

**ELETTROTECNICA**

# TRASFORMATORI



# TRASFORMATORI

I **trasformatori** sono macchine elettriche statiche (*i.e., prive di organi in movimento*) il cui funzionamento si basa sulla legge dell'induzione elettromagnetica (*i.e., la legge di Faraday-Neumann-Lenz*)

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

I trasformatori sono le macchine elettriche che, a partire dal 1890, hanno consentito la capillare diffusione dell'energia elettrica per usi civile ed industriali.



*Classificazione: in base al tipo d'impiego*

TIPO		APPLICAZIONE
MONOFASE	di misura	<i>di corrente di tensione</i>
	alimentazione circuiti	<i>di potenza di comando di segnalazione</i>
	speciali	<i>a corrente costante (illuminazione in serie) per saldatrici</i>
TRIFASE	di potenza	<i>per sistemi di I cat. (e.g., cabine secondarie MT/BT) per sistemi di II e III cat. (e.g. cabine primarie, stazioni ecc.)</i>
	trifasi	<i>per forni per raddrizzatori</i>

*Classificazione: in base alle modalità di raffreddamento*

TIPO	RAFFREDDAMENTO	LIMITI
<b>A secco in aria o in resina</b> <i>Le parti attive non sono immerse in liquido isolante.</i>	<b>Naturale</b> ( <i>moti convettivi dell'aria</i> )	Fino a 1000 kVA in aria Fino a 3000 kVA in resina
	<b>Forzata</b> ( <i>circolazione di aria forzata mediante ventilatori – solo per applicazioni speciali</i> )	
<b>In olio o liquidi siliconici</b> <i>Le parti attive sono immerse in un liquido isolante a cui viene trasmesso il calore che verrà asportato dal sistema di raffreddamento esterno.</i>	<b>Naturale</b> ( <i>come sopra</i> ): - a cassa liscia - con radiatori o con tubi	20-50 kVA 50-2000 kVA
	<b>Artificiale:</b> - con aria forzata ( <i>ventilatori</i> ) - con acqua ( <i>scambiatori di calore esterni</i> )	Fino alla massime potenze

*I trasformatori con una quantità di olio superiore ai 500 kg devono essere provvisti di una vasca di raccolta al fine di impedire il dilagare dell'olio infiammato all'esterno delle cabine, se queste non sono isolate.*

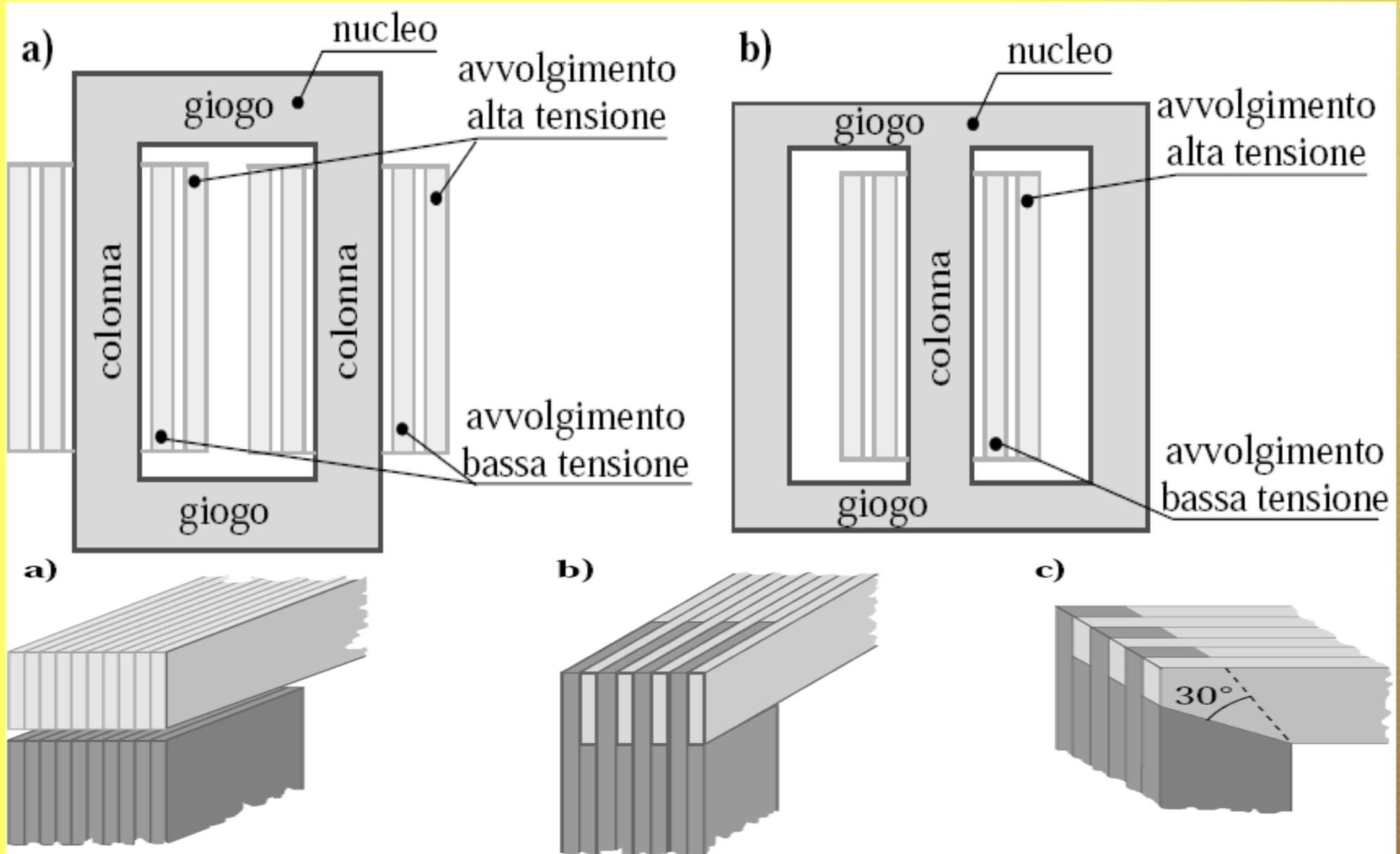


*Classificazione: in base alle modalità di raffreddamento*

PRINCIPALI SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO	
Sigla	Significato
AN(AF)	Per circolazione naturale dell'aria (o forzata non guidata)
ONAN	Per circolazione naturale dell'olio e dell'aria
ONAF	Per circolazione naturale dell'olio e forzata non guidata dell'aria
OFAN	Per circolazione forzata dell'olio e naturale dell'aria
OFAF	Per circolazione forzata dell'olio e forzata non guidata dell'aria

*Le prime due lettere indicano il mezzo di raffreddamento in contatto con le parti attive ed il tipo di circolazione. Le altre due lettere indicano il mezzo di raffreddamento intermedio a contatto con il sistema di raffreddamento esterno ed il tipo di circolazione.*

## Cenni costruttivi

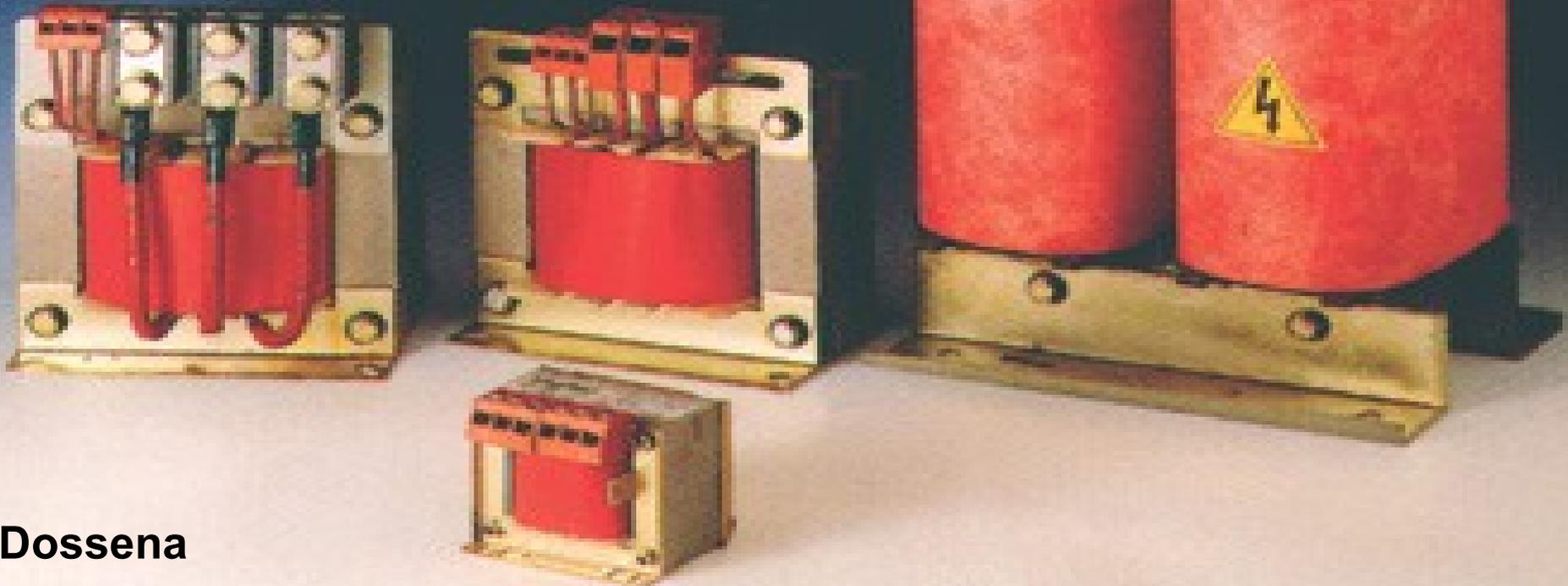




## Cenni costruttivi

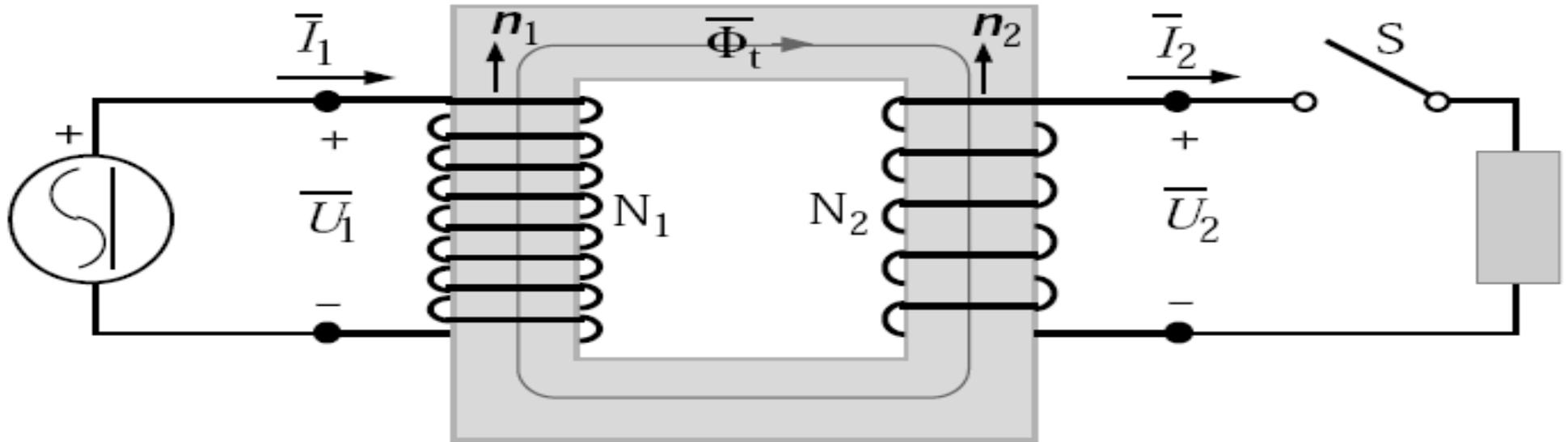
Trasformatori monofase di potenza a secco per la realizzazione di reti isolate in ambiente uso medico.

POTENZA: da 600 a 3500 VA @ 50/60 Hz  
PRIMARIO: 230 VAC  
SECONDARIO: 115 - 0 - 115 VAC  
RAFFREDDAMENTO: AN  
RESISTENZA D'ISOLAMENTO: > 50 kΩ



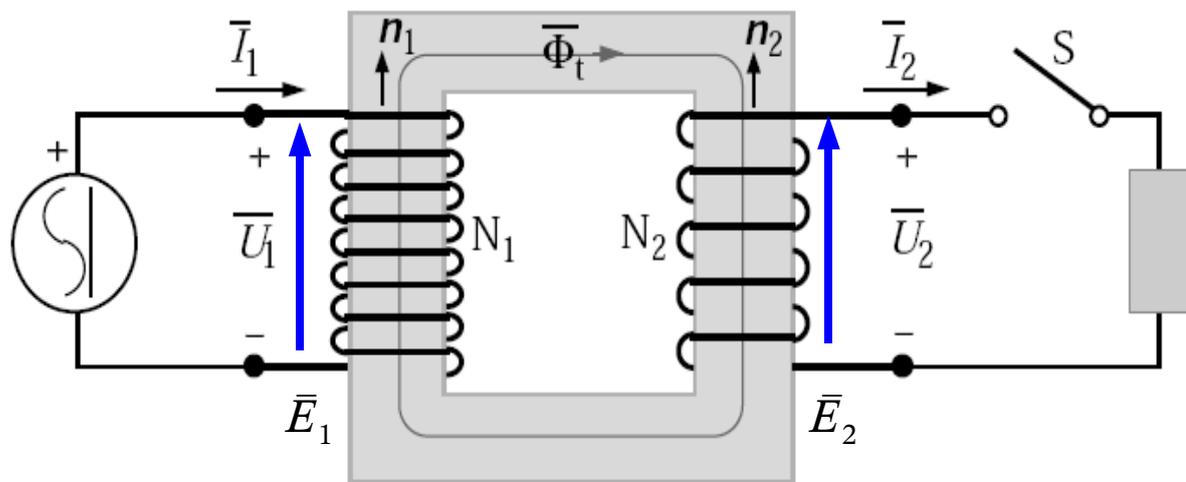
© Dossena

## Trasformatore ideale: ipotesi esemplificative



- ▶ Riluttanza del nucleo lineare ( $\mathcal{R} = \text{costante}$ ) ovvero permeabilità magnetica ( $\mu = \text{costante} \neq 0$ ) costante e diversa da zero.
- ▶ Perdite nel nucleo (per isteresi e correnti parassite) nulle.
- ▶ Accoppiamento fra gli avvolgimenti perfetto ( $k^2 = 1$ ).
- ▶ Resistenze degli avvolgimenti nulle ( $R_1 = R_2 = 0$ ).

## Trasformatore ideale: funzionamento a vuoto



**A vuoto**  $\bar{U}_1 \rightarrow \bar{I}_1$  con  $\bar{I}_2 = 0$

$$\bar{\mathcal{F}}_1 = N_1 \bar{I}_{1\mu} = \mathcal{R} \bar{\Phi}_t$$

$$\bar{\Phi}_t = \frac{\bar{\mathcal{F}}_1}{\mathcal{R}} = \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

$$\bar{E}_1 = j\omega(\bar{\Phi}_{c1}) = j\omega(N_1 \bar{\Phi}_t) = j\omega N_1 \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

$$\bar{E}_2 = -j\omega(-\bar{\Phi}_{c2}) = j\omega(N_2 \bar{\Phi}_t) = j\omega N_2 \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

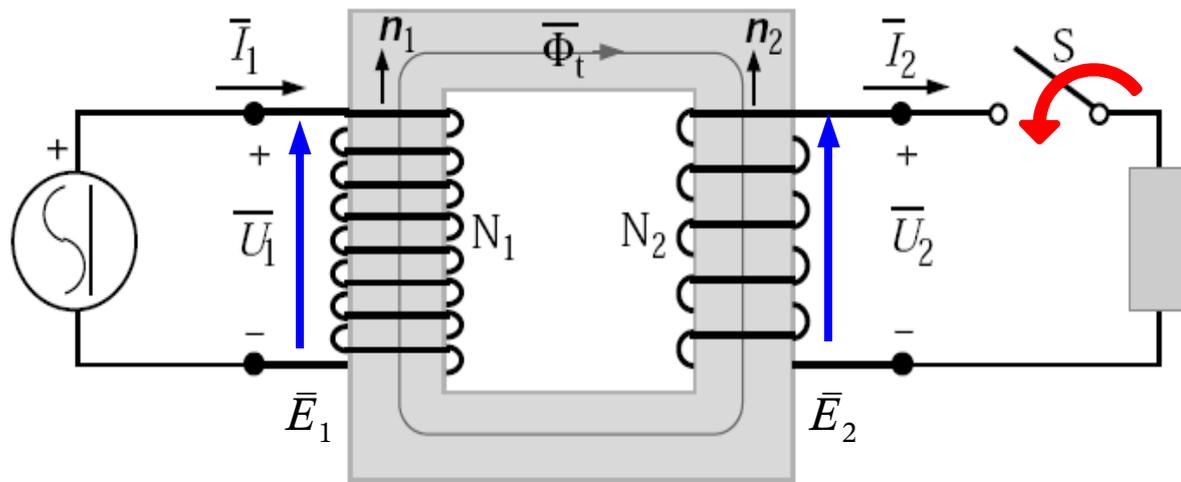
$$\bar{U}_1 - \bar{E}_1 = 0 \Rightarrow \bar{U}_1 = \bar{E}_1 = j\omega N_1 \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

$$\bar{U}_2 - \bar{E}_2 = 0 \Rightarrow \bar{U}_2 = \bar{E}_2 = j\omega N_2 \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

## Trasformatore ideale: funzionamento a carico



**A carico** con  $\bar{U}_1$  invariante  
 $\bar{U}_1 \rightarrow \bar{I}_1$  con  $\bar{I}_2 \neq 0$

$$\bar{\mathcal{E}}_1 - \bar{\mathcal{E}}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi}_t$$

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

Essendo ancora  $\bar{U}_1 - \bar{E}_1 = 0$  segue che  $\bar{U}_1 = \bar{E}_1 = j \omega N_1 \bar{\Phi}_t$  e cioè il flusso rimane INVARIATO nel passaggio da vuoto a carico

$$\bar{\Phi}_t = \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

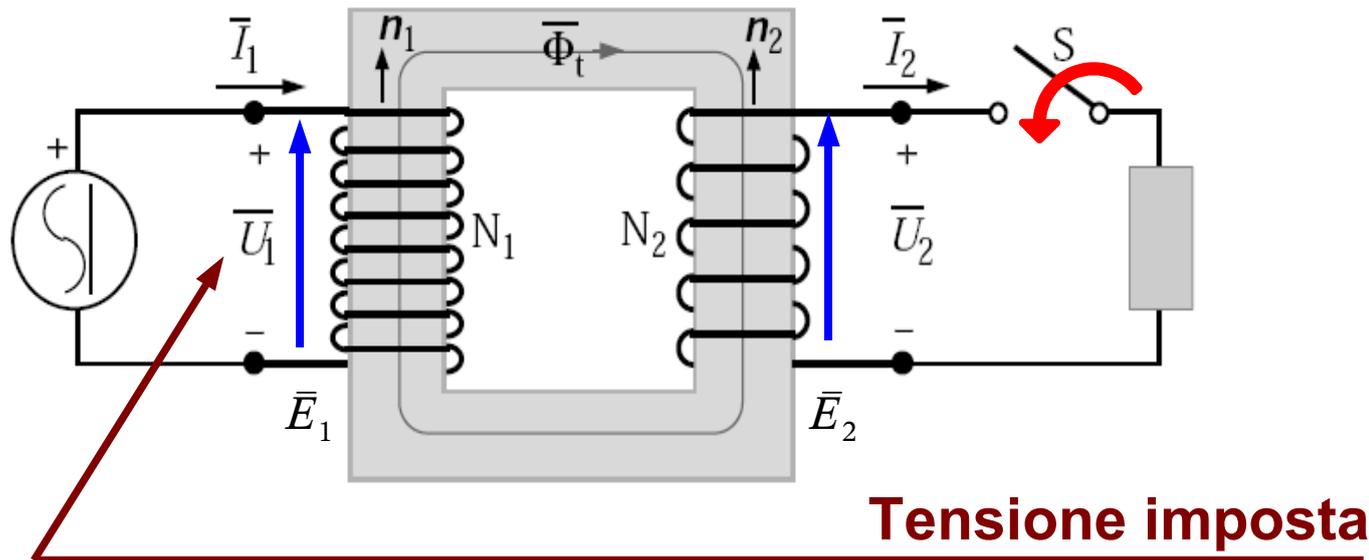
Quindi, per quanto visto in precedenza, risulta ancora

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

ed inoltre si ha  $N_1 \bar{I}_1 - N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_{1\mu} \Rightarrow$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{1\mu} + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2$$

## Trasformatore ideale: funzionamento a vuoto ed a carico



$$\bar{\Phi}_t = \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

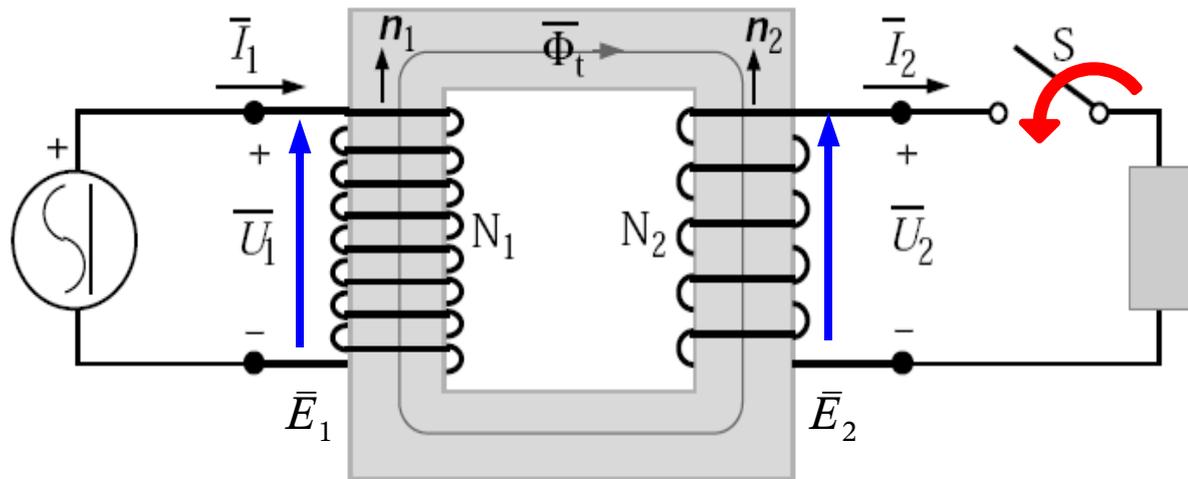
$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{1\mu} + \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_2$$

Si può quindi concludere che a **tensione imposta invariante** il **flusso nel ferro non varia** nel passaggio da a vuoto a carico. Inoltre, scegliendo in modo opportuno il **rapporto spire,  $n=N_1/N_2$** , si può passare da una tensione  $U_1$  più elevata ad una tensione  $U_2$  più bassa (*trasformatore abbassatore*) o viceversa (*trasformatore elevatore*). Infine, la corrente primaria,  $I_1$ , si adegua alle variazioni della corrente secondaria,  $I_2$ , secondo l'inverso del rapporto spire, i.e.  **$1/n=N_2/N_1$** .

Il circuito elettrico equivalente può essere così definito ...

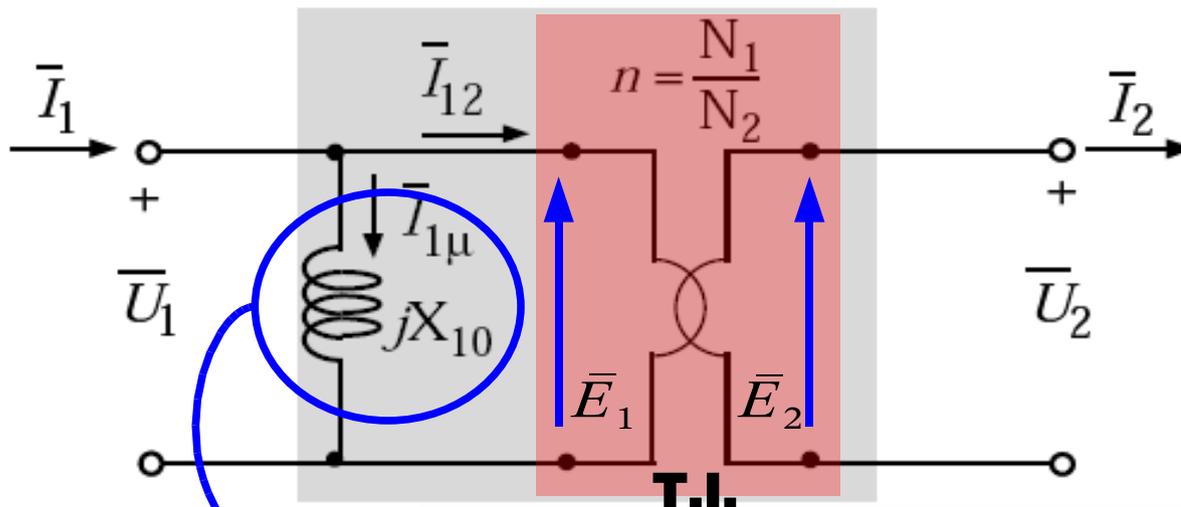
## Trasformatore ideale: schema equivalente



$$\bar{\Phi}_t = \frac{N_1}{\mathcal{R}} \bar{I}_{1\mu}$$

$$\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = n$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{1\mu} + \bar{I}_2/n$$

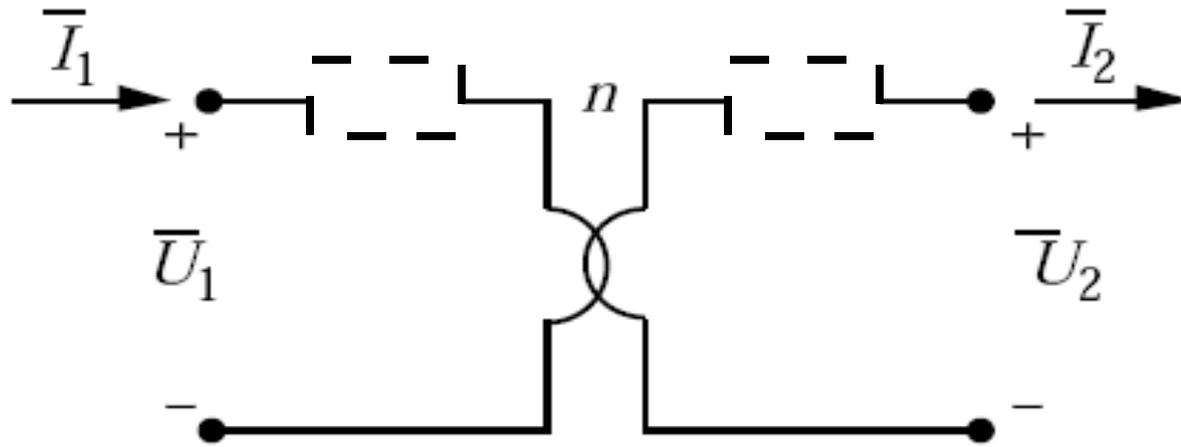


**T. I.**  $\left\{ \begin{array}{l} \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = n \\ \frac{\bar{I}_{12}}{\bar{I}_2} = \frac{1}{n} \end{array} \right.$

**C. E.**  $\left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_1 - \bar{E}_1 = 0 \\ \bar{U}_2 - \bar{E}_2 = 0 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_{1\mu} + \bar{I}_{12} \end{array} \right.$

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 = j\omega(N_1\Phi_t) = j\omega\frac{N_1^2}{\mathcal{R}}\bar{I}_{1\mu} = j\omega L_{10}\bar{I}_{1\mu} = jX_{10}\bar{I}_{1\mu}$$

## Trasformatore ideale: proprietà del trasformatore ideale



$$\text{T. I.} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = n \\ \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{1}{n} \end{array} \right.$$

**Il fattore di trasporto delle potenze 1**

$$\bar{U}_1 \bar{I}_1^* = (n \bar{U}_2) \left( \frac{1}{n} \bar{I}_2^* \right) = \bar{U}_2 \bar{I}_2^*$$

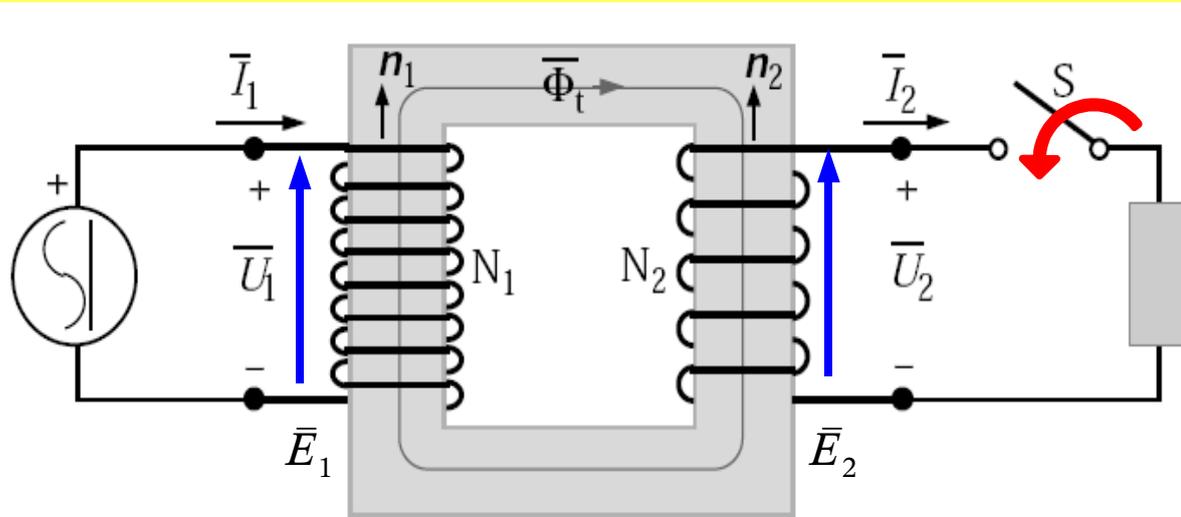
**Dal secondario al primario il fattore di trasporto delle impedenze è \$n^2\$**

$$\dot{Z}_2 I_2^2 = \dot{Z}_2 (n I_1)^2 = (n^2 \dot{Z}_2) I_1^2 = \dot{Z}_{12} I_1^2 \Rightarrow \dot{Z}_{12} = n^2 \dot{Z}_2$$

**Dal primario al secondario il fattore di trasporto delle impedenze è \$\frac{1}{n^2}\$**

$$\dot{Z}_1 I_1^2 = \dot{Z}_1 \left( \frac{1}{n} I_2 \right)^2 = \left( \frac{1}{n^2} \dot{Z}_1 \right) I_2^2 = \dot{Z}_{21} I_2^2 \Rightarrow \dot{Z}_{21} = \frac{1}{n^2} \dot{Z}_1$$

## Dal trasformatore ideale al trasformatore reale: rimozione ipotesi semplificative



$$P_{ist} = k_{ist} f B_M^{1.6 \div 2} \propto B^2 \propto E^2$$

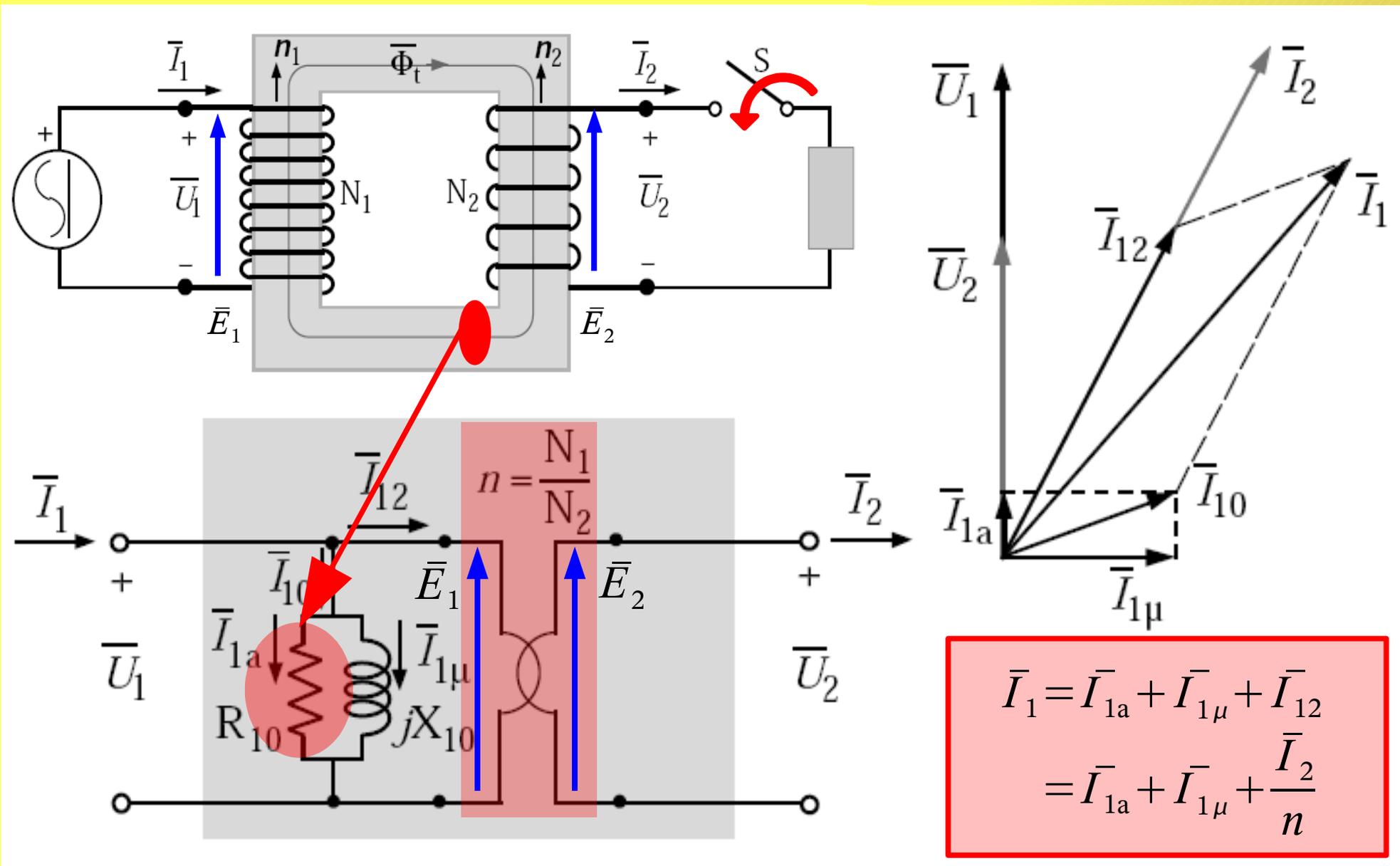
$$P_{cp} = k_{cp} \delta^2 f^2 B_M^2 \propto B^2 \propto E^2$$

$$P_f = P_{ist} + P_{cp} \propto B^2 \propto E^2$$

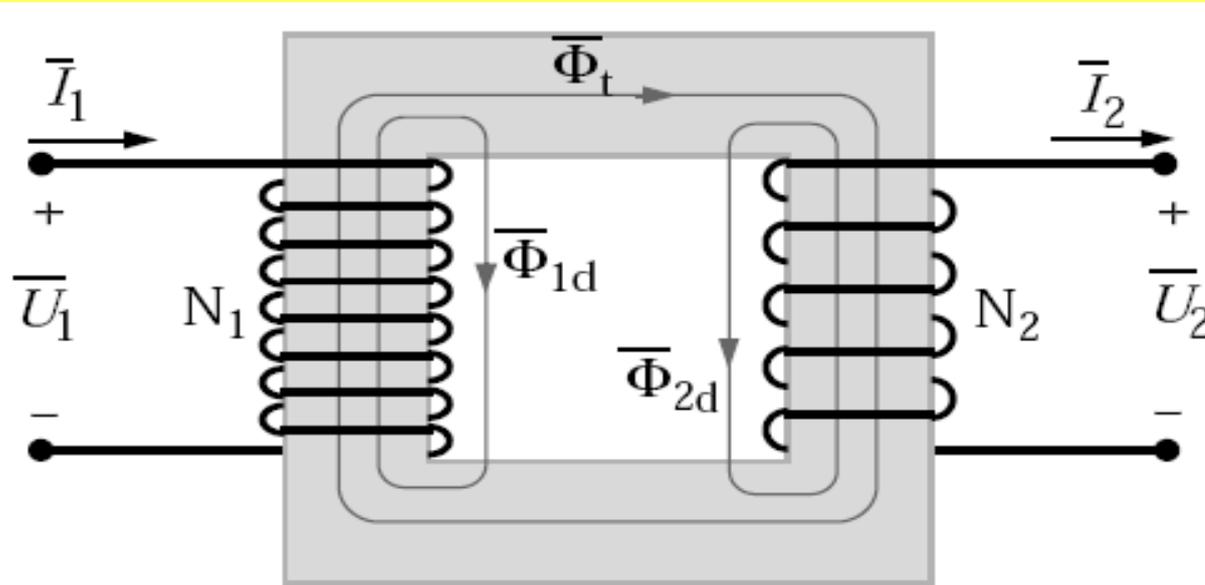
$$P_f = \frac{E^2}{R_f}$$

- ▶ Riluttanza del nucleo lineare ( $\mathcal{R} = \text{costante}$ ) ovvero permeabilità magnetica ( $\mu = \text{costante} \neq 0$ ) costante e diversa da zero.
- ~~▶ Perdite nel nucleo (per isteresi e correnti parassite) nulle.~~
- ▶ Accoppiamento fra gli avvolgimenti perfetto ( $k^2 = 1$ ).
- ▶ Resistenze degli avvolgimenti nulle ( $R_1 = R_2 = 0$ ).

## Dal trasformatore ideale al trasformatore reale: perdite nel ferro



## Dal trasformatore ideale al trasformatore reale: rimozione ipotesi semplificative

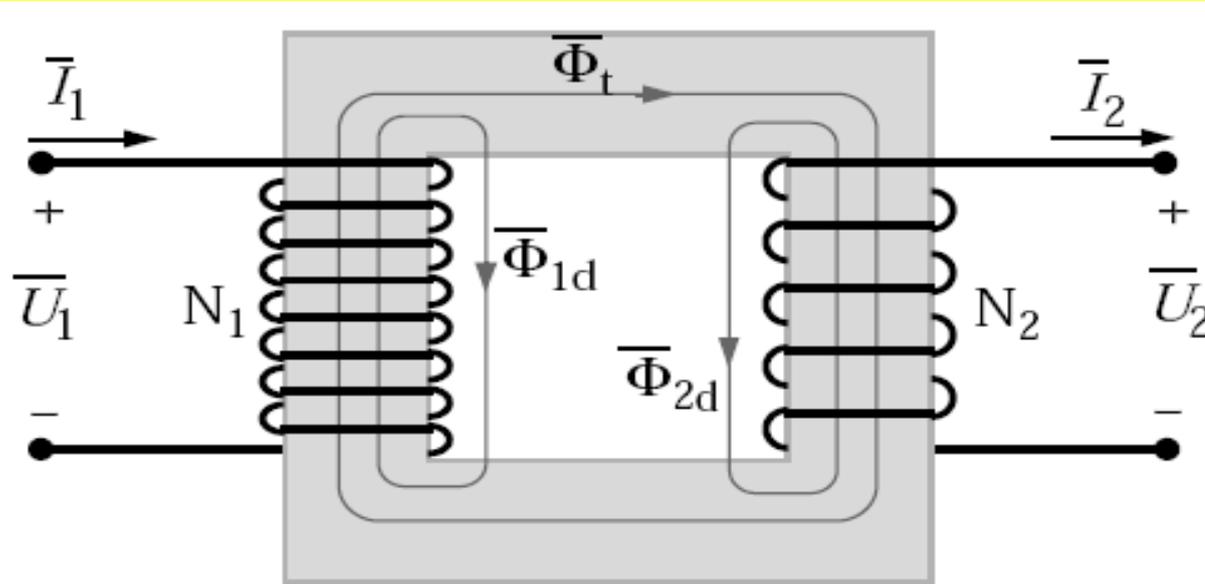


$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{cl} &= N_1 (\bar{\Phi}_{1d} + \bar{\Phi}_t) \\ \bar{E}_1 &= j \omega (N_1 \bar{\Phi}_t) \\ \bar{E}_{1d} &= j \omega (N_1 \bar{\Phi}_{1d}) = \\ &= j \omega \left( \frac{N_1 \bar{\Phi}_{1d}}{I_1} \right) \bar{I}_1 = j X_{1d} I_1\end{aligned}$$

$$L_{id} = \frac{N_i \bar{\Phi}_{id}}{I_i}, \quad X_{id} = j \omega L_{id}$$

- ▶ Riluttanza del nucleo lineare ( $\mathcal{R} = \text{costante}$ ) ovvero permeabilità magnetica ( $\mu = \text{costante} \neq 0$ ) costante e diversa da zero.
- ~~▶ Perdite nel nucleo (per isteresi e correnti parassite) nulle.~~
- ~~▶ Accoppiamento fra gli avvolgimenti perfetto ( $k^2 = 1$ ).~~
- ▶ Resistenze degli avvolgimenti nulle ( $R_1 = R_2 = 0$ ).

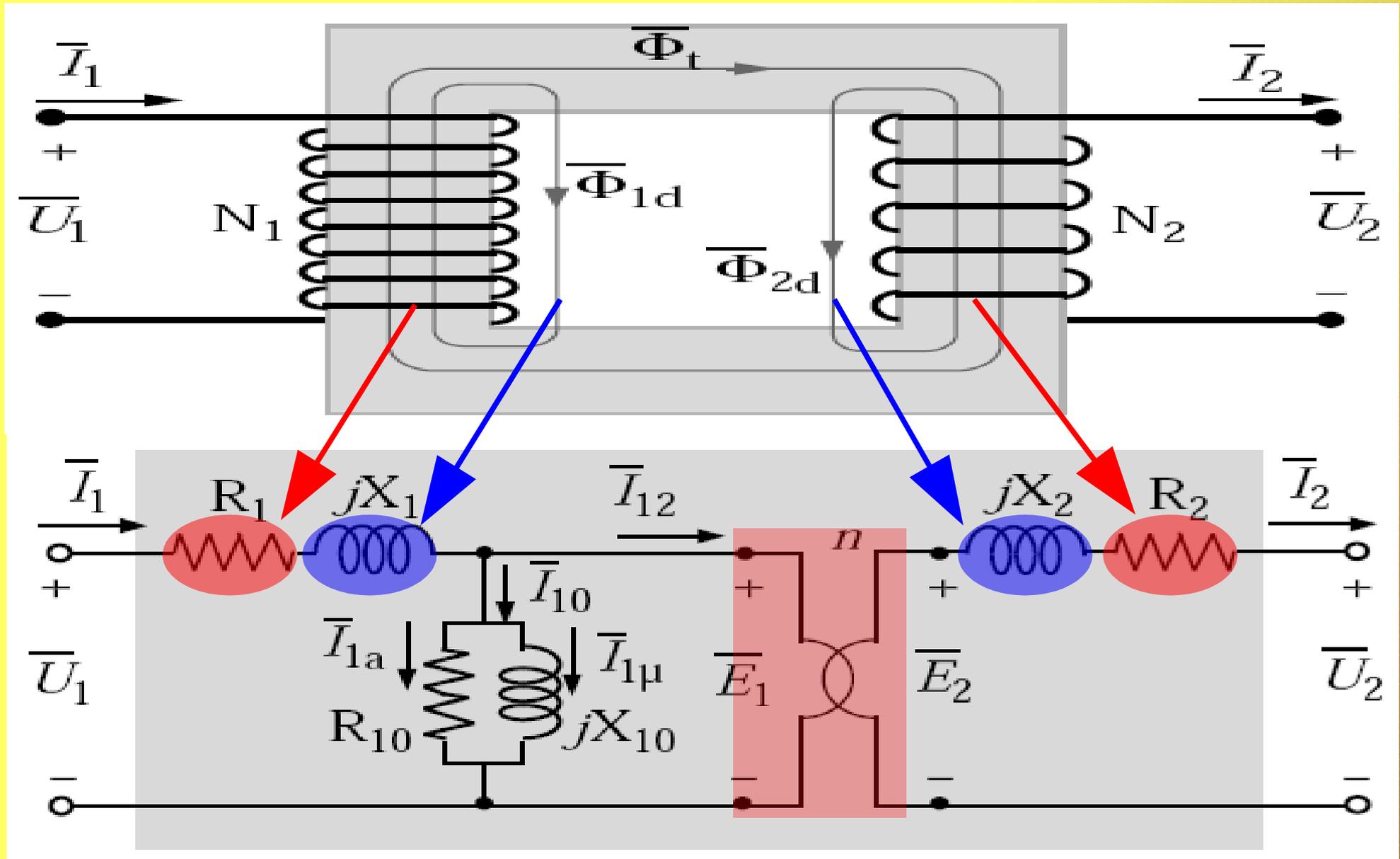
## Dal trasformatore ideale al trasformatore reale: rimozione ipotesi esemplificative



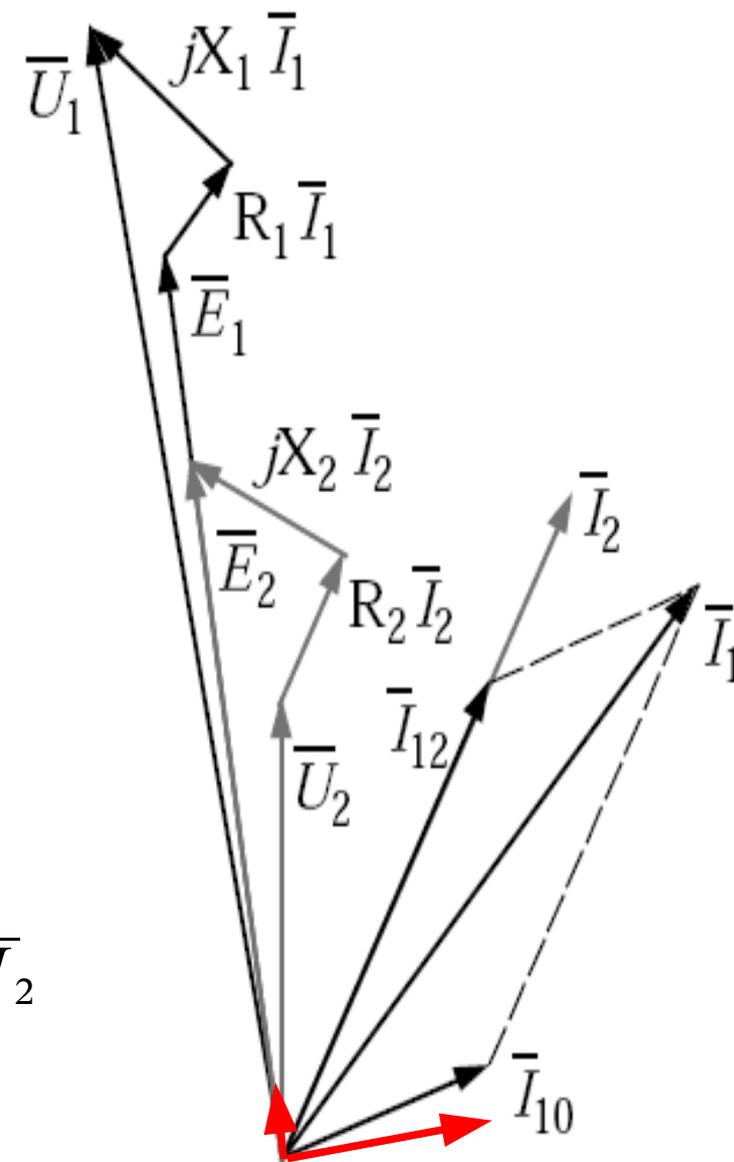
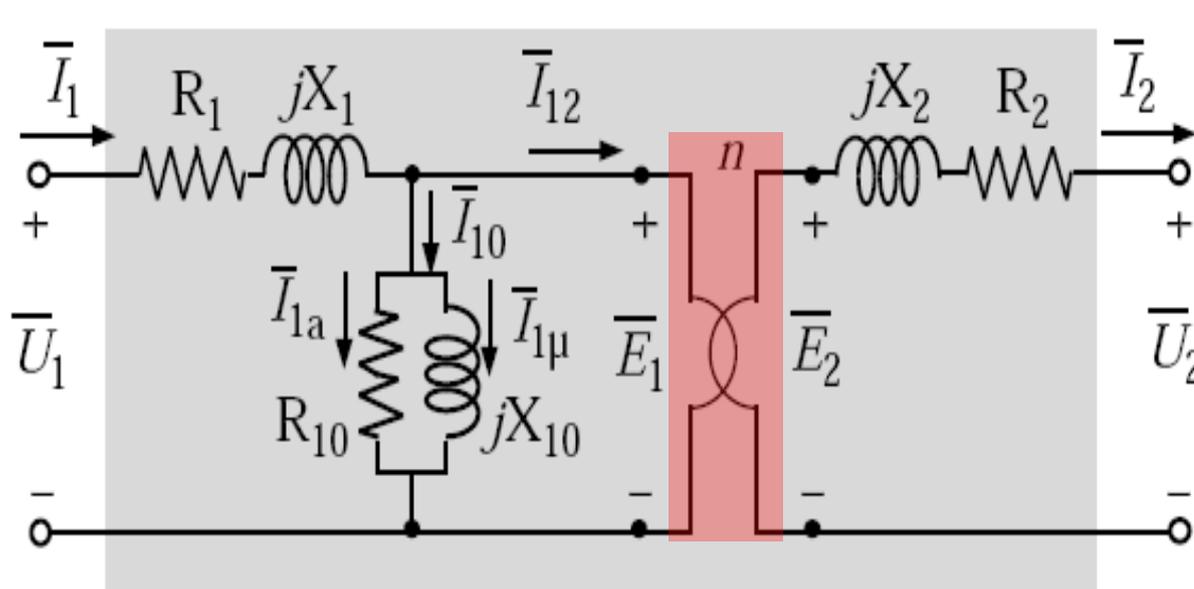
$\rho$  {  $R_1$  del primario  
 $R_2$  del secondario

- ▶ Riluttanza del nucleo lineare ( $\mathcal{R} = \text{costante}$ ) ovvero permeabilità magnetica ( $\mu = \text{costante} \neq 0$ ) costante e diversa da zero.
- ~~▶ Perdite nel nucleo (per isteresi e correnti parassite) nulle.~~
- ~~▶ Accoppiamento fra gli avvolgimenti perfetto ( $k^2 = 1$ ).~~
- ~~▶ Resistenze degli avvolgimenti nulle ( $R_1 = R_2 = 0$ ).~~

## Dal trasformatore ideale al trasformatore reale: perdite nel rame e flussi dispersi



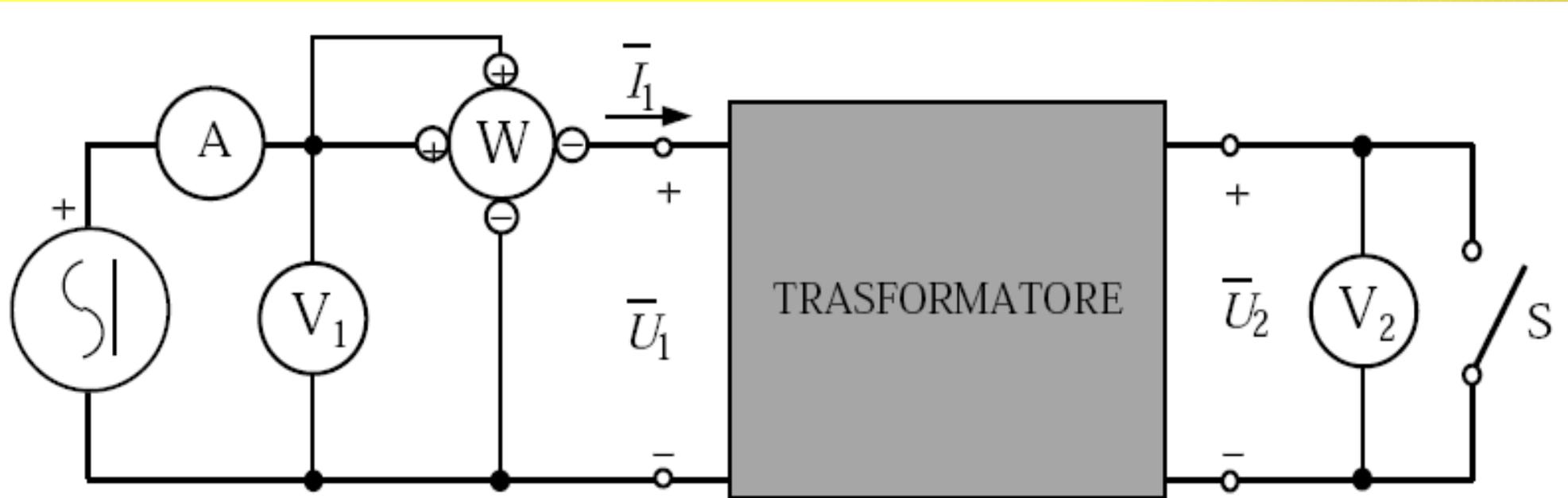
## Dal trasformatore ideale al trasformatore reale: schema equivalente



$$\begin{cases} \bar{U}_1 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + \bar{E}_1 \\ \bar{U}_2 = \bar{E}_2 - (R_2 + jX_2)\bar{I}_2 \end{cases}$$

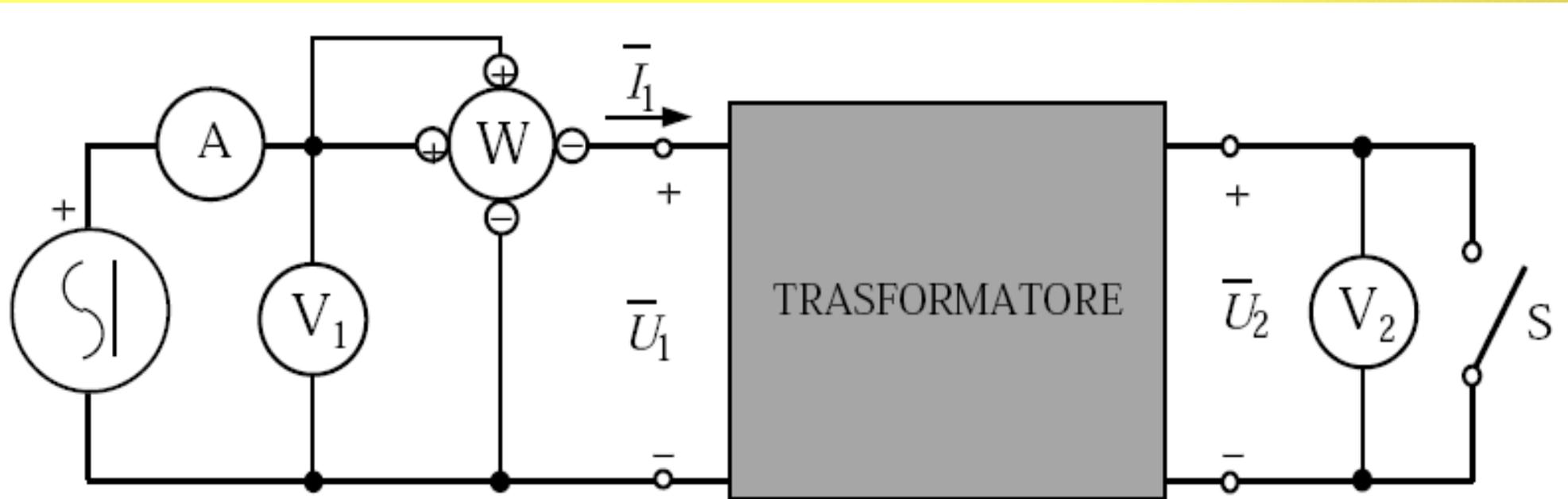
$$\begin{cases} \bar{U}_1 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + n\bar{U}_2 + n(R_2 + jX_2)\bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{I}_{10} + \frac{1}{n}\bar{I}_2 = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} \end{cases}$$

## Prova a vuoto ed in corto circuito



Attraverso la prova a vuoto e la prova in corto circuito vengono misurati/verificati i dati caratteristici di funzionamento del trasformatore, alcuni dei quali sono riportati direttamente sulla **targa** del trasformatore (sovente in percento dei valori nominali del trasformatore) da cui si possono dedurre i parametri degli schemi elettrici equivalenti.

## Prova a vuoto ed in corto circuito: valori nominali del trasformatore



$U_{1n}$  Tensione nominale primaria [V]

$U_{2n}$  Tensione secondaria a vuoto [V]

$I_{1n}$  Corrente nominale primaria [A]

$I_{2n}$  Corrente nominale secondaria [A]

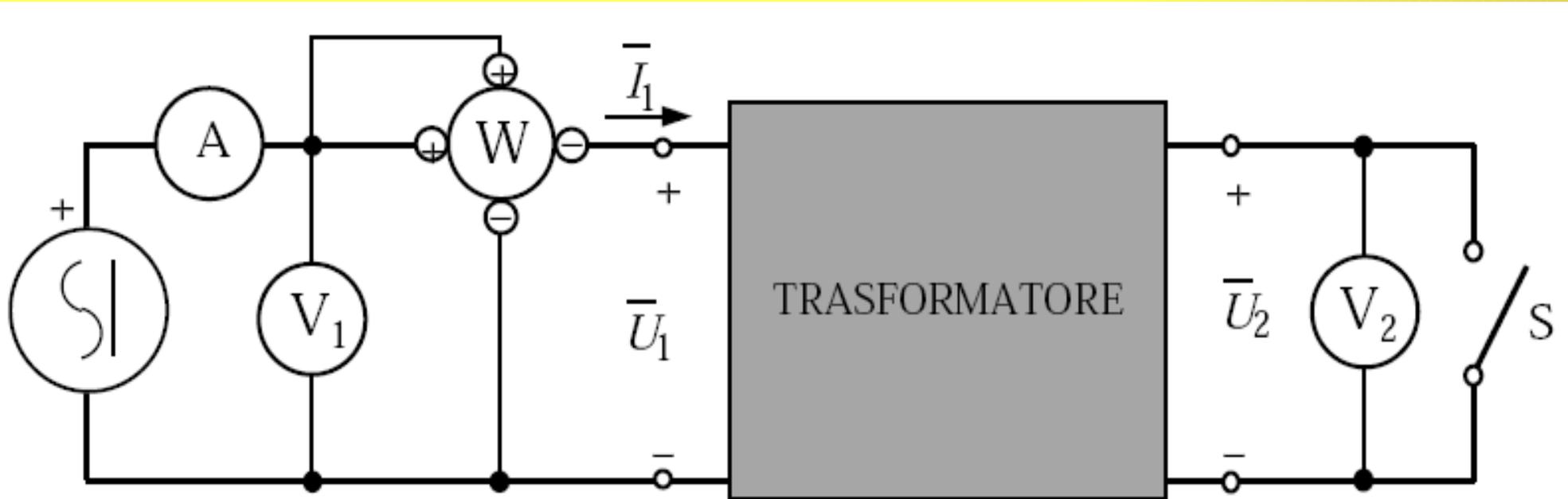
$P_n$  Potenza nominale [VA]

$f_n$  Frequenza nominale [Hz]

$n$  Rapporto di trasformazione

$$\left\{ \begin{array}{l} P_n = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n} \\ P_n = \sqrt{3} U_{1n} I_{1n} = \sqrt{3} U_{2n} I_{2n} \end{array} \right.$$

## Prova a vuoto ed in corto circuito: prova a vuoto



Alimentando il primario con la tensione nominale e l'interruttore S aperto si leggono le indicazioni degli strumenti da si ricava

**Dipende dal lato di misura**

$$I_{10} = A$$

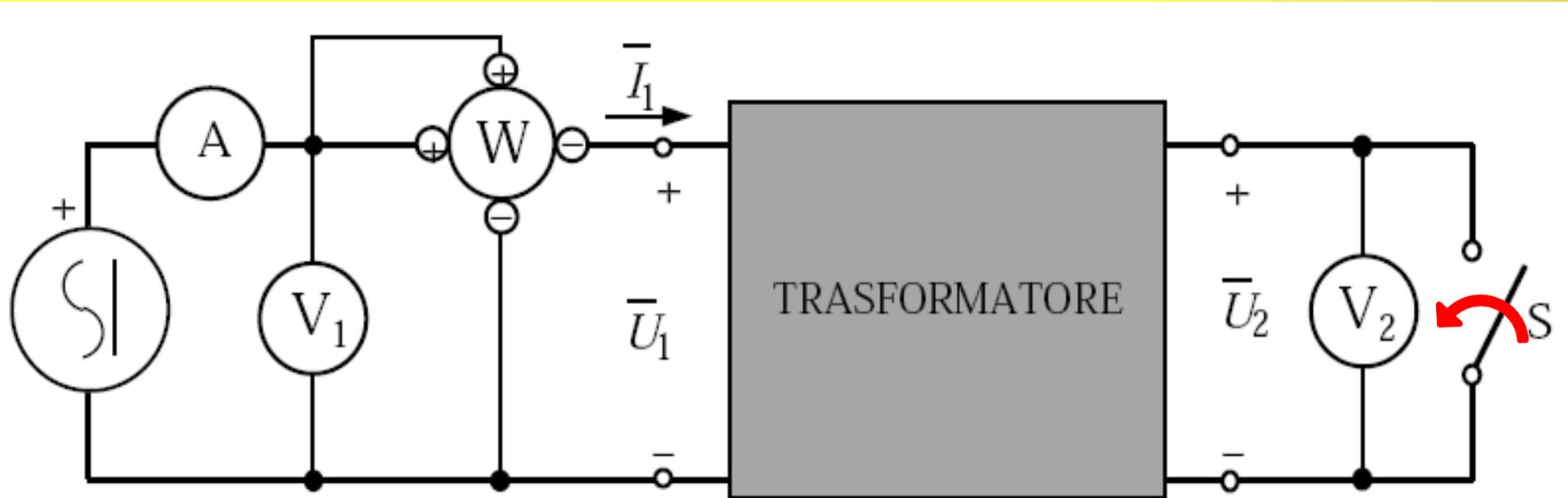
**Non dipendono dal lato di misura**

$$i_{0\%} = \frac{I_{10}}{I_{1n}} 100 \quad P_0 = W \quad P_{0\%} = \frac{P_0}{P_n} 100$$

**Verifica del rapporto di trasformazione**

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = n$$

## Prova a vuoto ed in corto circuito: prova in corto circuito



Chiudendo l'interruttore S ed alimentando con una tensione che fa scorrere nel primario la corrente nominale, dalle letture si ha

**Dipende dal lato di misura**

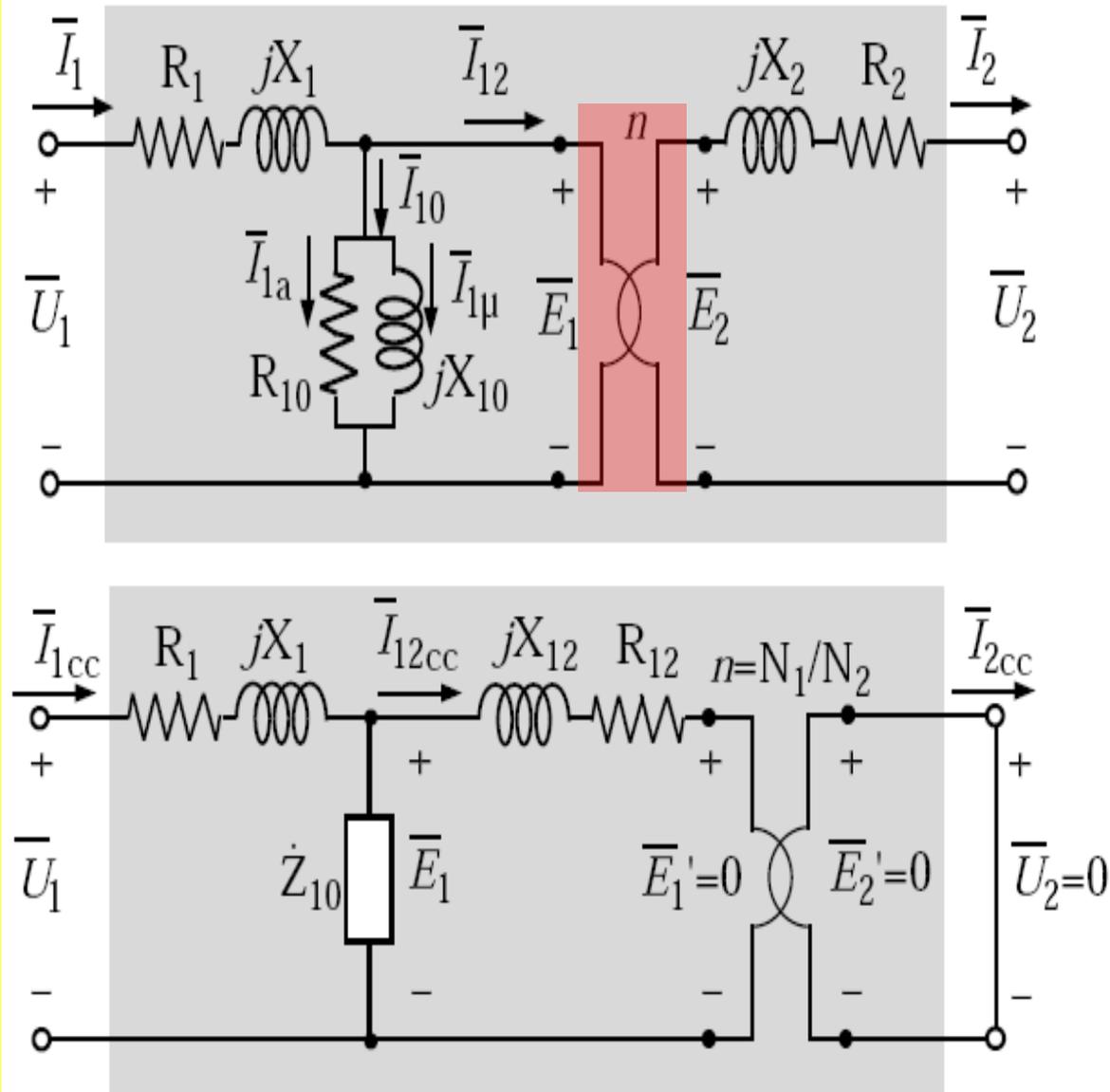
$$U_{1cc} = V_1 \quad I_{1cc} = A = I_{1n}$$

**Non dipendono dal lato di misura**

$$u_{cc\%} = \frac{U_{1cc}}{U_{1n}} 100 \quad P_{cc} = W \quad P_{cc\%} = \frac{P_{cc}}{P_n} 100$$

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

## Prova a vuoto ed in corto circuito: analisi dei risultati



**Dalle misure si ottiene**

$$Z_v = \frac{U_1}{I_{10}} \quad Z_{cc} = \frac{U_{1cc}}{I_{1n}}$$

**e si verifica che  $Z_v \gg Z_{cc}$**

con  $\dot{Z}_v = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_{10}$

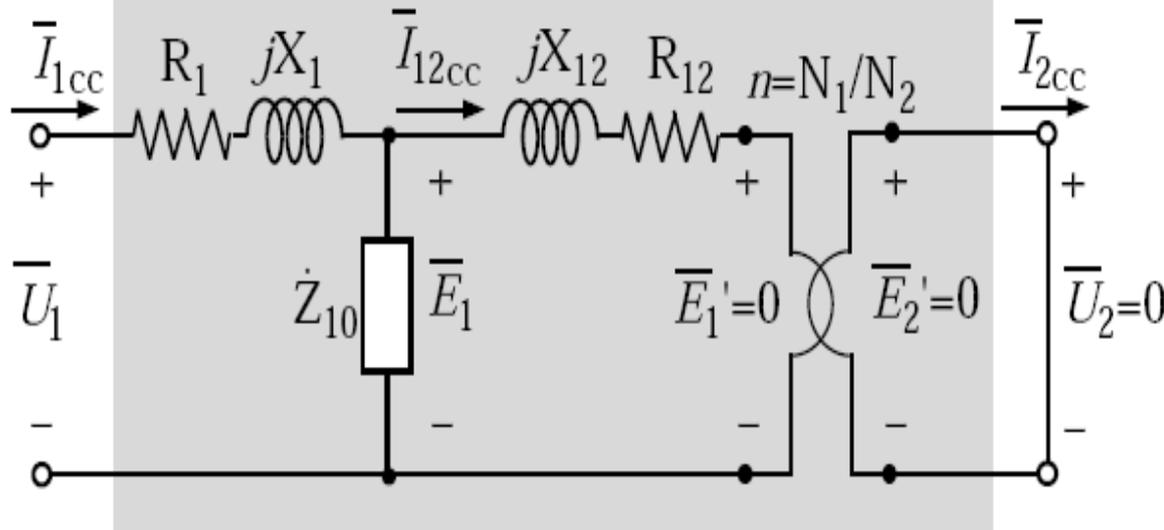
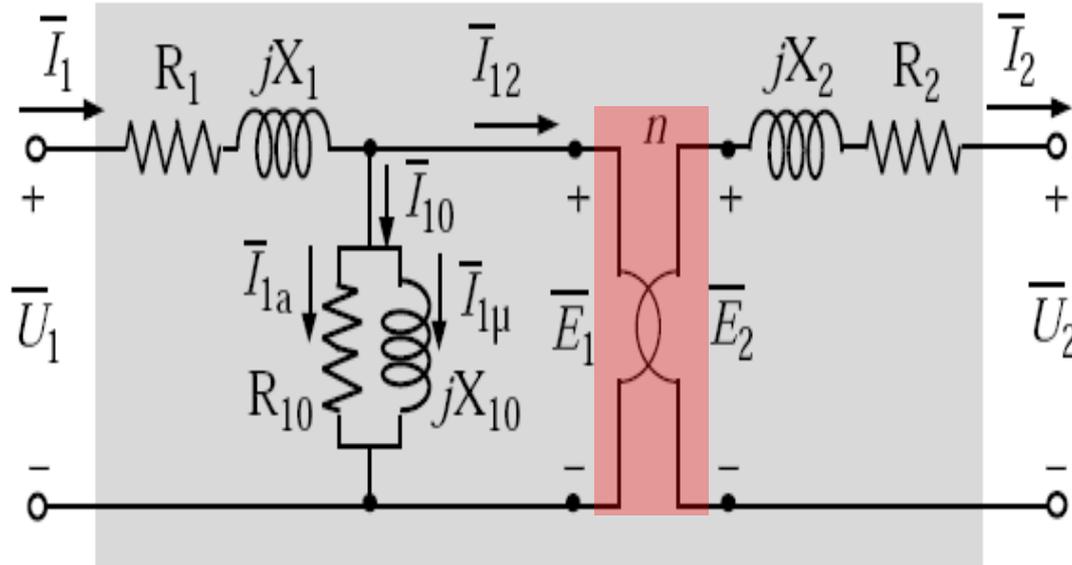
e  $\dot{Z}_{cc} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_{10} \dot{Z}_{12}}{\dot{Z}_{10} + \dot{Z}_{12}}$

essendo  $\dot{Z}_{12} = n^2 \dot{Z}_2$

dalla  $Z_v \gg Z_{cc}$

**segue**  $Z_{10} \gg Z_{12} \approx Z_1$

## Prova a vuoto ed in corto circuito: analisi dei risultati



### Ad esempio

TR:  $P_{an} = 100 \text{ kVA}$

$n = 10 / 0.230 \text{ kV}$

$U_{cc\%} = 4\%$

$I_{0\%} = 1.3\%$

$$I_{1n} = \frac{P_{an}}{U_{1n}} = 10 \text{ A}$$

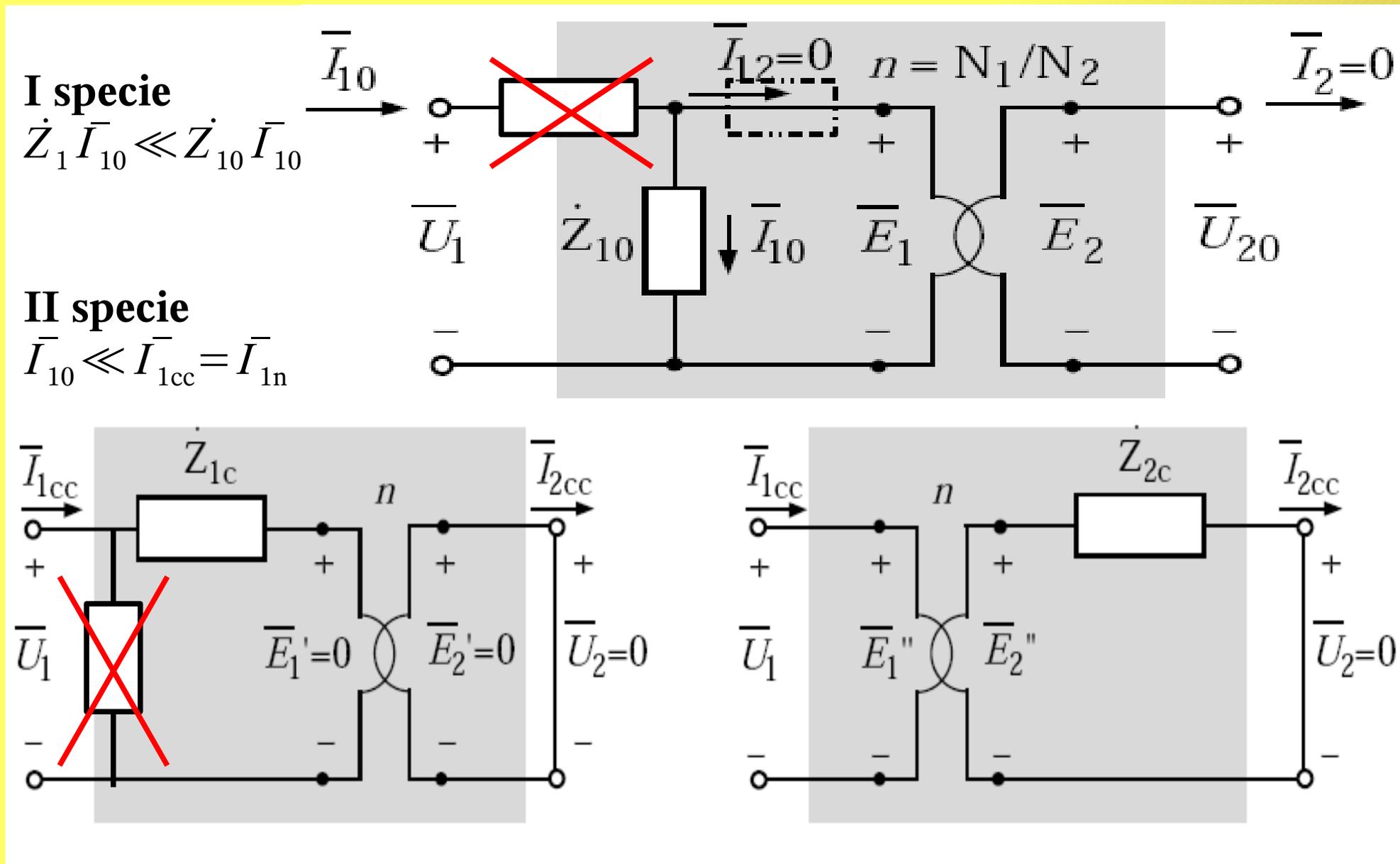
$$I_{10} = I_{1n} I_{0\%} = 0.13 \text{ A}$$

$$Z_v = \frac{U_1}{I_{10}} = 76923 \Omega$$

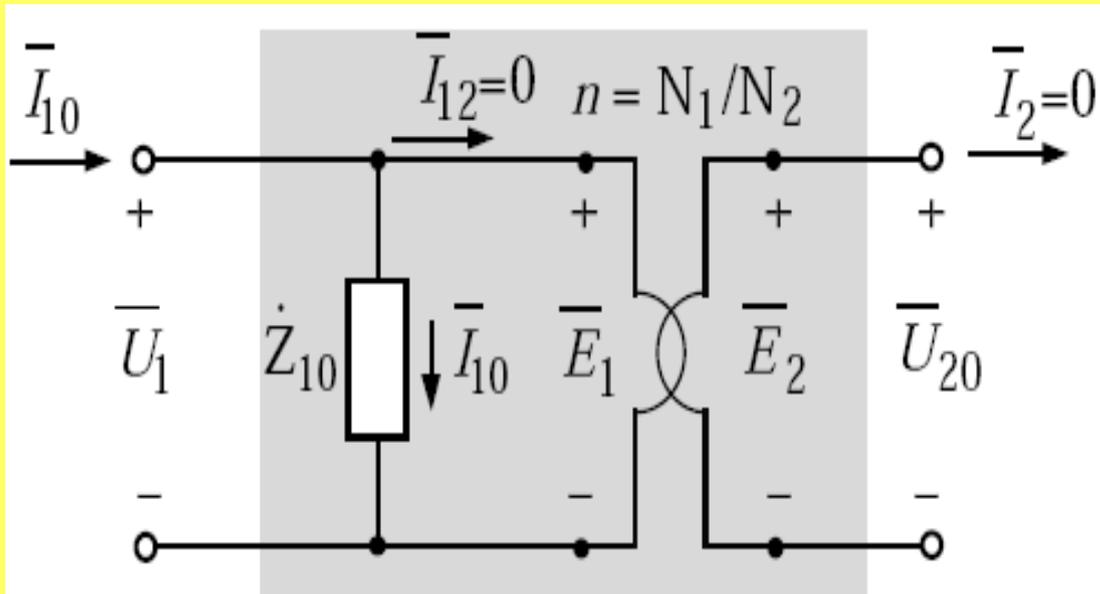
$$U_{1cc} = U_{1n} U_{cc\%} = 400 \text{ V}$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{1cc}}{I_{1n}} = 40 \Omega \ll Z_v$$

Funzionamento a vuoto: circuito equivalente di I (a vuoto) e II specie (a carico)



## Determinazione dei parametri dei circuiti elettrici equivalenti di I e II specie



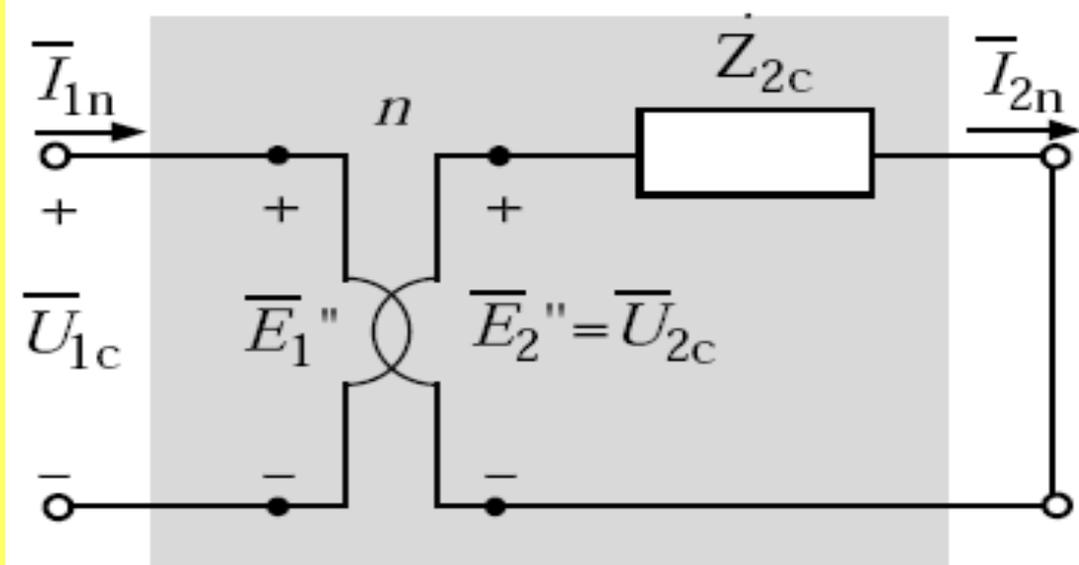
### I specie

$$P_0 \approx P_{fe}$$

$$Z_{10} = \frac{U_{1n}}{I_{10}} \quad \cos \phi_0 = \frac{P_0}{U_{1n} I_{10}}$$

$$Q_0 = \sqrt{(U_{1n} I_{10})^2 - P_0^2}$$

$$R_{10} = \frac{U_{1n}^2}{P_0} \quad X_{10} = \frac{U_{1n}^2}{Q_0}$$



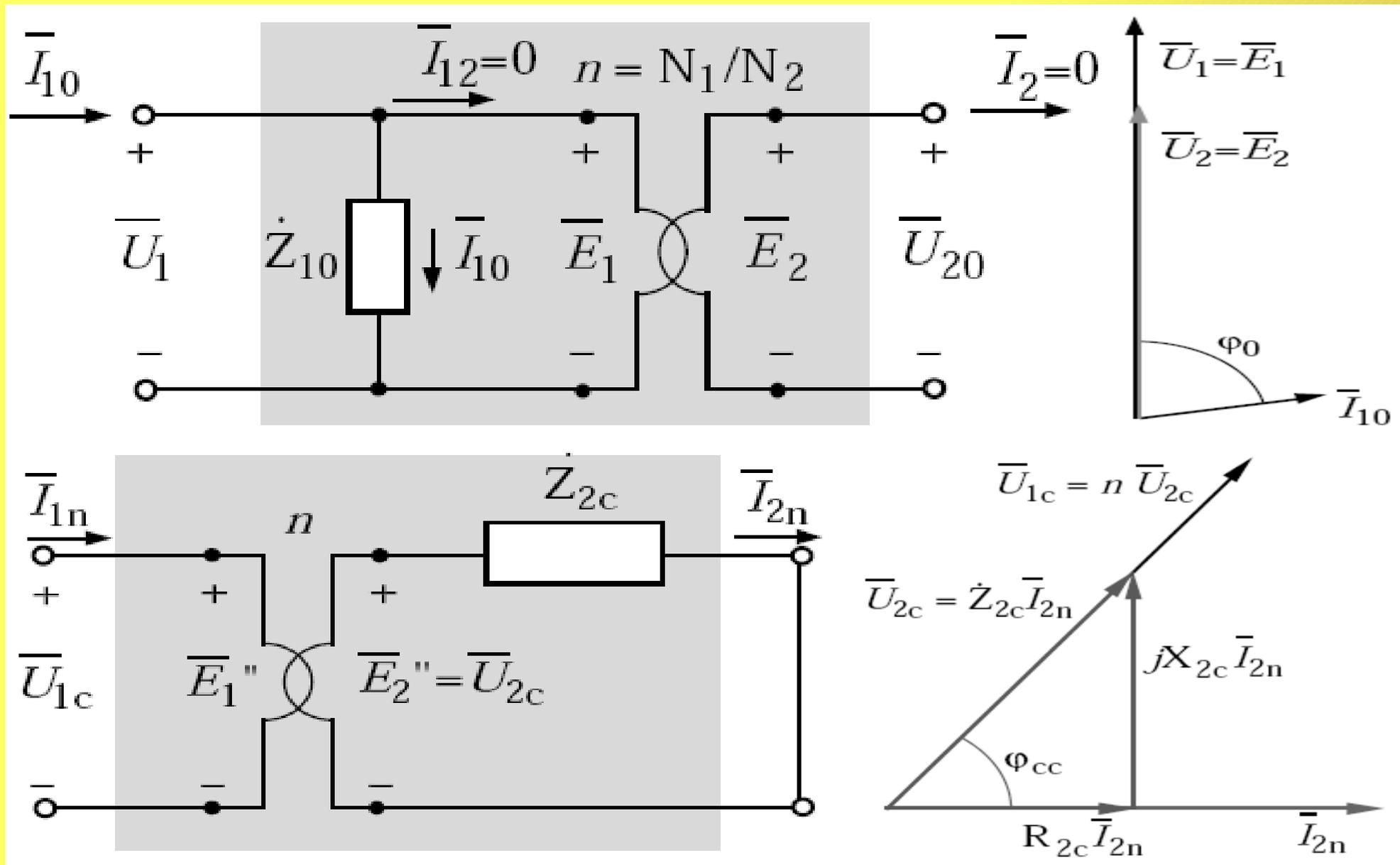
### II specie

$$P_{cc} \approx P_{cu} \quad Z_{2c} = \frac{1}{n^2} Z_{1c}$$

$$Z_{1c} = \frac{U_{1cc}}{I_{1n}} \quad \cos \phi_{cc} = \frac{P_{cc}}{U_{1cc} I_{1n}}$$

$$R_{1c} = \frac{P_{cc}}{I_{1n}^2} \quad X_{1c} = \sqrt{Z_{1c}^2 - R_{1c}^2}$$

## Funzionamento a vuoto e in corto circuito: diagrammi fasoriali





## Caduta di tensione da vuoto a carico

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = \overline{AD} \simeq \overline{AB} + \overline{BC} = I_2 (R_{2c} \cos \phi + X_{2c} \sin \phi)$$

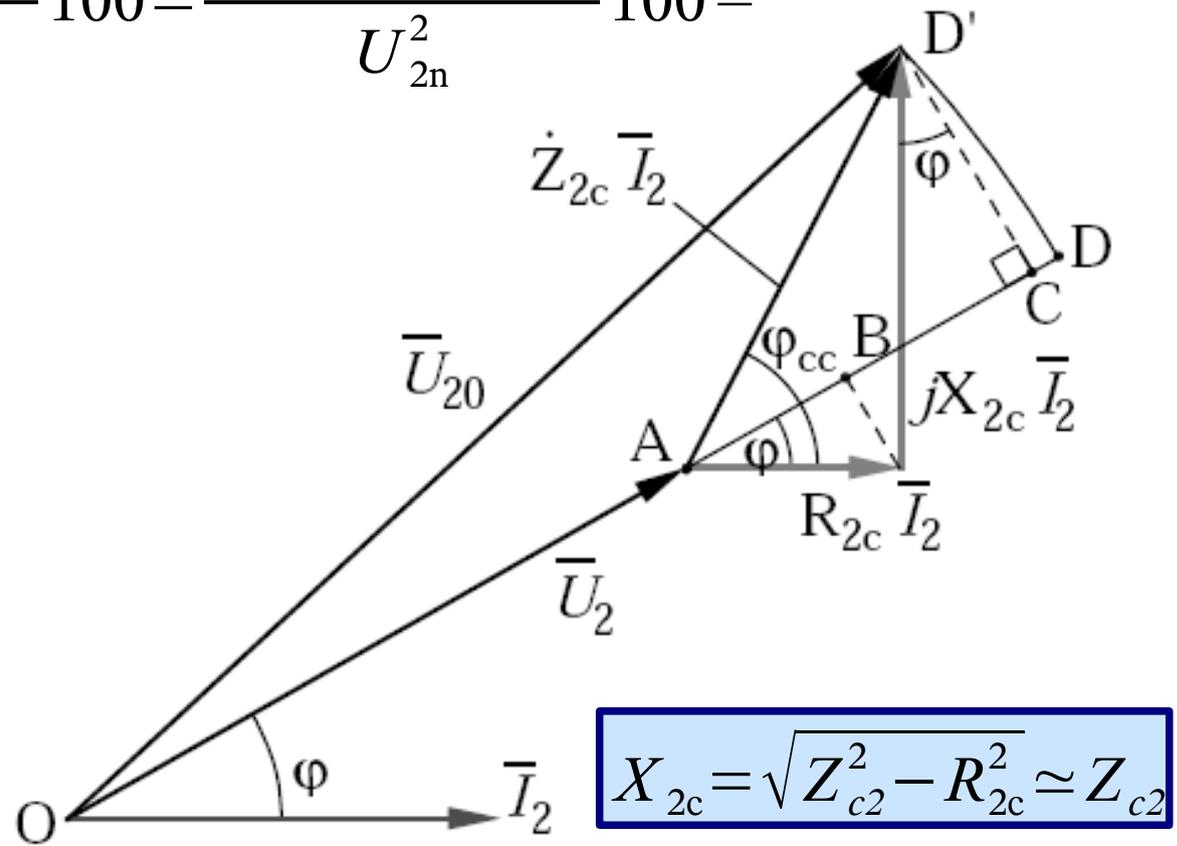
$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2n}} 100 = \frac{I_2 (R_{2c} \cos \phi + X_{2c} \sin \phi)}{U_{2n}} 100 =$$

$$= \frac{U_{2n} I_2 (R_{2c} \cos \phi + X_{2c} \sin \phi)}{U_{2n}^2} 100 = \frac{R_{2c} P_2 + X_{2c} Q_2}{U_{2n}^2} 100 =$$

$$= \frac{\left(\frac{P_{cc}}{I_{2n}^2}\right) P_2 + \left(\frac{U_{2cc}}{I_{2n}}\right) Q_2}{U_{2n}^2} 100 =$$

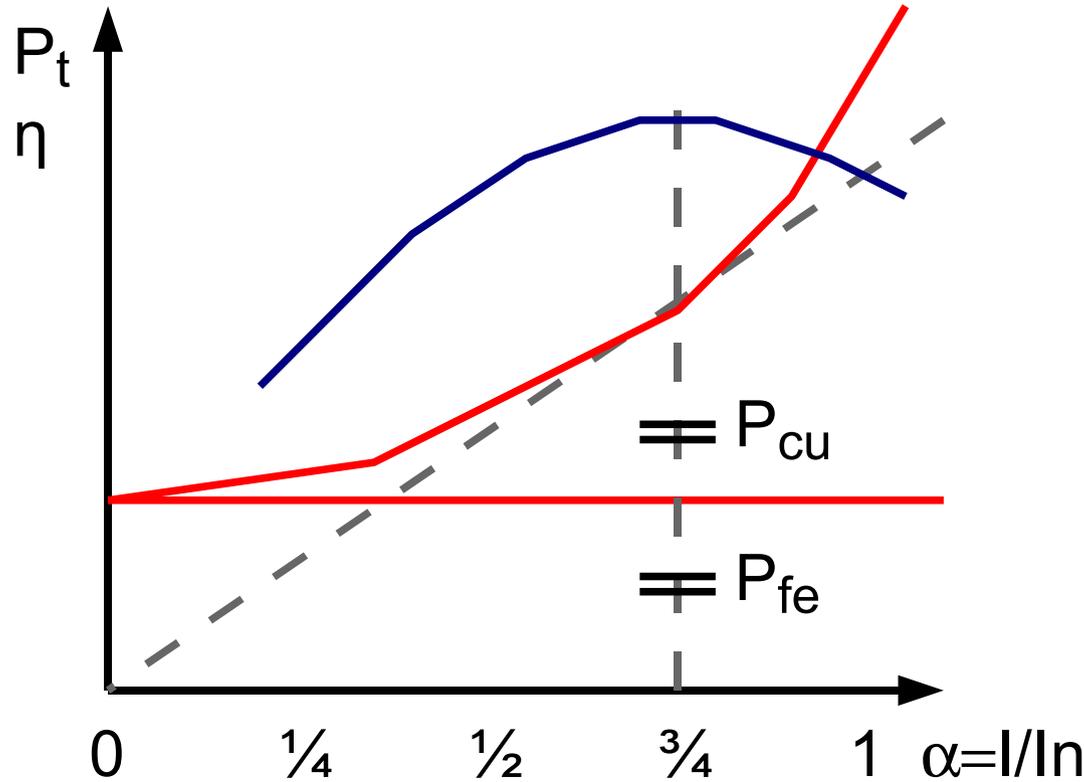
$$= \frac{\frac{P_{cc}}{U_{2n} I_{2n}} P_2 + \frac{U_{2cc}}{U_{2n}} Q_2}{U_{2n} I_{2n}} 100$$

$$\Delta U_{2\%} = \frac{P_{cc\%} P_2 + U_{cc\%} Q_2}{P_n}$$



$$X_{2c} = \sqrt{Z_{c2}^2 - R_{2c}^2} \simeq Z_{c2}$$

## Perdite e rendimento



$$P_t = P_{fe} + P_{cu}$$

Per  $U, f = \text{cost.} \Rightarrow P_{fe} = \text{cost.}$

$$P_{cu} = R_{2c} I_2^2 = R_{2c} \alpha^2 I_{2n}^2 = \alpha^2 P_{cc}$$

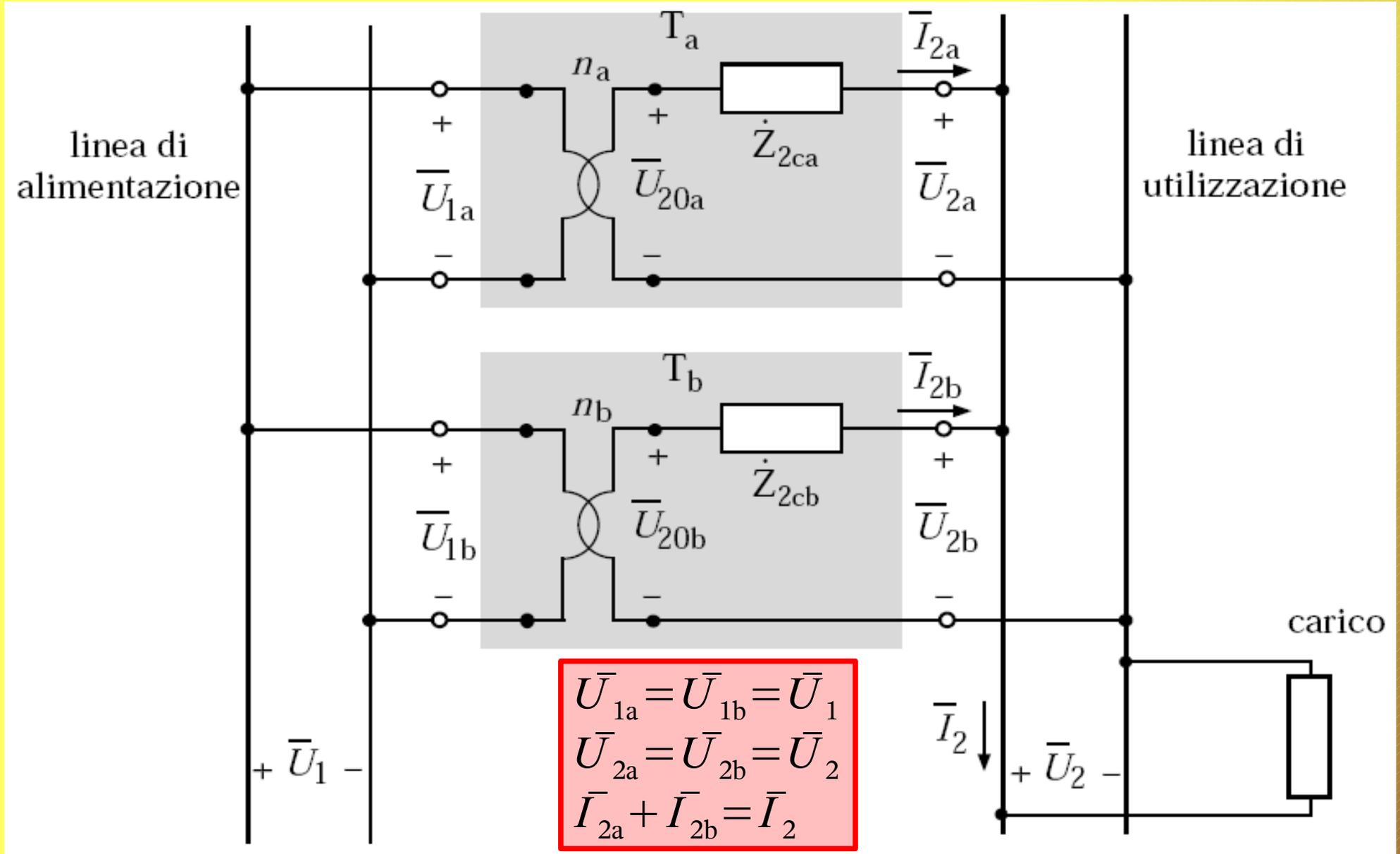
$$P_t = P_{fe} + \alpha^2 P_{cc}$$

Le  $P_t$  non dipendono dal  $\cos \phi$  del carico quindi è funzione della sola potenza apparente erogata, i.e.  $P_2 = U_2 I_2$

$$\eta = \frac{P_a - P_t}{P_a} = 1 - \frac{P_t}{P_r + P_t} \quad \text{con} \quad P_t = P_{fe} + \alpha^2 P_{cc} \quad \text{e} \quad P_r = \alpha P_n \cos \phi$$

Il rendimento dipende dal  $\cos \phi$  ed è massimo quando  $P_{fe} = \alpha^2 P_{cc}$

## Collegamento in parallelo



## Collegamento in parallelo: condizioni di funzionamento ottimali

Il funzionamento ottimale di due trasformatori in parallelo (i.e. di due trasformatori alimentati, lato primario, dalla stessa rete e, lato secondario, chiusi sullo stesso carico) si ha quando questi si comportano come se fossero un unico trasformatore che:

**in ogni condizione di lavoro presenta il massimo rendimento consentito dai due trasformatori**

ciò impone che in particolare a vuoto ( $I_2 = 0$ ) siano nulle anche le correnti erogate dai due trasformatori ( $I_{2a} = I_{2b} = 0$ ), onde evitare ingenti dissipazioni di potenza a fronte di una potenza assorbita dal carico identicamente nulla

**ha la potenza nominale massima uguale alla somma delle potenze nominali dei due trasformatori, i.e.  $P_n = P_{na} + P_{nb}$**

ciò impone che dovendo essere rispettata la

$$P_n = U_{2n} I_{2n} = U_{2na} I_{2na} + U_{2nb} I_{2nb} = U_{2n} ( I_{2na} + I_{2nb} )$$

si abbia  $I_{2n} = I_{2na} + I_{2nb}$  che è verificata se e soltanto se le correnti erogate dai due trasformatori sono in fase fra loro, e cioè.

$$I_{2na}^- = I_{2nb}^-$$

## Collegamento in parallelo: vincoli sui parametri

Il vincoli che devono essere soddisfatti dai parametri affinché risultino rispettate le due condizioni di funzionamento ottimale in parallelo sono:

### per la prima condizione

imponendo l'equilibrio delle tensioni ai secondari dei due TR si ha

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_2 &= \bar{U}_{20a} - Z_{2ca} \bar{I}_{2a} \\ \bar{U}_2 &= \bar{U}_{20b} - Z_{2cb} \bar{I}_{2b} \end{aligned} \right\} \bar{U}_{20a} - Z_{2ca} \bar{I}_{2a} = \bar{U}_{20b} - Z_{2cb} \bar{I}_{2b}$$

posto  $\bar{I}_{2a} = \bar{I}_{2b} = 0$  si ricava  $\bar{U}_{20a} - \bar{U}_{20b} = 0$ .

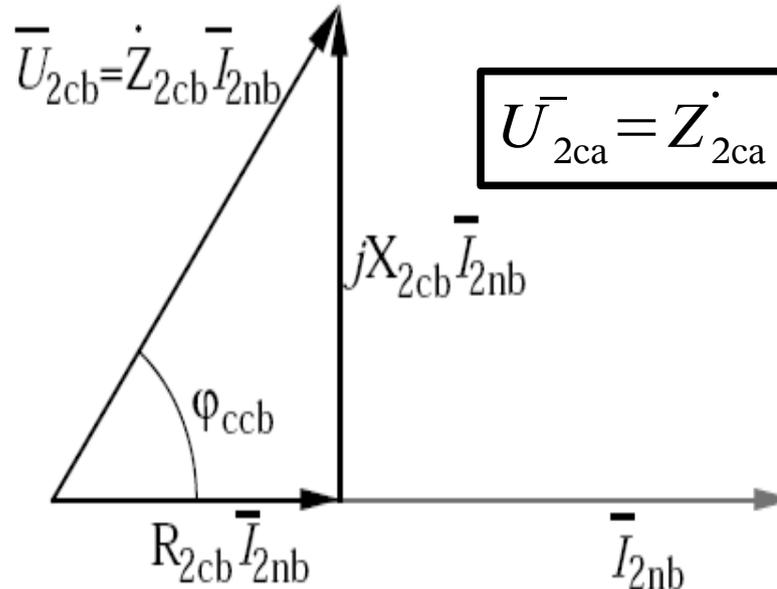
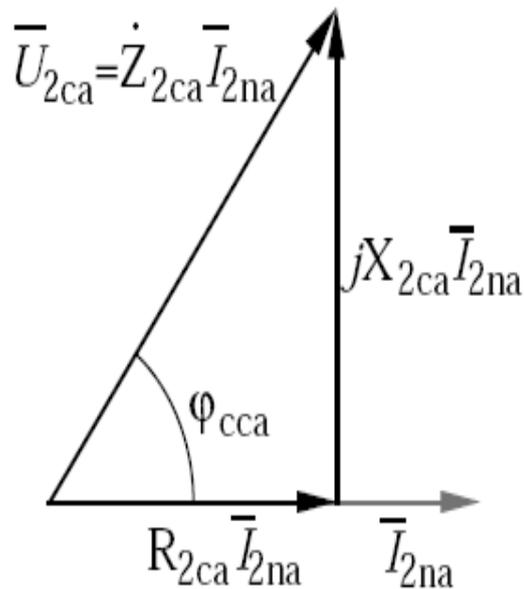
Ricordando che la tensione lato primario è uguale per i due TR si ottiene

$$n_a = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_{20a}} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_{20b}} = n_b$$

Cioè i due TR devono avere lo stesso rapporto di trasformazione ed i loro morsetti devono essere collegati in modo tale che le tensioni devono essere in fase.

## Collegamento in parallelo: vincoli sui parametri

### per la seconda condizione



$$\bar{U}_{2ca} = \bar{Z}_{2ca} \bar{I}_{2na} = \bar{Z}_{2cb} \bar{I}_{2nb} = \bar{U}_{2cb}$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_{20} - \bar{Z}_{2ca} \bar{I}_{2a}$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_{20} - \bar{Z}_{2cb} \bar{I}_{2b}$$

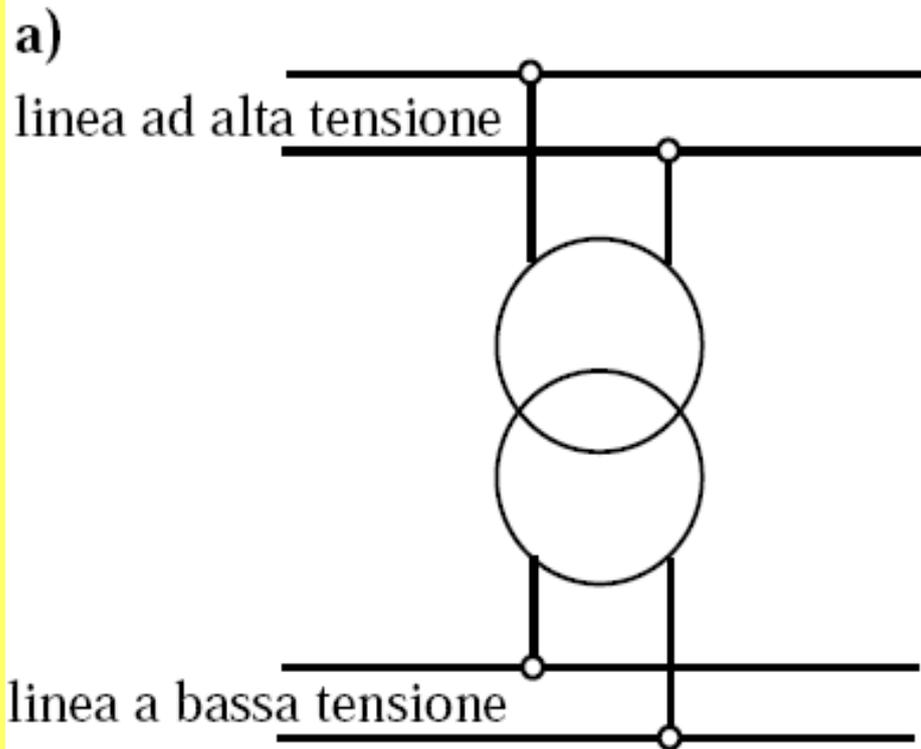
$$\frac{\bar{Z}_{2ca}}{\bar{Z}_{2cb}} = \frac{\bar{I}_{2nb}}{\bar{I}_{2na}} = \frac{I_{2nb}}{I_{2na}} = \frac{I_{2nb} U_{2n}}{I_{2na} U_{2n}}$$

$$\frac{\bar{Z}_{2ca} \bar{I}_{2na}}{U_{2n}} = \frac{\bar{Z}_{2cb} \bar{I}_{2nb}}{U_{2n}}$$

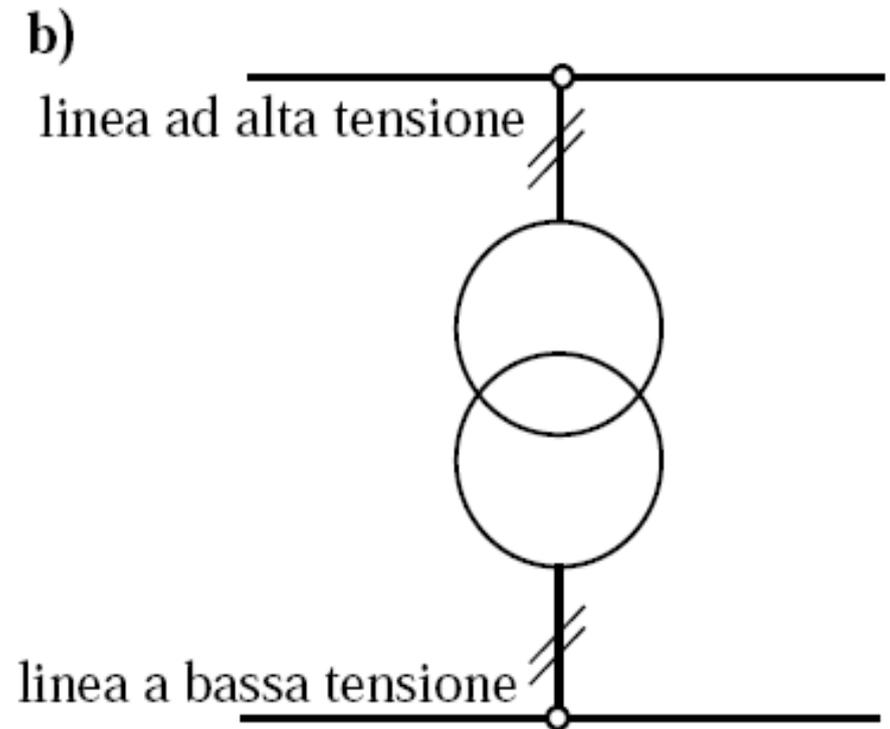
$$U_{ca\%} = U_{cb\%}$$

$$U_{ca\%} = U_{cb\%} \quad \text{e} \quad \cos \phi_{ca} = \cos \phi_{cb}$$

## Simboli grafici



Simbolo impiegato negli schemi bifilari dove sono mostrati entrambi i conduttori che fanno parte delle linee.



Simbolo impiegato negli schemi unifilari nei quali le linee elettriche sono ricondotte ad un unico tratto sul quale sono indicati il numero ed il tipo di conduttori che ne fanno parte.

Targa

## Officine Elettriche Anonime Boara Pisani (Padova)



TRASFORMATORE

MONOFASE

N.

3827

anno

1999

$f_n$

50 Hz

$P_n$

100 kVA

$u_{cc}\%$

4 %

$U_{1n}$

10 kV

$\cos\varphi_{cc}$

0,2

$U_{2n}$

220 V

tipo

O.N.A.N.

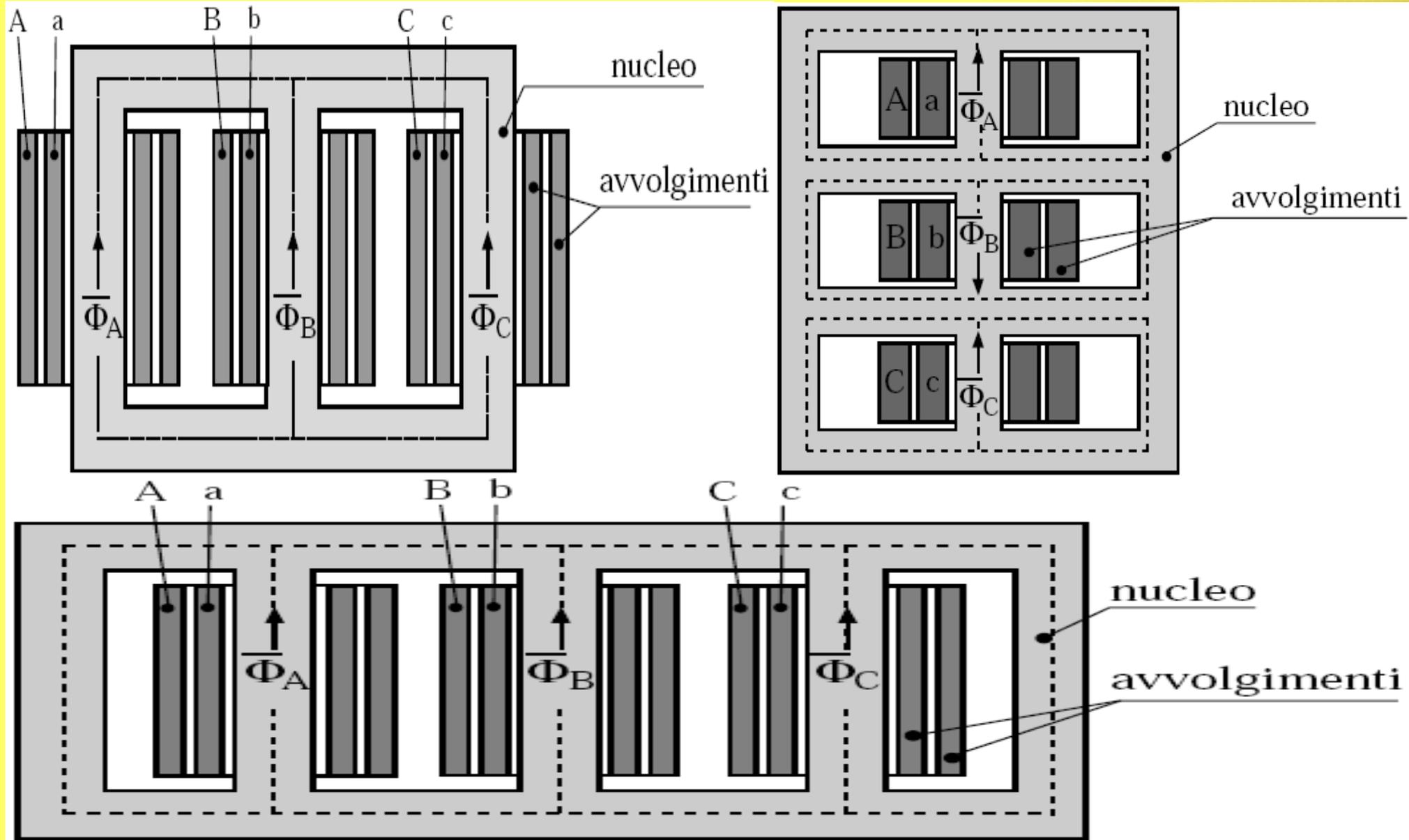
peso

800 kg

servizio

continuo

## Cenni costruttivi



## Cenni costruttivi: trasformatore in olio a perdite normali raffreddamento ONAN



$$\frac{U_{1n}}{U_{20}} = \frac{20000}{400} V$$

$$P_n = 630 \text{ kVA}$$

$$P_{fe} = 1470 \text{ W}$$

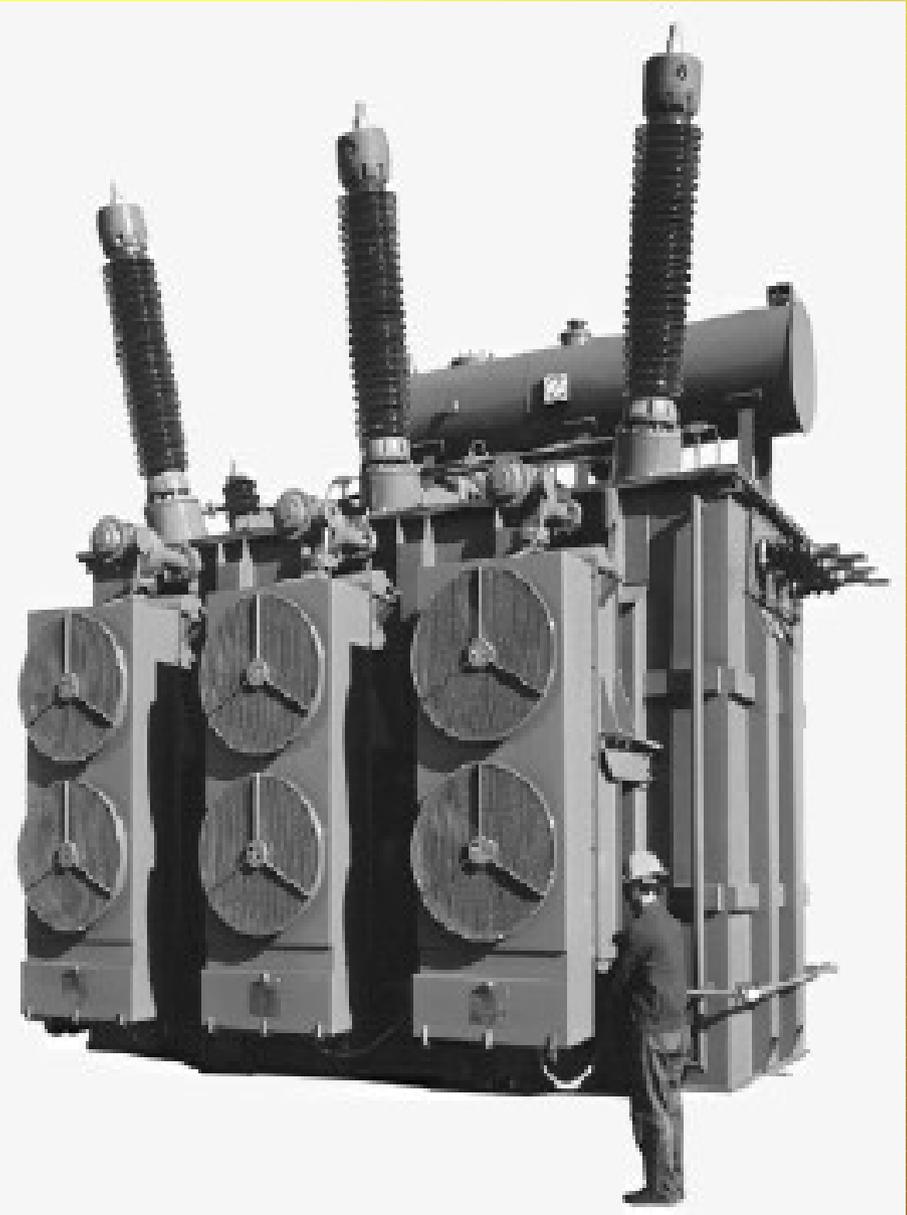
$$I_{0\%} = 1.30$$

$$P_{cc} = 10000 \text{ W}$$

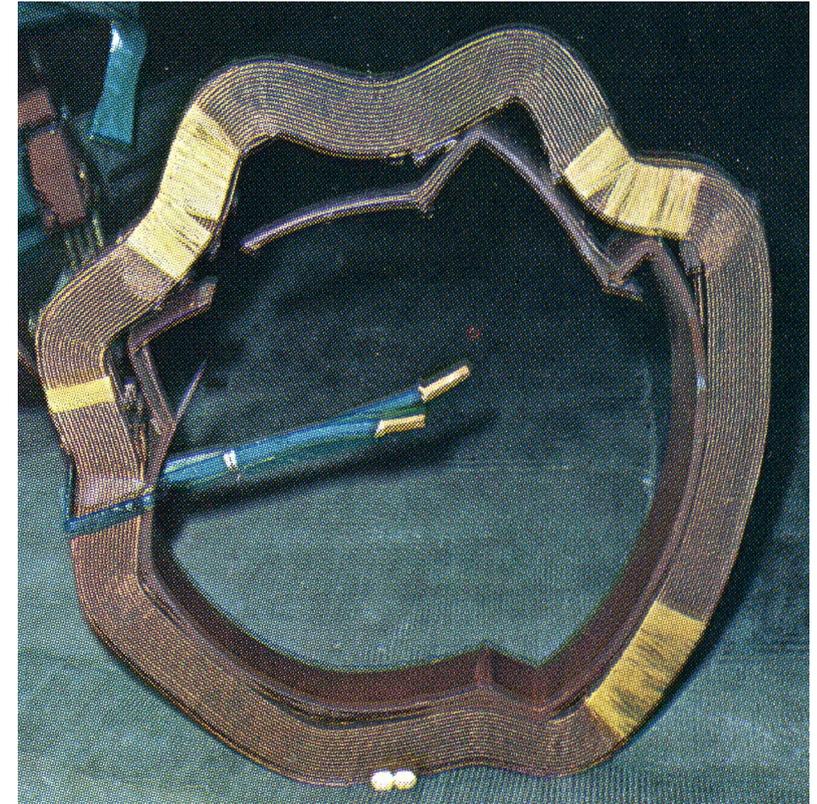
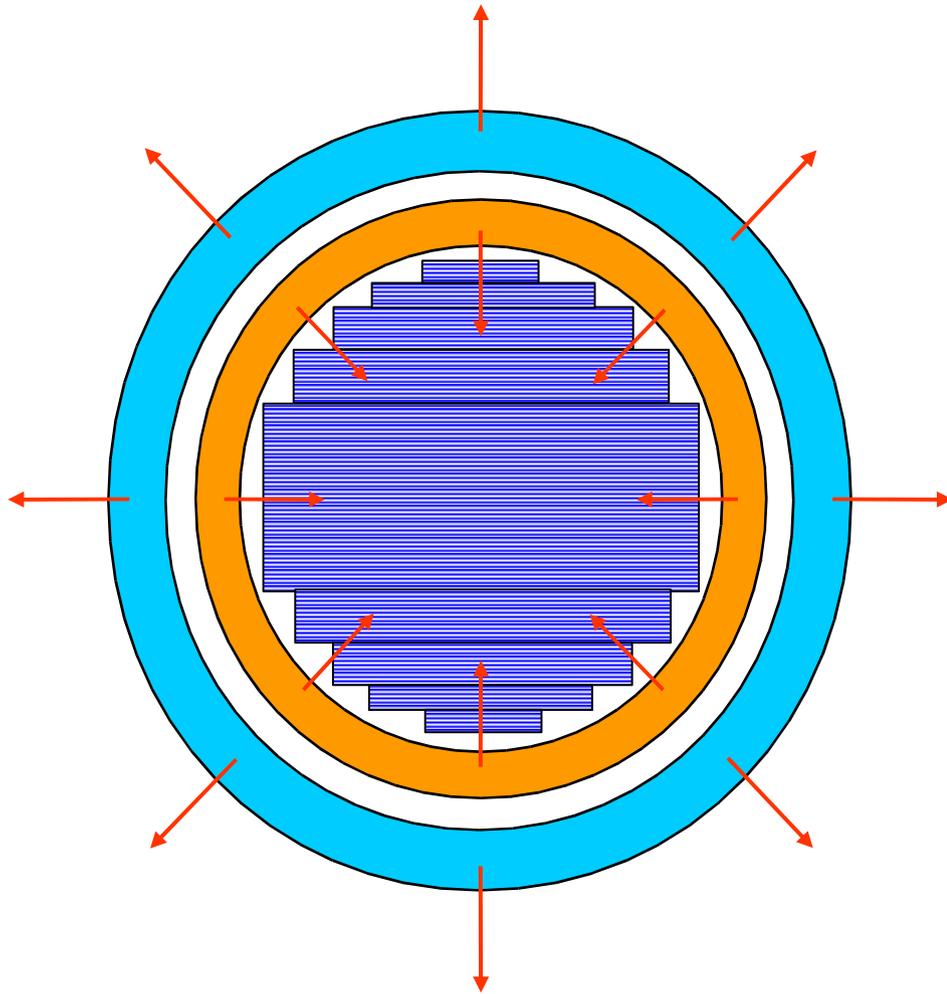
$$U_{cc\%} = 4$$

$$\Delta U_{\%} = 3.03$$

## Cenni costruttivi: trasformatori di grande potenza



## Cenni “distruttivi”: sforzi elettrodinamici negli avvolgimenti



*Cenni “distruttivi”: danni agli avvolgimenti prodotti dalle correnti di guasto*



## Cenni “distruttivi”: incendio trasformatore di stazione



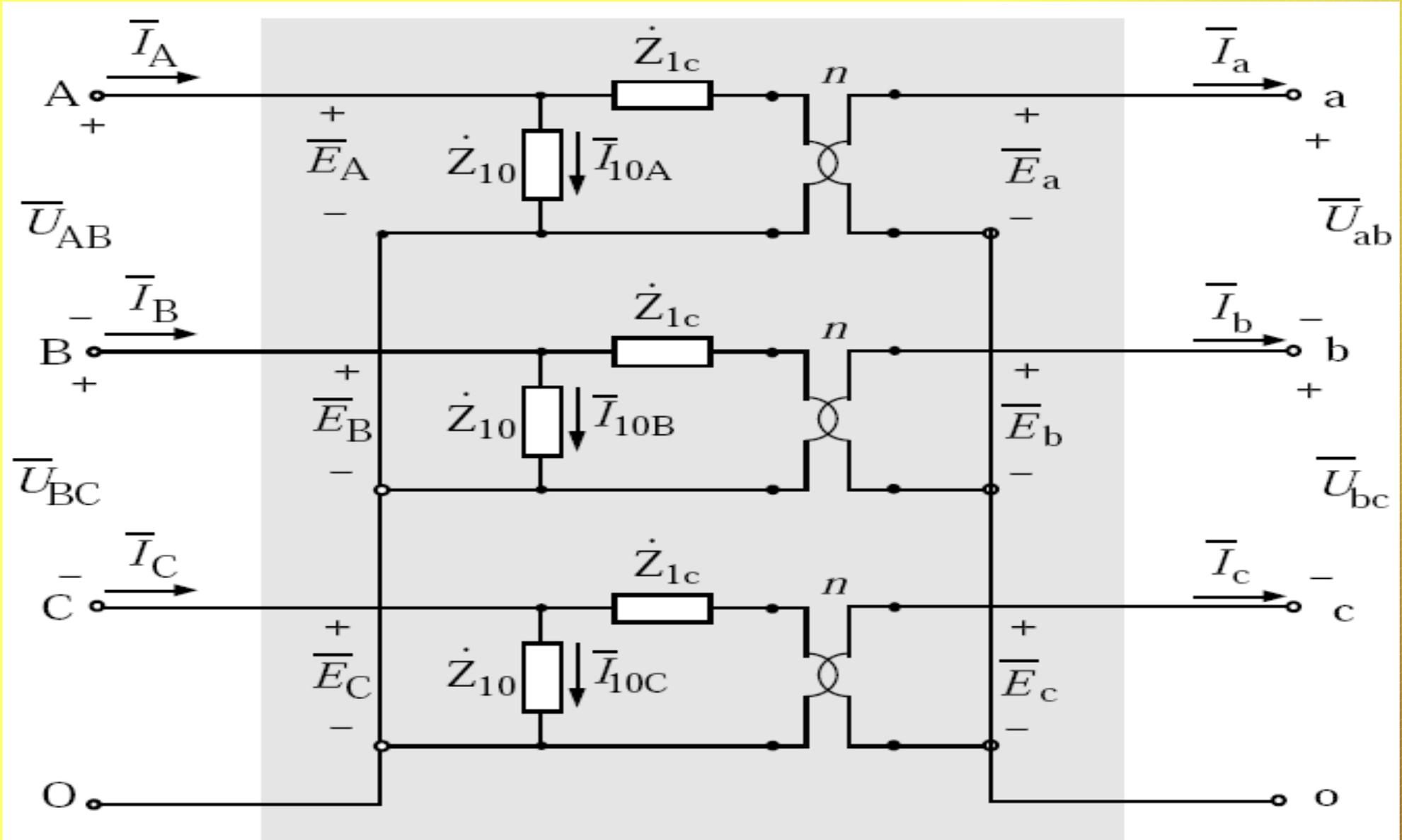
## Cenni “distruttivi”: incendio trasformatore di stazione



## Cenni “distruttivi”: incendio trasformatore di stazione



Schema equivalente: primario e secondario collegati ad Y (neutro accessibile)



## *Collegamento e gruppo (o indice orario): definizione*

Gli avvolgimenti primari e secondari dei trasformatori possono essere collegati a **stella** (con neutro accessibile o meno), a **triangolo** o a **zig-zag** (*questi ultimi in genere per trasformatori di non elevata potenza*).

La scelta dei collegamenti dipende da considerazioni di esercizio (e.g., *il collegamento a triangolo lato MT impedisce che un eventuale squilibrio dei carichi lato BT si ripercuota sulla rete di media tensione, mentre il collegamento a stella lato BT consente di distribuire il neutro, rende quindi accessibile la tensione di fase dell'impianto trifase ai carichi monofase*) e da scelte economiche (e.g., *un avvolgimento collegato a triangolo ha un costo superiore rispetto ad un avvolgimento collegato a stella, perché hanno conduttori di diametro minore ma necessitano di un maggior numero di spire*).

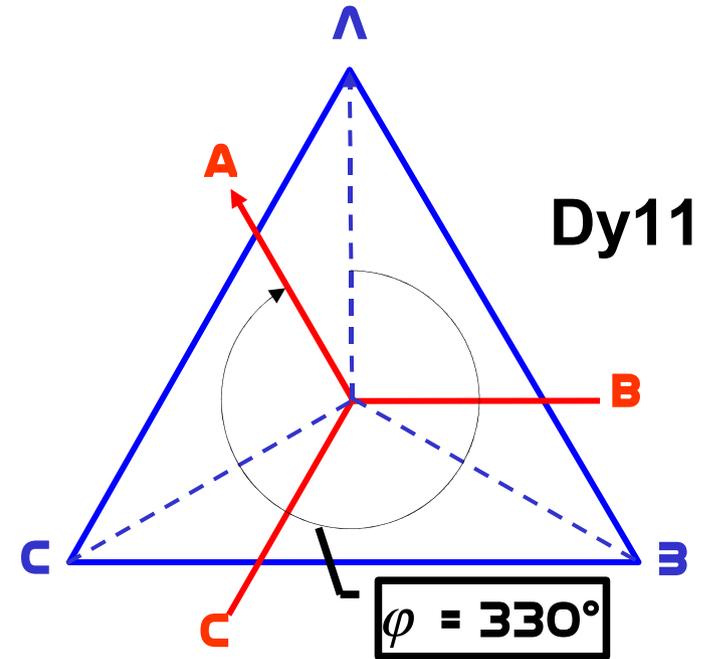
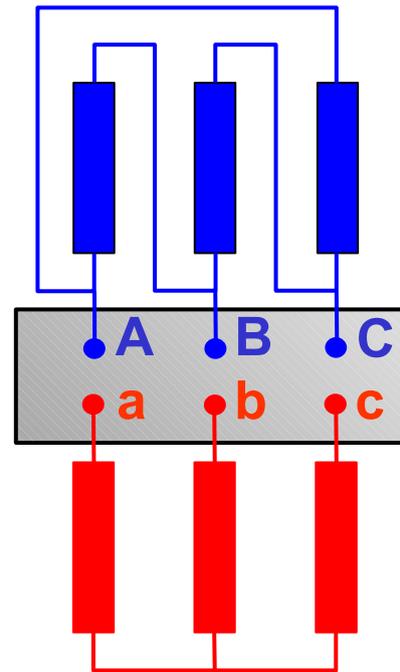
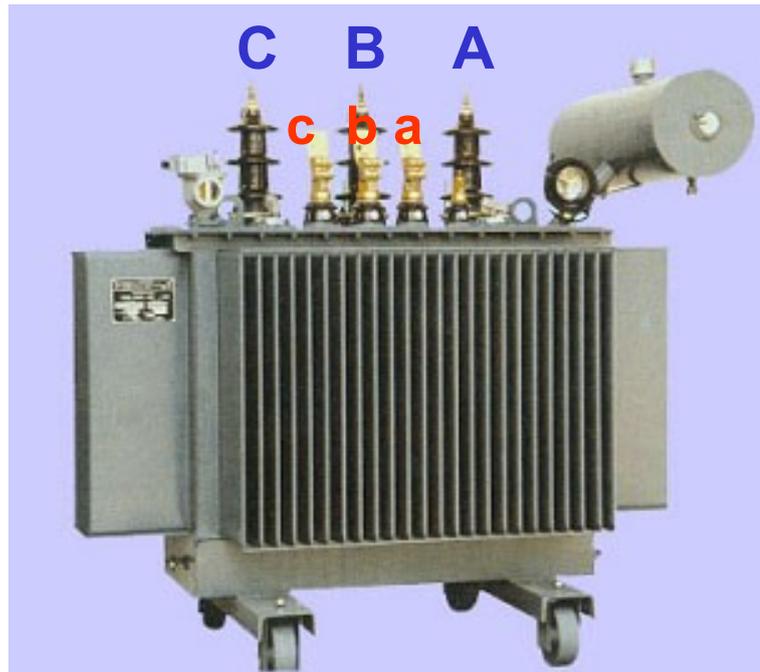
Nei trasformatori trifase la terna delle tensioni di fase secondarie può essere sfasata rispetto alla terna delle tensioni di fase primarie. Questo sfasamento, legato alla modalità di interconnessioni degli avvolgimenti ai morsetti accessibili del trasformatore, si esprime mediante il **gruppo**.

## Collegamento e gruppo (o indice orario): definizione

**Triangolo** : **D** (alta tensione)      **d** (bassa tensione)  
**Stella** : **Y** (alta tensione)      **y** (bassa tensione)  
**Zig-Zag** : **Z** (alta tensione)      **z** (bassa tensione)

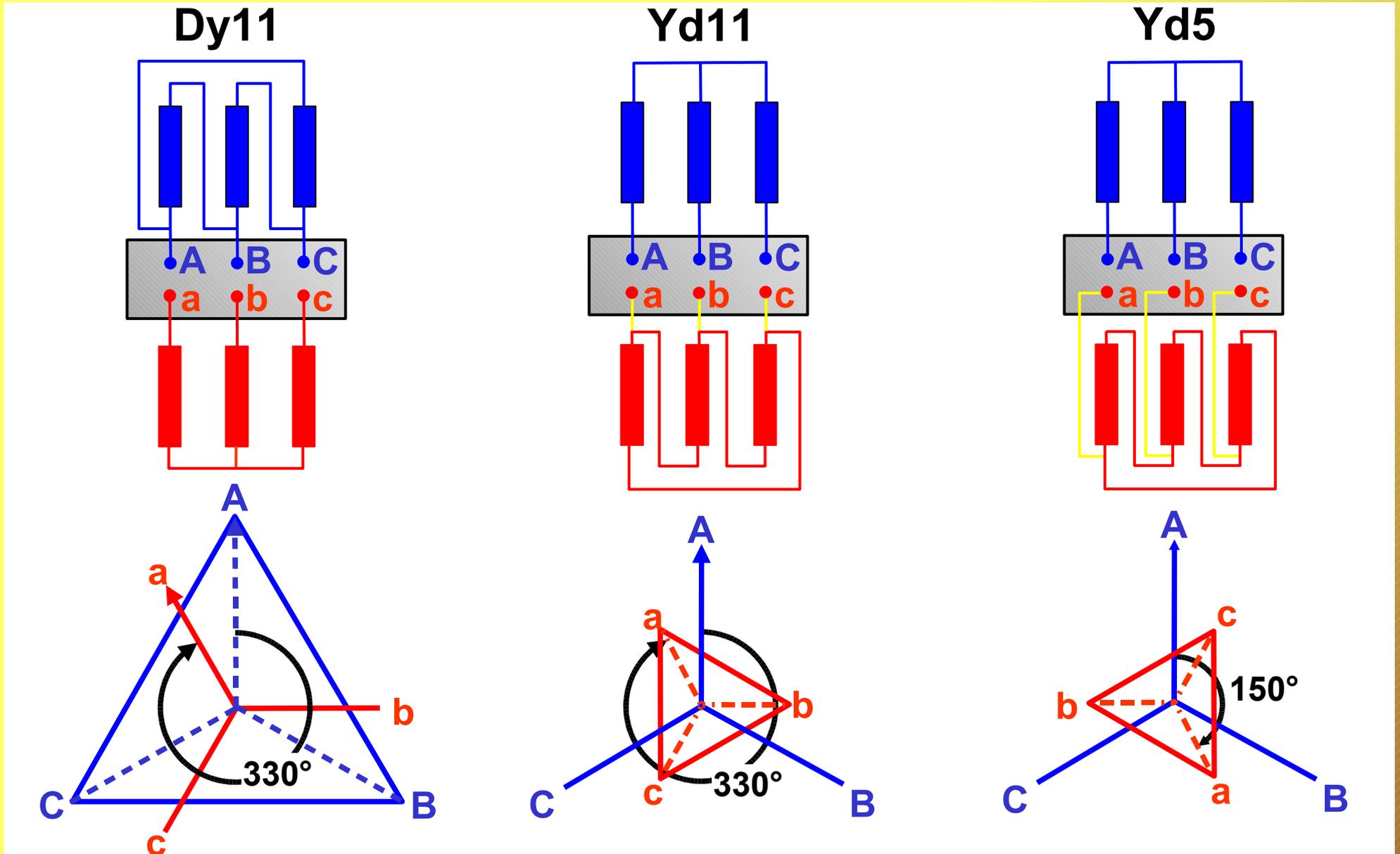
$\phi$  = ritardo della tensione di fase BT rispetto alla tensione di fase AT

**Morsetti**      **AT: A B C**      **BT: a b c**

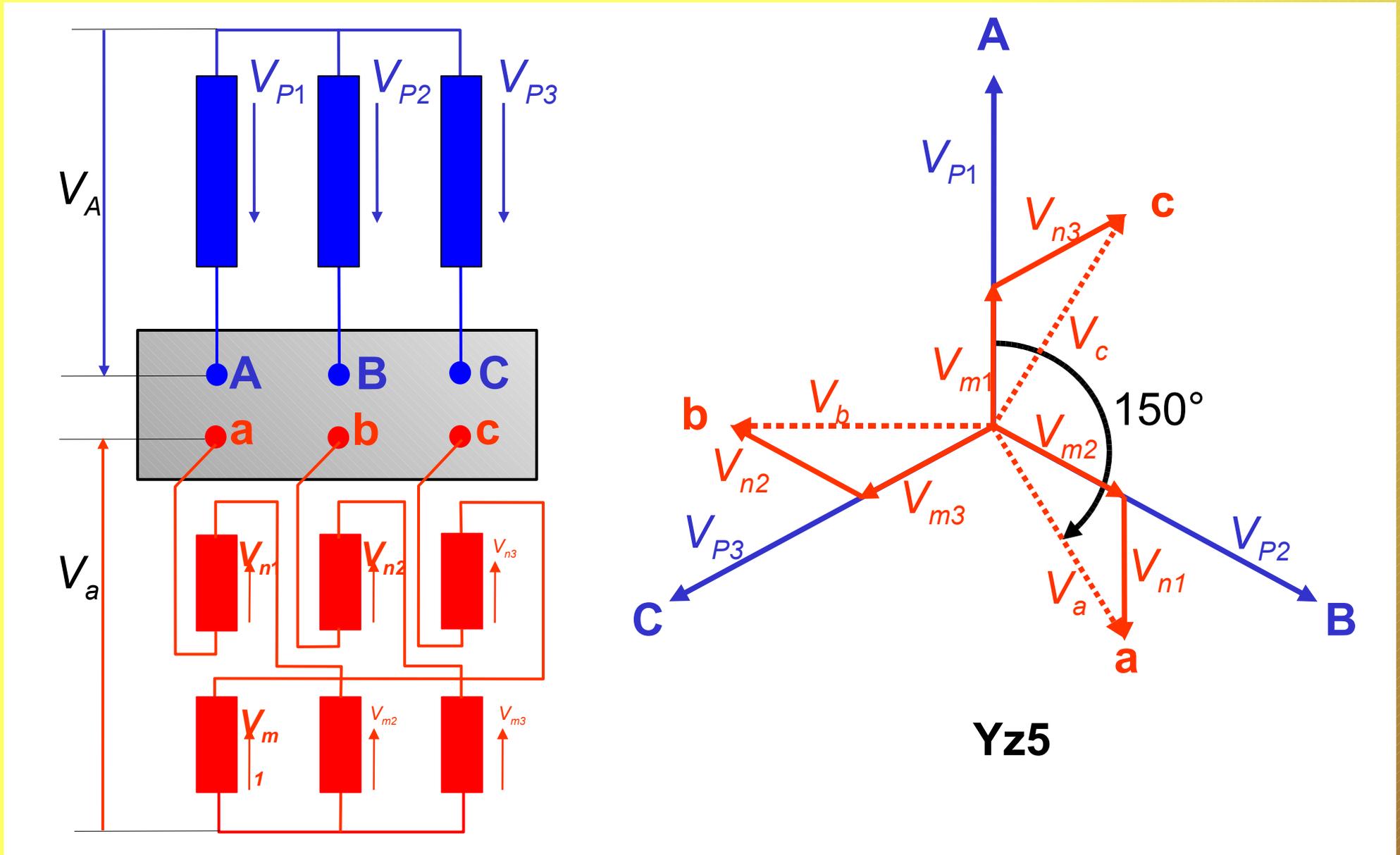


1 <sup>a</sup> lettera	2 <sup>a</sup> lettera	3 <sup>a</sup> lettera
Colleg. fasi AT	Colleg. fasi BT	$\phi / 30$

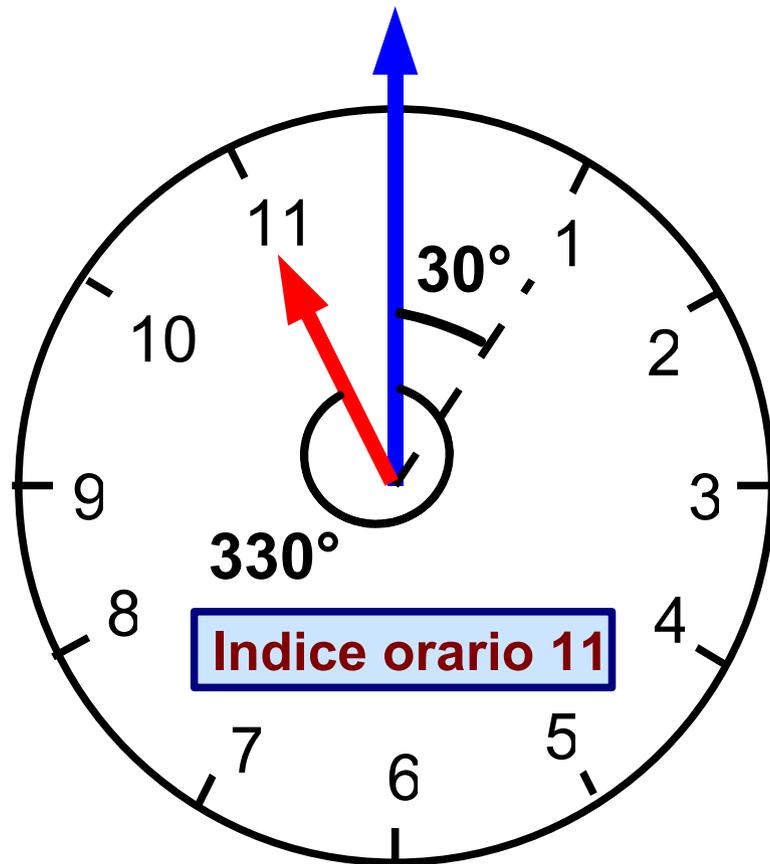
## Collegamento e gruppo (o indice orario): esempi



## Collegamento e gruppo (o indice orario): esempi



## Gruppo (o indice orario), rapporto di trasformazione e rapporto spire



Collegamento	Yy	$k_T = \frac{N_1}{N_2}$
Collegamento	Dd	$k_T = \frac{N_1}{N_2}$
Collegamento	Yd	$k_T = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
Collegamento	Dy	$k_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
Collegamento	Yz	$k_T = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$

### Gruppo (o indice orario)

**Collegamenti Yy e Dd**

0

2

4

6

8

10

**Collegamenti Yd e Dy**

1

~~3~~

5

7

~~9~~

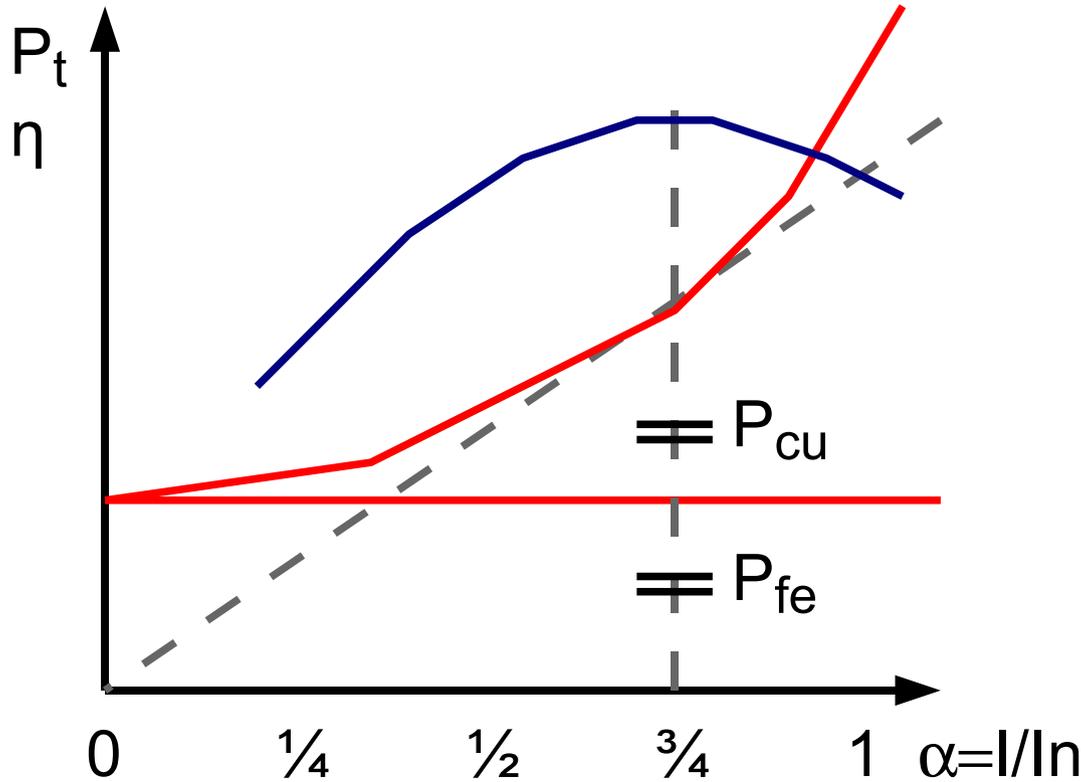
11

## Collegamento in parallelo: vincoli sui parametri

L'impiego di trasformatori in parallelo consente di ripartire la potenza richiesta dai carichi in modo tale da ottimizzare il rendimento dell'impianto (e.g., in considerazione di cicli produttivi caratterizzati da diagrammi di carico variabili) e/o costituire una riserva in caso di guasto (anche se in questo caso è preferibile, per ragioni economiche, di ingombri e funzionali, una riserva “fredda” anziché “calda”) di una macchina o di futuri ampliamenti dell'impianto. Le condizioni che devono essere soddisfatte, **per i trasformatori trifase**, sono **TRE**:

- 1) devono avere lo stesso rapporto di trasformazione,  $k_T$ ;
- 2) devono avere uguali sia le tensioni di corto circuito percentuali,  $U_{cc}\%$ , che i f.d.p. di corto circuito,  $\cos \phi_{cc}$ ;
- 3) **devono appartenere allo stesso gruppo (i.e., non ci devono essere sfasamenti fra le tensioni delle fasi che vengono collegate, in caso contrario potrebbero circolare correnti dello stesso ordine di grandezza delle correnti di corto circuito).**

## Perdite e rendimento



$$P_t = P_{fe} + P_{cu}$$

Per  $U, f = \text{cost.} \Rightarrow P_{fe} = \text{cost.}$

$$P_{cu} = 3 R_{2c} I_2^2 = 3 R_{2c} \alpha^2 I_{2n}^2 = \alpha^2 P_{cc}$$

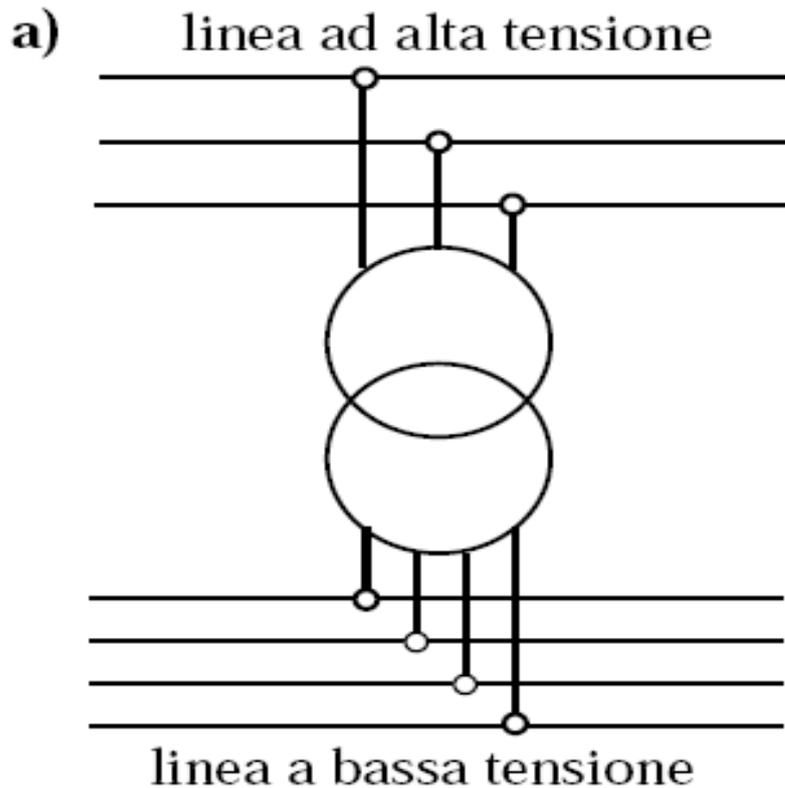
$$P_t = P_{fe} + \alpha^2 P_{cc}$$

Le  $P_t$  non dipendono dal  $\cos \phi$  del carico quindi è funzione della sola potenza apparente erogata, i.e.  $P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2$

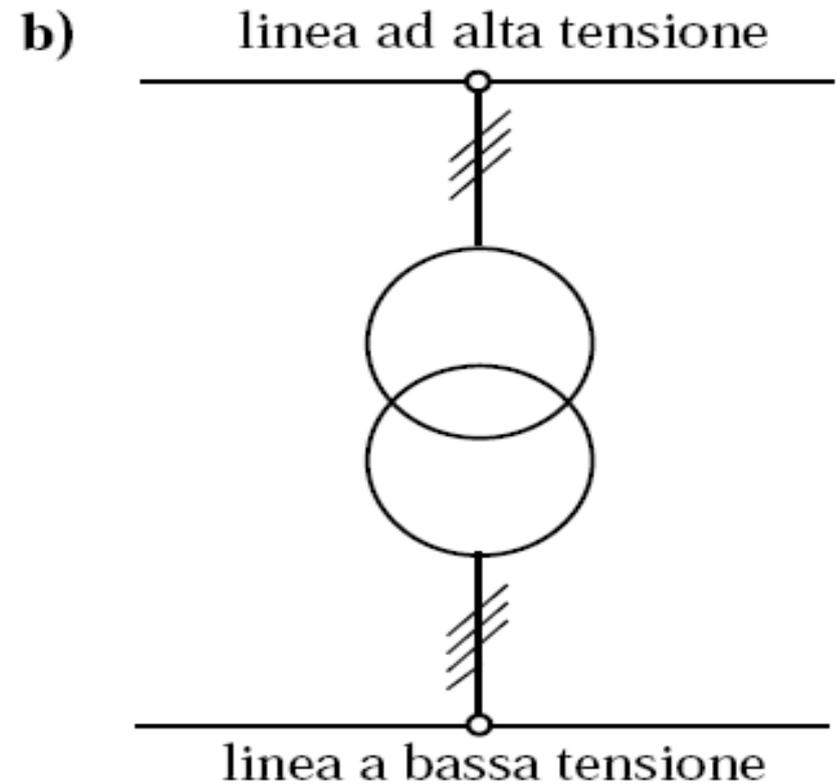
$$\eta = \frac{P_a - P_t}{P_a} = 1 - \frac{P_t}{P_r + P_t} \quad \text{con} \quad P_t = P_{fe} + \alpha^2 P_{cc} \quad \text{e} \quad P_r = \alpha P_n \cos \phi$$

Il rendimento dipende dal  $\cos \phi$  ed è massimo quando  $P_{fe} = \alpha^2 P_{cc}$

## Simboli grafici



Simbolo impiegato negli schemi multifilari dove sono mostrati tutti i conduttori che fanno parte delle linee (i.e., le tre fasi ed il neutro).



Simbolo impiegato negli schemi unifilari nei quali le linee elettriche sono ricondotte ad un unico tratto sul quale sono indicati il numero ed il tipo di conduttori che ne fanno parte.

## Targa

**Elettromeccanica Friulana**  
 Palazzolo dello Stella (Udine) 

**TRASFORMATORE**

**TRIFASE**

**N.**

**5671**

**anno**

**1999**

**$f_n$**

**50 Hz**

**collegamento**

**$\Delta/y$**

**gruppo**

**5**

**$P_n$**

**500 kVA**

**$u_{cc}\%$**

**4 %**

**$U_{1n}$**

**10 kV**

**$\cos\varphi_{cc}$**

**0,2**

**$U_{2n}$**

**400 V**

**tipo**

**O.N.A.N.**

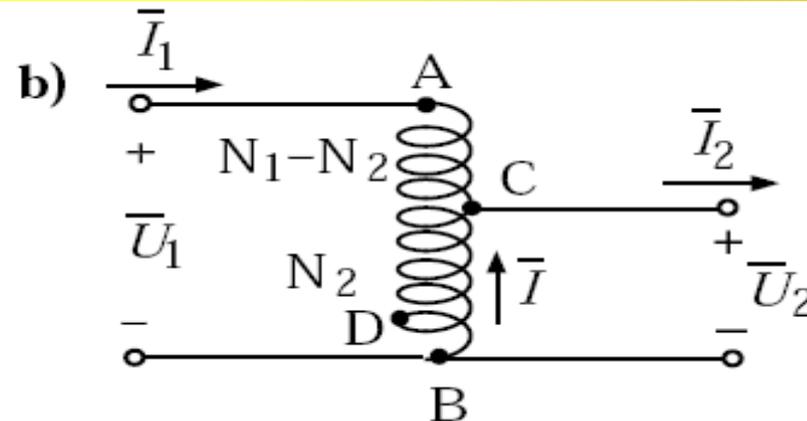
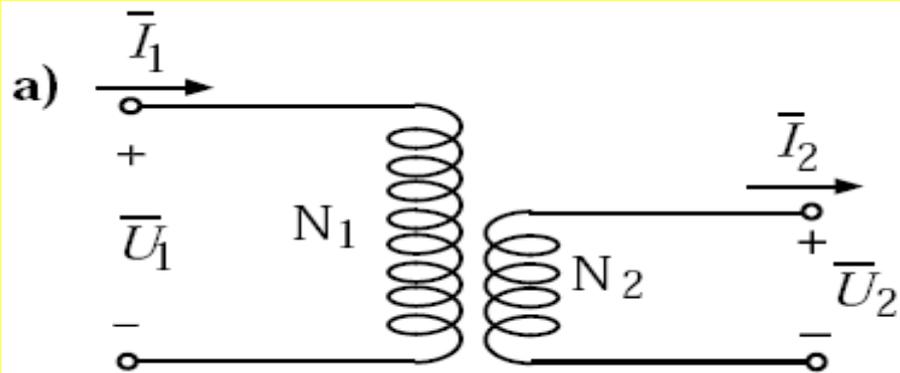
**peso**

**1600 kg**

**servizio**

**continuo**

## Autotrasformatori



$P_{an}$  = Potenza nominale o passante

$P_{dn}$  = Potenza di dimensionamento

$$P_{an} = P_{dn} = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n}$$

$$P_{an} = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n}$$

$$P_{dn} = (U_{1n} - U_{2n}) I_{1n} =$$

$$= U_{1n} I_{1n} - U_{2n} I_{1n}$$

$$\frac{P_{dn}}{P_{an}} = \frac{U_{1n} I_{1n} - U_{2n} I_{1n}}{U_{1n} I_{1n}} = \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{1n}} = k_r$$

$k_r$  1:2 (50% riparmio)  
 1:3 (60% riparmio - limite massimo)

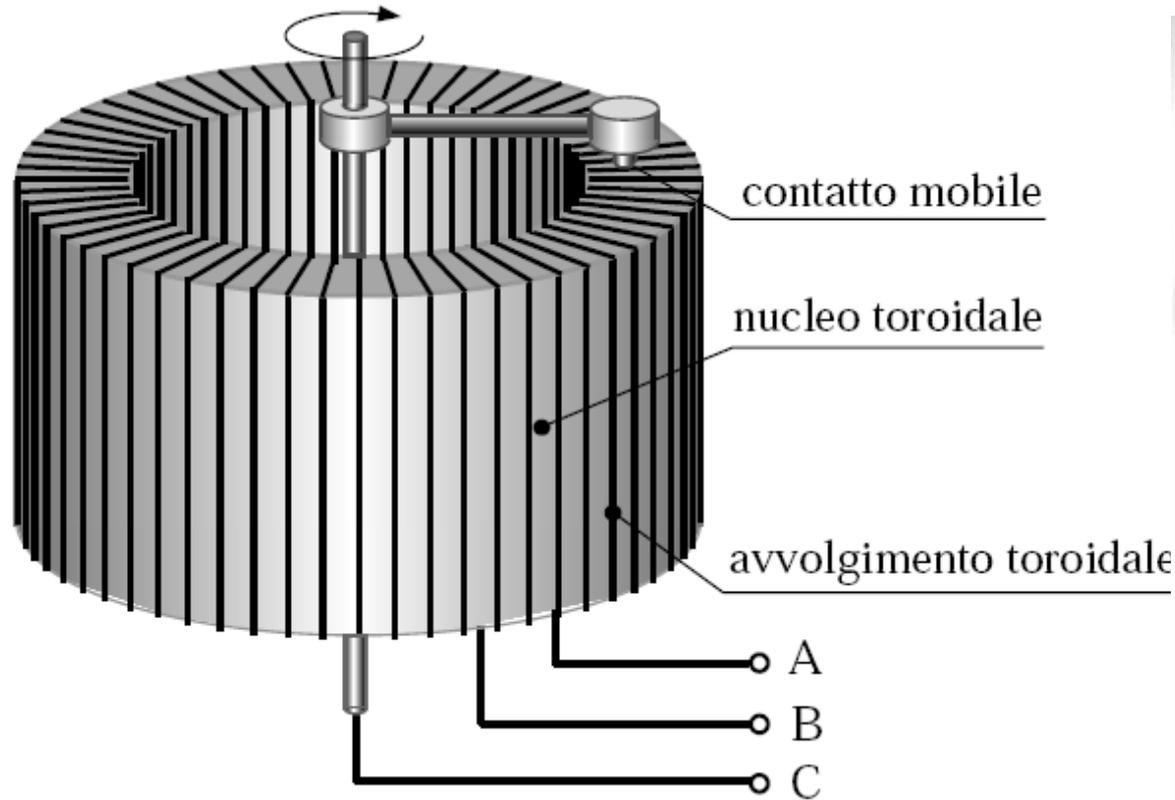
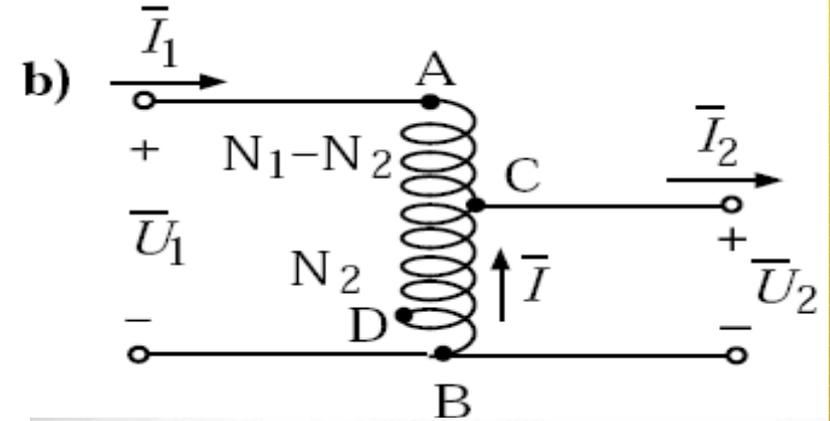
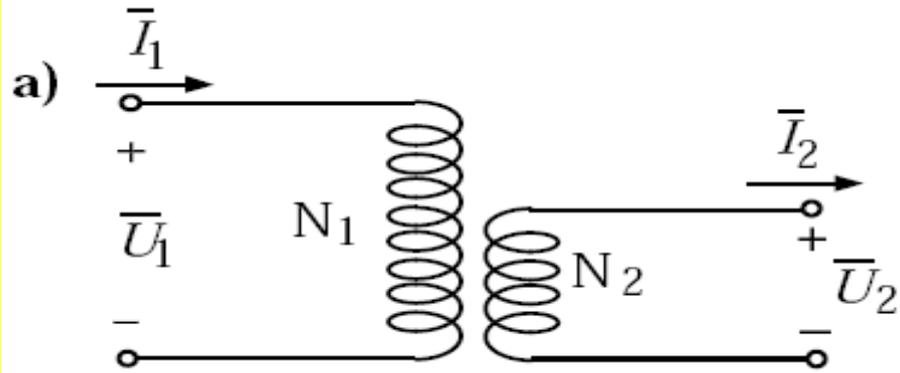
$$P_{dn} < P_{an}$$

$$P_{dn} = U_{2n} (I_{2n} - I_{1n}) =$$

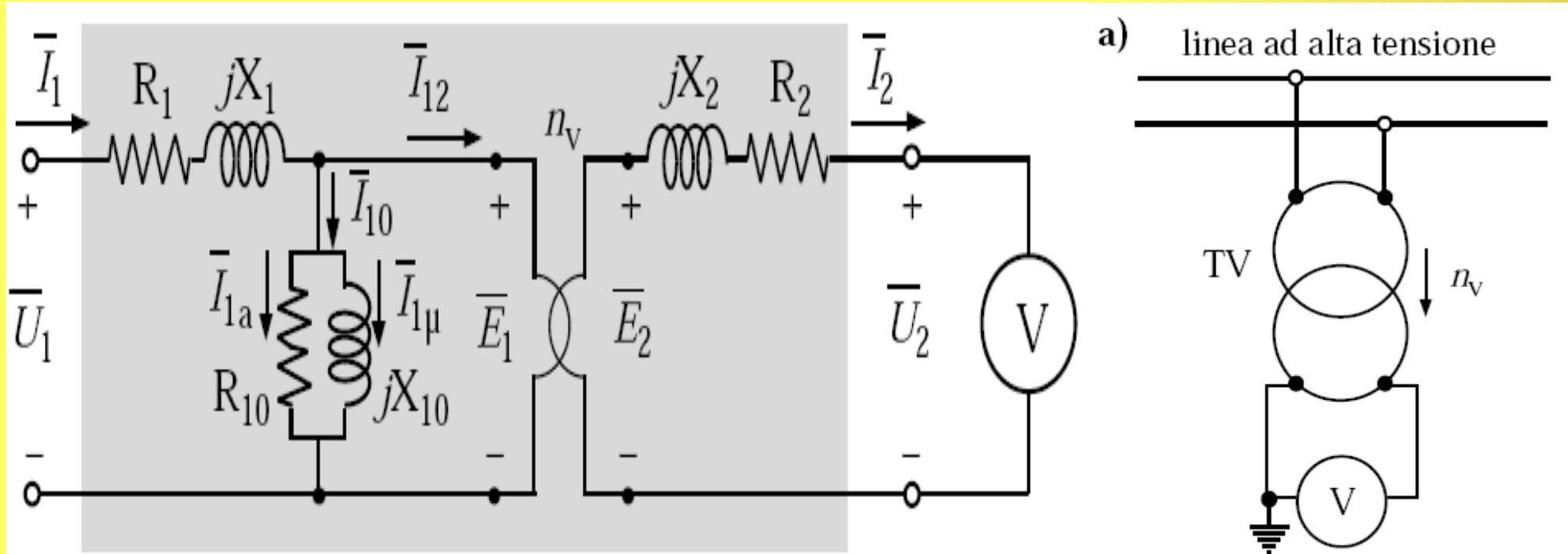
$$= U_{2n} I_{2n} - U_{2n} I_{1n}$$

$$P_{dn} < P_{an}$$

## Autotrasformatori



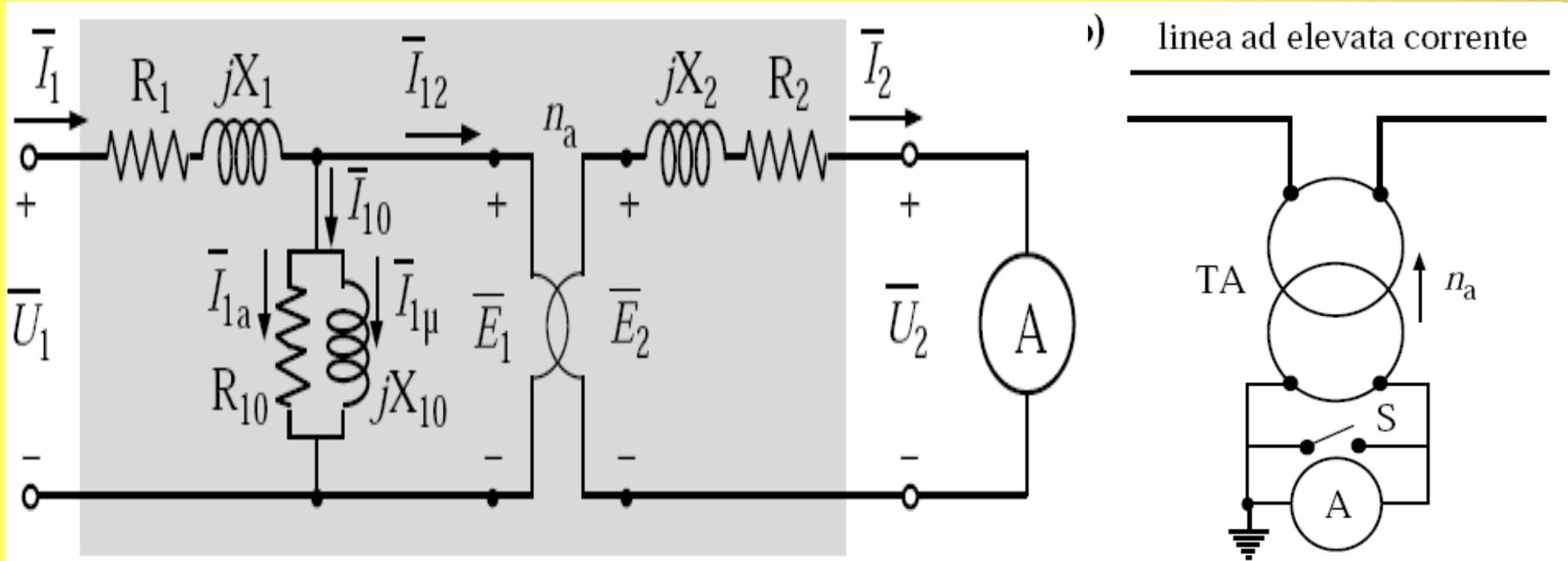
## Trasformatori di misura: trasformatori di tensione (TV)



Nuclei ferromagnetici di elevata sezione per lavorare lontano dalla saturazione e per ridurre le perdite.

$U_{cc\%}$             ridottissima  
 $Z_{cc}$              molto piccola  
 50-100 V        fondo scala

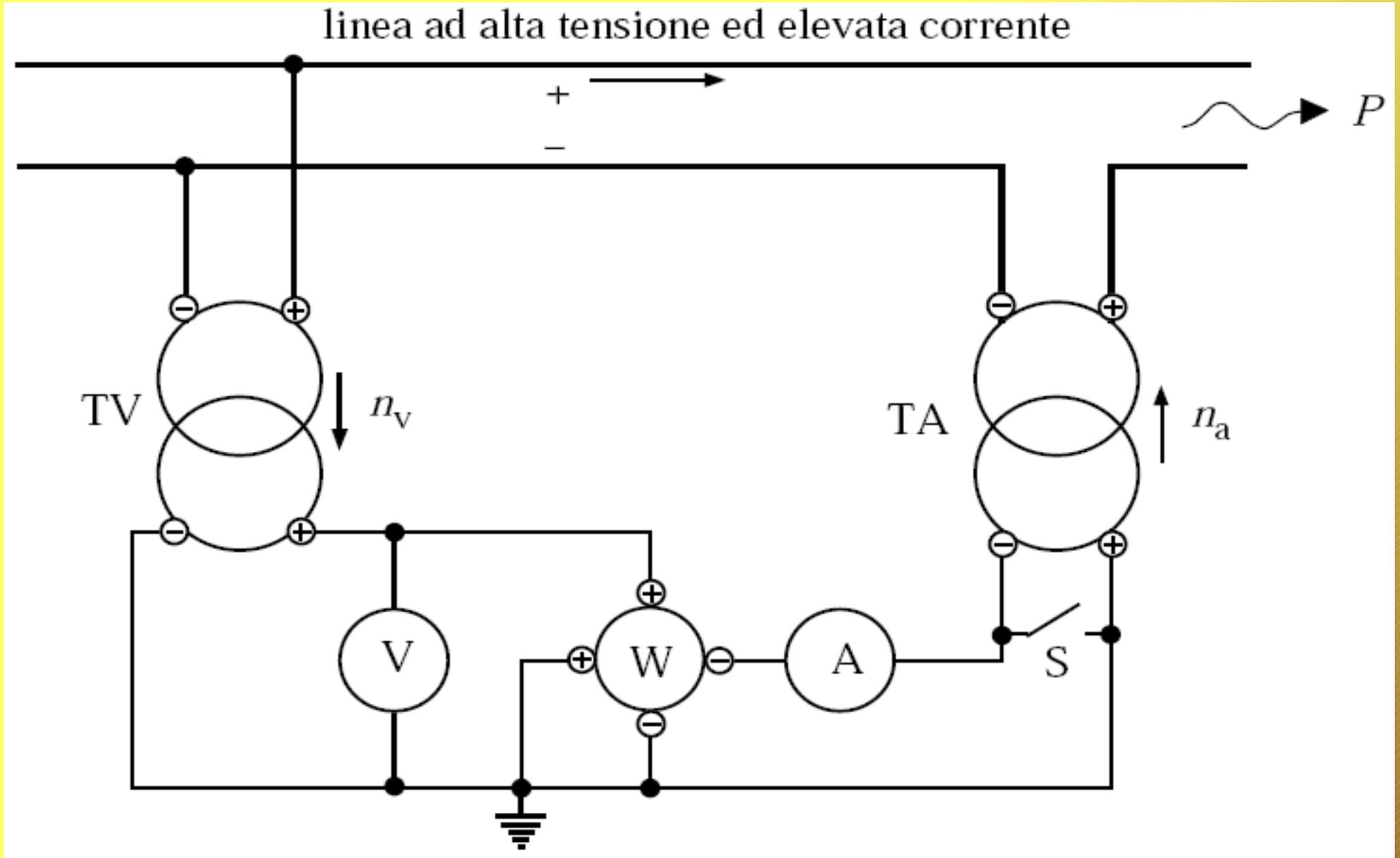
## Trasformatori di misura: trasformatori di corrente (TA)



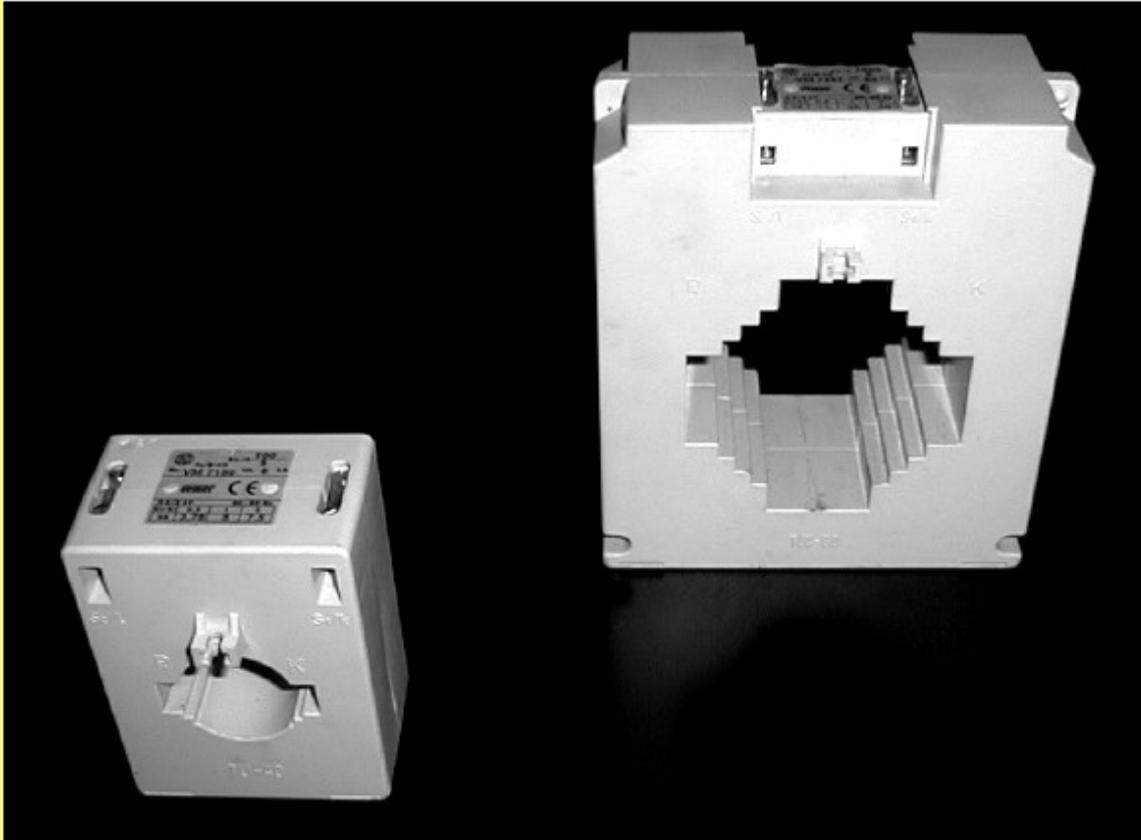
Nuclei ferromagnetici di elevata sezione per lavorare lontano dalla saturazione e per ridurre le perdite.

- $I_{0\%}$     ridottissima
- $\dot{Z}_0$     molto grande
- 5 A      fondo scala

## Trasformatori di misura: inserzione



## Trasformatori di misura



Trasformatori di corrente per la BT

Trasformatore di tensione per interni

