

TASFORMATORI

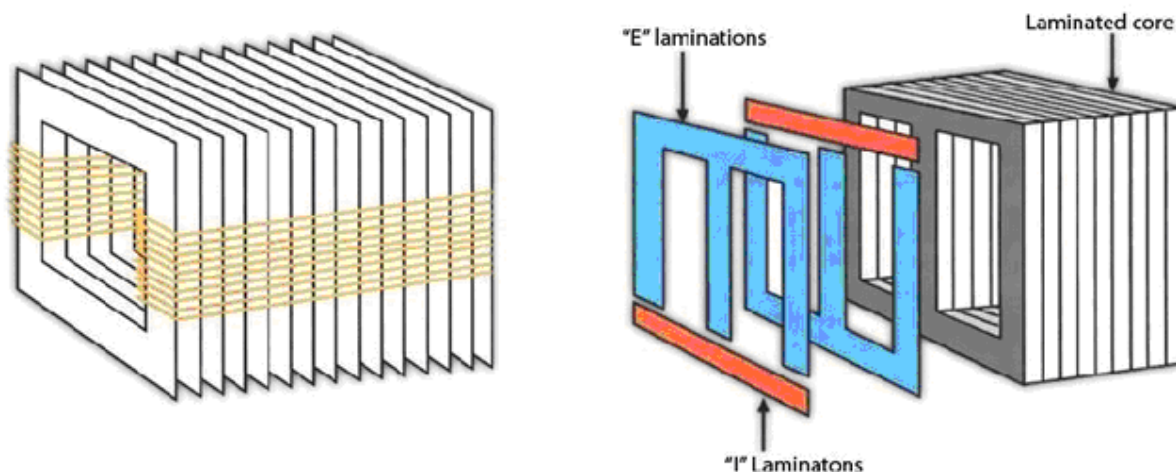
I trasformatori sono macchine elettriche:

1. **statiche**, cioè non hanno parti in movimento;
2. **funzionanti** a corrente alternata sinusoidale;
3. **Reversibili**: l'ingresso può diventare uscita e quest'ultima ingresso;
4. **Trasformano** i parametri in ingresso (tensione e corrente) rispetto a quelli in uscita, per mantenere costante la potenza elettrica apparente $S = VI$;
5. **hanno rendimento** molto alto e perdite molto basse.
6. **consentono** un trasferimento di potenza fra due o più circuiti, pur essendo essi isolati fra loro, sfruttando il principio della **mutua induzione**.

LA STRUTTURA GENERALE DI UN TRASFORMATORE

Un trasformatore è costituito da:

- 1) **un nucleo**: è un anello di materiale ferromagnetico a **bassa riluttanza (permeabilità magnetica elevata)** ($\mathcal{R} = l / \mu A$ nel SI essa è misurata in $[A/Wb]$), è realizzato sovrapponendo un certo numero di lamierini di *ferro-silicio* ed isolati tra loro con carta, vernice o ossido, queste lamiere hanno **delle sezioni molto** sottili $0,35 \div 0,5 \text{ mm}$ e **un traferro di minimo spessore**. Tutto ciò, serve a suddividere il nucleo in tanti percorsi di piccolo spessore, **al fine di diminuire le perdite per correnti parassite** che ne determinano il riscaldamento. Dal punto di vista del raffreddamento i trasformatori possono essere in *aria* o *olio*. Nei primi lo smaltimento del calore avviene per effetto dell'aria che lambisce sia il nucleo che gli avvolgimenti. Nel secondo caso il trasformatore risulta completamente immerso in un cassone pieno di olio isolante con funzione di fluido refrigerante.



La riluttanza misura l'opposizione di un materiale al transito di un flusso magnetico, essa è il rapporto tra la fmm (forza magnetomotrice, $F = N.I$) e il flusso magnetico da essa generato ($\Phi = B.S$), misurata in $[H^{-1}]$.

- 2) **Avvolgimenti elettrici**: sono conduttori elettrici (solenoidi) avvolti sul nucleo. L'avvolgimento al quale fornita l'energia viene detto PRIMARIO, mentre quello dal quale l'energia è prelevata è detto SECONDARIO. Aventi rispettivamente N_1 e N_2 spire avvolti su un nucleo di materiale ferromagnetico

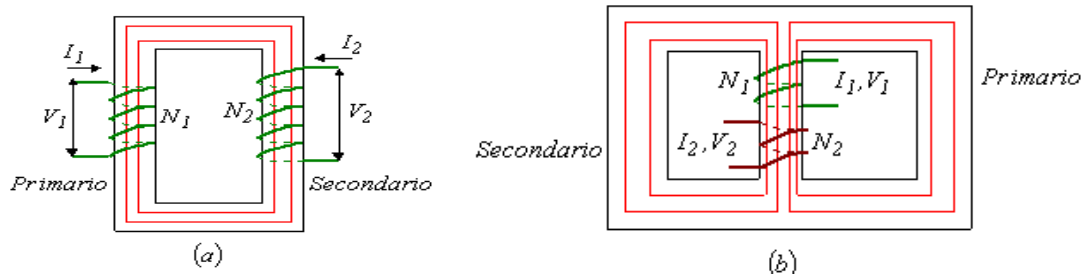


Fig. 1.7 *Trasformatore* a colonna (a), corazzato (b)

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Quando sul primario viene applicata una tensione elettrica alternata sinusoidale, per effetto dell'induzione magnetica, si crea nel nucleo un flusso magnetico (Φ) con andamento sinusoidale, ogni avvolgimento sar  soggetto all'azione di un **flusso concatenato** (Φ_C).

$$\Phi(t) = \Phi_M \text{sen}(\omega t) \rightarrow \Phi_C(t) = N\Phi_M \text{sen}(\omega t)$$

$$\Phi_M = S \cdot B \quad S: \text{sezione del nucleo in [m}^2\text{]} \quad \text{e } B: \text{induzione magnetica in Tesla [T]}$$

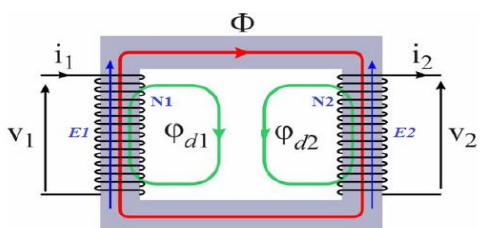
Per la legge dell'induzione elettromagnetica (**FARADAY-NEUMAN-LENZ**) nasceranno, ai capi dei due avvolgimenti, delle tensioni indotte sinusoidali che sono la derivata del flusso magnetico.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{la derivata del seno   coseno})$$

$$e_1(t) = N_1 \Phi_M \omega \text{sen}(\omega t - \pi/2) = E_{1\text{max}} \text{sen}(\omega t - \pi/2) \quad e_2(t) = N_2 \Phi_M \omega \text{sen}(\omega t - \pi/2) = E_{2\text{max}} \text{sen}(\omega t - \pi/2)$$

$e_1(t)$ e $e_2(t)$ sono sfasate di 90° , in ritardo rispetto al flusso induttore e aventi valore efficace:

$$E_1 = E_{1\text{max}}/\sqrt{2} = 4,44 f N_1 \Phi_M \quad E_2 = E_{2\text{max}}/\sqrt{2} = 4,44 f N_2 \Phi_M$$



Φ : **flusso utile** ed   $\Phi = LI$

Φ_d : **flusso disperso**, causa la dispersione magnetica e la diminuzione del flusso utile e quindi la diminuzione della tensione indotta in entrambi gli avvolgimenti.

Φ_C : **flusso concatenato con le N spire dell'avvolgimento** ed  : $\Phi_C = NLI$

MUTUA INDUZIONE

Due bobine di N_1 e N_2 spire, avvolte sullo stesso nucleo magnetico. Le due bobine sono **mutuamente accoppiate**, in quanto la circolazione di corrente in una delle due produce un flusso magnetico nel nucleo, che va a interessare, anche l'altra bobina.

Si definisce coefficiente di **mutua induzione M** il rapporto tra il flusso concatenato ($\Phi_{C2} = N_2\Phi$) con la bobina 2 e la corrente della bobina 1; esso   misurato in henry [H].

r : il coefficiente o fattore di accoppiamento,   un numero adimensionale, di valore compreso tra 0 e 1. Esso dipende dalla geometria delle induttanze ($L = \mu \cdot S \cdot N^2 / l = N^2/R$), dalla loro posizione relativa, dal numero di spire di cui sono composte.

$$M = r \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$r = \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

TENSIONE INDOTTA PER MUTUA INDUZIONE:

nella bobina 1 nasce una tensione per mutua induzione, dovuta alla variazione di I_1 ;
 nella bobina 2 nasce una tensione di mutua induzione, dovuta alla variazione del flusso concatenato Φ_{C2} , variazione conseguente a quella di I_1 ; l'avvolgimento 1   detto induttore in quanto produce la variazione del flusso, mentre l'avvolgimento 2   indotto, dato che subisce gli effetti di tale variazione.

$$\Delta\Phi_{C2} = M \Delta I_1$$

Per la legge di Faraday – neumann , la tensione indotta nella bobina 2 risulta: $E_2 = M (\Delta I_1 / \Delta t)$

Perdite e rendimento

Il rendimento è definito come il rapporto tra la potenza attiva resa in uscita ($P_r = P_2$) e la potenza attiva assorbita in ingresso ($P_a = P_1$). I trasformatori, essendo macchine statiche, hanno rendimenti molto elevati (oltre il 99.5% per i trasformatori di grande potenza)

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

P_a = potenza attiva assorbita dal primario

P_r : potenza attiva ceduta al carico

P_{Cu} = potenza dissipata a causa delle perdite nel rame

P_{Fe} = potenza dissipata a causa delle perdite nel ferro

$P_a = P_2 + P_p$

$P_p = P_{Cu} + P_{Fe}$: potenza persa

Trascurando le perdite si può calcolare il rendimento come:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 V_2 \cos \phi_2}{I_1 V_1 \cos \phi_1}$$

Vi sono delle oggettive difficoltà ad usare questa formula; gli strumenti di misura possono falsare questo rapporto in maniera significativa. Normalmente si usa:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{CU}}$$

$$P_{CU} = \left(\frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2 P_{CC}$$

P_0 =Potenza attiva a vuoto;

P_{CU} =Perdite nel rame

E' possibile, inoltre dimostrare:

P_n =Potenza attiva nominale; P_0 =Potenza attiva a vuoto;

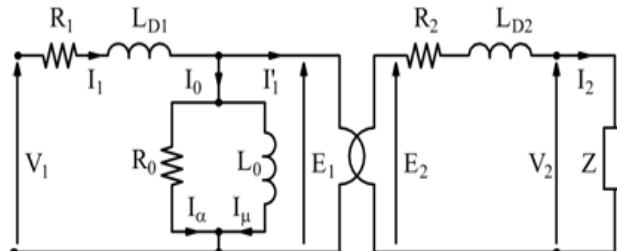
P_{CC} =Potenza in corto circuiti con:

$$\eta_{MAX} = \frac{P_n}{P_n + 2\sqrt{P_0 P_{CC}}}$$

$$P_n = V_2 I_{2n} \cos \phi_2$$

TRASFORMATORE MONOFASE REALE (CARATTERISTICHE)

- 1] Gli avvolgimenti presentano sempre una resistenza.
- 2] Il flusso magnetico non concatena perfettamente i due avvolgimenti.
- 3] La corrente magnetizzante non è trascurabile.
- 4] Vi sono perdite nel ferro dovute ad isteresi e a correnti parassite.



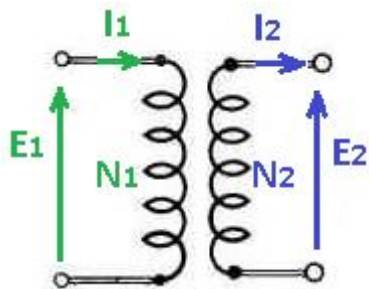
R_0 : Resistenza che tiene conto delle perdite nel ferro per isteresi e per correnti parassite.

L_0 : Induttanza che tiene conto della corrente magnetizzante necessaria a creare il flusso: coincide con l'induttanza dell'avvolgimento primario;

$R_1 R_2$: Resistenze che tengono conto delle perdite per effetto Joule negli avvolgimenti primario e secondario;

$L_{D1} L_{D2}$: Induttanze che tengono conto del flusso disperso negli avvolgimenti primario e secondario.

TRASFORMATORE IDEALE



Il **trasformatore ideale** è caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- avvolgimenti con resistenza nulla : $R_1 = R_2 = 0$ vuole dire negli avvolgimenti non vi è alcuna caduta di tensione ne perdita di potenza
- assenza di flussi dispersi $\rightarrow \phi_{d1} = \phi_{d2} = 0$
- nucleo con permeabilità infinita $\mu = \infty \rightarrow$ riluttanza $\mathcal{R} = 0$: vuol dire che è nulla la f.m.m necessaria per creare il flusso magnetico
- assenza di effetti dissipativi nel nucleo $K_f = 0$, vuol dire nulle le perdite nel ferro.

Per comprendere il funzionamento elettrico di un trasformatore notiamo che, indicando con il pedice 1 le grandezze relative al circuito primario e con 2 quelle del secondario, sussiste la relazione:

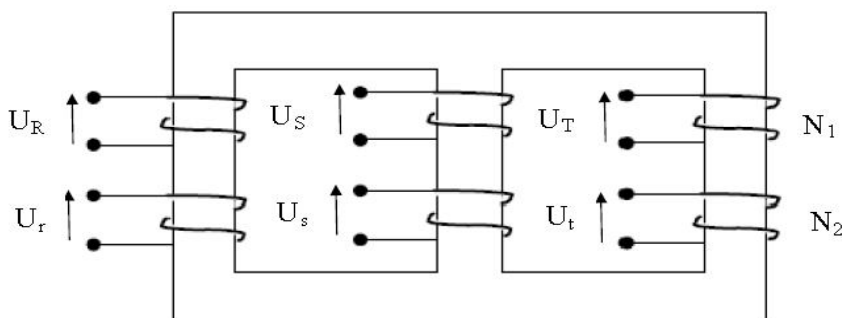
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

Come può notarsi, variando il numero di *spire* del primario (N_1), rispetto al secondario (N_2), il cui rapporto ($N_1 / N_2 = k$) definisce il **rapporto di trasformazione**, è possibile variare il rapporto tra le tensioni e quindi delle correnti, a condizione che la potenza apparente di ingresso $S_1 = V_1 I_1$ risulta uguale alla potenza apparente in uscita $S_2 = V_2 I_2$.

ALCUNI DEI PRINCIPALI DATI DI TARGA SONO:

- Frequenza nominale: f_n [Hz]
- Tensione nominale primaria (valore efficace): V_{1n} [V]
- Tensione nominale secondaria a vuoto (valore efficace): V_{20} [V]
- Rapporto nominale di trasformazione: $K_0 = V_{1n} / V_{20}$
- Potenza apparente nominale : $S_n = V_{1n} \cdot I_{1n} = V_{20} \cdot I_{2n}$ [VA]
- Corrente nominale primaria (valore efficace): I_{1n} [A]
- Corrente nominale secondaria (valore efficace): I_{2n} [A]
- le perdite a vuoto espresse in percento della potenza nominale **Po%** , la corrente assorbita a vuoto in percento della corrente nominale **Io%** , il f.d.p. a vuoto **cosφ₀** quando il trasformatore è alimentato a tensione e frequenza nominali (esiste la relazione **cosφ₀ = Po% / Io%**);
- le perdite in cortocircuito espresse in percento della potenza nominale **Pcc%** , la tensione applicata in cortocircuito in percento della tensione nominale **Vcc%** , il f.d.p. in cortocircuito **cosj_{cc}** quando il trasformatore ha i morsetti d'uscita cortocircuitati, ha gli avvolgimenti percorsi dalle correnti nominali e la temperatura è quella convenzionale di riferimento (esiste la relazione **cos (φ_{cc} = Pcc% / Vcc%**);

TRASFORMATORE TRIFASE: COLLEGAMENTO DEGLI AVVOLGIMENTI



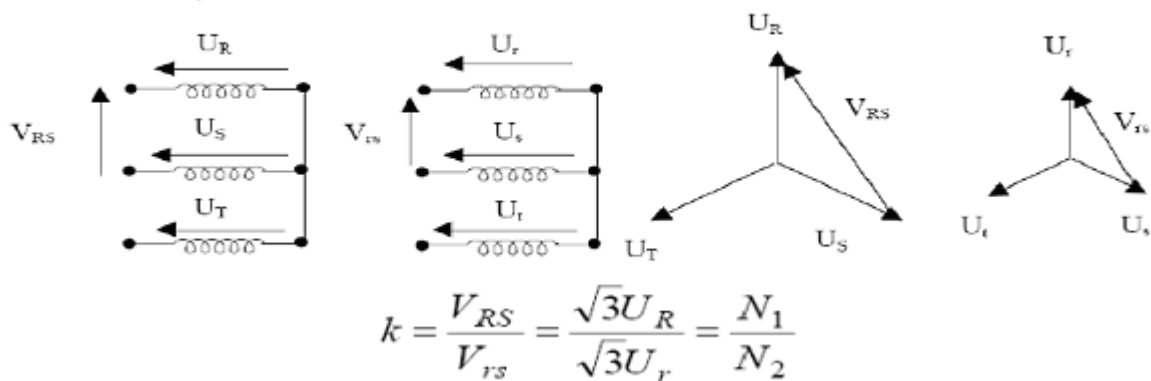
U_s, U_R, U_T: Tensioni indotte nell'avvolgimento primario;

U_s, U_r, U_t: Tensioni indotte nell'avvolgimento secondario.

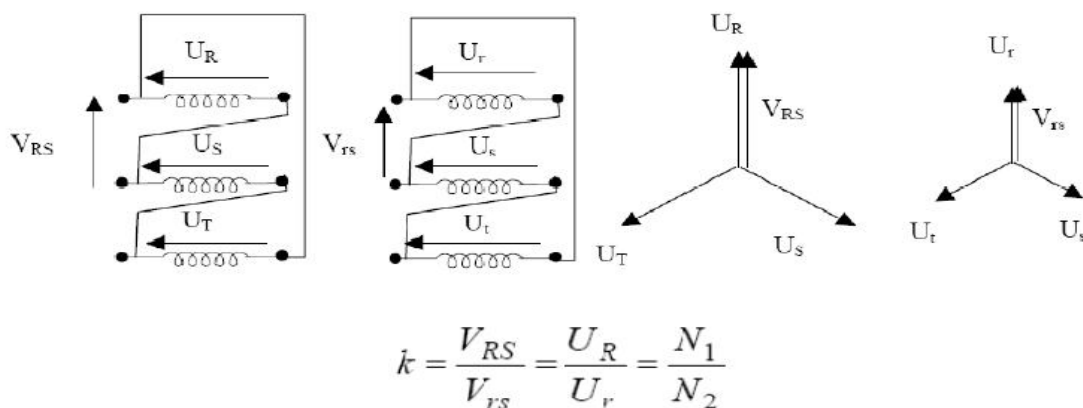
RAPPORTO di TRASFORMAZIONE

$$k = \frac{\text{tensione concatenata primaria}}{\text{tensione concatenata secondaria}} = \frac{V_{RS}}{V_{rS}}$$

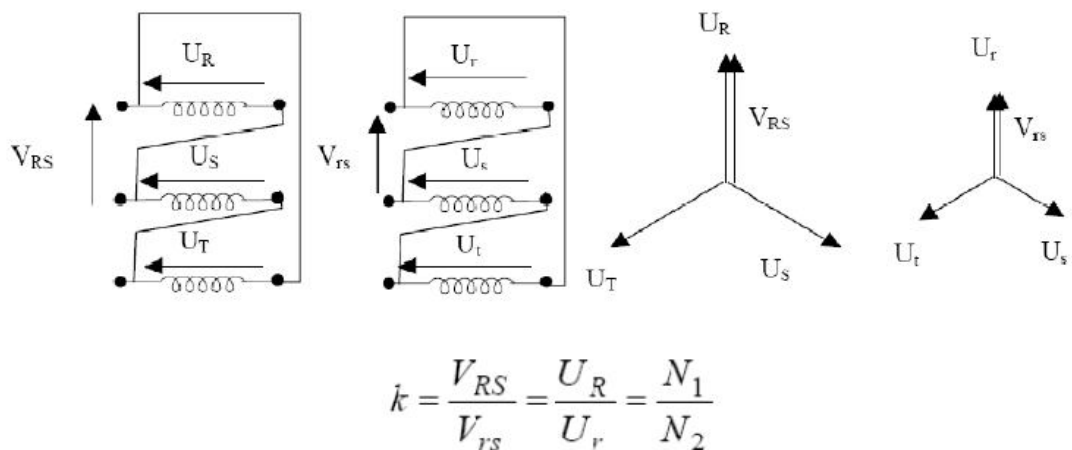
STELLA-STELLA



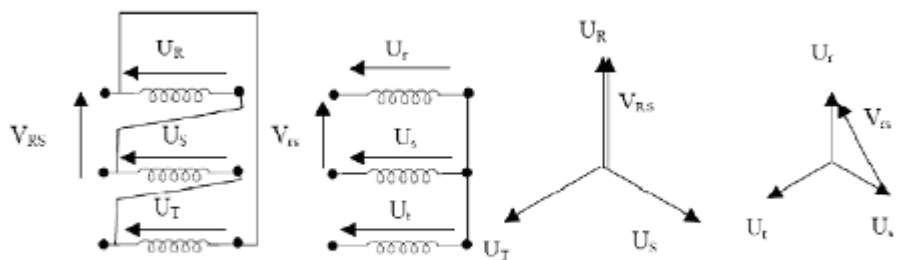
TRIANGOLO-TRIANGOLO



TRIANGOLO-TRIANGOLO

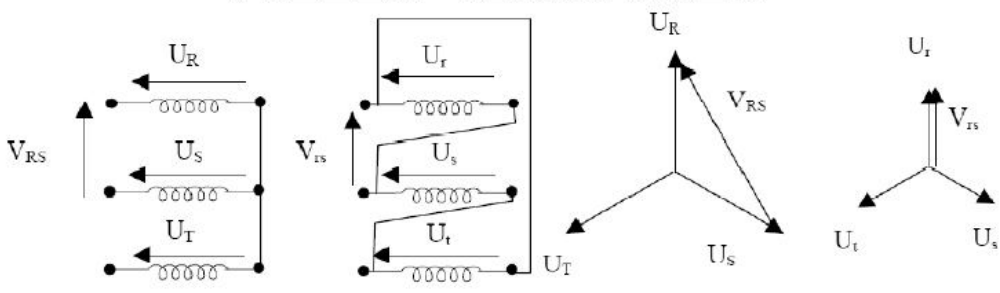


TRIANGOLO-STELLA



$$k = \frac{V_{RS}}{V_{rs}} = \frac{U_R}{\sqrt{3} U_r} = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$$

STELLA- TRIANGOLO



$$k = \frac{V_{RS}}{V_{rs}} = \frac{\sqrt{3} U_R}{U_r} = \frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$$

COLLEGAMENTO		Rapporto di trasformazione V_1/V_{20}
primario	secondario	
Y	y	$\frac{\sqrt{3} N_1 E}{\sqrt{3} N_2 E} = \frac{N_1}{N_2}$
D	d	$\frac{N_1 E}{N_2 E} = \frac{N_1}{N_2}$
Y	d	$\frac{\sqrt{3} N_1 E}{N_2 E} = \sqrt{3} \frac{N_1}{N_2}$
D	y	$\frac{N_1 E}{\sqrt{3} N_2 E} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$