si verificano diversi fenomeni (come dispersioni di flusso e perdite nei materiali) la cui analisi renderebbe complesso il primo approccio allo studio della macchina.
Perciò sono stati creati dei **modelli semplificati** di rappresentazione del trasformatore, i quali **non tengono conto di tutti i fenomeni** che avvengono in esso, ma solo di quelli fondamentali.
Il principale modello semplificato è il "modello **SENZA FLUSSI DISPERSI**" o "**trasformatore IDEALE**[1]".

---

[1] Alcuni testi definiscono un ulteriore modello, ancora più semplificato, di trasformatore, che oltre a non presentare flussi dispersi, non è percorso, a vuoto, da alcuna corrente. Noi chiameremo "trasformatore perfetto" questo modello caratterizzato da:

- Assenza di flussi dispersi
- Assenza, a vuoto, di correnti

Precisiamo che alcuni testi

- chiamano "perfetto" il modello che noi abbiamo definito "ideale"
- chiamano "ideale" il modello che noi abbiamo definito "perfetto"

Il trasformatore perfetto è un modello astratto del funzionamento del trasformatore semplificato al massimo grado.

Oltre a possedere i requisiti di quello ideale, il trasformatore perfetto a vuoto è caratterizzato da **corrente nulla I_{10} al primario** (mentre il trasformatore ideale, ma non perfetto, presenta, a vuoto, una corrente al primario non nulla, detta "corrente di magnetizzazione Iμ")

Ciò è dovuto all'ipotesi che l'induttanza **L** sia **INFINITA** e quindi che la ***riluttanza R*** sia ***nulla*** .
Ricordiamo che l'induttanza di un avvolgimento caratterizzato da

- N spire
- sezione S (ossia superficie, in m^2, contornata da una spira)
- lunghezza l del solenoide
- nucleo con permeabilità magnetica μ

è data da:

TRASFORMATORE IDEALE

Il trasformatore è definito "ideale" quando **l'intero flusso dovuto all'avvolgimento primario si concatena al secondario**, senza che vi sia flusso disperso e senza che vi sia flusso che si autoinduce sul primario stesso (**Φ_{11}=0)**
Analogamente tutto il flusso dovuto all'avvolgimento secondario si concatena solo al primario, senza che vi sia flusso disperso o flusso che si autoinduce sul secondario stesso (**Φ_{22}=0).**
Il trasformatore ideale a vuoto inoltre presenta **al primario** una corrente **non nulla** che è una corrente **di magnetizzazione I_{10}** (detta anche **Iμ**) la quale genera una forza magnetomotrice $N_1 \cdot I_{10}$ chiamata anche $N_1 \cdot I\mu$.

$$L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l} = \frac{N^2}{l / \mu \cdot S} = \frac{N^2}{\mathrm{R}}$$

Da questa relazione si vede che se **l'induttanza L è infinita** (induttore perfetto), la **permeabilità μ è anch'essa infinita** mentre la ***riluttanza R è nulla***.
E' infatti naturale pensare che, se l'induttore è perfetto, il parametro che lo caratterizza, e cioè l'induttanza L, abbia un valore teoricamente infinito, analogamente alla permeabilità, che esprime l'attitudine di un materiale ad "accogliere" il campo magnetico. E che invece la riluttanza (che quantifica l'ostacolo che il materiale oppone al flusso del campo magnetico) sia nulla (in quanto l'induttore perfetto non ostacola in alcun modo il flusso).

TRASFORMATORE REALE O INDUSTRIALE

Il trasformatore reale è caratterizzato dai seguenti fenomeni:

- **perdite ohmiche** o perdite **nel rame** per effetto **Joule**
- **dispersione nei dei due avvolgimenti di rame,** dovuta ai **flussi dispersi** i quali si richiudono sullo stesso avvolgimento che li ha generati
- **perdite nel ferro (nucleo)** per **isteresi magnetica** e per **correnti parassite**[2]

[2] Inoltre, come il trasformatore ideale (trasformatore senza flussi dispersi) presenta una **riluttanza** del nucleo **diversa da zero** e quindi **induttanza del sistema "nucleo+avvolgimenti" non infinita**, il che significa che c'è bisogno di una corrente magnetizzante $\mathbf{i_\mu}$ (che, convenzionalmente, scorre proprio su una reattanza trasversale X) per creare il flusso, conformemente alla legge di Hopkinson

CONSIDERAZIONE PRELIMINARE

Nel trasformatore ideale, sia a vuoto che sotto carico, la **forza elettromotrice E_1del primario** deve essere sempre **uguale e contraria alla tensione V_1di alimentazione** applicata ai terminali di ingresso del primario stesso.
Pertanto se la tensione di alimentazione **V_1viene mantenuta costante** dalla rete di alimentazione, anche la **f.e.m E_1**, e di conseguenza anche il **flusso** devono rimanere **costanti.**

Infatti, applicando il 2° Principio di Kirchhoff alla maglia primaria si ha:

$V_1 + E_1 = 0$

da cui

$V_1 = - E_1$

e quindi:

$$V_1 = \text{cost} \Rightarrow E_1 = \text{cost}$$

Inoltre dalla relazione fra fem e flusso[3]:

---

[3] $e(t) = -N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$ ed essendo: $\phi(t) = L \cdot i(t)$

$e(t) = -N \cdot L \cdot \frac{di(t)}{dt}$ Passando alla forma simbolica, la variabile t viene sostituita dalla variabile $j\omega$ e la derivata temporale diventa un prodotto per $j\omega$, per cui si ha:

$$E(j\omega) = -j\omega \cdot L \cdot N \cdot I(j\omega)$$

$\mathbf{E_1 = -j\omega\ L\ N_1\ \Phi}$

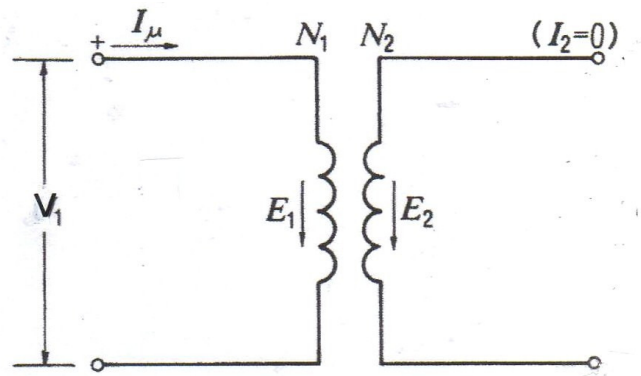
si vede che, per fissati valori di ω e di Φ:

$$E_1 = \text{cost} \Rightarrow \phi_1 = \text{cost}$$

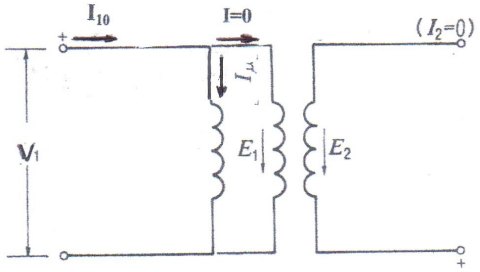
(e che E1 è sfasata di 90° in ritardo rispetto al flusso, in quanto moltiplicare per **–jω** significa **sfasare di 90° in ritardo** e moltiplicare per **+jω** significa **sfasare di 90° in anticipo**)

TRASFORMATORE IDEALE
A VUOTO
COSTRUZIONE DEL DIAGRAMMA VETTORIALE

Schema equivalente del trasformatore ideale



Altro Possibile Schema EQUIVALENTE DEL TRASFORMATORE IDEALE



(Il secondo induttore posto al primario è una rappresentazione simbolica che schematizza l'induttanza NON infinita degli avvolgimenti. Non sempre viene riportato nello schema del trasformatore ideale)

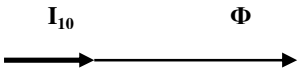
PREMESSE

1. Siccome il trasformatore è **ideale** si può parlare di un **unico flusso Φ** che è il flusso che si concatena **fra il primario e il secondario**.
   Ciò perché la definizione di trasformatore ideale implica che l'intero flusso dovuto all'avvolgimento primario si concatena al secondario, senza che vi sia flusso disperso e senza che vi sia flusso che si autoinduce sul primario stesso (**$\Phi_{11}=0$).**
   Analogamente tutto il flusso dovuto all'avvolgimento secondario si concatena solo al primario, senza che vi sia flusso disperso o flusso che si autoinduce sul secondario stesso (**$\Phi_{22}=0$).**
2. il trasformatore **ideale** a vuoto presenta **al primario** una corrente **non nulla** che è una corrente **di magnetizzazione I_{10}** (detta anche **Iμ**), la quale genera una forza magnetomotrice $N_1 \cdot I_{10}$ chiamata anche $N_1 \cdot I\mu$.

COSTRUZIONE DEL DIAGRAMMA VETTORIALE DEL TRASFORMATORE **IDEALE A VUOTO**

1. Tracciamo il **vettore Φ del flusso** sul semiasse reale positivo. Assumiamo quindi il flusso **come riferimento di fase**, ossia come vettore a fase nulla:

2. Tracciamo la **corrente I_{10} del primario parallelamente a Φ**, in quanto la corrente al primario e il flusso risultano in fase tra loro, come si vede dalla legge di Hopkinson $N_1 \cdot I_{10} = R \cdot \Phi$ sui circuiti magnetici. Inoltre, essendo il primario un circuito puramente induttivo, **la tensione V_1 risulta in anticipo di 90°** rispetto alla corrente I_{10} e quindi **rispetto al flusso**[4].



Essendo inoltre la I_{10} una corrente magnetizzante, possiamo applicare la legge di Hopkinson sui circuiti magnetici:

fmm = riluttanza * flusso

$$N_1 \cdot I_{10} = R \cdot \Phi$$

$$\Phi = \frac{N_1}{R} \cdot I_{10} \leftrightarrow I_{10} = \frac{R}{N_1} \cdot \Phi$$

---

[4] Il 2° principio di Kirchhoff in forma simbolica alla maglia primaria fornisce:

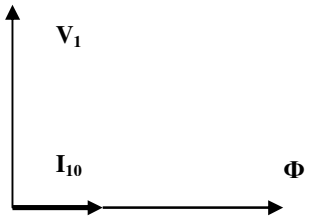
$$V_1 = j\omega L\, I_{10} + j\omega M\, I_2$$

Essendo il secondario aperto, la corrente I_2 è nulla, per cui:

$V_1 = j\omega L\, I_{10}$ (V_1 in anticipo[4] di 90° rispetto a I_{10} e rispetto al flusso)

da cui è evidente che la **corrente magnetizzante** e il **flusso** sono **in fase**

3. Tracciamo la **tensione di alimentazione o tensione primaria V_1**, che, come abbiamo visto nel punto 2, è **<u>in anticipo di 90°</u> rispetto alla corrente e <u>al flusso</u>** e quindi si trova sul **semiasse immaginario positivo**, cioè sul semiasse **verticale superiore.**

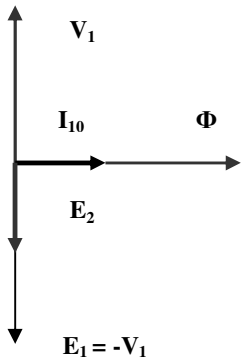


La V_1 inoltre è **uguale in modulo alla fem E_1**, ma è **in opposizione di fase rispetto ad essa**, come si vede applicando il 2° p. di K. alla maglia primaria:

$$\mathbf{V_1 + E_1 = 0}$$

$$\mathbf{V_1 = - E_1}$$

4. **Tracciamento delle fem E_1 ed E_2**
   Le tensioni E_1 ed E_2 sono **entrambe in opposizione di fase rispetto alla tensione V_1.** Sono cioè entrambe sfasate di **180°** in ritardo rispetto alla tensione primaria in quanto sono sfasate di 90° in ritardo rispetto alla corrente e quindi al flusso[5], il quale a sua volta è in ritardo di 90° rispetto a V_1



   Il modulo di E_1 è legato al modulo di E_2 dal rapporto-spire:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

   Se ipotizziamo $N_2 < N_1$, allora la E_2 risulta, in modulo, più piccola della E_1.

[5] $E = j\omega\varphi$ con $\varphi = L \cdot I$

Riguardo alla relazione fra fem E e flussi si ha[6]:

$$\mathbf{E_1 = 4{,}44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{MAX}}$$

$$\mathbf{E_2 = 4{,}44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{MAX}}$$

---

[6] RELAZIONE TRA FORZE ELETTROMOTRICI E FLUSSO

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Che, in forma simbolica, diventa:

$$E_1 = -j\omega L\, N_1\, \Phi$$

Volendo introdurre

$$\Phi = \frac{\Phi_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

e cioè il valore max del flusso in luogo del valore efficace, otteniamo:

$$E_1 = -j\omega N_1 \frac{\Phi_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

$$E_1 = -j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \frac{\Phi_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

ed essendo: $\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4{,}44$

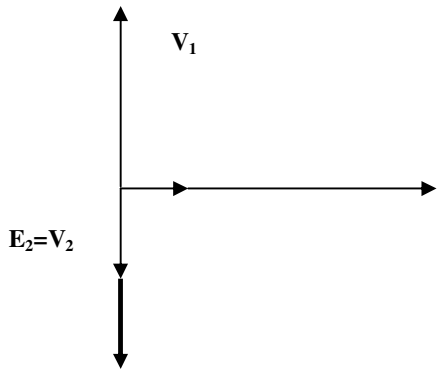
si ha (in modulo):

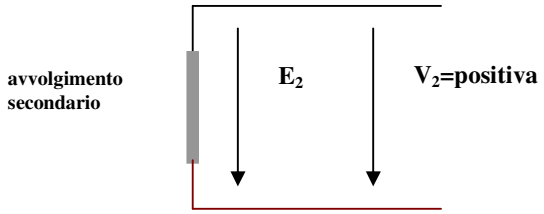
$$\boldsymbol{E_1 = 4{,}44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_{MAX}}$$

e, in maniera analoga, al secondario:

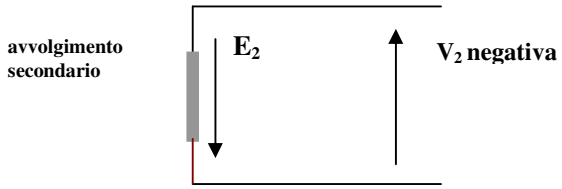
$$\boldsymbol{E_2 = 4{,}44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_{MAX}}$$

5. Tracciamo la **tensione secondaria** a vuoto o tensione trasformata $\mathbf{V_2}$
   La $\mathbf{V_2}$ **coincide in modulo e in fase con la fem** $\mathbf{E_2}$**.**
   Infatti, essendo il secondario un circuito aperto, la
   V_2 è esattamente la stessa cosa di E_2, come è
   evidente anche applicando il 2° p. di K. alla maglia secondaria.
   Dire che V_2 coincide con E_2, anche in fase, significa dire che la
   polarità effettiva di V_2 è indicata (fra i terminali di uscita del
   secondario) da una freccia con la punta rivolta verso il basso.

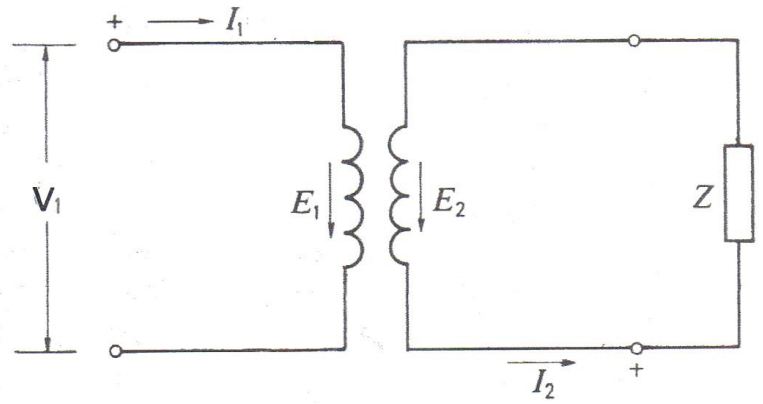




Se invece indicassimo convenzionalmente la polarità di V_2 mediante una freccia con la punta rivolta verso l'alto, la V_2 risulterebbe negativa.



TRASFORMATORE IDEALE
SOTTO CARICO
COSTRUZIONE DEL DIAGRAMMA VETTORIALE



SCHEMA EQUIVALENTE DEL TRASFORMATORE PERFETTO

(Talvolta viene inserita, nello schema del trasformatore ideale, una seconda induttanza in parallelo a quella del primario. Questo secondo induttore è una rappresentazione simbolica che schematizza l'induttanza NON infinita degli avvolgimenti. Non sempre viene riportata nello schema del trasformatore ideale)

PREMESSE

Quando il trasformatore ideale è a vuoto, è presente un'unica forza magnetomotrice, per cui si ha, per la legge di Hopkinson sui circuiti magnetici:

fmm = riluttanza * flusso

$N_1 \cdot I_{10} = R \cdot \Phi$ (*)

Quando invece il trasformatore è **sotto carico**, si **manifesta** una **seconda forza magnetomotrice**, per cui la legge di Hopkinson si scrive:

$N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = R \cdot \Phi$ (**)

Nel passaggio dal funzionamento a vuoto al funzionamento sotto carico **cambiano le forze magnetomotrici, ma non la loro somma** in quanto **rimangono invariate la riluttanza e il flusso**, il quale dipende solo da V_1. Questo significa che, nelle equazioni (*) e (**) il secondo membro rimane invariato, per cui possiamo uguagliare tra loro i primi membri ottenendo:

$$N_1 \cdot I_{10} = N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2$$

ossia:

(fmm del primario a vuoto) = (fmm del primario) + (fmm del secondario)

Dall'ultima equazione possiamo ricavare la corrente del primario a carico, ottenendo:

$$I_1 = \frac{N_1 \cdot I_{10} - N_2 \cdot I_2}{N_1}$$ e quindi:

$$I_1 = I_{10} - \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$ ***corrente del primario a carico***

ponendo poi:

$$I_1^{'} = -\frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$ ***(corrente primaria di reazione)***

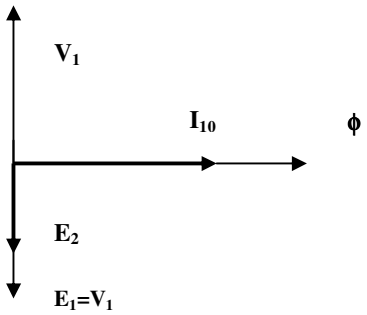
si ha:

corrente del primario a carico $I_1 = I_{10} + I_1^{'}$

Da ciò si vede che, **quando** il trasformatore viene posto **sotto carico**, **nasce** nel primario una **nuova corrente**, la corrente **primaria di reazione I'_1**, che è in opposizione di fase rispetto alla corrente I_2 del secondario.
La corrente primaria di reazione I'_1 è molto più grande (da 50 a 100 volte circa) della corrente magnetizzante, per cui di fatto si ha:

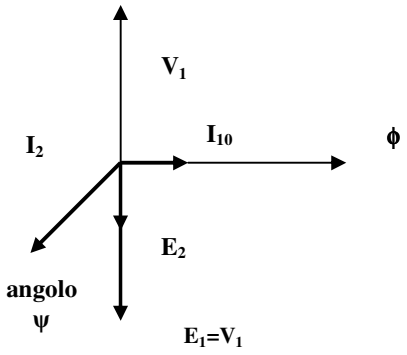
$$I_1 \cong I_1^{'}$$

COSTRUZIONE DEL DIAGRAMMA SOTTO CARICO
DEL TRASFORMATORE IDEALE

1. Tracciamo il diagramma vettoriale del trasformatore **IDEALE** sotto carico. Notiamo però che, sul semiasse reale, la corrente $\mathbf{I_{10}}$ cioè $\mathbf{I_\mu}$ non rappresenta più l'intera corrente del primario, ma solo una delle sue due componenti e cioè la componente a vuoto. Riguardo alla V_1, osserviamo che, siccome la V_1 è mantenuta costante dalla rete di alimentazione, anche il flusso si mantiene costante e la relazione di fase tra flusso e V_1 rimane la stessa della situazione a vuoto e cioè **la V_1 è in anticipo di 90° rispetto al flusso**.
2. 

3. Tracciamo la **corrente secondaria I_2.** Essa si ricava dall'osservazione del circuito secondario. Detta:
   $Z_C = R_C + j X_C$ l'impedenza del CARICO, si ha:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_C} = \frac{E_2}{R_C + j X_C}$$



La corrente secondaria è quindi sfasata di un angolo:

$$\psi = arctg\left(\frac{X_C}{R_C}\right)$$

rispetto alla fem E_2 del secondario e avrà modulo:

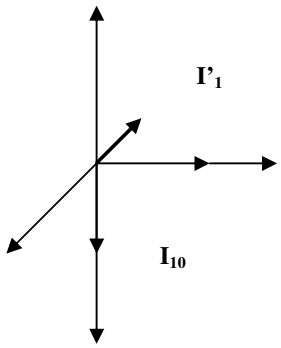
$$|I_2| = \frac{E_2}{Z_C} = \frac{|E_2|}{\sqrt{(R_C^2 + X_C^2)}}$$

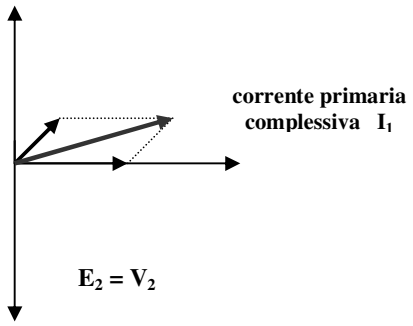
L'angolo Ψ può essere di ritardo o di anticipo rispetto a E_2.
Se il carico è **capacitivo** (Xc<0), allora si ha un angolo
Ψ negativo e **I_2** risulta (come nella figura) **in ritardo** rispetto a E_2.
Se invece il carico è induttivo (Xc>0), allora si ha un angolo Ψ positivo e I_2 risulta in anticipo rispetto a E_2.

4. Tracciamo la **seconda componente** $I_1^{'}$ della corrente **al primario**.
   Questa componente è detta **corrente primaria di reazione** ed è data da:

$$I_1^{'} = -\frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

La $I_1^{'}$ è quindi:
- in opposizione di fase rispetto a I_2
- è, in modulo, $\frac{N_2}{N_1}$ volte il modulo di I_2.





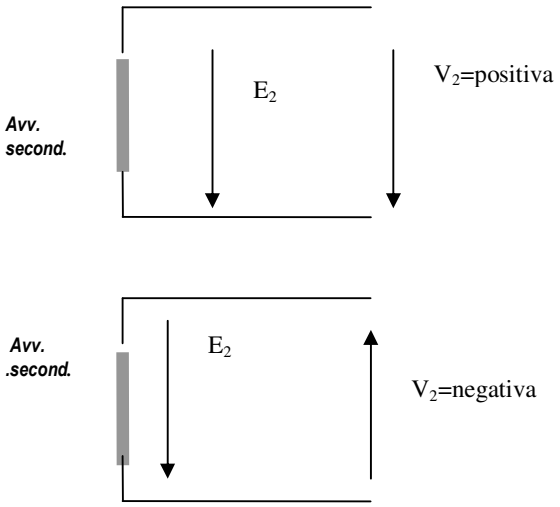
5. Determiniamo la **corrente complessiva I_1 del primario**, ossia la **corrente primaria.**

   Essa è data dalla **somma vettoriale di** I'_1 e di I_{10}.

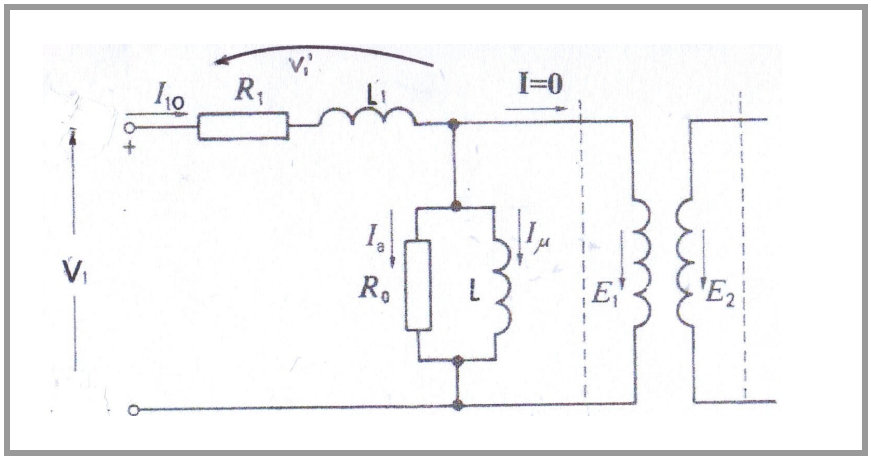
   La somma vettoriale può essere eseguita graficamente con la regola del parallelogramma.

6. Tracciamo la **tensione secondaria** o tensione trasformata V_2
   Poiché non vi sono impedenze in serie fra l'avvolgimento secondario e l'impedenza di carico, la V_2 **coincide in modulo** con la **fem E_2** del secondario**.**

Riguardo allo sfasamento la V_2 ha la stessa fase della E_2 nel senso che la polarità effettiva di V_2 è indicata (fra i terminali di uscita del secondario) da una freccia con la punta rivolta verso il basso.
Se invece indicassimo convenzionalmente la polarità di V_2 mediante una freccia con la punta rivolta verso l'alto, la V_2 risulterebbe negativa.



TRASFORMATORE REALE
A VUOTO
TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA VETTORIALE



Il trasformatore reale viene schematizzato mediante il circuito equivalente della figura precedente, caratterizzato:

- dai cosiddetti parametri **longitudinali**, cioè da una **resistenza R_1** e da una **reattanza X_1** in "serie" al percorso della corrente di ingresso al primario e inoltre da una **resistenza R_2** e una **reattanza X_2** in "serie" al percorso della corrente al secondario[7] (non riportate nella figura precedente)
- dai cosiddetti **parametri trasversali o in derivazione**, cioè da una resistenza **R** (o **Ro**) e da una reattanza **X** (o **Xo**) in "**parallelo**" al percorso della corrente di ingresso al primario,

[7] Spesso, nello schema equivalente, la resistenza e la reattanza longitudinali vengono inserite solamente al circuito primario o solamente al circuito secondario, conglobando in tal caso sul solo primario o sul solo secondario i fenomeni relativi all'intero trasformatore

PARAMETRI NELLO SCHEMA DEL TRASFORMATORE REALE

PARAMETRI LONGITUDINALI

Posti **in serie** all'avvolgimento primario, fanno riferimento agli avvolgimenti primario e secondario e sono:

- **R1, che** schematizza **le perdite ohmiche** o perdite **nel rame** per effetto **Joule negli avvolgimenti primario e secondario** del trasformatore e che dipende dal numero e dalle dimensioni delle spire

- la reattanza **$X_1 = j\omega L_1$, che** schematizza le **reattanze di dispersione dei due avvolgimenti** ed è dovuta ai **flussi dispersi** i quali si richiudono sullo stesso avvolgimento che li ha generati

PARAMETRI TRASVERSALI o DERIVATI

Posti in PARALLELO all'avvolgimento primario, fanno riferimento al NUCLEO ferromagnetico del trasformatore e sono:

- **R,** che schematizza **le perdite NEL FERRO (nucleo)** per **isteresi magnetica** e per **correnti parassite**

- la reattanza **$X = j\omega L$**, che schematizza il fatto che la **riluttanza $\mathcal{R}$** del nucleo è **diversa da zero**[8] e che quindi **l'induttanza L del sistema "nucleo+avvolgimenti" non è infinita**[9], il che significa che c'è bisogno di una corrente magnetizzante **$I\mu$** (che, convenzionalmente scorre proprio su X) **per creare il flusso**, conformemente alla legge di Hopkinson

  $N_1 \cdot I_\mu = \mathcal{R} \cdot \Phi$

  $$\Phi = \frac{N_1}{\mathcal{R}} \cdot I_\mu \leftrightarrow I_\mu = \frac{\mathcal{R}}{N_1} \cdot \Phi$$

la legge di Hopkinson ci mostra che se la riluttanza fosse infinita[10], si potrebbe avere flusso non nullo anche con corrente nulla.

---

[8] e in particolare è costante

[9] L è invece infinita nel trasformatore perfetto, nel quale c'è generazione di flusso senza corrente al primario

[10] come nel trasformatore perfetto

APPLICAZIONE DEL II PRINCIPIO DI KIRCHHOFF AL PRIMARIO DEL TRASFORMATORE REALE

$$V_1 - V_1' + E_{10} = 0 \qquad V_1 = -E_{10} + V_1' \qquad V_1 = -E_{10} + \cdot I_{10}(R_1 + jX_1)$$

$$\boxed{V_1 = -E_{10} + R_1 \cdot I_{10} + jX_1 \cdot I_{10}}$$

CORRENTE

Nel trasformatore reale a vuoto la corrente del primario

I_{10}= *Iμ*+ Ia

risulta costituita da due componenti:

- una componente **attiva Ia** (non presente nel modello ideale), **in fase**[11] **con -E_{10}**, che **fornisce la potenza** (P_0) che viene dissipata per isteresi e per correnti parassite (perdite nel ferro) e, in misura minore per effetto delle ***perdite ohmiche*** negli avvolgimenti (perdite ***nel rame***)

  $$I_a = \frac{P_0}{V_1}$$

- una componente ***magnetizzante Iμ*** (presente anche nel modello ideale) che ***produce il flusso***, è ***in fase col flusso*** e può essere espressa come

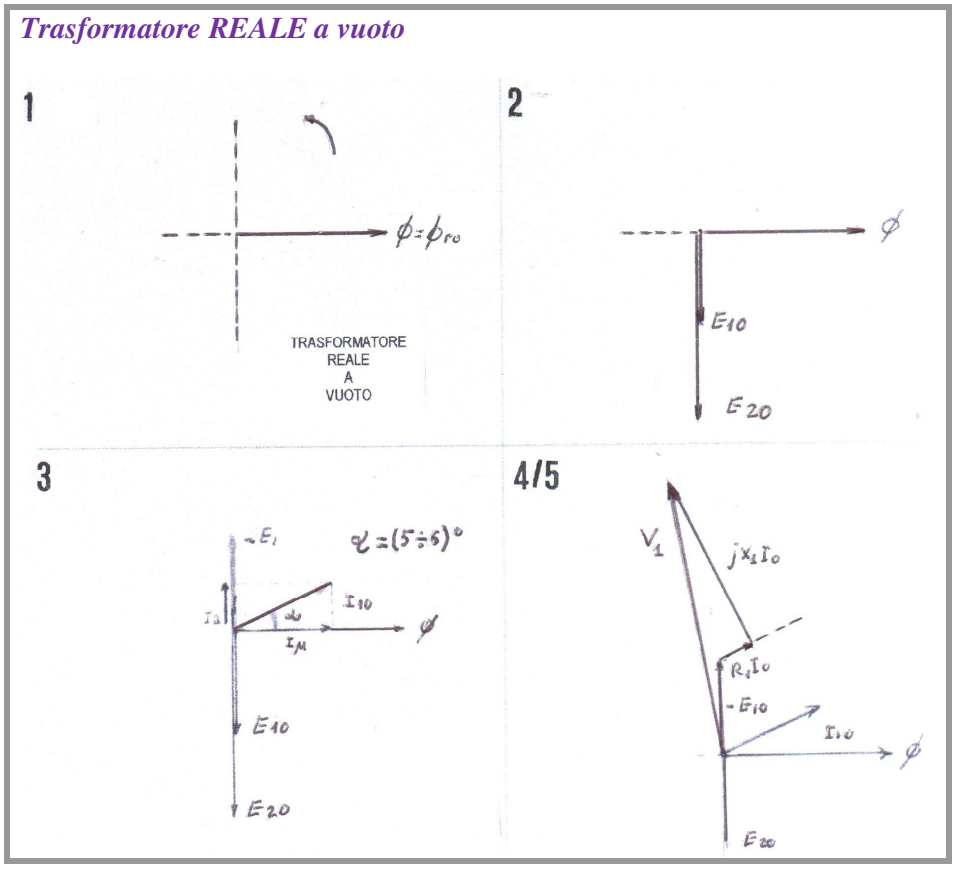
  $$I_\mu = \frac{P_0}{V_1} \cdot tg(\varphi_0) = I_a \cdot tg(\varphi_0)$$

---

[11] dal circuito di pag. **25** si vede che $I_a = -\frac{E_1}{R}$ e che quindi I_a ha la stessa direzione , ma verso opposto rispetto a E_1

TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA VETTORIALE

(RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEL SECONDO p. di K. AL PRIMARIO)



Si eseguono, nell'ordine i passi (illustrati nella figura che segue):

1. tracciamento del **flusso principale Φ_{P0}** (cioè il flusso utile che non comprende flussi dispersi) come riferimento di fase, cioè come vettore **a fase zero**

2. tracciamento delle fem **E_{10} e E_{20}** del primario e del secondario in **ritardo di 90° rispetto al flusso[12].**
   L'espressione del legame tra flusso e fem è data da:

$$\Phi = \frac{E_1}{4{,}44 \cdot f \cdot N_1} \qquad \Phi = \frac{E_2}{4{,}44 \cdot f \cdot N_2}$$

3. tracciamento della **componente a vuoto I_{10}** della **corrente primaria**; essendo il trasformatore di tipo reale, la componente a vuoto è la risultante di due componenti: la componente magnetizzante **Iμ** in fase con il flusso[13] e la componente attiva[14] **Ia** (in fase[15] con $-E_{10}$); siccome la **Ia** è **molto più piccola** della **Iμ** , la corrente a vuoto
   Iμ+ Ia = I_{10} risulterà sfasata in anticipo solo di pochi gradi rispetto al flusso (***sfasamento*** di un angolo ***α*** di ***5 o 6 gradi***, chiamato "***angolo di perdita***");
   nel grafico noi tracceremo direttamente la corrente somma I_{10}, non per somma vettoriale delle correnti parziali, ma con uno **sfasamento** di **5 o 6 gradi in anticipo** rispetto al flusso.

---

[12] $E = -j\omega L\, N\, \Phi$

[13] $N_1 \cdot I_{10} = R \cdot \Phi$

[14] osserviamo che nel trasformatore reale il vettore Ia della corrente attiva si trova ancora lungo il semiasse verticale positivo, ma su tale semiasse non ci sarà più la tensione di ingresso V_1 (la cui fase sarà calcolata in seguito) bensì la $-E_1$;
sul semiasse verticale positivo ci sarebbe ancora la V_1 se il trasformatore fosse ideale; possiamo quindi dire che la **Ia** è in fase con la $-E_1$

[15] dal circuito di pag. **25** si vede che $I_a = -\frac{E_1}{R}$ e che quindi I_a ha la stessa direzione , ma verso opposto rispetto a E_1

4. tracciamento, a partire dalla "punta" di $-E_{10}$, delle **cadute di <u>tensione</u>**:

   - $R_1 \cdot I_0$ che è **in fase** con $\mathbf{I_0}$
   - $jX_1 \cdot I_0$ che è in **anticipo di 90°** rispetto a $\mathbf{R_1 \cdot I_0}$ **,**
     essa è abbastanza più grande, in modulo,
     di $\mathbf{R1 \cdot I_0}$**;**
     la relazione fra i moduli è quindi

     $$|R_1 \cdot I_0| << |jX_1 \cdot I_0|$$

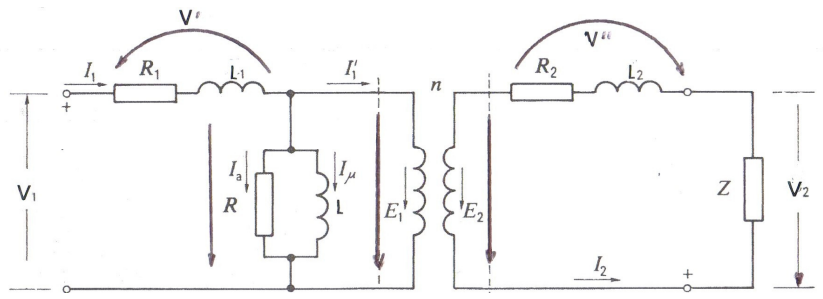
5. tracciamento della tensione di ingresso $\mathbf{V_1}$ al **primario** mediante somma vettoriale della fem $-E_{10}$ alle componenti di cui al punto 4 in base al 2° p. di K. al primario stesso

$$V_1 = -E_{10} + R_1 \cdot I_{10} + j X_1 \cdot I_{10}$$

TRASFORMATORE REALE
A CARICO
TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA VETTORIALE

$$V_1 = -E_1 + (R_1 + j X_1) \cdot I_1$$ *(2° principio di Kirchhoff al primario)*

$$V_2 = E_2 - (R_2 + j X_2) \cdot I_2$$ *(2° principio di Kirchhoff al secondario)*



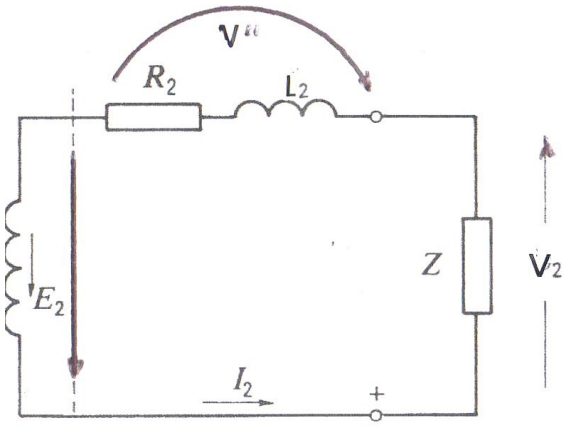
- *l'impedenza del carico è:* $Z_C = R_C + j X_C$
- ***R1 e R2*** *schematizzano* ***le perdite ohmiche*** *o perdite* ***nel rame*** *per effetto* ***Joule negli avvolgimenti primario e secondario*** *del trasformatore e dipendono dal numero e dalle dimensioni delle spire*
- *le reattanze* $X_1 = j\omega L_1$ *e* $X_2 = j\omega L_2$ *schematizzano le* ***reattanze di dispersione dei due avvolgimenti*** *e sono dovute ai* ***flussi dispersi*** *i quali si richiudono sullo stesso avvolgimento che li ha generati*

NOTA
I riferimenti di tensione al secondario possono essere assunti anche come nella figura sottostante

$$-V_2 - E_2 + V'' = 0$$

$$V_2 = -E_2 + V''$$

$$V_2 = -E_2 + (R_2 + j\,X_2) \cdot I_2$$



Nel trasformatore reale a carico la corrente del primario risulterà costituita da una componente a vuoto (formata a sua volta da due correnti: magnetizzante Iμ e **attiva Ia**) e da **una componente,** detta **"*corrente primaria di reazione*" dovuta alla *presenza del carico*.**

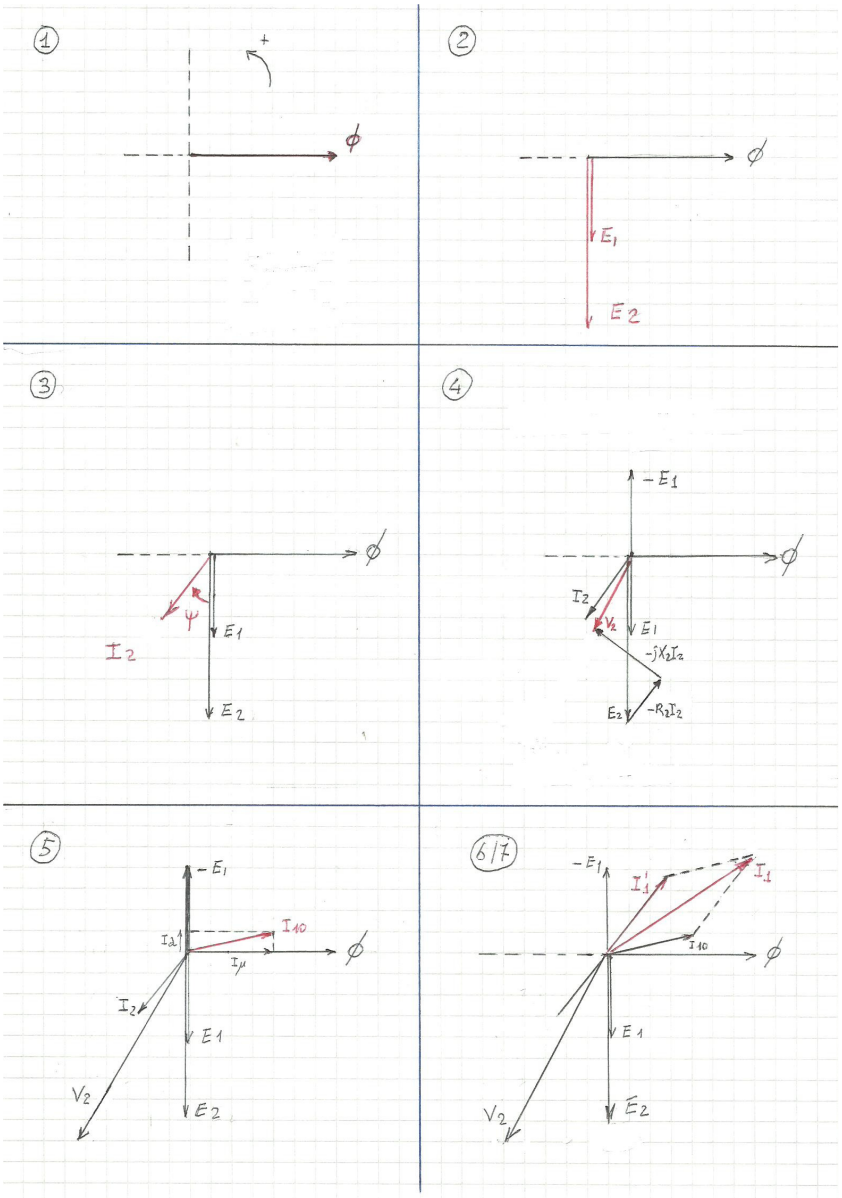
La corrente del primario presenterà quindi complessivamente tre componenti:

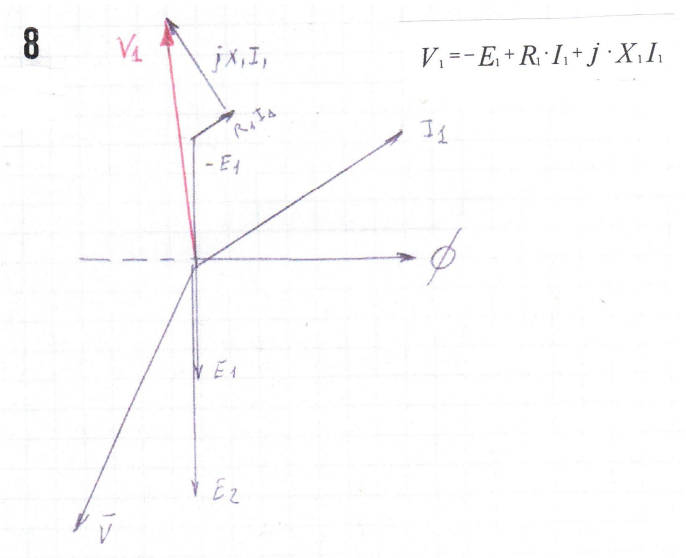
I_1= Iμ+ Ia+ *I'_1*

con

Iμ+ Ia = I_{10} = componente a vuoto

TRACCIAMENTO DEL DIAGRAMMA VETTORIALE





$$V_1 = -E_1 + R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_1 I_1$$

Si tracciano, nell'ordine:

1. **il flusso Φ** come riferimento di fase (**vettore a fase zero**)

2. le fem **E_1 e E_2** del primario e del secondario in **ritardo di 90° rispetto al flusso**[16]
   l'espressione del legame tra flusso e fem è data da:
   $\Phi = \frac{E_1}{4{,}44 \cdot f \cdot N_1}$ $\Phi = \frac{E_2}{4{,}44 \cdot f \cdot N_2}$

3. **la corrente I_2 al secondario**; dall'osservazione del circuito, essendo E_2 l'unica sorgente di tensione del secondario si può scrivere:

$$I_2 = \frac{E_2}{(R_C + j X_C) + (R_2 + j X_2)} \qquad [*]$$

questa relazione ci permette di determinare I_2 perché la E_2 è nota dal punto 2 e si possono supporre note anche le R e le X; il modulo è dato da:

$$|I_2| = \left| \frac{E_2}{(R_C + j X_C) + (R_2 + j X_2)} \right|$$

$$|I_2| = \frac{|E_2|}{\sqrt{\left[(R_2 + R_C)^2 + (X_2 + X_C)^2\right]}}$$

l'**angolo ψ** di **sfasamento di I_2** rispetto a E_2
ψ = (fase di I_2) – (fase di E_2)
si ricava dalla [*] ottenendo[17]:

---

[16] $E = -j\omega L N \Phi$

[17] $\frac{I_2}{E_2} = \frac{1}{(R_C + j X_C) + (R_2 + j X)}$

$$fase \frac{I_2}{E_2} = fase \frac{1}{(R_C + j X_C) + (R_2 + j X)}$$

$$\Psi = -arctg\left(\frac{X_2 + X_C}{R_2 + R_C}\right)$$

4. tracciamento della **tensione V_2 sul carico**: si applica il secondo p. di K. Al secondario:

$$V_2 = E_2 - (R_2 + j\,X_2)\cdot I_2$$

e si procede **graficamente** mediante **somma vettoriale osservando che:**

$-R_C \cdot I_2$ è in opposizione di fase con $\mathbf{I_2}$

per cui:

$-jX_C \cdot I_2$ è in anticipo di 90° rispetto a $-\mathbf{I_2}$ (e quindi in ritardo di 90° rispetto a $-\mathbf{I_2}$)

5. tracciamento della **componente a vuoto I_{10}** della **corrente primaria**; essendo il trasformatore di tipo reale, la componente a vuoto è la risultante di due componenti: la componente magnetizzante **Iμ** in fase con il flusso e la componente attiva[18] **Ia**;

(fase di I_2) – (fase di E_2) = $fase\dfrac{1}{(R_C + j\,X_C) + (R_2 + j\,X\ )}$

(fase di I_2) – (fase di E_2)= - fase $\left[(R_C + j\,X_C) + (R_2 + j\,X\ )\right]$

[18] osserviamo che nel trasformatore reale a carico il vettore Ia della corrente attiva si trova ancora lungo il semiasse verticale positivo, ma su tale asse non ci sarà più la tensione di ingresso V_1 (la cui fase sarà calcolata in seguito) bensì la $-E_1$; sul semiasse verticale positivo

siccome la **Ia (in fase con –Io)** è **molto più piccola** della **Iμ** , la corrente a vuoto **Iμ+ Ia = I_{10}** risulterà sfasata in anticipo solo di pochi gradi rispetto al flusso (***sfasamento*** di un angolo ***α*** di ***5 o 6 gradi***, chiamato "***angolo di perdita***"); nel grafico noi tracceremo direttamente la corrente somma I_{10}, non per somma vettoriale delle correnti parziali, ma:

a. con uno **sfasamento** di **5 o 6 gradi in anticipo** rispetto al flusso
b. con un **modulo** che ricaviamo, mediante la **legge di Hopkinson**:

$$N_1 \cdot I_{10} = \mathrm{R} \cdot \Phi \qquad\qquad I_{10} = \frac{\mathrm{R} \cdot \Phi}{N_1}$$

6. tracciamento della **corrente di reazione primaria I'_1**;
la corrente di reazione primaria (dovuta alla circolazione della I_2 al secondario) è data dall'espressione

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

e quindi è **in opposizione di fase rispetto alla corrente I_2 del secondario** e **viene tracciata in base a** quest'ultima considerazione.

7. Tracciamento della **corrente primaria complessiva**

$$I_1 = I\mu + Ia + I'_1 = I_{10} + I'_1$$

che si effettua **graficamente** facendo la somma vettoriale **I_{10} +I'_1**

8. Tracciamento della tensione di ingresso **V_1** al **primario** mediante applicazione del 2° p. di K. al primario stesso

---

ci sarebbe ancora la V_1 se il trasformatore fosse perfetto; possiamo quindi dire che la **Ia** è in fase con la $-E_1$

$$V_1 = -E_1 + R_1 \cdot I_1 + j X_1 \cdot I_1$$

e mediante somma vettoriale grafica.

VARIAZIONE DI TENSIONE DA VUOTO A CARICO

Premettiamo che quando un qualunque trasformatore è a vuoto, cioè con i terminali di uscita del secondario aperti, , la tensione V_{20} fra tali terminali coincide sempre con la f.e.m. E_2 (tensione indotta) ai capi dell'avvolgimento secondario, quindi si ha:

$$\frac{V_{20}}{V_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$ ***(valida solo per trasformatore ideale e reale a vuoto)***

Quando invece il trasformatore è <u>a carico</u>, cioè quando c'è un'impedenza di carico fra i terminali di uscita del secondario, le tensioni V_2 (fra i terminali del carico) ed E_2 (sull'avvolgimento secondario) non coincidono più e l'uguaglianza:

$$\frac{V_{20}}{V_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$ (***valida solo per trasformatore ideale e reale a vuoto)***

<u>continua ad essere verificata l'uguaglianza solo se il trasformatore è ideale</u>, mentre per il trasformatore reale si ha:

$$\frac{V_2}{V_1} \neq \frac{V_{20}}{V_1}$$

$$\frac{V_2}{V_1} \neq \frac{E_2}{E_1}$$

$$\frac{V_2}{V_1} \neq \frac{N_2}{N_1}$$

Invece è sempre vero che:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = n$$

Nel trasformatore ideale non c'è quindi differenza fra la tensione a carico V_2 (tensione fra i terminali di uscita del secondario) e la f.e.m. E_2 coincidente con la tensione a vuoto V_{20} fra i terminali del secondario.

Invece nel trasformatore reale la tensione a carico V_2 fra i terminali di uscita è diversa dalla E_2 sull'avvolgimento secondario e quindi è diversa dalla V_{20} a vuoto.

Si definisce perciò un parametro, detto "**variazione V di tensione da vuoto a carico**" oppure "**variazione V di tensione**". La "V" è definita in questo modo:

$$V = \frac{V_2}{V_1} - \frac{V_{20}}{V_1}$$

oppure

$$V = \frac{V_2}{V_1} - \frac{E_2}{E_1}$$

oppure

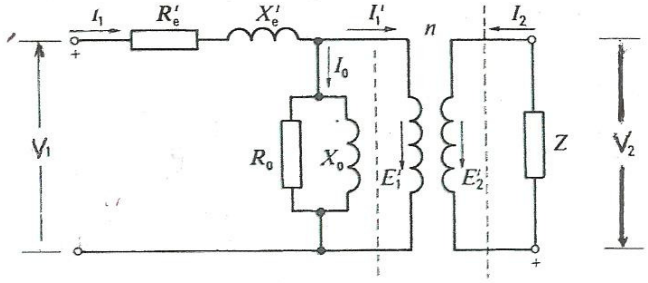
$$V = \frac{V_2}{V_1} - \frac{N_2}{N_1}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE PRIMARIO DI UN TRASFORMATORE

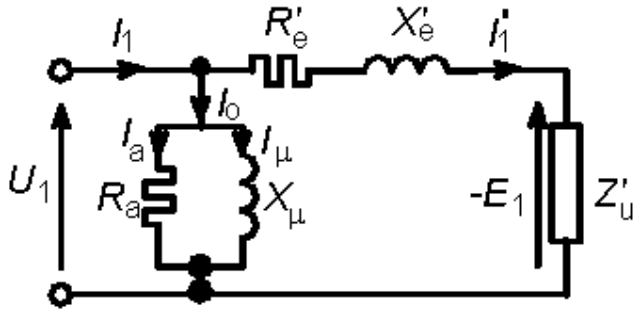
Il circuito equivalente primario di un trasformatore è un modello astratto di rappresentazione del funzionamento del trasformatore che risulta utile in fase di analisi o di progetto della macchina.
Con la rappresentazione mediante il circuito equivalente primario:

- vengono eliminate dal circuito secondario tutte le resistenze e le reattanze presenti in esso.
- gli effetti sul primario delle resistenze e delle reattanze soppresse al secondario vengono schematizzate attraverso resistenze e reattanze "equivalenti" fittizie che vengono aggiunte nel circuito primario stesso.

Riporto al primario delle impedenze longitudinali del secondario



<u>Circuito equivalente riportato al primario</u>
Ra è resistenza trasversale chiamata altrove Ro oppure R
Xμ è la reattanza trasversale chiamata altrove Xo oppure X



Detto

$$n = \frac{N_1}{N_2} = rapporto - spire$$

si ha, in generale:

ELEMENTO SOPPRESSO DEL SECONDARIO	CORRISPONDENTE ELEMENTO EQUIVALENTE AGGIUNTO AL PRIMARIO
R	$n^2 \cdot R$
X	$n^2 \cdot X$
V	$n \cdot V$
I	$\frac{I}{n}$

Nel caso specifico del trasformatore reale gli elementi del secondario che vengono riportati al primario sono la resistenza e la reattanza longitudinali R_2 e X_2 (rappresentative delle perdite nel rame e dei flussi dispersi relativi agli avvolgimenti di rame stessi) e la tensione V_2 del secondario

Nel caso specifico del trasformatore reale si ha quindi:

ELEMENTO SOPPRESSO DEL SECONDARIO	CORRISPONDENTE ELEMENTO EQUIVALENTE AGGIUNTO AL PRIMARIO
R_2	$n^2 \cdot R_2$
X_2	$n^2 \cdot X_2$
V_2	$n \cdot V_2$
I_2	$\frac{I_2}{n}$

La resistenza e la reattanza riportate dal secondario vengono sommate alla resistenza e la reattanza già presenti al primario, ottenendo così:

- un'unica resistenza equivalente longitudinale $R_e^{'}=R_1+n^2 \cdot R_2$
- un'unica reattanza equivalente longitudinale $X_e^{'}=X_1+n^2 \cdot X_2$

Inoltre, riguardo alle f.e.m:

- $E_2^{'}=V_2$
- $E_1^{'}=n \cdot V_2$

Infine, come si vede dallo schema circuitale della penultima figura (pag.40), il 2° p. di K., applicato al circuito equivalente primario fornisce:

$$V_1=-E^{'}+R_e^{'} \cdot I_1+j \cdot X_e^{'} \cdot I_1$$

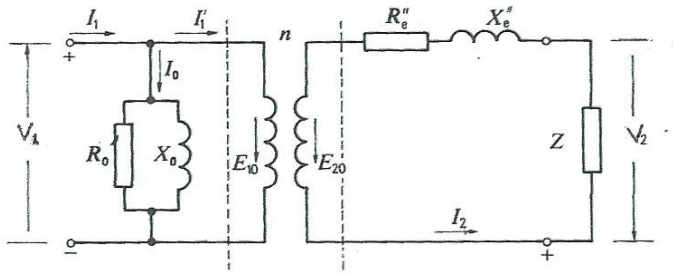
$$V_1=-n \cdot V_2+R_e^{'} \cdot I_1+j \cdot X_e^{'} \cdot I_1$$

CIRCUITO EQUIVALENTE SECONDARIO DI UN TRASFORMATORE

Il circuito equivalente secondario di un trasformatore è un modello astratto di rappresentazione del funzionamento del trasformatore che risulta utile in fase di analisi o di progetto della macchina.
Con la rappresentazione mediante il circuito equivalente secondario:

- vengono eliminate dal circuito primario tutte le resistenze e le reattanze presenti in esso
- gli effetti sul secondario delle resistenze e delle reattanze soppresse al primario vengono schematizzate attraverso resistenze e reattanze "equivalenti" fittizie che vengono aggiunte nel circuito secondario stesso.

Riporto al secondario delle impedenze longitudinali del primario



Detto

$$n = \frac{N_1}{N_2} = rapporto - spire$$

si ha, in generale:

ELEMENTO SOPPRESSO DEL PRIMARIO	CORRISPONDENTE ELEMENTO EQUIVALENTE AGGIUNTO AL SECONDARIO
R	$\frac{R}{n^2}$
X	$\frac{X}{n^2}$
V	$\frac{V}{n}$
I	$n \cdot I$

Nel caso specifico del trasformatore reale gli elementi del primario che vengono riportati al secondario sono la resistenza e la reattanza longitudinali R_1 e X_1 (rappresentative delle perdite nel rame e dei flussi dispersi) e la tensione V_1 del primario

Nel caso specifico del trasformatore reale si ha quindi:

ELEMENTO SOPPRESSO DEL PRIMARIO	CORRISPONDENTE ELEMENTO EQUIVALENTE AGGIUNTO AL SECONDARIO
R_1	$\frac{R_1}{n^2}$
X_1	$\frac{X_1}{n^2}$
V_1	$\frac{V_1}{n}$
I_1	$n \cdot I_1$

La resistenza e la reattanza riportate dal primario vengono sommate alla resistenza e la reattanza già presenti al secondario, ottenendo così:

- un'unica resistenza equivalente longitudinale $R_e'' = R_2 + \frac{R_1}{n^2}$
- un'unica reattanza equivalente longitudinale $X_e'' = X_2 + \frac{X_1}{n^2}$

Inoltre, riguardo alle f.e.m:

- $E_{10} = V_1$
- $E_{20} = V_{20}$

Infine, come si vede dallo schema circuitale della figura precedente, il 2° p. di K., applicato al circuito equivalente secondario fornisce:

$$E_{20} = V_{20} = V_2 + R_e'' \cdot I_2 + j \cdot X_e'' \cdot I_2$$

DATI DI TARGA o DATI "NOMINALI" DEL TRASFORMATORE

PREMESSA: VALORE NOMINALE O DI TARGA DI UNA GRANDEZZA

Il valore nominale o di targa di una grandezza non è un valore massimo in assoluto, ma è il massimo valore della grandezza che si può utilizzare con il trasformatore **in modo continuativo** senza **correre il rischio di sovraccaricarlo.**
In sostanza è il **valore di lavoro**, quello per cui è stato progettato il trasformatore. Ciò però non esclude il fatto che il trasformatore sia in grado di sopportare, seppure per brevi istanti, picchi di valore superiore.

TENSIONI NOMINALI PRIMARIA E SECONDARIA

Sono i valori **nominali efficaci** delle tensioni al primario e al secondario nel funzionamento **A VUOTO**. Sono indicate come $\mathbf{V_{1n}}$ (o come $\mathbf{V_{1n0}}$) e come $\mathbf{V_{2n}}$ oppure $\mathbf{V_{20}}$ oppure $\mathbf{V_{2no}}$.

POTENZA APPARENTE "An" o "Sn" NOMINALE O DI TARGA

E' una potenza apparente convenzionalmente riferita al secondario. La potenza apparente al secondario è un parametro che è definito in base a due grandezze appartenenti **entrambe** al circuito **secondario**: una tensione (V_{20n}) riferita al funzionamento a vuoto[19] e una corrente secondaria I_{2n} (ovviamente ***non*** a vuoto) che rappresenta il valore di corrente ***che il trasformatore è in grado di erogare*** in condizioni nominali. La potenza apparente così riferita al secondario è uguale alla potenza apparente al primario $V_{1n}*I_{1n}$:

$$A_n = S_n = V_{20n} \cdot I_{2n} = V_{1n} \cdot I_{1n}$$

dove:
V_{1n}= tensione nominale primaria o tensione di alimentazione
I_1= corrente assorbita ai terminali di ingresso del primario.

Quanto detto non significa che la potenza apparente sia uguale in ogni sezione del circuito equivalente del trasformatore. Infatti oltre alla potenza apparente nominale o di targa, noi possiamo misurare o calcolare la potenza apparente a diverse sezioni del circuito, ottenendo risultati differenti.

[19] e quando al primario è applicata la sua tensione nominale

APPROFONDIMENTO SULLA POTENZA APPARENTE

Nei dati di targa la **potenza nominale**, per macchina monofase, è definita, come potenza apparente, dalle le relazioni:

$$A_n = S_n = V_{20n} \cdot I_{2n} = V_{1n} \cdot I_{1n}$$

La potenza apparente definita – in quanto dato di targa -come prodotto della tensione A VUOTO V_{20} del secondario per la corrente nominale I_{2n} del secondario (e solo in questo modo) **è uguale** alla potenza apparente del primario calcolata come prodotto V_{1n} * I_{1n} della corrente e della tensione nominali del primario.

Se quindi ci viene assegnato il valore della potenza apparente senza specificare se è riferita al primario o al secondario, noi possiamo riferirlo al primario o al secondario:

- se riferiamo il valore della potenza apparente al secondario esso va inteso come prodotto V_{20}* I_{2n}
- se riferiamo il valore della potenza apparente al primario esso va inteso come prodotto V_{1n}* I_{1n}

Di conseguenza

- se insieme alla potenza apparente ci viene assegnata I_{2n} (oppure la V_{20}) , allora la potenza è riferita al secondario e ci permette di calcolare V_{20} (oppure la I_{2n})
- se insieme alla potenza apparente ci viene assegnata I_{1n} (oppure la V_{1n}) , allora la potenza è riferita al primario e ci permette di calcolare V_{1n} (oppure la I_{1n})

FREQUENZA NOMINALE

E' la frequenza alla quale sono misurati gli altri dati di targa, frequenza che è quella della tensione e della corrente applicate in ingresso al trasformatore.

CORRENTE NOMINALE del PRIMARIO

E' generalmente indicata con "I_{1n}", è espressa in funzione della potenza APPARENTE nominale ed è il valore efficace di corrente (con sfasamento φ=0 rispetto a V1n) che può circolare nell'avvolgimento primario in condizioni nominali e, in particolare, quando è applicata la tensione nominale ai terminali di ingresso del primario:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} \quad \Leftrightarrow \quad I_{1n} = \frac{A_n}{V_{1n}}$$

CORRENTE NOMINALE del SECONDARIO

E' indicata con "I_{2n}", è espressa in funzione della potenza APPARENTE nominale ed è il valore efficace di corrente che può circolare nell'avvolgimento secondario in condizioni nominali e, in particolare quando sul secondario è presente la tensione nominale a vuoto:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{V_{20n}} \quad \Leftrightarrow \quad I_{2n} = \frac{A_n}{V_{20n}}$$

RAPPORTO "Ko" di TRASFORMAZIONE a VUOTO

E' il rapporto:

$$K_0 = \frac{\text{Tensione NOMINALE applicata al PRIMARIO}}{\text{corrispondente tensione SECONDARIA a VUOTO}} = \frac{V_{10}}{V_{20}}$$

Per un trasformatore che abbia le resistenze e le reattanze longitudinali nulle (trasformatore ideale), Ko coincide con il rapporto-spire $n = N_1/N_2$:

$$K_0 = \frac{V_{10}}{V_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = n$$

PERDITA "Po" A VUOTO
O
POTENZA PERDUTA A VUOTO

Potenza **assorbita** (dai terminali di ingresso del trasformatore), in presenza di tensioni nominali, nel funzionamento **a vuoto**, per effetto delle sole **perdite nel ferro.**

PERDITA PERCENTUALE "Po%" A VUOTO
O
POTENZA PERCENTUALE PERDUTA A VUOTO

Potenza assorbita (dai terminali di ingresso del trasformatore), in presenza di tensioni nominali, nel funzionamento **a vuoto**, per effetto delle sole **perdite nel ferro**, espressa come **percentuale** della potenza nominale APPARENTE del primario o comunque dell'avvolgimento alimentato:

$$P_{0_\%} = \frac{P_0}{S_n} \cdot 100 \quad \Leftrightarrow \quad P_{0_\%} = \frac{P_0}{A_n} \cdot 100 \quad \Leftrightarrow \quad P_{0_\%} = \frac{V_{1n} \cdot I_{10} \cdot \cos(\varphi_0)}{V_{1n} \cdot I_{1n}} \cdot 100$$

CORRENTE "Io" A VUOTO

E' il valore efficace di corrente assorbito (dai terminali di ingresso del trasformatore), in presenza di tensioni nominali, nel funzionamento **a vuoto.**

CORRENTE PERCENTUALE "Io%" A VUOTO

Corrente assorbita (dai terminali di ingresso del trasformatore), in presenza di tensioni nominali, nel funzionamento **a vuoto**, per effetto delle sole **perdite nel ferro**, espressa come **percentuale** della **corrente nominale** del primario o comunque dell'avvolgimento alimentato:

$$I_{0_\%} = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100$$

FATTORE DI POTENZA "$\cos\varphi_0$" A VUOTO

E' definito come:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{V_{1n} \cdot I_{10}} = \frac{\text{perdita di potenza a vuoto}}{\text{tensione nominale} \cdot \text{corrente a vuoto al primario}}$$

oppure come:

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_a}{I_0} = \frac{\text{componente attiva della corrente del primario}}{\text{corrente a vuoto al primario}}$$

oppure come:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_{0_\%}}{I_{0_\%}} = \frac{\text{perdita di potenza percentuale a vuoto}}{\text{corrente a vuoto}}$$

TENSIONE PERCENTUALE "Vcc%" DI CORTO CIRCUITO

La tensione **percentuale** di corto circuito è **uguale per entrambi** i circuiti primario e secondario ed è definita come quel valore di tensione **in corrispondenza del quale** nei due avvolgimenti circolano le **correnti nominali**:

$$V_{CC_\%} = \frac{V_{CC}(\text{primaria})}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{V_{CC}(\text{secondaria})}{V_{2n}} \cdot 100$$

<u>Non</u> sono invece **<u>uguali</u>** tra loro le tensioni di cc **<u>non</u>** percentuali

TENSIONE (NON percentuale) "V_1cc" DI CORTO CIRCUITO PRIMARIA

$$V_{1CC} = \frac{V_{CC_\%} \cdot V_{1n}}{100}$$

TENSIONE (NON percentuale) "V_2cc" DI CORTO CIRCUITO SECONDARIA

$$V_{1CC} = \frac{V_{CC_\%} \cdot V_{2n}}{100}$$

POTENZA DI CORTO CIRCUITO "Pcc

(coincidente approssimativamente, con le perdite nel rame P_{Cu})

E' la potenza assorbita (dai morsetti di ingresso del trasformatore) quando:

- il SECONDARIO è chiuso in CORTOCIRCUITO
- al primario e al secondario scorrono le CORRENTI NOMINALI
- il trasformatore è alla temperatura di regime.

In funzione dei parametri del secondario può essere espressa come:

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{2n} \cdot \cos(\varphi_{CC})$$

POTENZA DI CORTO CIRCUITO "Pcc%"
COME PERCENTUALE DELLA POTENZA APPARENTE

$$P_{CC_\%} = \frac{P_{CC}}{S_n} \cdot 100 \quad \Leftrightarrow \quad P_{CC_\%} = \frac{P_{CC}}{A_n} \cdot 100$$

FATTORE DI POTENZA "$\cos\varphi_{cc}$" IN CORTOCIRCUITO

E' definito come:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{1cc} \cdot I_{1n}} = \frac{\text{perdita di potenza in cc}}{\text{tensione primaria di cc} * \text{corrente primaria nominale}}$$

oppure come:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{2cc} \cdot I_{2n}} = \frac{\text{perdita di potenza in cc}}{\text{tensione secondaria di cc} * \text{corrente secondaria nominale}}$$

oppure come[20]:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc_\%}}{V_{cc_\%}} = \frac{\text{perdita di potenza percentuale in cc}}{\text{tensione percentuale di cc}}$$

dove il numeratore e il denominatore sono adimensionali.

---

[20] Si veda la nota relativa al $\cos\varphi_0$

BILANCIO DELLE POTENZE ATTIVE DI UN TRASFORMATORE

Il compito del trasformatore è di fornire a un utilizzatore (impedenza di carico) una certa potenza attiva P_2 con una tensione (o una corrente) ridotta o accresciuta rispetto a quella di rete. La potenza P_2 è erogata al carico dal circuito secondario del trasformatore.
Per poter fornire la potenza P_2 all'utilizzatore, il trasformatore deve assorbire dalla linea (attraverso i terminali di ingresso del circuito primario) una potenza attiva P_1 maggiore di P_2 in quanto deve fornire, oltre alla quota di potenza "utile" che viene trasferita al carico, anche le quote di potenza che vengono perdute (o dissipate) nel corso del processo di trasformazione.
In particolare la potenza attiva P_1 assorbita dal primario deve comprendere, oltre alla potenza "utile" P_2, che il secondario fornisce al carico, anche una quota di potenza attiva Pj che copre le perdite ohmiche per effetto Joule nel rame degli avvolgimenti ("j" sta per "Joule") e una quota di potenza attiva P_f che copre le perdite nel ferro, cioè le perdite per isteresi magnetica e correnti parassite che si verificano nel nucleo del trasformatore.
Quindi la potenza attiva che il primario del trasformatore assorbe dalla linea è data da:

$$P_1 = P_2 + P_j + P_f$$

Il primario preleva la potenza P_1 dalla linea con una tensione V_1 (applicata ai terminali di ingresso del primario), con una corrente I_1 (assorbita dai terminali di ingresso del primario), e con un angolo di

sfasamento φ_1 fra corrente e tensione. Perciò la potenza P_1 può anche essere espressa come:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)$$

La potenza che il secondario del trasformatore fornisce al carico si può esprimere quindi come:

$$P_2 = P_1 - P_j - P_f$$

Il secondario trasferisce al carico la potenza P_2 con una tensione V_2 (applicata ai terminali di uscita del secondario), con una corrente I_2 erogata dai terminali di uscita del secondario) e con un angolo di sfasamento φ_2 fra corrente e tensione.

Perciò la potenza P_2 può anche essere espressa come:

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2)$$

PERDITE NEL FERRO P_f cioè POTENZA ATTIVA dissipata nel NUCLEO FERROMAGNETICO

Le perdite di potenza ATTIVA nel ferro sono dovute all'isteresi magnetica e alle correnti parassite nel nucleo del trasformatore.
L'isteresi magnetica è un attrito molecolare che si oppone all'orientamento (per effetto del campo) dei magnetini elementari del nucleo. Le perdite per isteresi sono di entità sopportabile.
Le correnti parassite sono correnti indotte all'interno del nucleo ferromagnetico. La loro circolazione determina una dissipazione di potenza che è necessario limitare realizzando il nucleo con lamierini isolati.

Con P_f si indica la potenza perduta per entrambi gli effetti e tale potenza coincide con la potenza ATTIVA[21] P_0 perduta dal trasformatore nel funzionamento a vuoto:

$$P_f = P_0 = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_0) = R_0 \cdot I_0^2$$

dove:

R_0 = resistenza trasversale del circuito equivalente

$I_0 = I_\mu + I_a$ = corrente A VUOTO del trasformatore reale (che convenzionalmente scorre sui due rami dell'impedenza trasversale del circuito equivalente)

[21] Invece la potenza REATTIVA connessa al nucleo di materiale ferromagnetico, necessaria per **sostenere il flusso principale** è schematizzata (nel circuito equivalente del trasformatore reale) **dall'induttanza trasversale con reattanza Xo**. Questa potenza coincide con la **potenza REATTIVA assorbita dal trasformatore a vuoto** e viene presa in considerazione nel bilancio delle potenze reattive.

PERDITE NEL RAME per effetto Joule P_j cioè POTENZA ATTIVA dissipata negli AVVOLGIMENTI primario e secondario

Le perdite nel rame per effetto Joule[22] negli avvolgimenti primario e secondario vengono schematizzate come perdite ohmiche di potenza attiva per effetto Joule nelle **resistenze** longitudinali R_1 ed R_2 dello schema equivalente del trasformatore reale.

Le **perdite nel rame** sono **massime** nel funzionamento in **corto circuito**. Nel funzionamento **in c.c. tutta la potenza attiva assorbita Pcc coincide** con le **perdite nel rame.**

$$P_j = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

La Pj può anche essere espressa in funzione della resistenza fittizia $R_e^{'}$ del circuito equivalente ridotto al primario o della resistenza fittizia R_e^{II} del trasformatore ridotto al secondario:

$$P_j = R_e^{'} \cdot I_1^2 = R_e^{II} \cdot I_2^2$$

con:

$$R_e^{'} = R_1 + n^2 \cdot R_2$$ (con riferimento al circuito equivalente primario)

$$R_e^{''} = R_2 + \frac{R_1}{n^2}$$ (con riferimento al circuito equivalente secondario)

---

[22] Invece le perdite nel rame per flussi dispersi vengono schematizzate come perdite di potenza REATTIVA sulle INDUTTANZE LONGITUDINALI X′ e X″ e di esse si tiene conto nel bilancio delle potenze reattive Q

BILANCIO DELLE POTENZE REATTIVE DI UN TRASFORMATORE

Il trasformatore deve fornire all'utilizzatore (impedenza di carico) anche una certa potenza reattiva Q_2. La Q_2 è erogata al carico dal circuito secondario del trasformatore.
Per poter fornire la potenza Q_2 all'utilizzatore, il trasformatore deve assorbire dalla linea (attraverso i terminali di ingresso del circuito primario) una potenza reattiva Q_1 maggiore di Q_2 in quanto deve fornire, oltre alla quota di potenza Q_2 che viene trasferita al carico, anche la quota di potenza reattiva Q_j connessa ai flussi dispersi negli avvolgimenti di rame (di cui danno conto le reattanze induttive trasversali X_1 e X_2) e la quota Qo di potenza REATTIVA connessa al nucleo di materiale ferromagnetico, necessaria per **sostenere il flusso principale** . Qo è schematizzata (nel circuito equivalente del trasformatore reale) **dall'induttanza trasversale con reattanza Xo**. Questa potenza coincide con la **potenza REATTIVA assorbita dal trasformatore a vuoto**.
Quindi la potenza reattiva che il primario del trasformatore assorbe dalla linea è data da:

$$Q_1 = Q_2 + Q_j + Q_0$$

Il primario preleva la potenza reattiva Q_1 dalla linea con una tensione V_1 (applicata ai terminali di ingresso del primario), con una corrente I_1 assorbita dai terminali di ingresso del primario), e con un angolo di sfasamento φ_1 fra corrente e tensione. Perciò la potenza reattiva Q_1 può anche essere espressa come:

$$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot sen(\varphi_1)$$

La potenza reattiva che il secondario del trasformatore fornisce al carico si può esprimere quindi come:

$$Q_2 = Q_1 - Q_j - Q_0$$

Il secondario trasferisce al carico la potenza Q_2 con una tensione V_2 (applicata ai terminali di uscita del secondario), con una corrente I_2 (erogata dai terminali di uscita del secondario), e con un angolo di sfasamento φ_2 fra corrente e tensione.

Perciò la potenza P_2 può anche essere espressa come:

$$Q_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot sen(\varphi_2) = P_2 \cdot tg(\varphi_2)$$

POTENZA REATTIVA PRELEVATA PER SOSTENERE IL FLUSSO PRINCIPALE NEL NUCLEO FERROMAGNETICO

Ricordiamo che la potenza Qo coincide con la potenza reattiva assorbita dal trasformatore nel funzionamento a vuoto:

$$Q_0 = V_1 \cdot I_0 \cdot sen(\varphi_0) = X_0 \cdot I^2 = P_0 \cdot tg(\varphi_0)$$

dove:

X_0 = reattanza trasversale del circuito equivalente

$I_0 = I_\mu + I_a$ = corrente A VUOTO del trasformatore reale (che convenzionalmente scorre sui due rami dell'impedenza trasversale del circuito equivalente)

POTENZA REATTIVA Q_J CONNESSA AI FLUSSI DISPERSI NEGLI AVVOLGIMENTI DI RAME

$$Q_j = X_1 \cdot I_1^2 + X_2 \cdot I_2^2$$

La Qj può anche essere espressa in funzione della reattanza fittizia $X_e^{'}$ del circuito equivalente ridotto al primario o della reattanza fittizia X_e^{II} del trasformatore ridotto al secondario:

$$Q_j = X_e^{'} \cdot I_1^2 = X_e^{II} \cdot I_2^2 = P_j \cdot tg\left(\varphi_{cc}\right)$$

con:

$X_e^{'} = X_1 + n^2 \cdot X_2$ (con riferimento al circuito equivalente primario)

$X_e^{''} = X_2 + \frac{X_1}{n^2}$ (con riferimento al circuito equivalente secondario)

IMPEDENZE FITTIZIE,

TIPI DI POTENZA PERSA e CORRENTI

Le impedenze fittizie di tipo **resistivo** (longitudinali o trasversali che siano) danno conto di dissipazioni di potenza **attiva**. In particolare:

- Le resistenze longitudinali R_1 ed R_2 danno conto della potenza attiva Pj perduta per effetto Joule nel rame degli avvolgimenti
- La resistenza trasversale detta R o Ro dà conto delle perdite di potenza attiva (P_f o Po) nel ferro per isteresi e per correnti parassite. La resistenza trasversale detta R o Ro è convenzionalmente percorsa dalla componente attiva Ia della corrente primaria, dovuta appunto all'isteresi e alle correnti parassite.

Le impedenze fittizie di tipo **reattivo** (longitudinali o trasversali che siano) danno conto di dissipazioni di potenza **reattiva**. In particolare:

- Le induttanze longitudinali di reattanza X_1 ed X_2 danno conto della potenza reattiva perduta per effetto dei flussi dispersi nel rame, cioè negli avvolgimenti del trasformatore
- L 'induttanza trasversale detta X o Xo dà conto della potenza reattiva impiegata (sia nel modello reale che in quello ideale) per sostenere il flusso principale.
  Questa reattanza è convenzionalmente percorsa dalla corrente di magnetizzazione I_μ.

POTENZA APPARENTE (A_1 OPPURE S_1) AL PRIMARIO

$$\boxed{A_1 = S_1 = V_1 \cdot I_1 = \sqrt{(P_1)^2_1 + (Q_1)^2}}$$

da cui:

$$I_1 = \frac{A_1}{V_1}$$

$$\boxed{\cos(\varphi_1) = \frac{P_1}{A_1}}$$

in quanto:

$$\frac{P}{A} = \frac{V \cdot I \cdot \cos(\varphi)}{V \cdot I}$$

$$\frac{P}{A} = \cos(\varphi)$$

RENDIMENTO η

$$\eta = \frac{\text{potenza attiva erogata dal secondario al carico}}{\text{potenza attiva che il primario preleva dalla linea}} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\eta = \frac{\mathrm{P}_2}{\mathrm{P}_2 + \text{potenza attiva persa nel rame} + \text{potenza attiva persa nel ferro}} = \frac{P_2}{P_2 + P_j + P_f}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + R_e^{II} \cdot I_2^2 + P_0} \qquad \text{(con Po = Pf = costante)}$$

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2)}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2) + R_e^{II} \cdot I_2^2 + P_0} \qquad \text{(con Po = Pf = costante)}$$

Dalle precedenti espressioni si vede che il rendimento diminuisce al diminuire della corrente I_2 fornita al carico[23]. Diminuisce cioè al diminuire del carico ossia all'aumentare dell'impedenza di carico. Si dice perciò che il rendimento è basso in caso di carichi molto ridotti. Tipicamente i trasformatori sono realizzati in modo da ottenere il **massimo rendimento** ai ¾ **del carico**.

---

[23] L'espressione del rendimento è assimilabile a una funzione del tipo

$$y = \frac{x}{x + k}$$

che è decrescente al diminuire di x

Si può inoltre dimostrare che il **rendimento** assume il **valore massimo** quando è verificata la condizione:

perdite nel rame = perdite nel ferro

$P_j = P_0$ (con Po = Pf)

Il che avviene quando la I_2 assume un valore tale da verificare la condizione:

$$R_e^{II} \cdot I_2^2 = P_0$$

da cui:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_0}{R_e^{II}}}$$

TRASFORMATORE IN CORTOCIRCUITO (c.c.)

Si dice che un trasformatore funziona in cc quando i terminali di uscita vengono collegati fra loro in cc, ossia quando l'impedenza di carico è nulla.

La condizione di funzionamento in cortocircuito è importante perché, attraverso misure eseguite in cc si possono determinare alcune grandezze come:

$$P_{cc_\%} \qquad I_{cc_\%} \qquad \cos\left(\varphi_{cc}\right)$$

$$R_e^{'} \qquad X_e^{'} \qquad Z_e^{'}$$

$$R_e^{II} \qquad X_e^{II} \qquad Z_e^{II}$$

Osserviamo esplicitamente che nelle prove di cortocircuito il **rapporto** fra la **corrente** nominale al primario I_{1n} e la corrente nominale al secondario I_{2n} è esattamente **uguale** al **reciproco** del **rapporto-spire n**:

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}$$

IMPEDENZA DI CORTOCIRCUITO

E' l'impedenza offerta dai terminali di ingresso del primario quando il secondario è chiuso in c.c.

$$\overline{Z_{1cc}} = \left(R_1 + n^2 R_2\right) + j\left(X_1 + n^2 X_2\right)$$

con $\mathrm{n} = \dfrac{\mathrm{N}_1}{\mathrm{N}_2}$ = rapporto – spire

$n^2 R_2$ = resistenza longitudinale del circuito secondario riportato al primario

$n^2 X_2$ = reattanza longitudinale del circuito secondario riportato al primario

Spesso bisogna usare il modulo di questa impedenza, che è dato da:

MODULO DELL'IMPEDENZA DI CORTOCIRCUITO	$\left\lvert\overline{Z_{1cc}}\right\rvert = Z_{1cc} = \sqrt{\left(R_1 + n^2 R_2\right)^{+2} + \left(X_1 + n^2 X_2\right)^{+2}}$

Inoltre, come si vede dalle sue espressioni , $\overline{Z_{1cc}}$ è l'impedenza di ingresso del circuito equivalente ridotto a primario. Il suo modulo infatti può essere scritto come:

MODULO DELL'IMPEDENZA DI CORTOCIRCUITO	$\left\lvert\overline{Z_e^{'}}\right\rvert = Z_e^{'} = \sqrt{\left(R_e^{'}\right)^{+2} + \left(X_e^{'}\right)^{+2}}$

dove:

- $R_e^{'}=R_1+n^2 \cdot R$

  resistenza equivalente longitudinale del circuito equivalente riportato al primario

- $X_e^{'}=X_1+n^2 \cdot X$

  reattanza equivalente longitudinale del circuito equivalente riportato al primario

La $\overline{Z_{1cc}}$ può anche essere espressa in funzione della tensione di cortocircuito percentuale (Vcc%) e della potenza apparente[24] (detta An oppure Sn):

[24] Ricordiamo, fra i dati di targa, la "tensione di cortocircuito primaria" **(pag. 55):**

$$V_{1CC}=\frac{V_{CC_\%} \cdot V_{1n}}{100}$$

Per definizione di impedenza di ingresso possiamo scrivere:

$$Z_{1cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} = \frac{V_{CC_\%} \cdot V_{1n}}{100 \cdot I_{1n}}$$

$$Z_{1cc} = \frac{V_{cc\%} \cdot V_{1n}^2}{100 \cdot A_n}$$

$$Z_{2cc} = \frac{V_{cc\%} \cdot V_{2n}^2}{100 \cdot A_n}$$

$$Z_{1cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} = \frac{V_{CC_\%} \cdot V_{1n} \cdot V_{1n}}{100 \cdot I_{1n} \cdot V_{1n}}$$

$$Z_{1cc} = \frac{V_{1cc}}{I_{1n_n}} = \frac{V_{CC_\%} \cdot V_{1n}^2}{100 \cdot A_n}$$

CORRENTE DI CORTOCIRCUITO

La corrente di cortocircuito I_{1cc} è la corrente assorbita dai **terminali di ingresso** del circuito **primario** quando il **secondario è chiuso in c.c**.
La corrente di cortocircuito è anche il rapporto fra la tensione V_1 di alimentazione del primario e l'impedenza di c.c.

$$\left|\overline{I_{1cc}}\right| = I_{1cc} = \frac{\left|\overline{V_1}\right|}{\left|\overline{Z_{1cc}}\right|}$$

$$\left|\overline{I_{1cc}}\right| = I_{1cc} = \frac{\left|\overline{V_1}\right|}{\sqrt{\left(R_1+n^2R_2\right)^{+2}+\left(X_1+n^2X_2\right)^{+2}}}$$

La corrente di cortocircuito **Icc**

- **è molto maggiore della corrente a vuoto I_{10}** ($I_{cc} >> I_{10}$) cioè della corrente che si ripartisce fra la resistenza e la reattanza trasversali Ro e Xo relative alle perdite nel ferro, perciò, nel trasformatore in cc, le perdite nel ferro sono trascurabili e **la potenza assorbita coincide sostanzialmente con la potenza relativa alle perdite nel rame e al flusso disperso**. Il che permette di eliminare la resistenza e la reattanza trasversali nel circuito equivalente
- è molto maggiore (da 5 a 30 volte) della corrente nominale e può essere sopportata dal trasformatore solo per brevi istanti, perciò il funzionamento in cc è possibile solo riducendo la tensione di alimentazione.

TENSIONE DI CORTOCIRCUITO DELL'AVVOLGIMENTO PRIMARIO E DELL'AVVOLGIMENTO SECONDARIO

TENSIONE DI CORTOCIRCUITO DELL'AVVOLGIMENTO PRIMARIO

La tensione di cortocircuito V_{1cc} dell'avvolgimento primario è quella tensione che si deve **applicare** ai **terminali di ingresso del primario** affinché sia al primario che al secondario scorrano le correnti nominali, quando *il secondario è chiuso in cc*:

$$\overline{V_{1cc}} = \overline{Z_{1cc}} \cdot \overline{I_{1n}} = \overline{Z_e^{'}} \cdot \overline{I_{1n}} = \left(\overline{Z_1} + n^2 \overline{Z_2} \right) \cdot \overline{I_{1n}}$$

TENSIONE DI CORTOCIRCUITO DELL'AVVOLGIMENTO SECONDARIO

La tensione di cortocircuito V_{2cc} dell'avvolgimento secondario è quella tensione che si deve **applicare ai terminali di uscita del secondario** affinché sia al primario che al secondario scorrano le correnti nominali, quando <u>i terminali di ingresso del primario sono chiusi in cc</u>:

$$\overline{V_{2cc}} = \overline{Z_{2cc}} \cdot \overline{I_{2n}} = \overline{Z_e^{II}} \cdot \overline{I_{2n}} = \left(\overline{Z_2} + \frac{\overline{Z_1}}{n^2} \right) \cdot \overline{I_{2n}}$$

Osserviamo esplicitamente che è:

$$\overline{V_{1cc}} \neq \overline{V_{2cc}}$$

TENSIONI DI CORTOCIRCUITO PERCENTUALI

Sono uguali al primario e al secondario.

Le Vcc possono essere espresse anche come frazioni percentuali delle tensioni nominali dei due avvolgimenti:

$$\overline{V}_{cc\%} = \frac{\overline{V}_{1cc}}{\overline{V}_{1n}} \cdot 100$$

$$\overline{V}_{cc\%} = \frac{\overline{V}_{2cc}}{\overline{V}_{2n}} \cdot 100$$

FATTORI DI POTENZA DI CORTOCIRCUITO AL PRIMARIO E AL SECONDARIO

Sono uguali al primario e al secondario.

$$\cos\left(\varphi_{cc}\right)=\frac{P_{cc}}{V_{1n}\cdot I_{1n}}$$

$$\cos\left(\varphi_{cc}\right) = \cos\left(\varphi_{1cc}\right) = \frac{R_e^{'}}{Z_e^{'}} = \frac{R_1+n^2 R_2}{Z_1+n^2 Z_2}$$

$$\cos\left(\varphi_{cc}\right) = \cos\left(\varphi_{2cc}\right) = \frac{R_e^{II}}{Z_e^{II}} = \frac{R_2+\frac{R_1}{n^2}}{Z_2+\frac{Z_1}{n^2}}$$

POTENZA ASSORBITA D
AL TRASFORMATORE IN CC
A CORRENTI NOMINALI

La **potenza attiva Pcc assorbita dal trasformatore in cc** coincide con la ***potenza attiva perduta nel rame per il solo effetto Joule sulle resistenze R1 ed R2***.

La potenza **erogata** è **nulla**.

Le **perdite nel ferro** sono **trascurabili**.

La **potenza attiva Pcc** è uguale al **primario** e al **secondario** e può essere espressa sia in funzione dei parametri del primario, sia in funzione dei parametri del secondario:

$$P_{cc} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = R_e^{'} \cdot I_{1n}^2 = V_{1cc} \cdot I_{1n} \cdot \cos\left(\varphi_{cc}\right)$$

$$P_{cc} = R_1 \cdot I_{1n}^2 + R_2 \cdot I_{2n}^2 = R_e^{II} \cdot I_{2n}^2 = V_{2cc} \cdot I_{2n} \cdot \cos\left(\varphi_{cc}\right)$$