

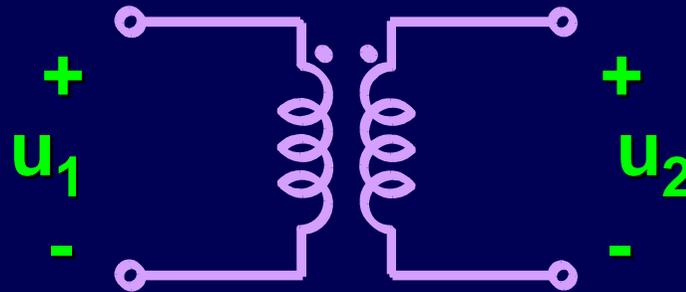
Corso di
ELETRONICA INDUSTRIALE

“Trasformatori ad alta frequenza”

Trasformatori ad alta frequenza

- Motivazioni per l'uso di trasformatori ad AF
- Richiami sul trasformatore ideale
 - Relazioni tra le tensioni
 - Relazioni tra le correnti
- Trasformatore a piú avvolgimenti
- Calcolo del flusso
- Dimensionamento del nucleo
- Caratteristiche del trasformatore reale

Motivazioni per l'uso dei trasformatori ad alta frequenza



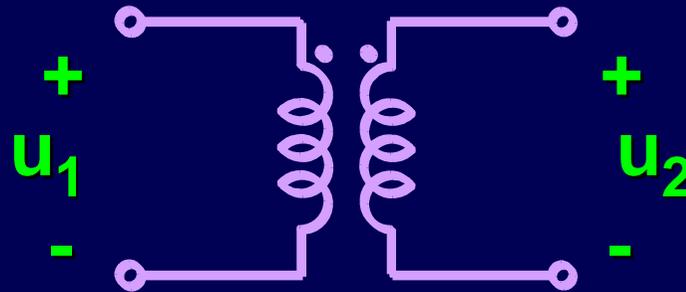
- Isolamento tra ingresso ed uscita
- Adattamento del livello di tensione
- Minore potenza di dimensionamento del convertitore ($U_i \approx U_{0max}$)

Motivazioni per l'uso dei trasformatori ad alta frequenza

Motivazioni valide anche per trasformatori a bassa frequenza

- Isolamento tra ingresso ed uscita
- Adattamento del livello di tensione
- Minore potenza di dimensionamento del convertitore ($U_i \approx U_{0\max}$)

Motivazioni per l'uso dei trasformatori ad alta frequenza



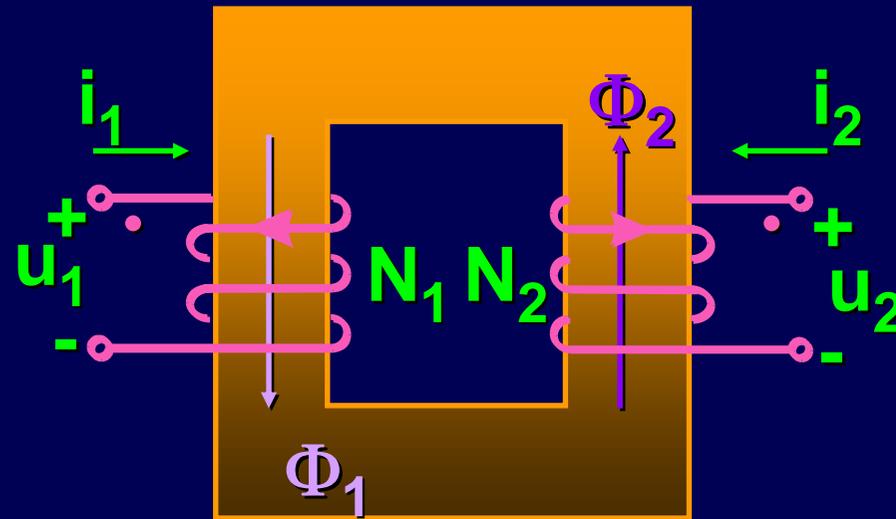
- **Piccole dimensioni**
- **Possibilità di realizzare convertitori multi-uscita**

Motivazioni per l'uso dei trasformatori ad alta frequenza

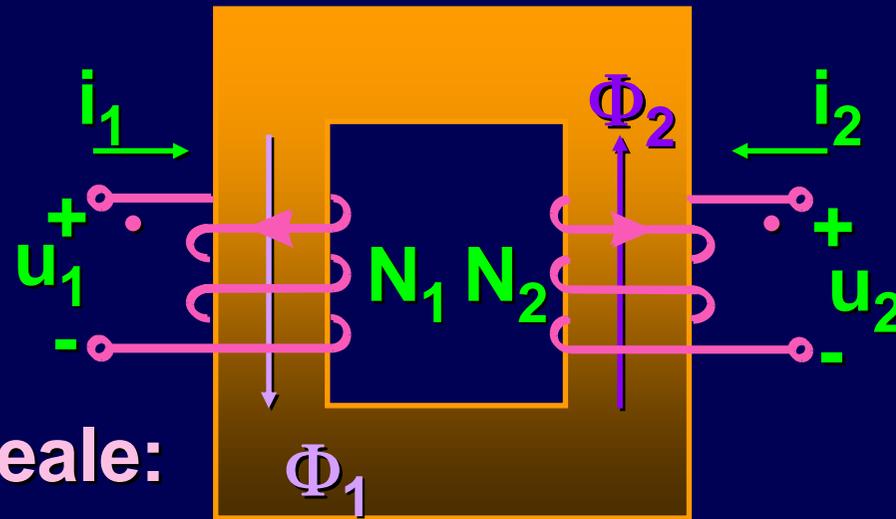
Motivazioni tipiche dei trasformatori ad alta frequenza

- **Piccole dimensioni**
- **Possibilità di realizzare convertitori multi-uscita**

Richiami sul trasformatore ideale



Richiami sul trasformatore ideale

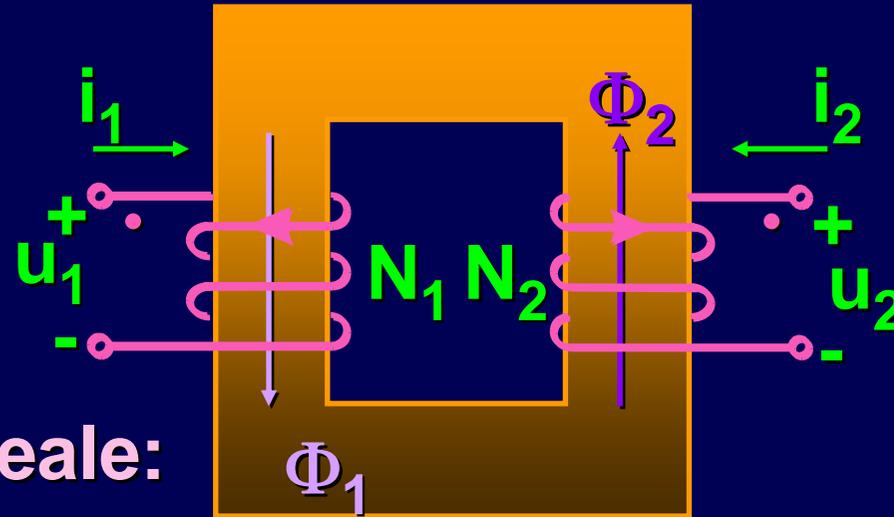


Trasformatore ideale:

- nucleo con $\mu = \infty$

$$R = 0$$

Richiami sul trasformatore ideale



Trasformatore ideale:

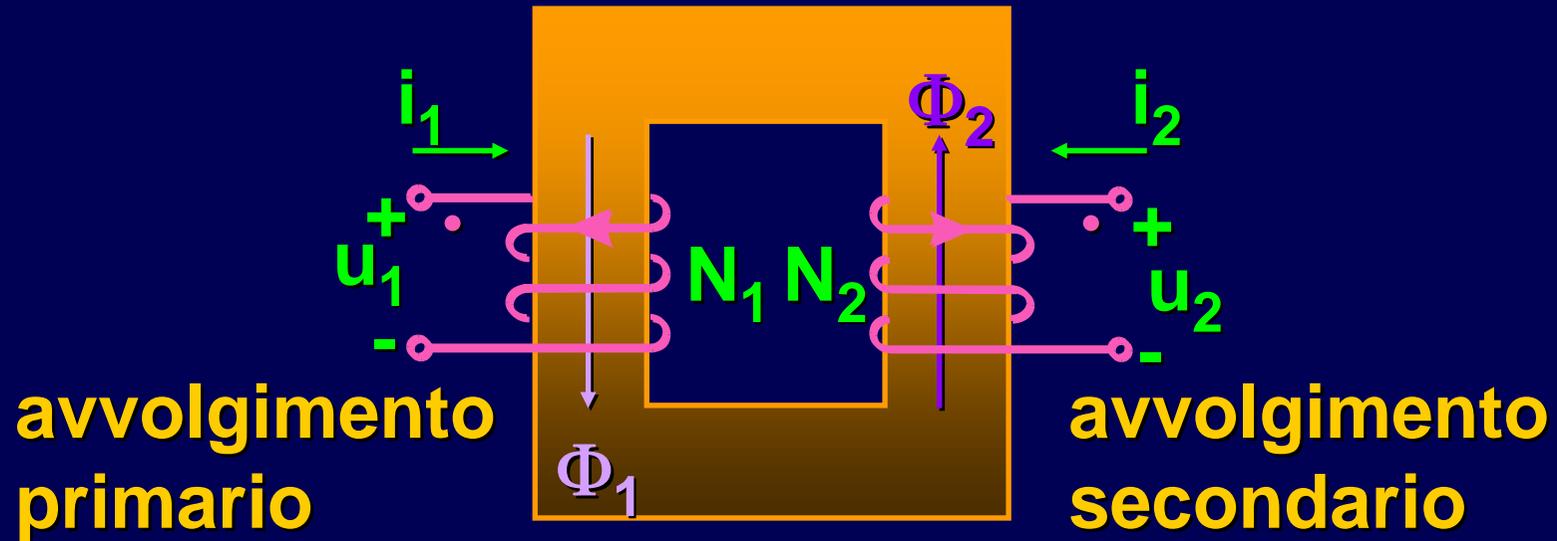
- nucleo con $\mu = \infty$

$$R = 0$$

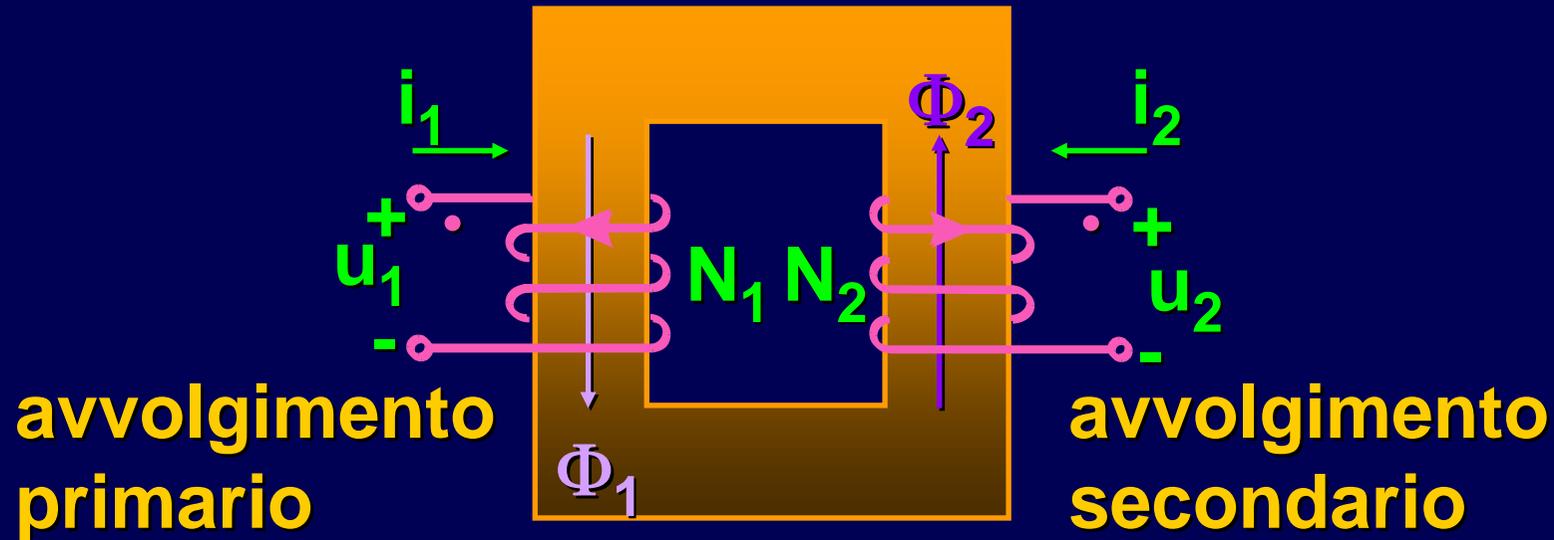
- avvolgimenti perfettamente accoppiati

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$$

Relazione tra le tensioni

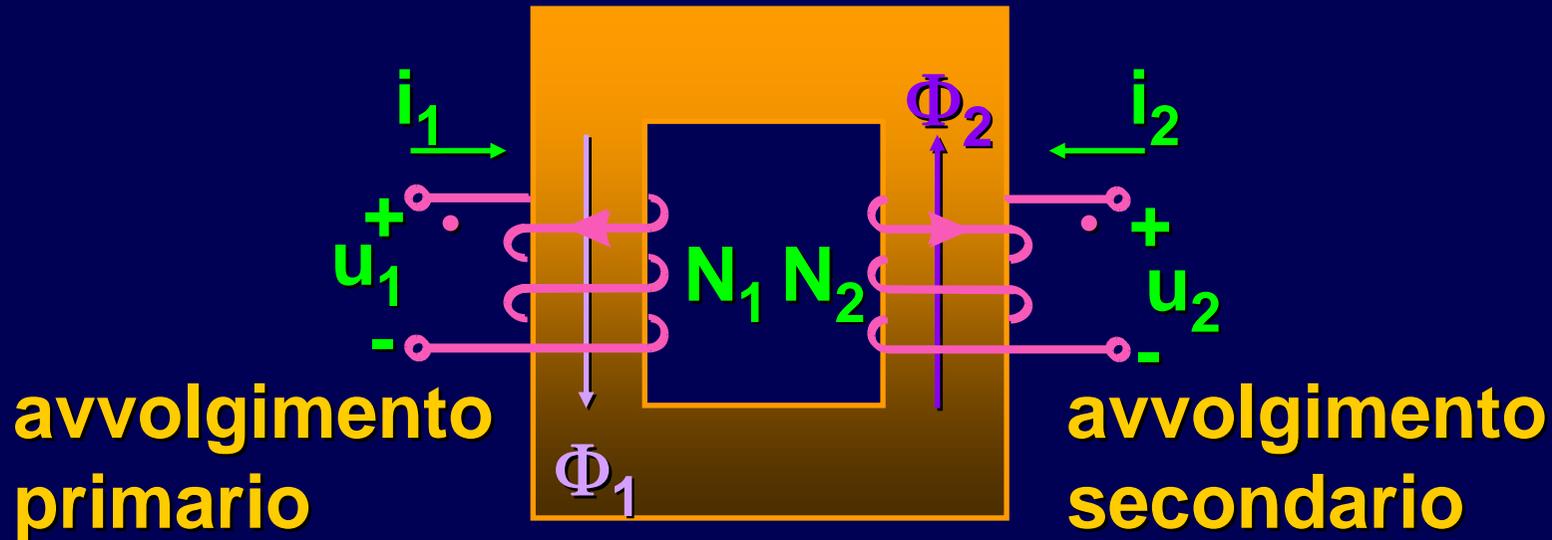


Relazione tra le tensioni



$$\lambda = N\Phi = \text{flusso concatenato}$$

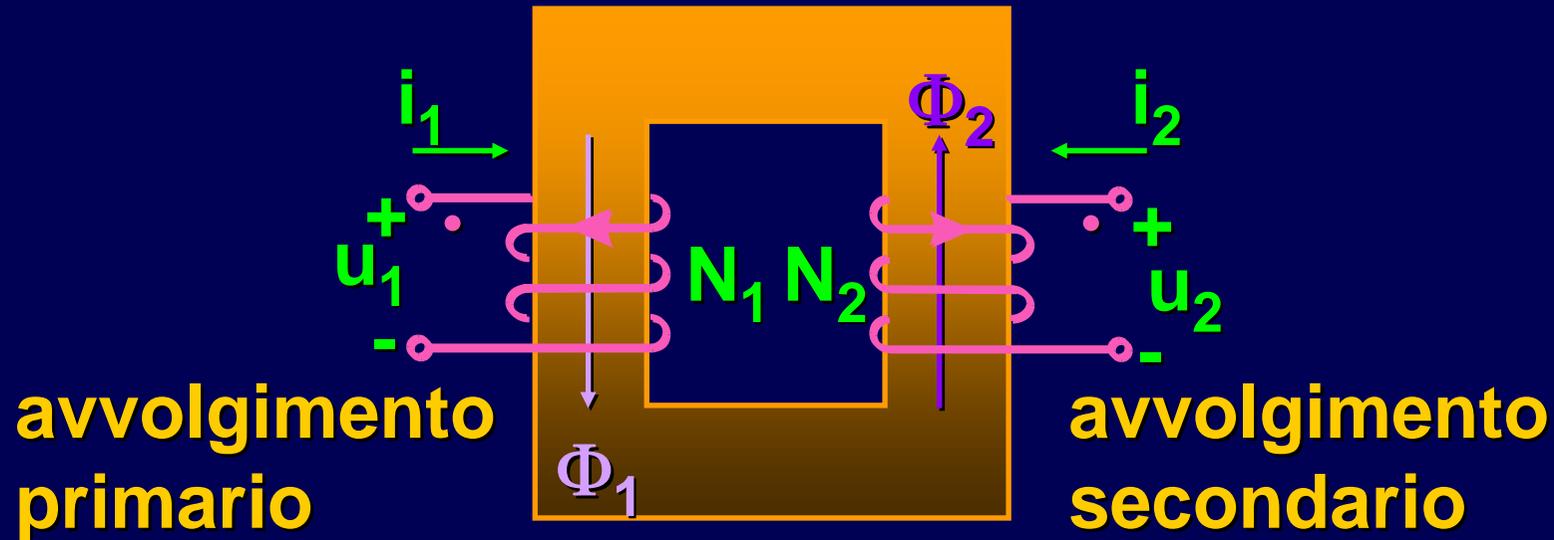
Relazione tra le tensioni



$\lambda = N\Phi =$ flusso concatenato

$$u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

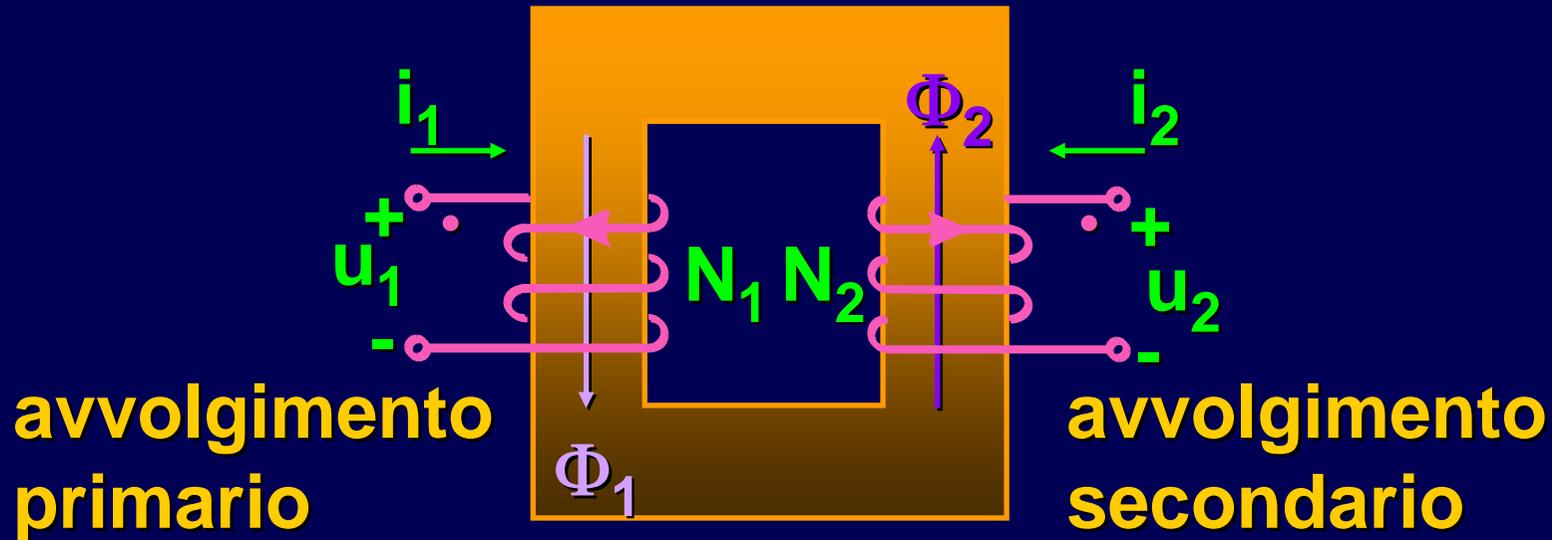
Relazione tra le tensioni



$\lambda = N\Phi =$ flusso concatenato

$$\begin{cases} u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$

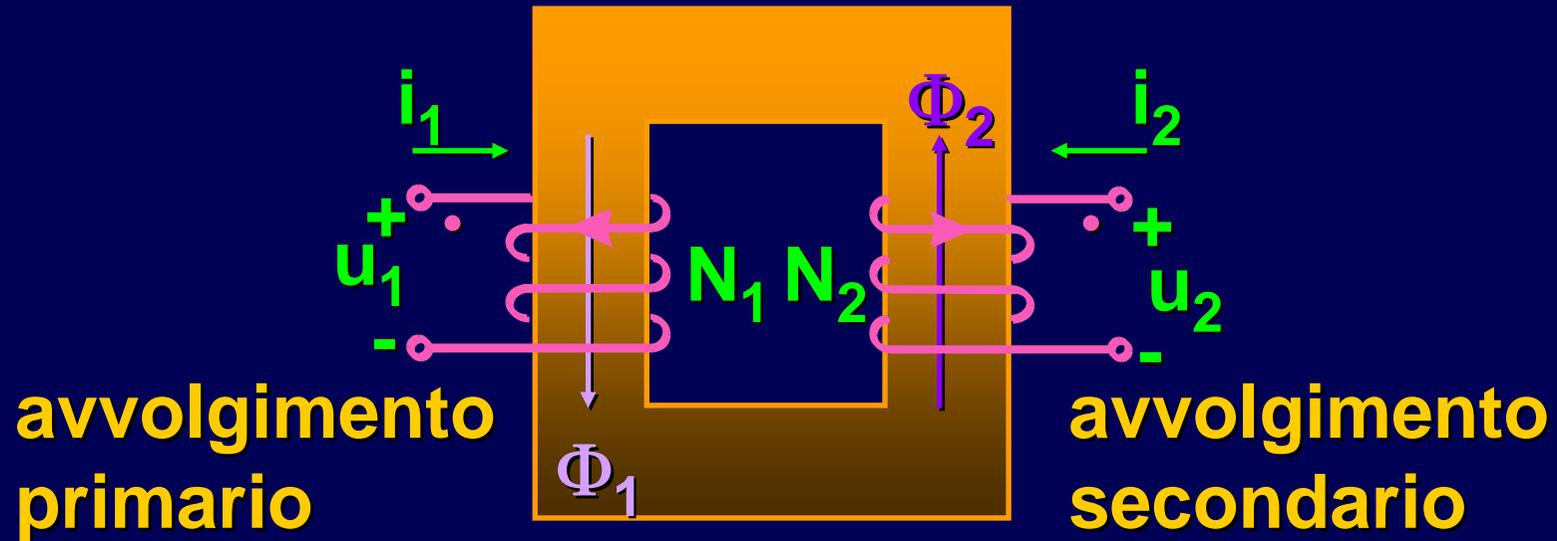
Relazione tra le tensioni



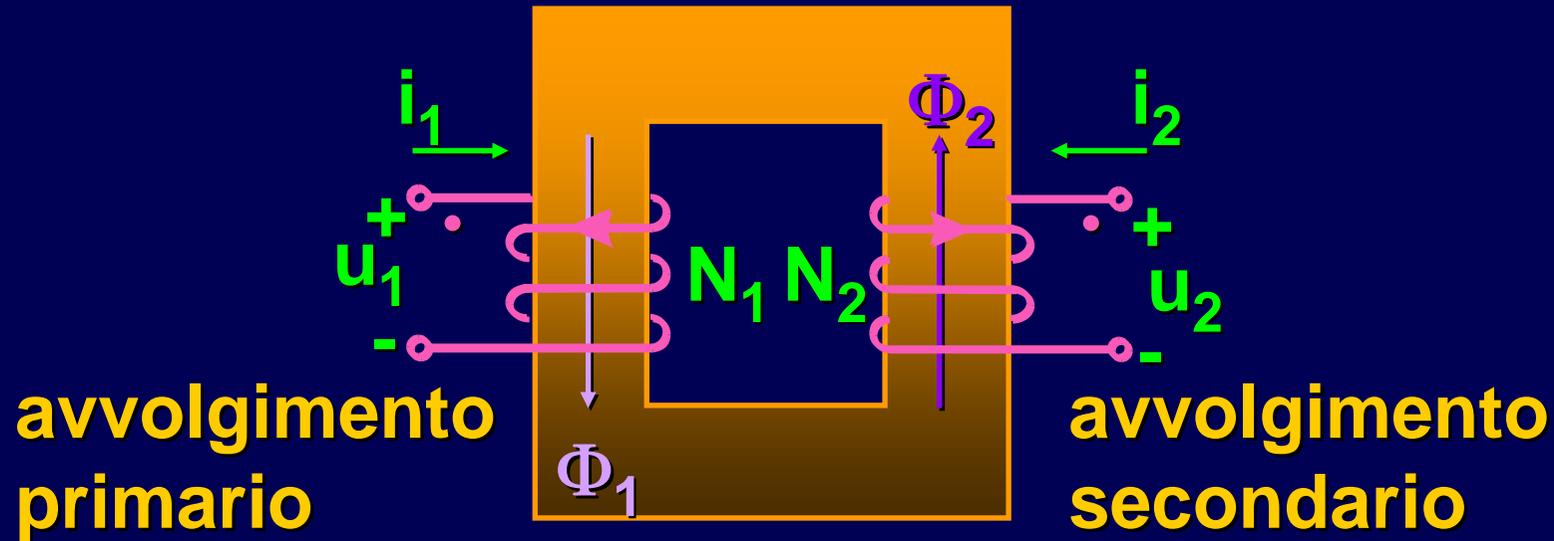
$\lambda = N\Phi =$ flusso concatenato

$$\begin{cases} u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \end{cases} \Rightarrow \boxed{\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

Relazione tra le correnti

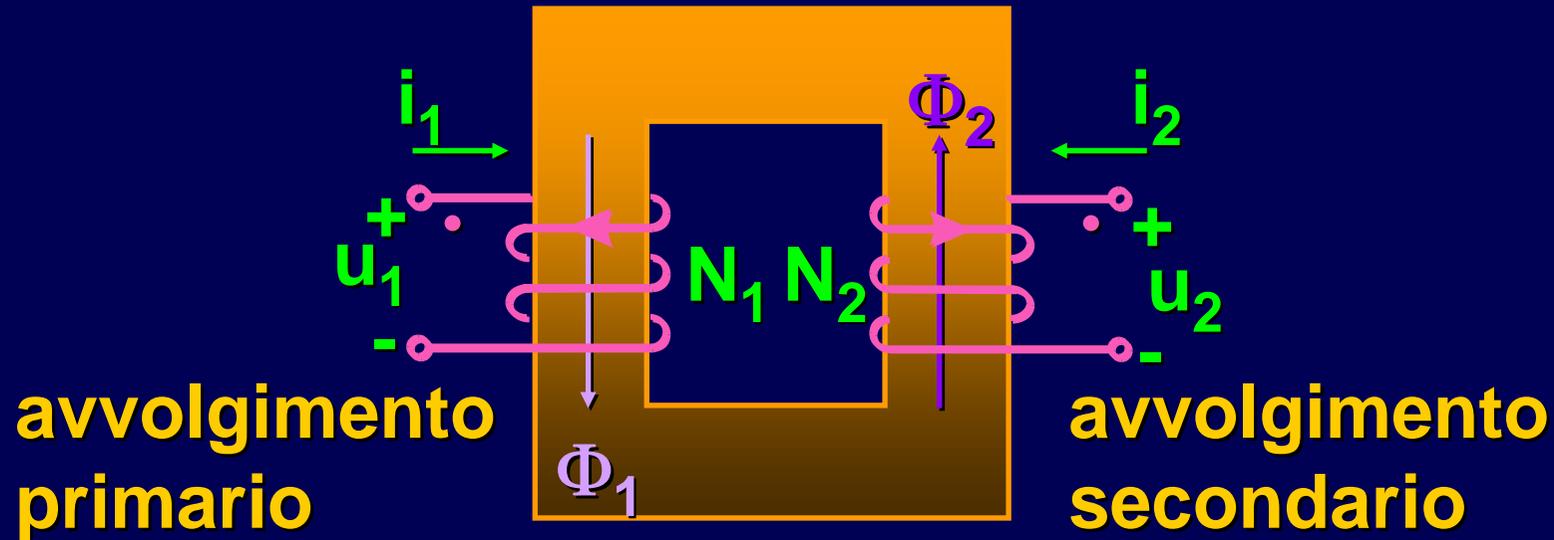


Relazione tra le correnti



Compensazione delle forze magnetomotrici

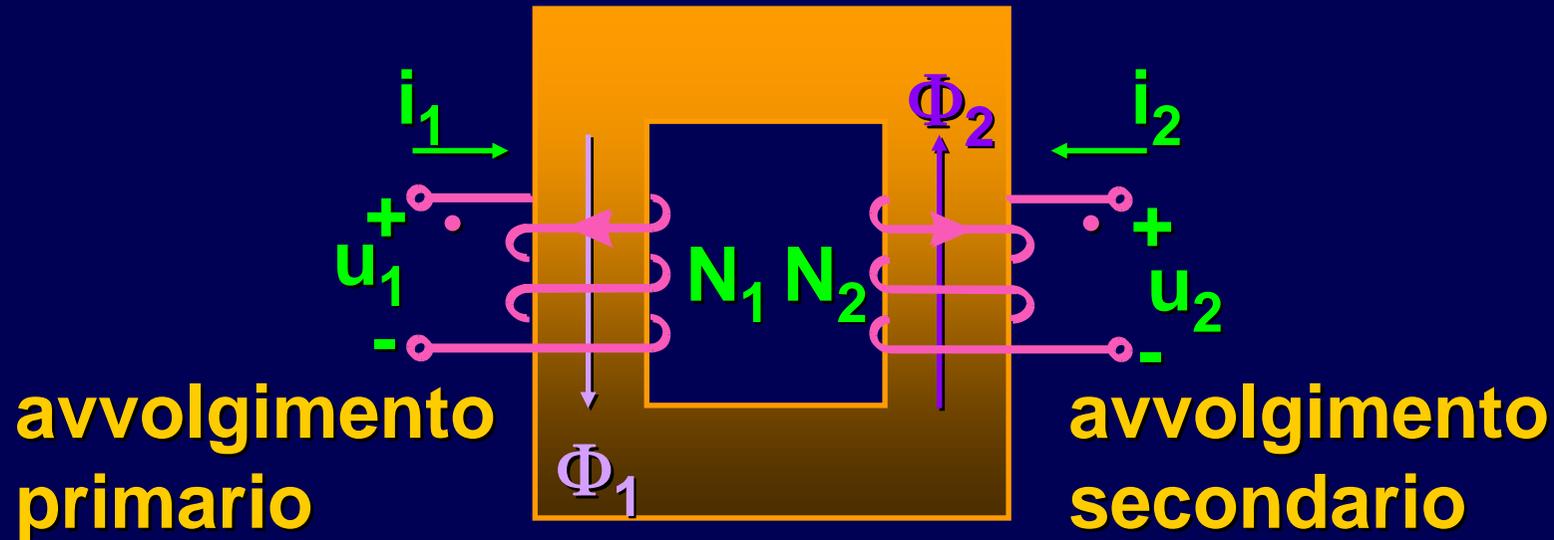
Relazione tra le correnti



Compensazione delle forze magnetomotrici

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = \mathbf{R} \cdot \Phi = 0$$

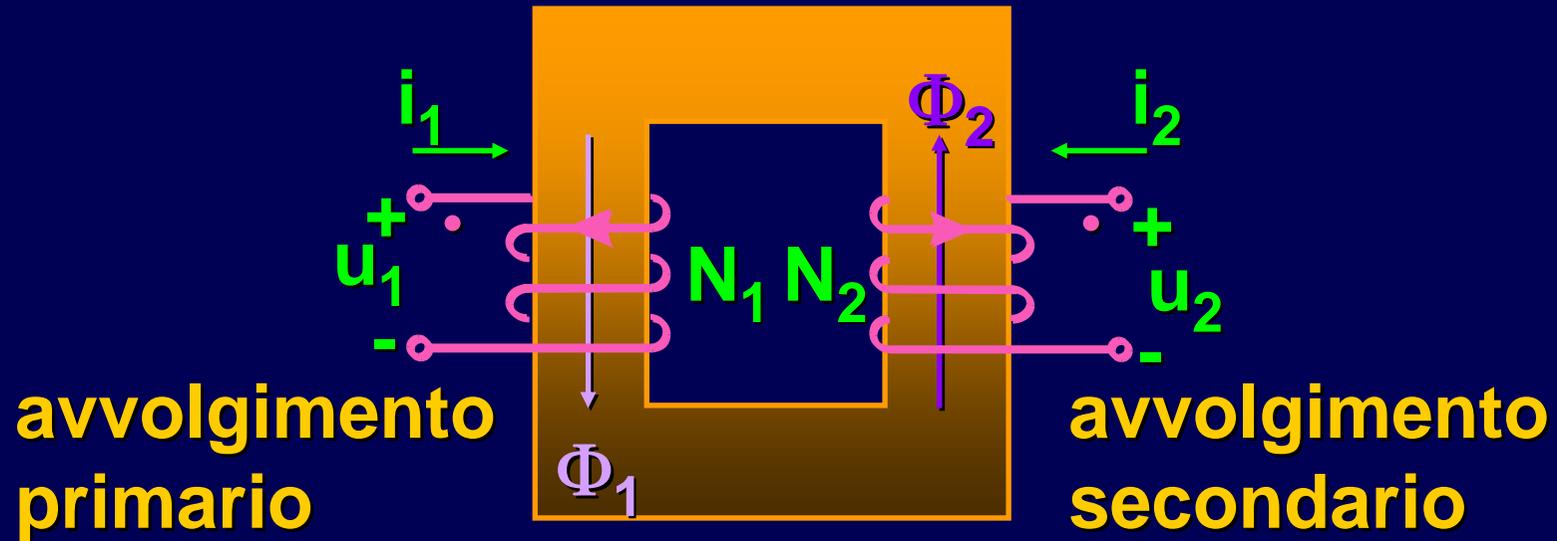
Relazione tra le correnti



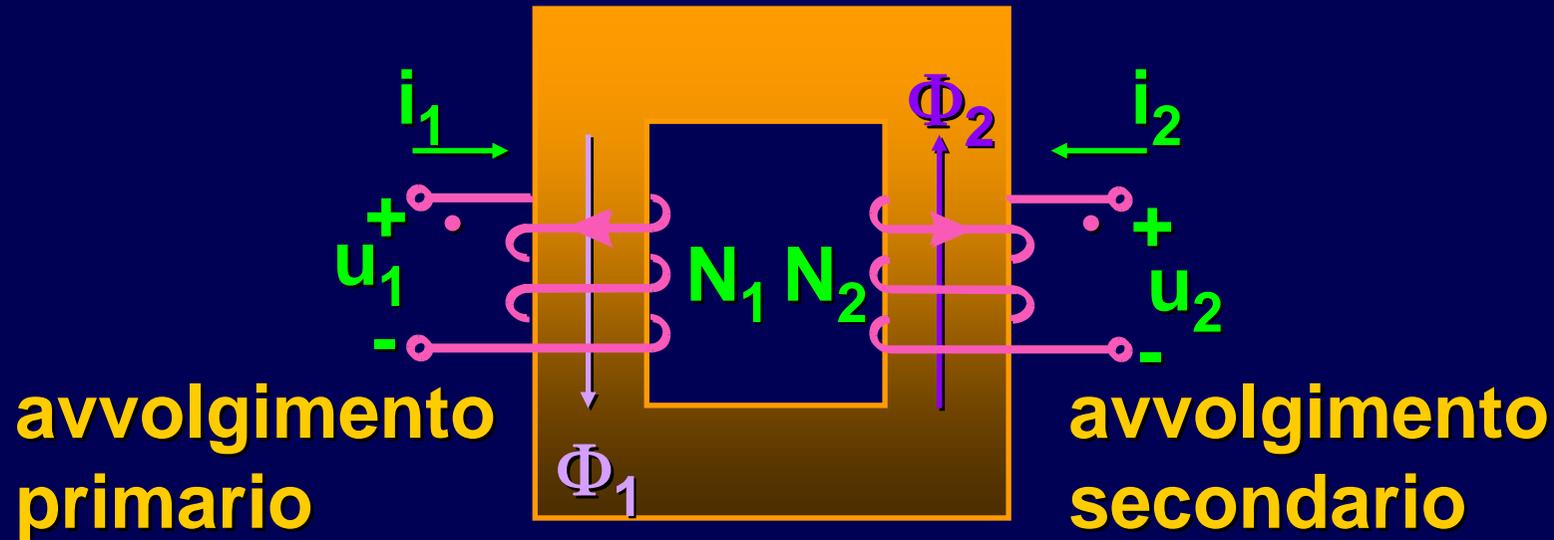
Compensazione delle forze magnetomotrici

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = \mathbf{R} \cdot \Phi = \mathbf{0} \Rightarrow \boxed{\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1}}$$

Conservazione delle potenze

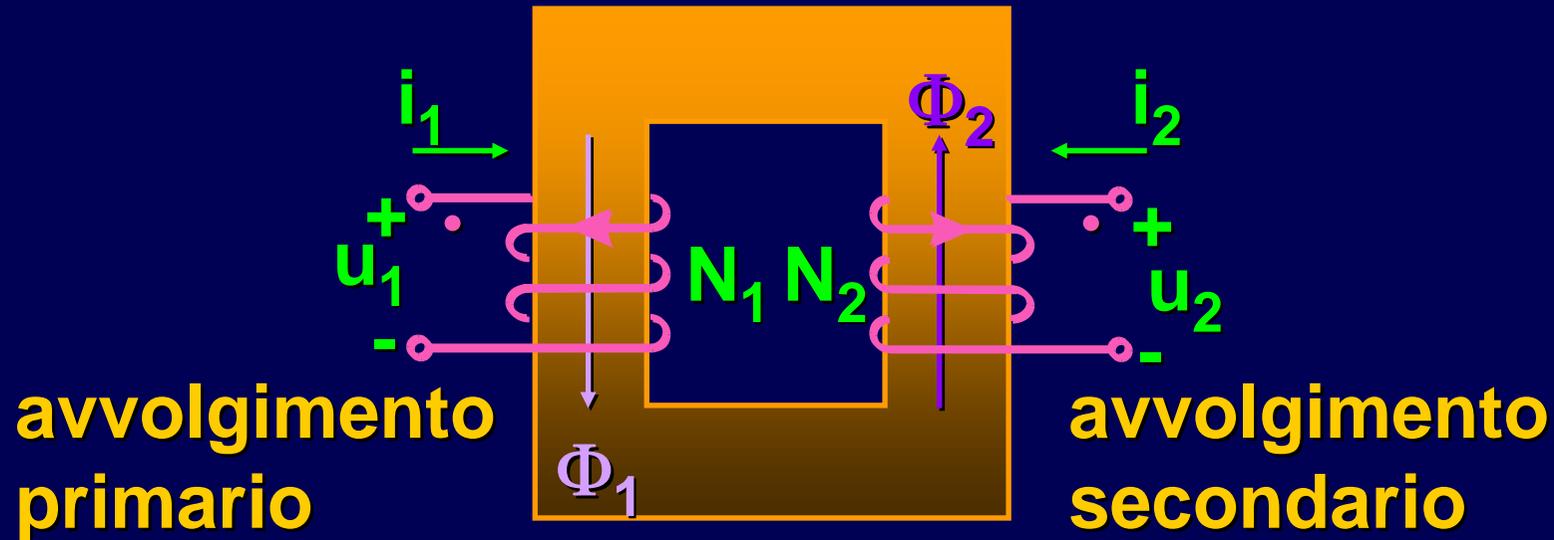


Conservazione delle potenze



$$P_1 = u_1 \cdot i_1 = -\frac{N_1}{N_2} \cdot u_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = -u_2 \cdot i_2 = -P_2$$

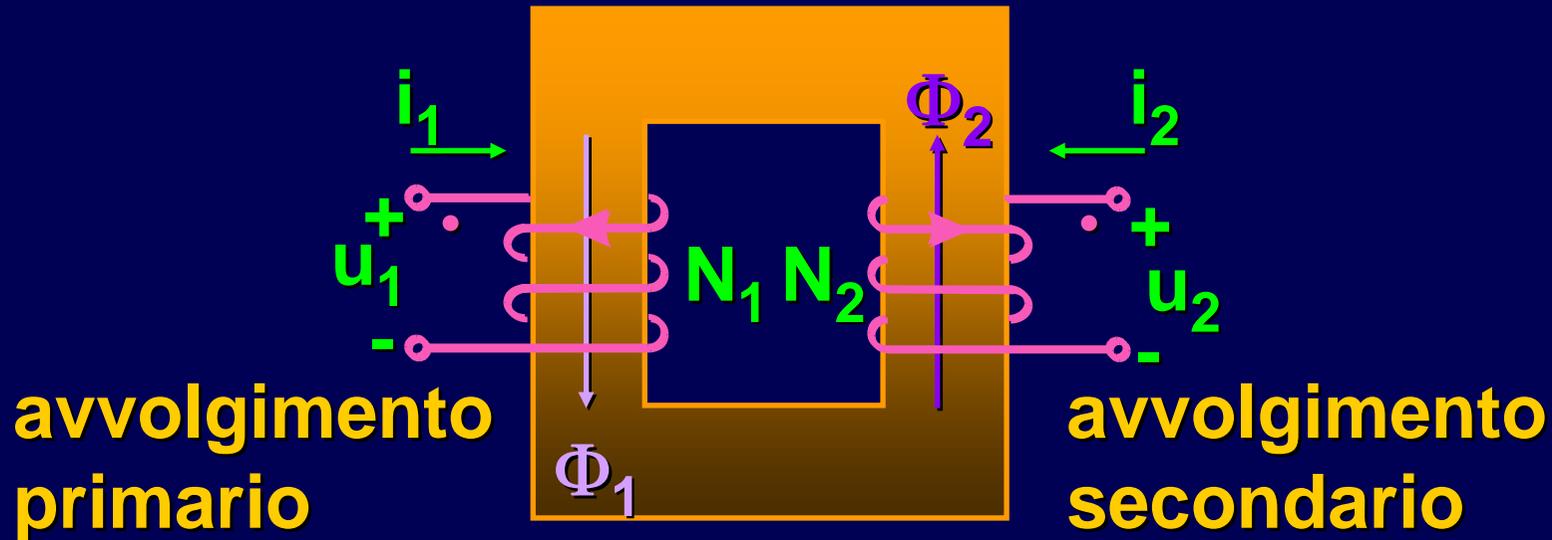
Conservazione delle potenze



$$P_1 = u_1 \cdot i_1 = -\frac{N_1}{N_2} \cdot u_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = -u_2 \cdot i_2 = -P_2$$

$$P_1 + P_2 = 0$$

Conservazione delle potenze

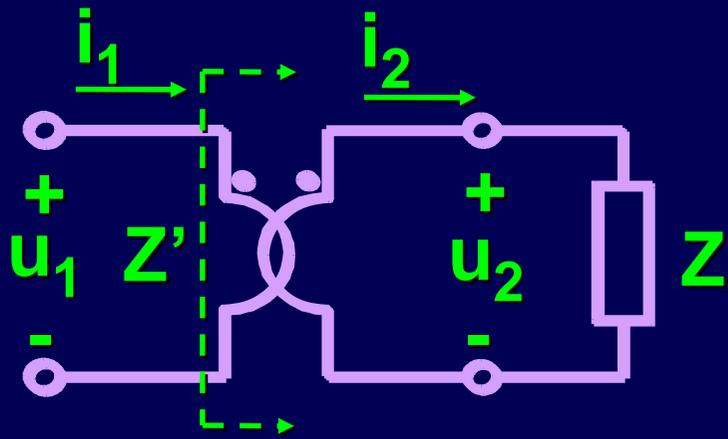


$$P_1 = u_1 \cdot i_1 = -\frac{N_1}{N_2} \cdot u_2 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = -u_2 \cdot i_2 = -P_2$$

$P_1 + P_2 = 0$ La totale potenza entrante nel trasformatore é nulla (potenza entrante = potenza uscente)

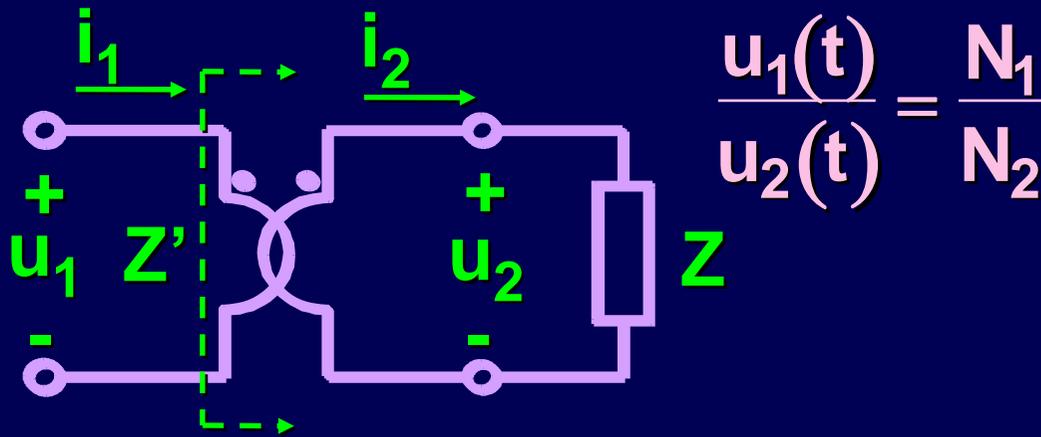
Adattamento di impedenza

Trasformatore ideale



Adattamento di impedenza

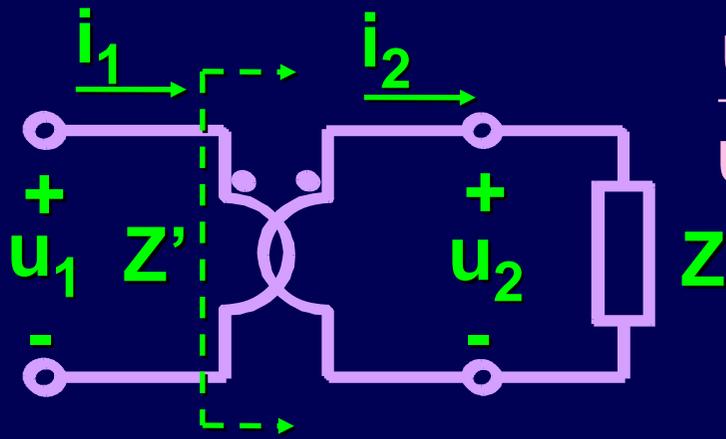
Trasformatore ideale



$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

Adattamento di impedenza

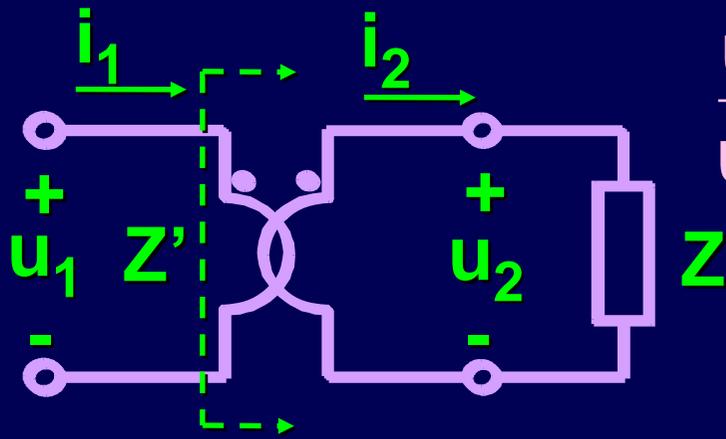
Trasformatore ideale



$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{U_1(s)}{U_2(s)} = \frac{N_1}{N_2}$$

Adattamento di impedenza

Trasformatore ideale

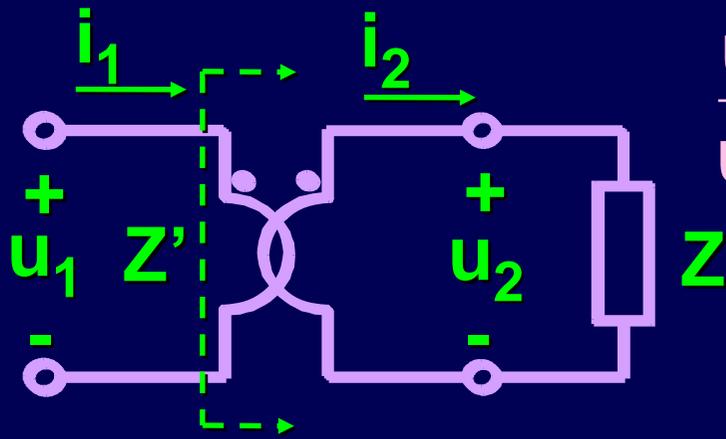


$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{U_1(s)}{U_2(s)} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{I_1(s)}{I_2(s)} = \frac{N_2}{N_1}$$

Adattamento di impedenza

Trasformatore ideale



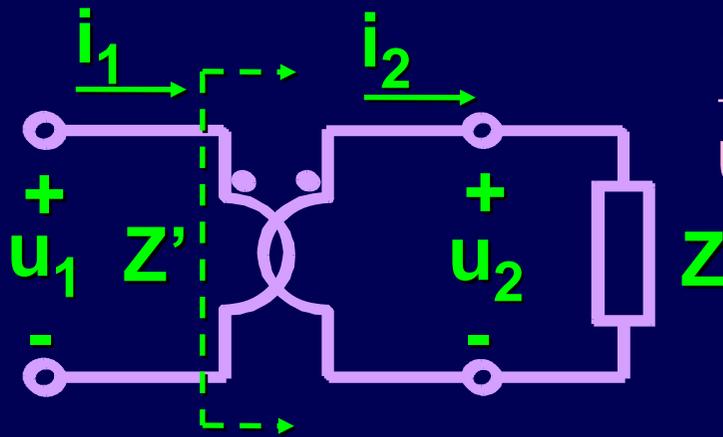
$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{U_1(s)}{U_2(s)} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{I_1(s)}{I_2(s)} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$Z'(s) = \frac{U_1(s)}{I_1(s)}$$

Adattamento di impedenza

Trasformatore ideale

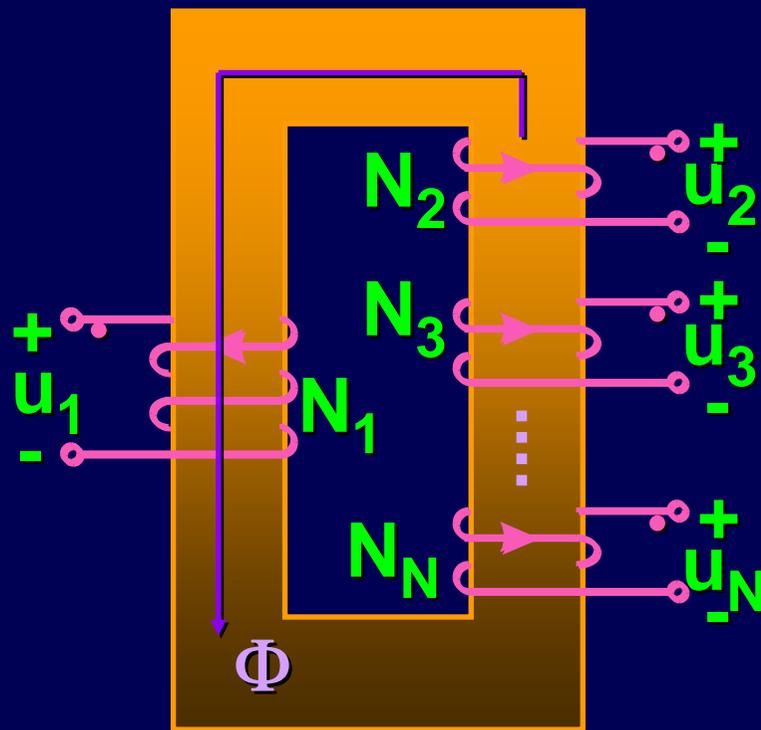


$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow \frac{U_1(s)}{U_2(s)} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{I_1(s)}{I_2(s)} = \frac{N_2}{N_1}$$

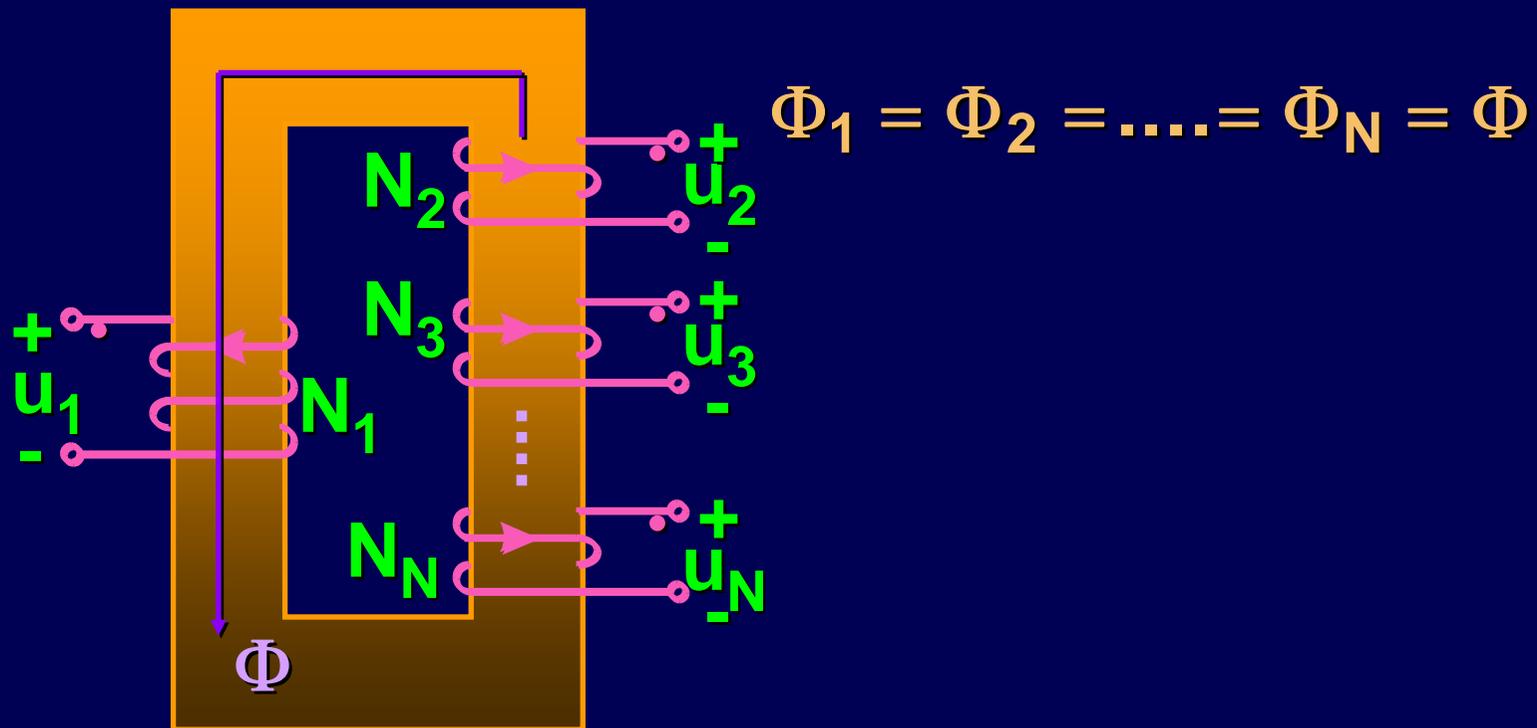
$$Z'(s) = \frac{U_1(s)}{I_1(s)} = \frac{U_2(s)}{I_2(s)} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z(s)$$

Trasformatore a piú avvolgimenti



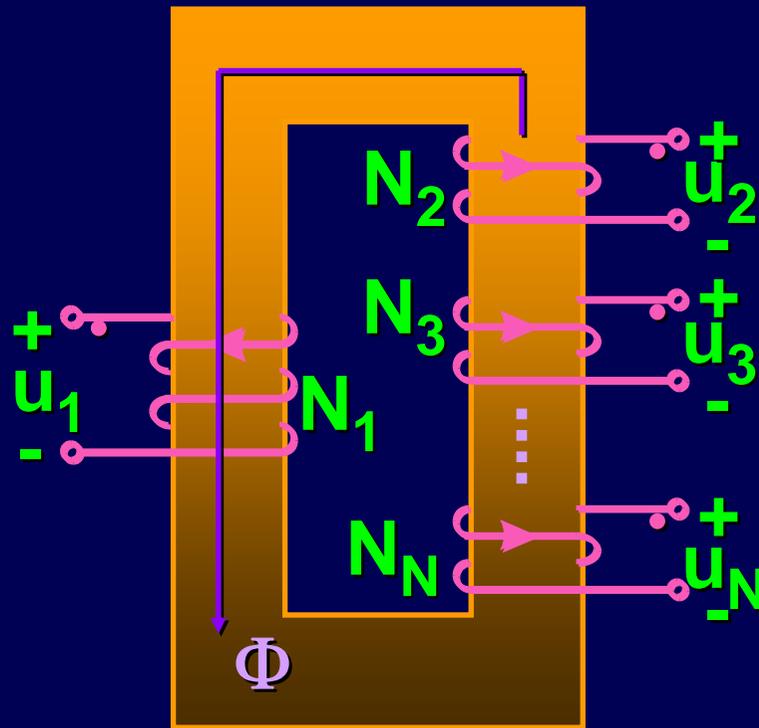
Trasformatore ideale

Trasformatore a piú avvolgimenti



Trasformatore ideale

Trasformatore a piú avvolgimenti



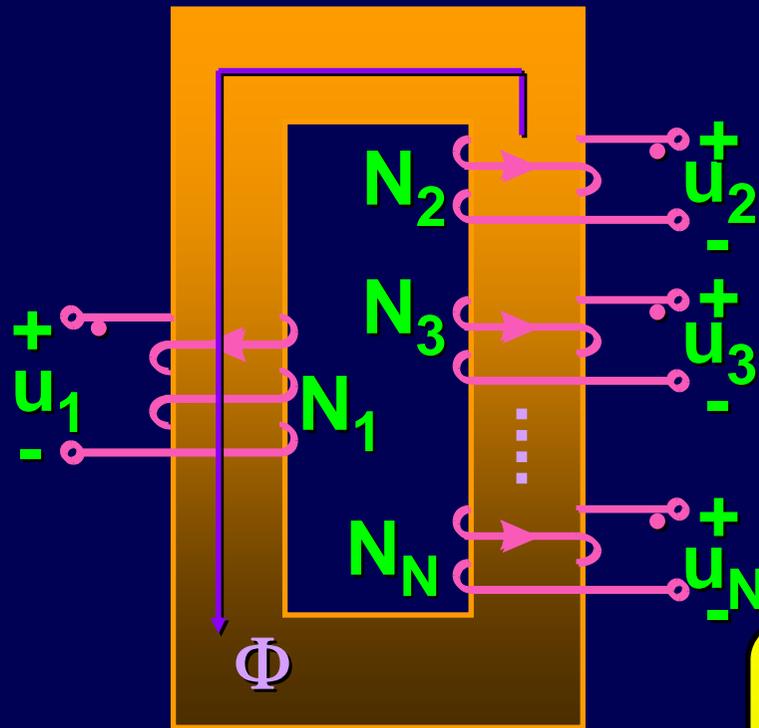
$$\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_N = \Phi$$

Legge delle tensioni

$$\frac{u_k}{u_j} = \frac{N_k}{N_j}$$

Trasformatore ideale

Trasformatore a piú avvolgimenti



Trasformatore ideale

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_N = \Phi$$

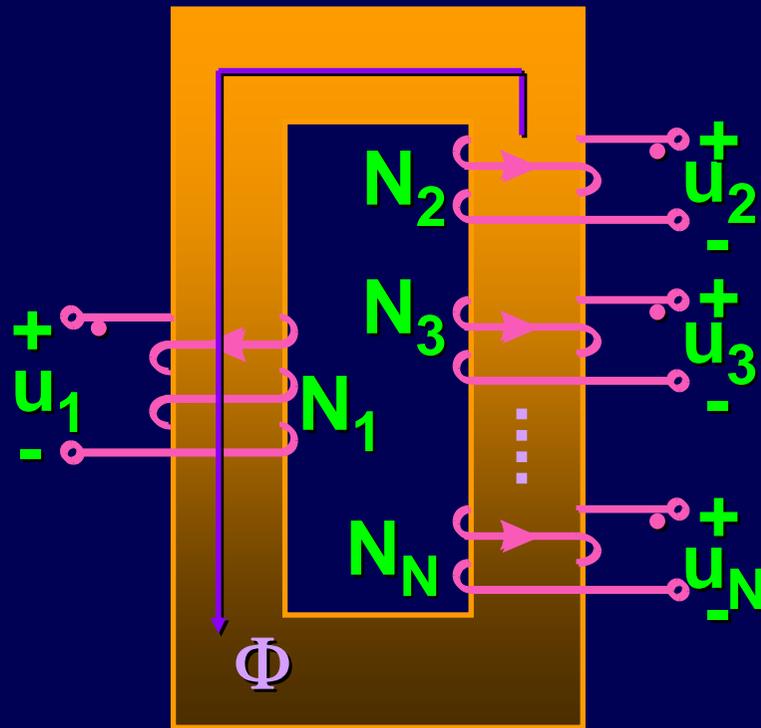
Legge delle tensioni

$$\frac{u_k}{u_j} = \frac{N_k}{N_j}$$

In particolare:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1}; \quad \dots \quad \frac{u_N}{u_1} = \frac{N_N}{N_1}$$

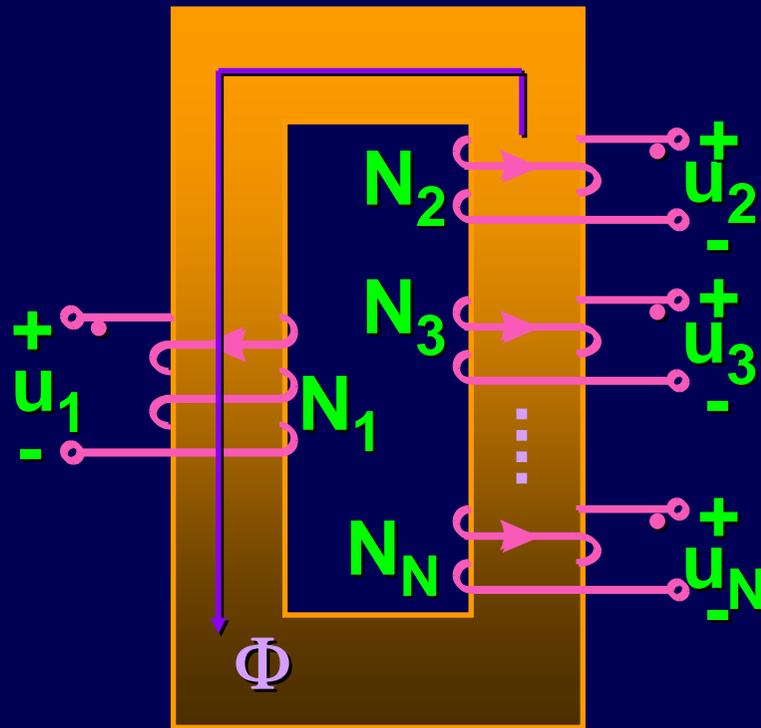
Trasformatore a piú avvolgimenti



Legge delle correnti

Trasformatore ideale

Trasformatore a piú avvolgimenti

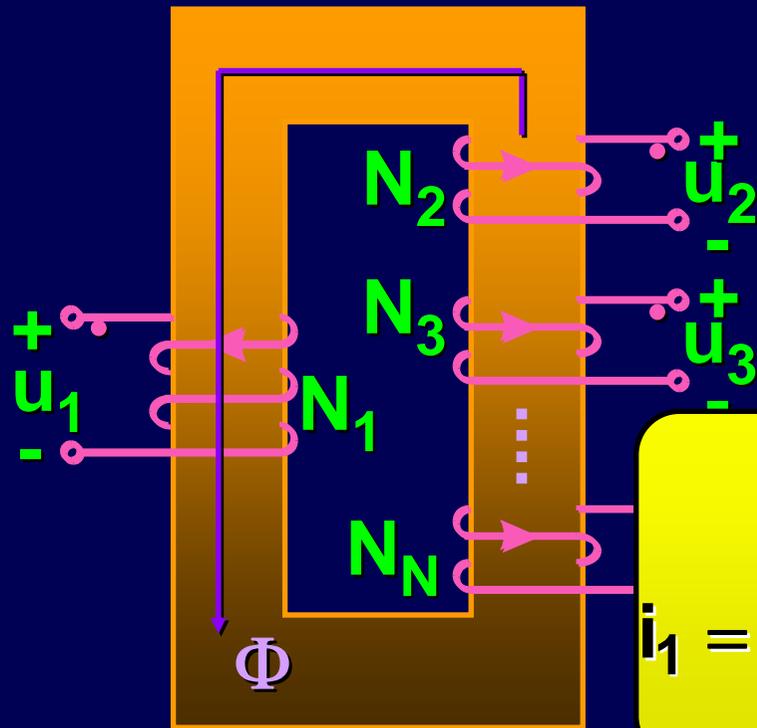


Legge delle correnti

$$\sum_{k=1}^N N_k \cdot i_k = R \cdot \Phi = 0$$

Trasformatore ideale

Trasformatore a piú avvolgimenti



Legge delle correnti

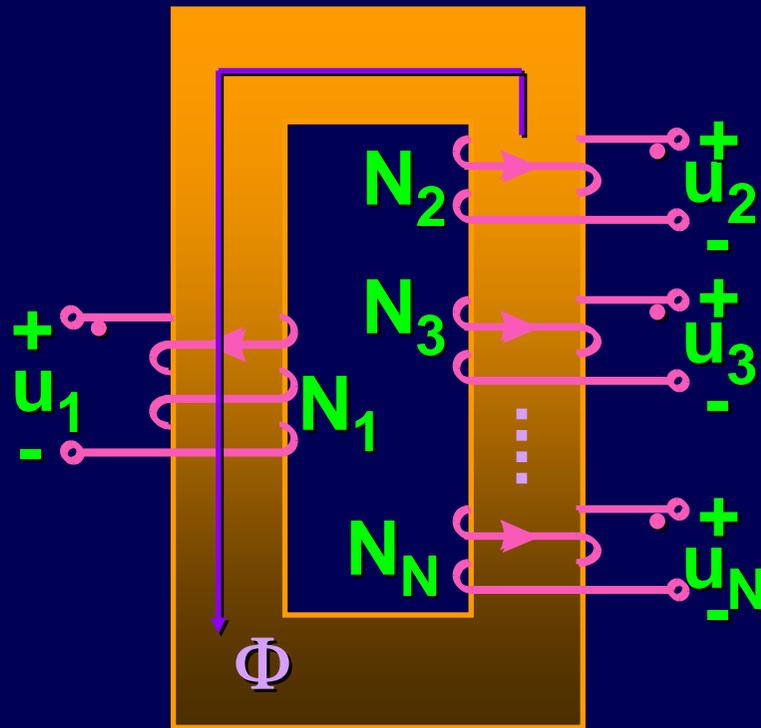
$$\sum_1^N N_k \cdot i_k = R \cdot \Phi = 0$$

In particolare:

$$i_1 = -\frac{1}{N_1} \cdot (N_2 \cdot i_2 + \dots + N_N \cdot i_N)$$

Trasformatore ideale

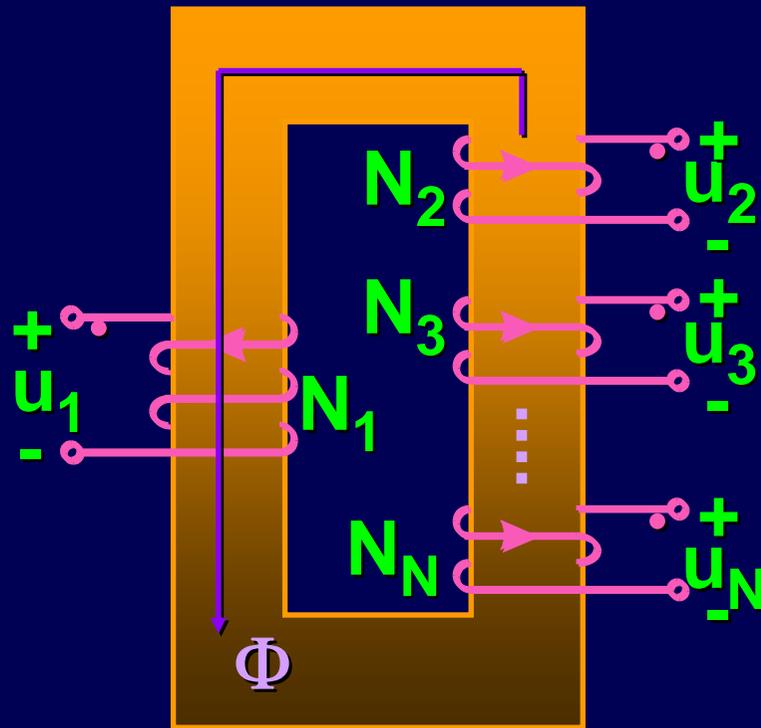
Trasformatore a piú avvolgimenti



Legge delle potenze

Trasformatore ideale

Trasformatore a piú avvolgimenti



Legge delle potenze

$$\sum_1^N u_k \cdot i_k = \sum_1^N P_k = 0$$

Trasformatore ideale

Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- **La tensione non può avere componenti continue**

Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- La tensione non può avere componenti continue

$$\Phi(t) - \Phi(0) = \frac{1}{N} \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$

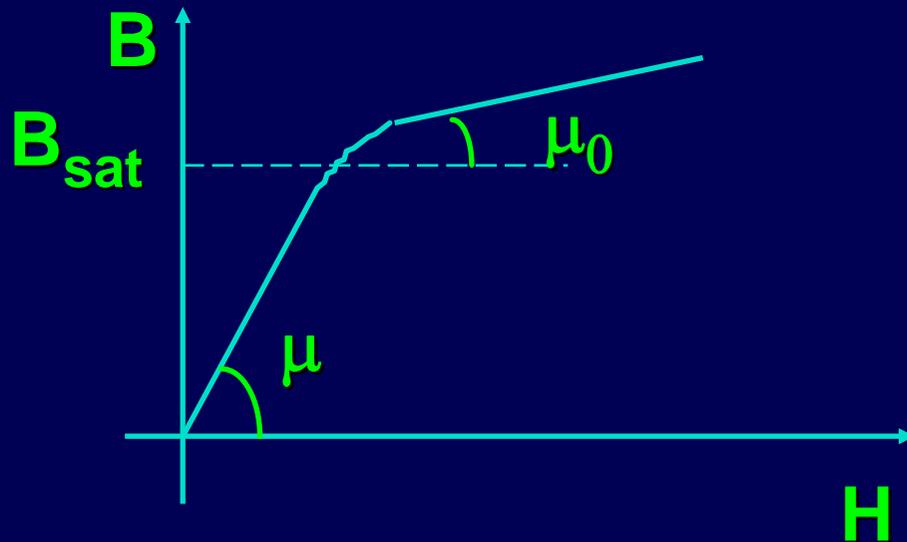
... altrimenti il flusso cresce indefinitamente

Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- La tensione non può avere componenti continue
- B_{\max} é limitata dalla saturazione

Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- La tensione non può avere componenti continue
- B_{\max} é limitata dalla saturazione



Funzionamento con nucleo non saturo

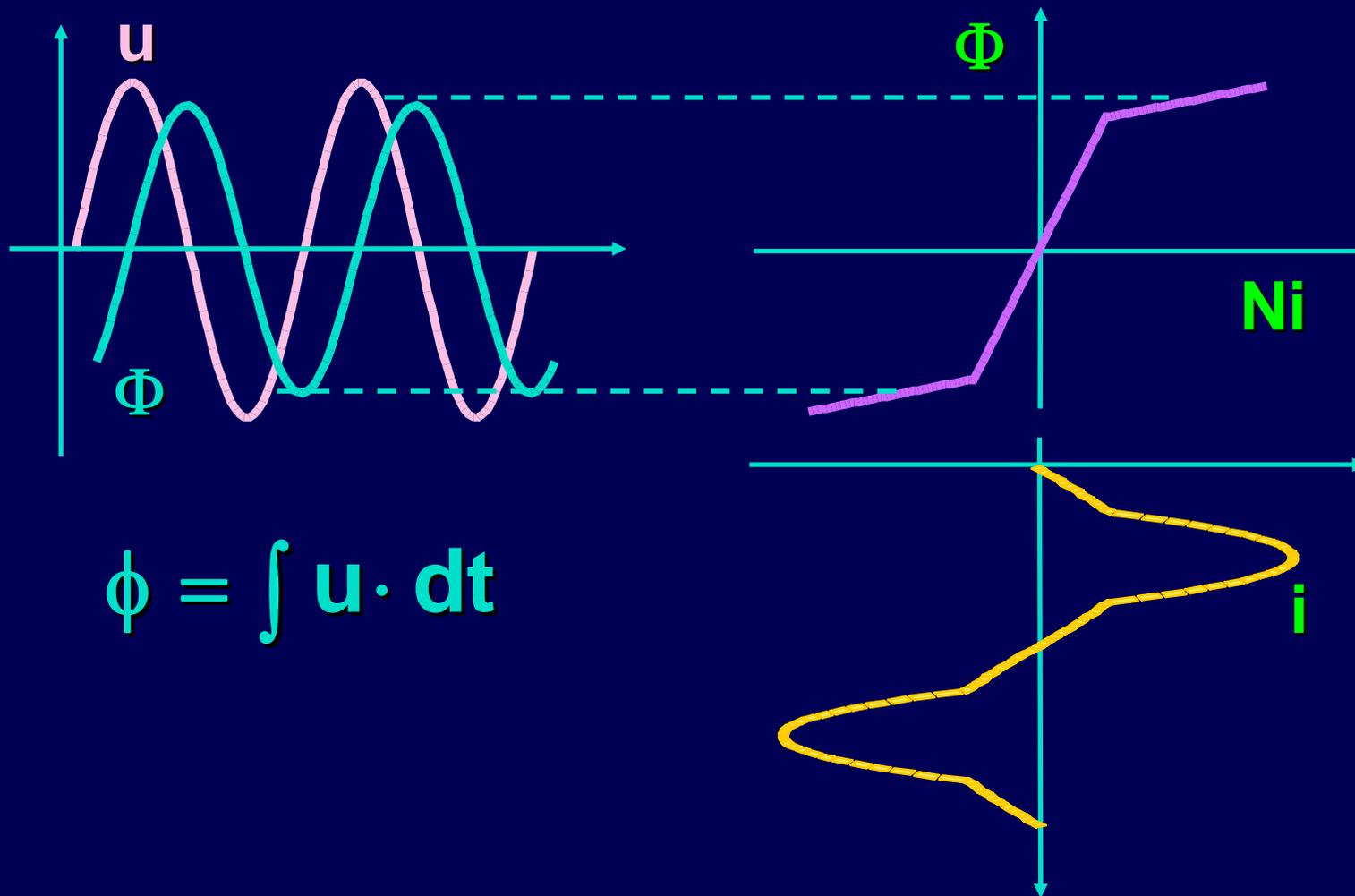


Funzionamento con nucleo non saturo



Imprimendo una tensione sinusoidale il flusso e la corrente risultano anch'essi sinusoidali

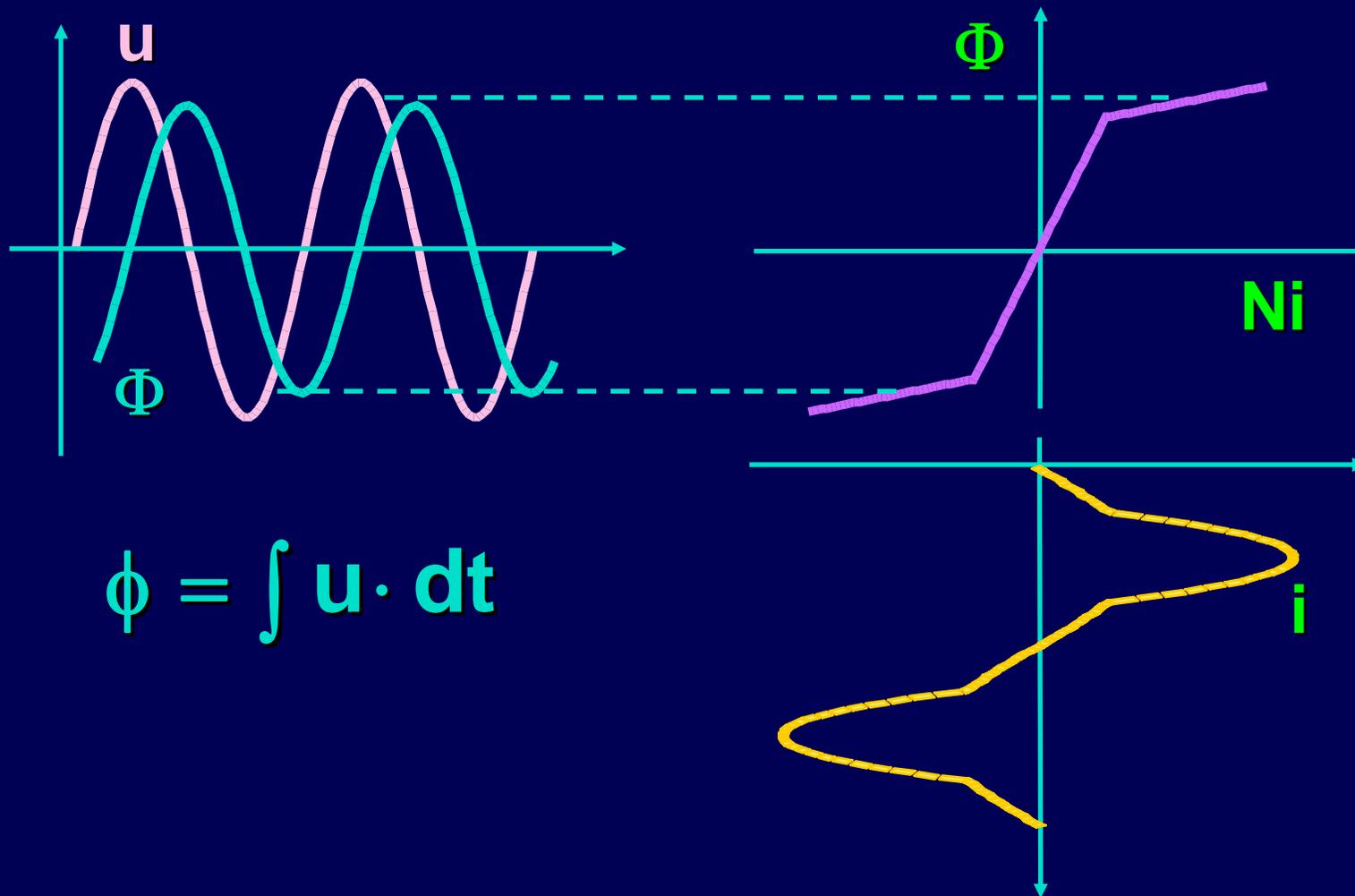
Funzionamento con nucleo saturo



Funzionamento con nucleo saturo

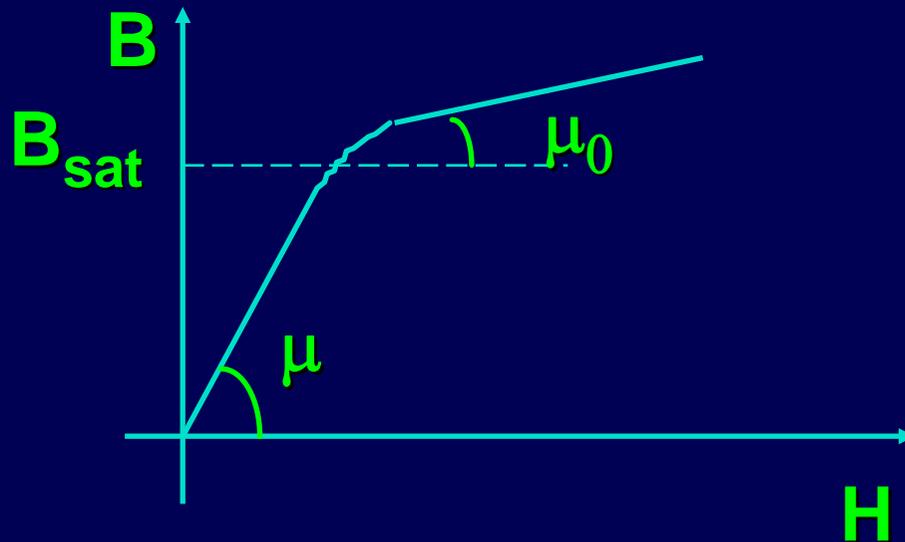


Funzionamento con nucleo saturo



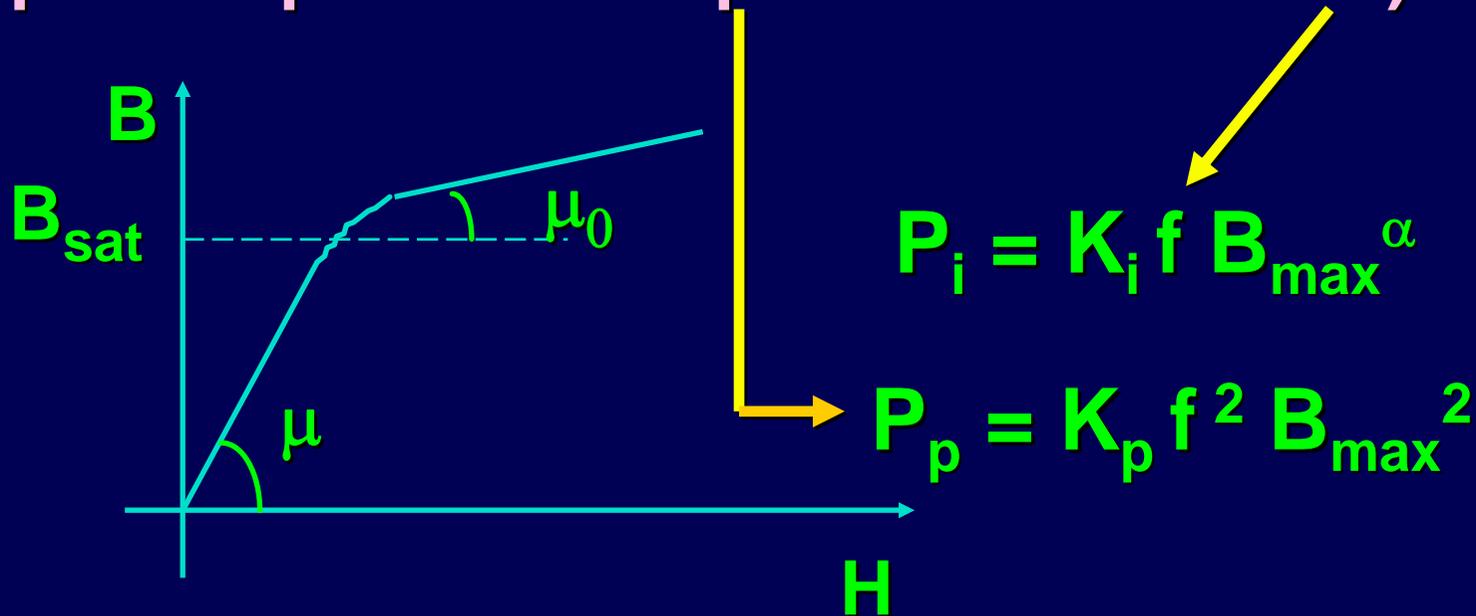
Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- La tensione non può avere componenti continue
- B_{\max} é limitata dalla saturazione



Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- La tensione non può avere componenti continue
- B_{\max} é limitata dalla saturazione (e dalle perdite per correnti parassite e isteresi)



Limiti d'impiego posti dal nucleo magnetico

- La tensione non può avere componenti continue
- B_{\max} é limitata dalla saturazione (e dalle perdite per correnti parassite e isteresi)

Materiali magnetici per alta frequenza debbono avere bassi coefficienti di perdita K_i e K_p .

Si usano **ferriti**, che sono sinterizzati a piccola isteresi magnetica.

$$P_i = K_i f B_{\max}^\alpha$$

$$P_p = K_p f^2 B_{\max}^2$$

→
H

Dimensionamento del nucleo

Dimensionamento del nucleo

- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo

Dimensionamento del nucleo

- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo

$$\Phi(t) - \Phi(0) = \frac{1}{N} \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$

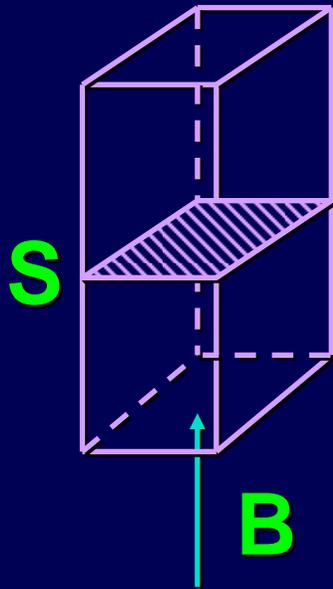
$$\Phi_{\max} = B_{\max} \cdot S \leq B_{\text{sat}} \cdot S$$

Dimensionamento del nucleo

- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo

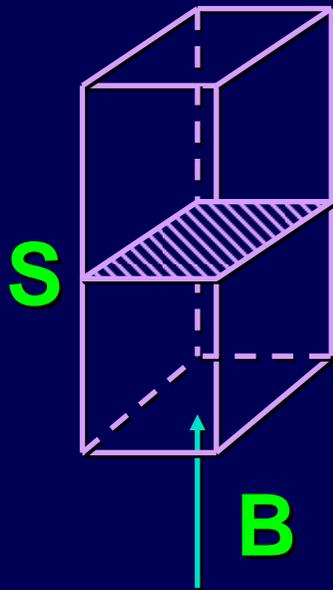
$$\Phi(t) - \Phi(0) = \frac{1}{N} \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$

$$\Phi_{\max} = B_{\max} \cdot S \leq B_{\text{sat}} \cdot S$$



Dimensionamento del nucleo

- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo



$$\Phi(t) - \Phi(0) = \frac{1}{N} \cdot \int_0^t u(\tau) d\tau$$

$$\Phi_{\max} = B_{\max} \cdot S \leq B_{\text{sat}} \cdot S$$

B_{sat} é una caratteristica del materiale: quindi Φ_{\max} determina S (cioé la sezione del nucleo magnetico)

Dimensionamento del nucleo

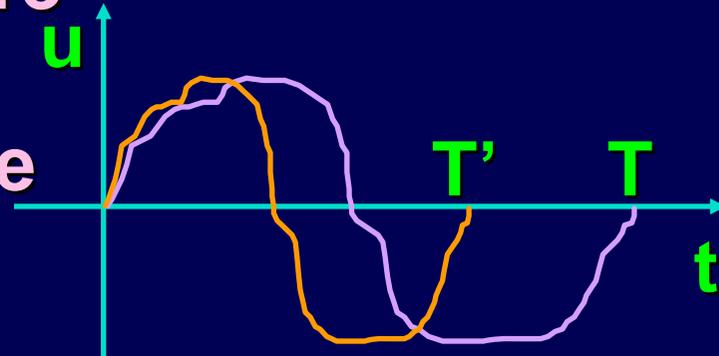
- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo (assegnata B_{sat})

Dimensionamento del nucleo

- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo (assegnata B_{sat})
- Data la forma d'onda della tensione, il valore massimo del flusso (Φ_{max}) é proporzionale al periodo

Dimensionamento del nucleo

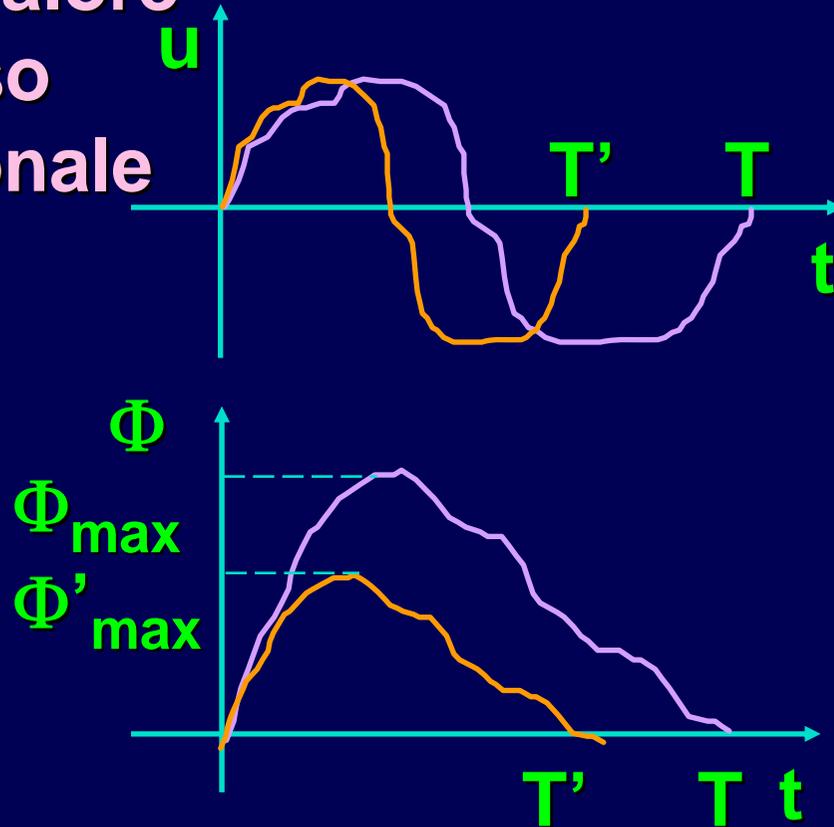
Data la forma d'onda della tensione, il valore massimo del flusso (Φ_{\max}) è proporzionale al periodo



Dimensionamento del nucleo

Data la forma d'onda della tensione, il valore massimo del flusso (Φ_{\max}) è proporzionale al periodo

$$\phi = \int u \cdot dt$$

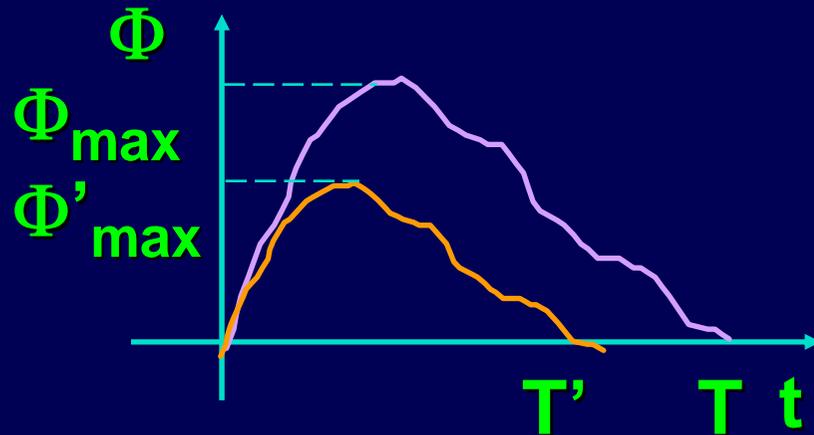
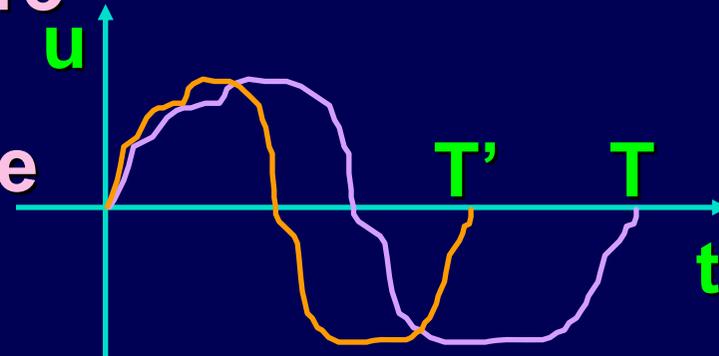


Dimensionamento del nucleo

Data la forma d'onda della tensione, il valore massimo del flusso (Φ_{\max}) é proporzionale al periodo

$$\phi = \int u \cdot dt$$

$$\frac{\Phi_{\max}}{\Phi'_{\max}} = \frac{T}{T'}$$



Dimensionamento del nucleo

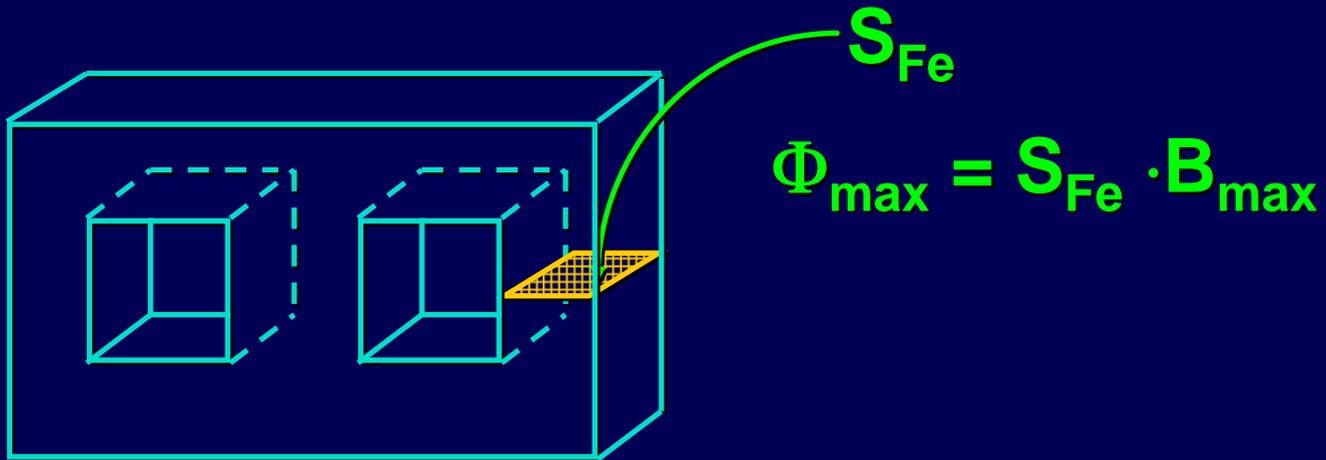
- Il flusso Φ determina le dimensioni del nucleo (assegnata B_{sat})
- Data la forma d'onda della tensione, il valore massimo del flusso (Φ_{max}) é proporzionale al periodo



Un trasformatore dimensionato per funzionare a frequenza più elevata risulta più piccolo

Potenza gestibile dal nucleo

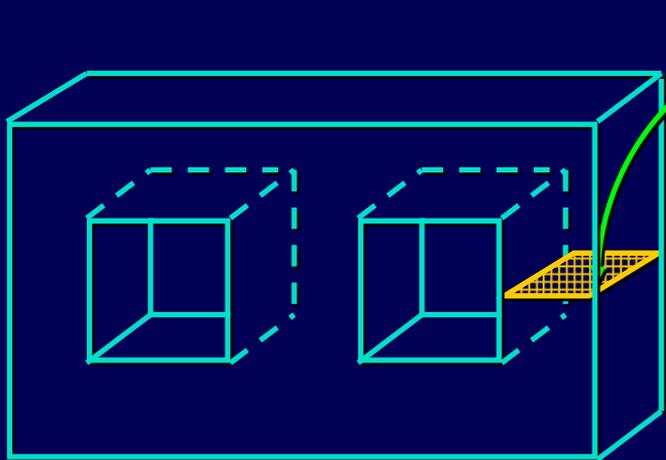
Potenza gestibile dal nucleo



S_{Fe}

$$\Phi_{max} = S_{Fe} \cdot B_{max}$$

Potenza gestibile dal nucleo



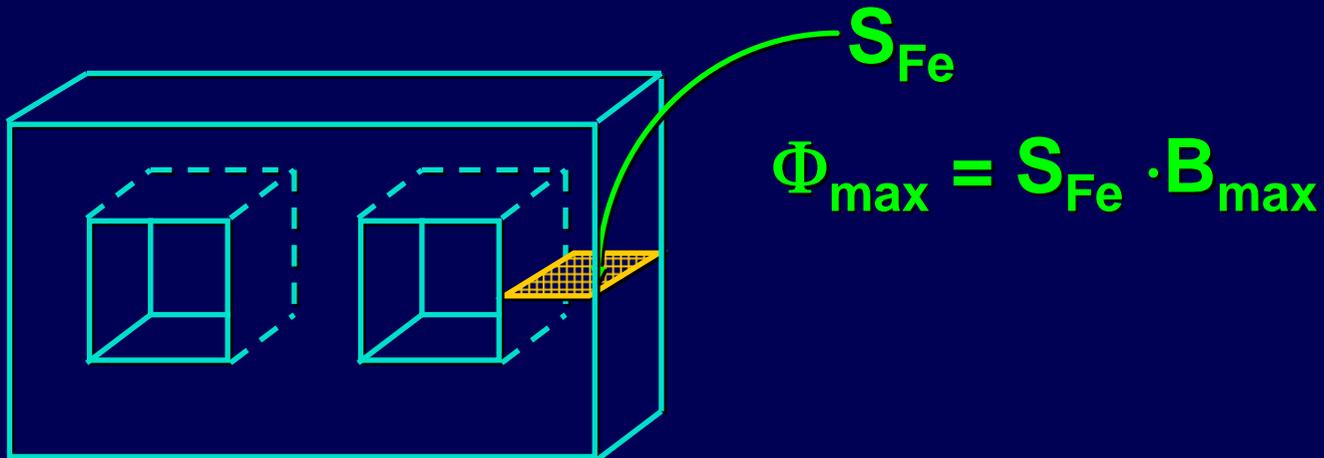
S_{Fe}

$$\Phi_{max} = S_{Fe} \cdot B_{max}$$

0.5T Saturazione

$B_{max} =$

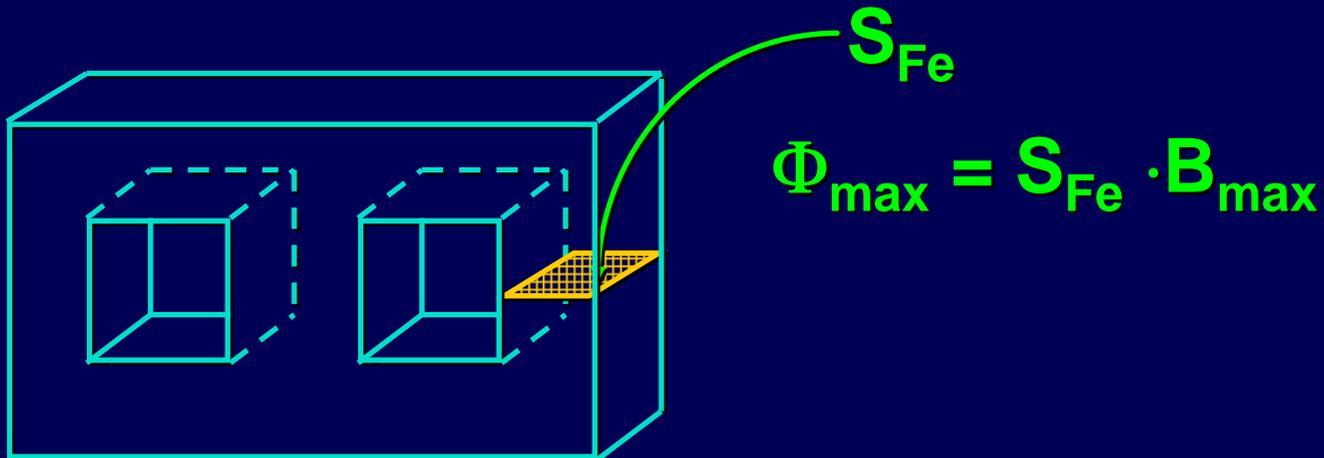
Potenza gestibile dal nucleo



$$B_{max} = \begin{matrix} \nearrow & \text{0.5T Saturazione} \\ \longrightarrow & \text{0.1T 100 kHz} \end{matrix}$$

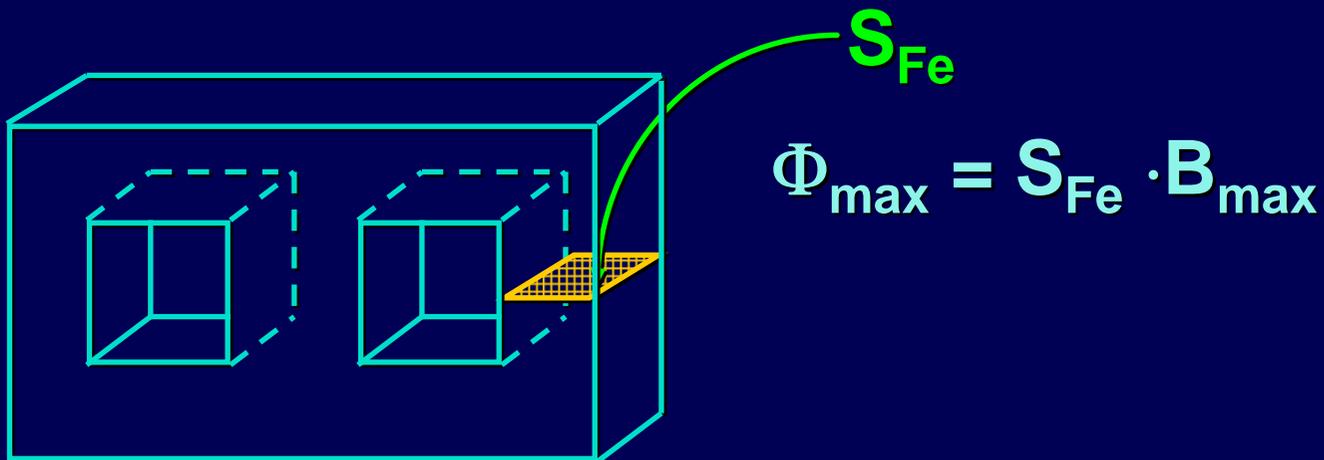
Al crescere della frequenza crescono le perdite per isteresi e correnti parassite

Potenza gestibile dal nucleo



- $B_{max} =$
- 0.5T Saturazione
 - 0.1T 100 kHz
 - 0.03T 500 kHz

Potenza gestibile dal nucleo

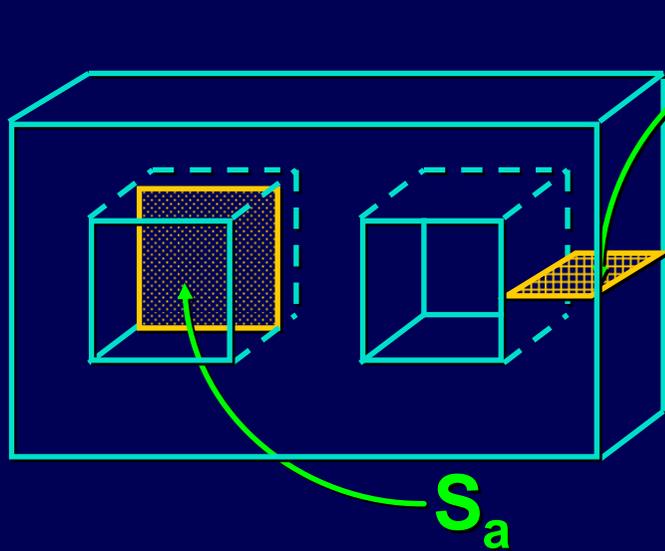


Posto: $\Phi = \Phi_{max} \cdot \text{sen } \omega t$

$$u = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot \omega \cdot \Phi_{max} \cdot \text{cos } \omega t$$

$$U = \frac{N \cdot \omega \cdot B_{max} \cdot S_{Fe}}{\sqrt{2}} \quad U \uparrow \text{ se } \omega \uparrow$$

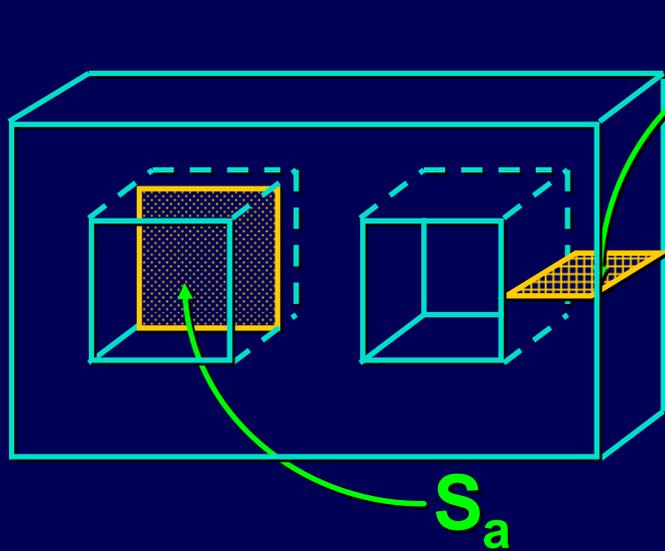
Potenza gestibile dal nucleo



$$\Phi_{\max} = S_{\text{Fe}} \cdot B_{\max}$$
$$U = \frac{N \cdot \omega \cdot B_{\max} \cdot S_{\text{Fe}}}{\sqrt{2}}$$

$$S_{\text{avv}} = \frac{S_a \cdot k_r}{2} = \frac{N \cdot I}{\delta_l}$$

Potenza gestibile dal nucleo



$$\Phi_{\max} = S_{\text{Fe}} \cdot B_{\max}$$
$$U = \frac{N \cdot \omega \cdot B_{\max} \cdot S_{\text{Fe}}}{\sqrt{2}}$$

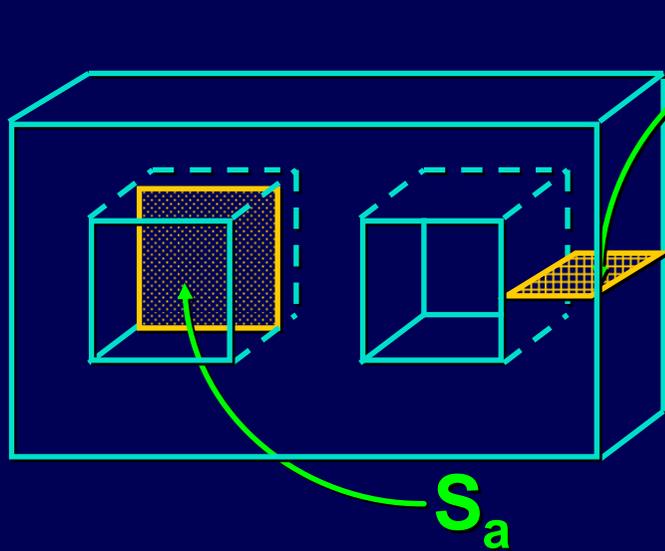
coeff. riempimento $\cong 0.5$

$$S_{\text{avv}} = \frac{S_a \cdot k_r}{2} = \frac{N \cdot I}{\delta_I}$$

2 avvolgimenti

3-5 A/mm²

Potenza gestibile dal nucleo



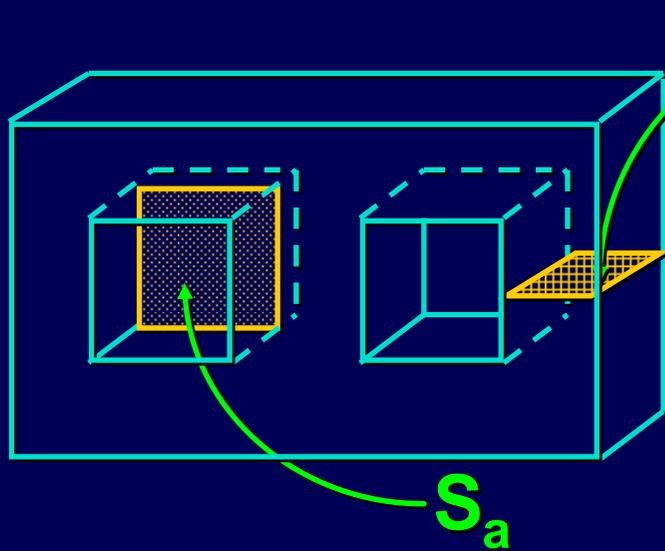
$$\Phi_{\max} = S_{Fe} \cdot B_{\max}$$
$$U = \frac{N \cdot \omega \cdot B_{\max} \cdot S_{Fe}}{\sqrt{2}}$$

$$I = \frac{S_a \cdot k_r \cdot \delta_l}{2 \cdot N}$$

$$P = P_1 = P_2 = U \cdot I = \omega \cdot B_{\max} \cdot \underbrace{S_{Fe} \cdot S_a}_{\text{Dimensioni del nucleo}} \cdot \delta_l \cdot \frac{k_r}{2\sqrt{2}}$$

Dimensioni del nucleo

Potenza gestibile dal nucleo



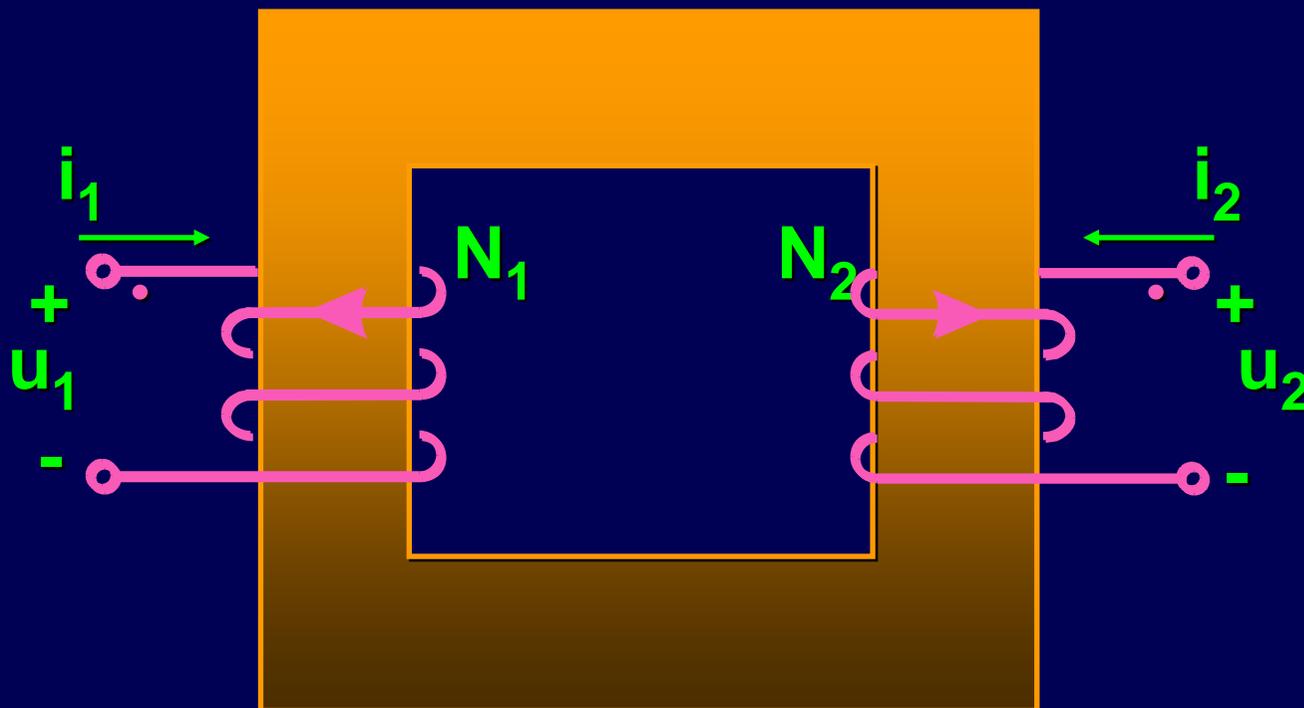
$$\Phi_{\max} = S_{\text{Fe}} \cdot B_{\max}$$

$$U = \frac{N \cdot \omega \cdot B_{\max} \cdot S_{\text{Fe}}}{\sqrt{2}}$$

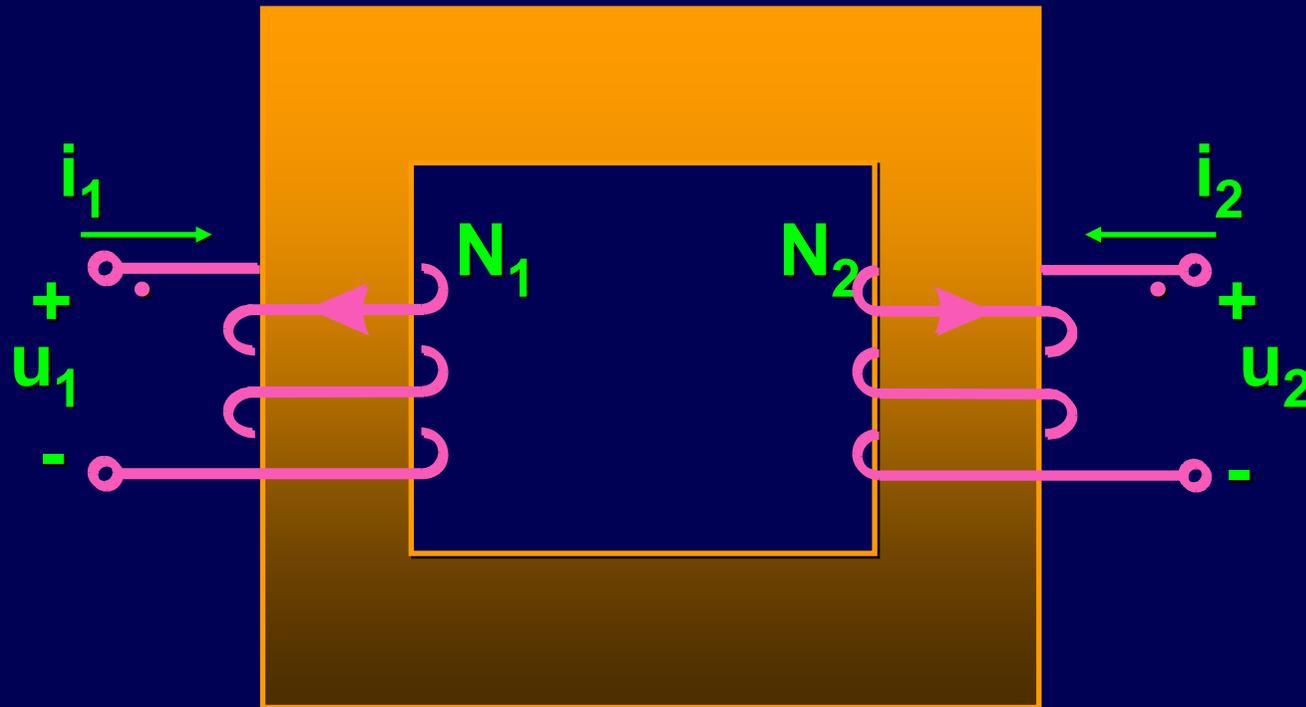
$$I = \frac{S_a \cdot k_r \cdot \delta_l}{2 \cdot N}$$

$$P \propto \omega \cdot S_{\text{Fe}} \cdot S_a \propto \omega \cdot \text{Vol}$$

Trasformatore reale ($\mu < \infty$)

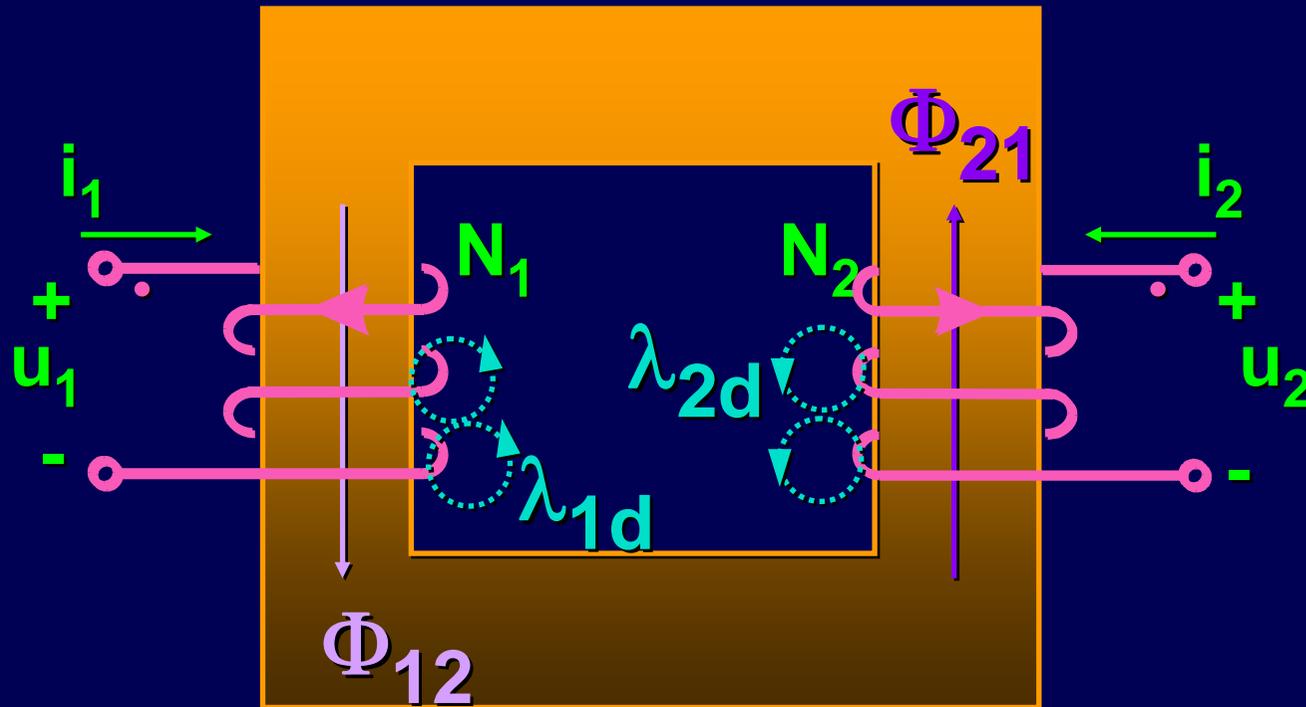


Trasformatore reale ($\mu < \infty$)



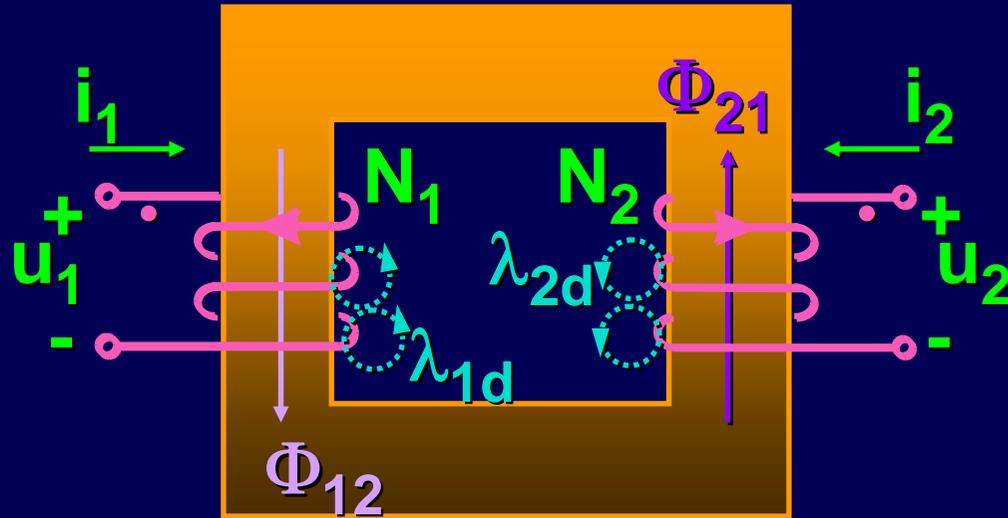
La riluttanza del nucleo non è trascurabile

Trasformatore reale ($\mu < \infty$)



La riluttanza del nucleo non è trascurabile
I flussi concatenati con gli avvolgimenti
sono diversi

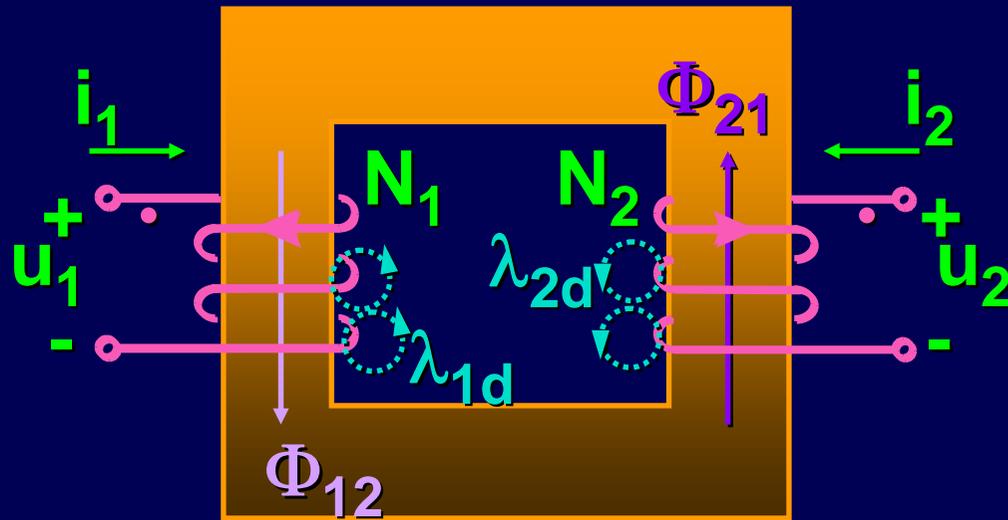
Trasformatore reale ($\mu < \infty$)



$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{1d}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{2d}$$

Trasformatore reale ($\mu < \infty$)



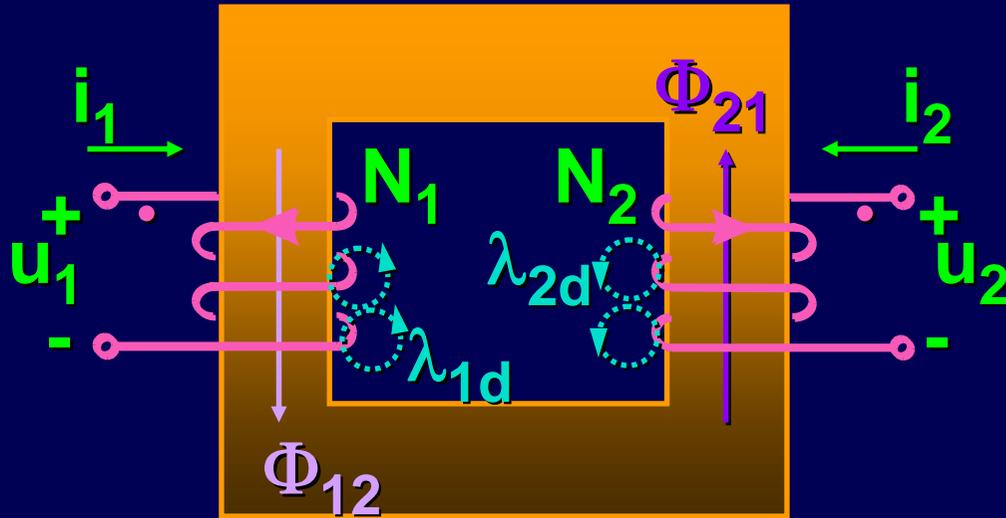
$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{1d}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{2d}$$

$$\lambda_{12} = N_1 \cdot \Phi_{12}$$

$$\lambda_{21} = N_2 \cdot \Phi_{21}$$

Trasformatore reale ($\mu < \infty$)



$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{1d}$$

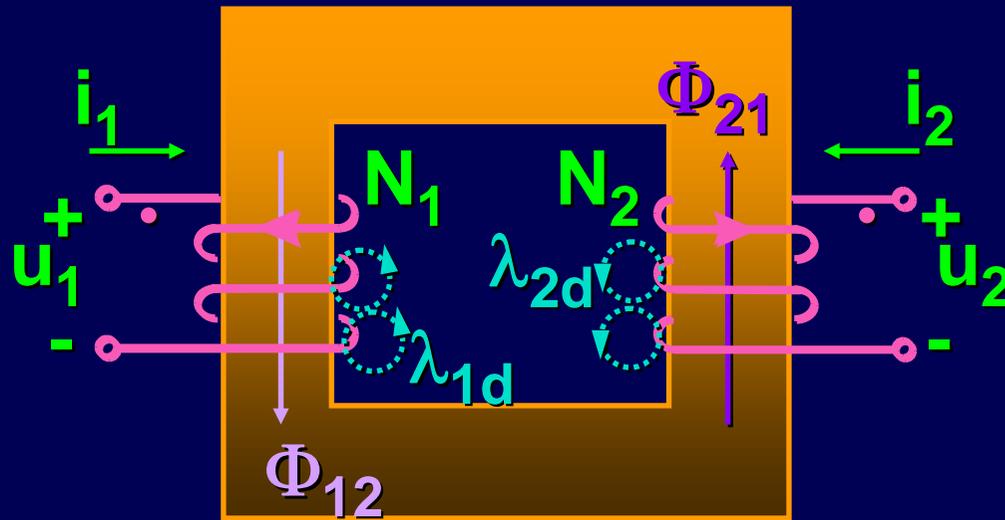
$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{2d}$$

$$\lambda_{12} = N_1 \cdot \Phi_{12}$$

$$\lambda_{21} = N_2 \cdot \Phi_{21}$$

$$\Phi_{12} = \Phi_{21} = \Phi$$

Trasformatore reale ($\mu < \infty$)



Induttanze di dispersione:

$$\lambda_1 = \lambda_{12} + \lambda_{1d}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{2d}$$

$$\lambda_{12} = N_1 \cdot \Phi_{12}$$

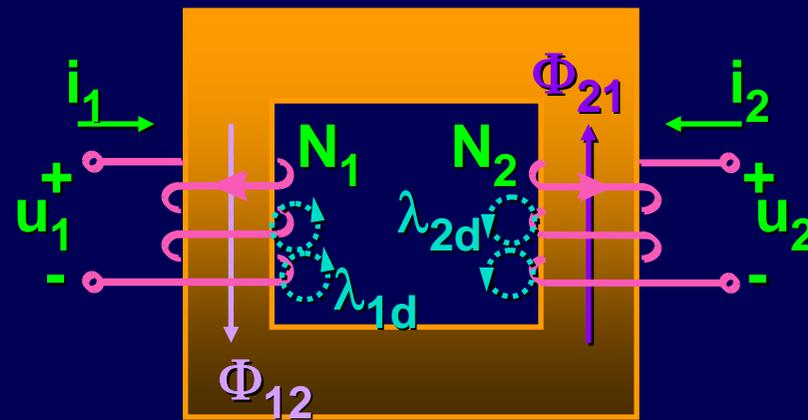
$$\lambda_{21} = N_2 \cdot \Phi_{21}$$

$$\Phi_{12} = \Phi_{21} = \Phi$$

$$\lambda_{1d} = L_{1d} \cdot i_1$$

$$\lambda_{2d} = L_{2d} \cdot i_2$$

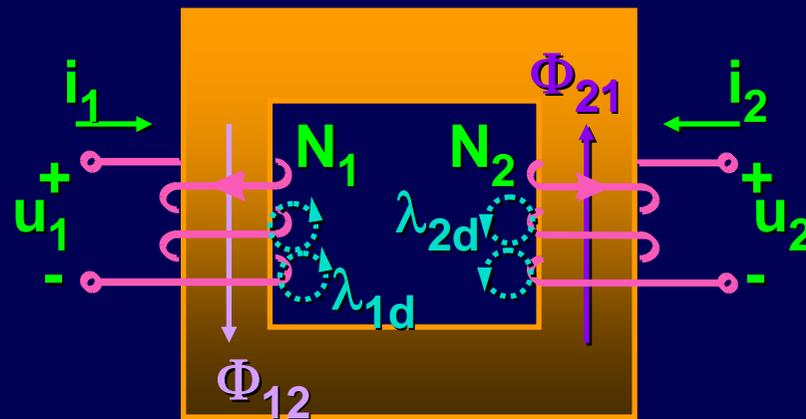
Trasformatore reale



Trasformatore reale

$$u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = \frac{d\lambda_{1d}}{dt} + \frac{d\lambda_{12}}{dt} = L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = \frac{d\lambda_{2d}}{dt} + \frac{d\lambda_{21}}{dt} = L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$



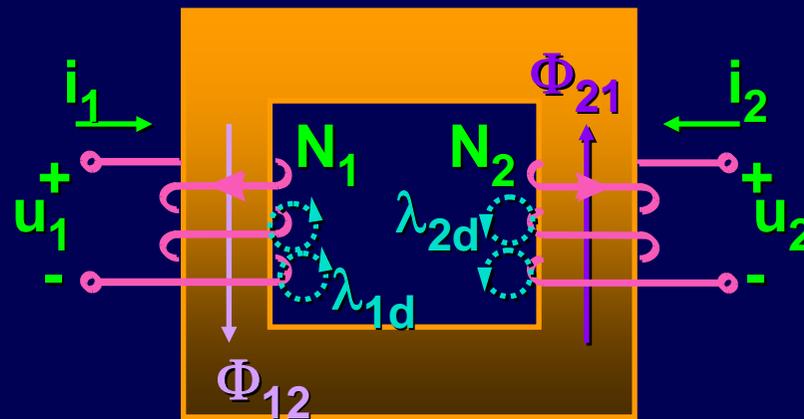
Trasformatore reale

$$u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = \frac{d\lambda_{1d}}{dt} + \frac{d\lambda_{12}}{dt} = L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = \frac{d\lambda_{2d}}{dt} + \frac{d\lambda_{21}}{dt} = L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Posto:

$$\begin{cases} e_1 = u_1 - L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} \\ e_2 = u_2 - L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$



Trasformatore reale

$$u_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = \frac{d\lambda_{1d}}{dt} + \frac{d\lambda_{12}}{dt} = L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$u_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = \frac{d\lambda_{2d}}{dt} + \frac{d\lambda_{21}}{dt} = L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

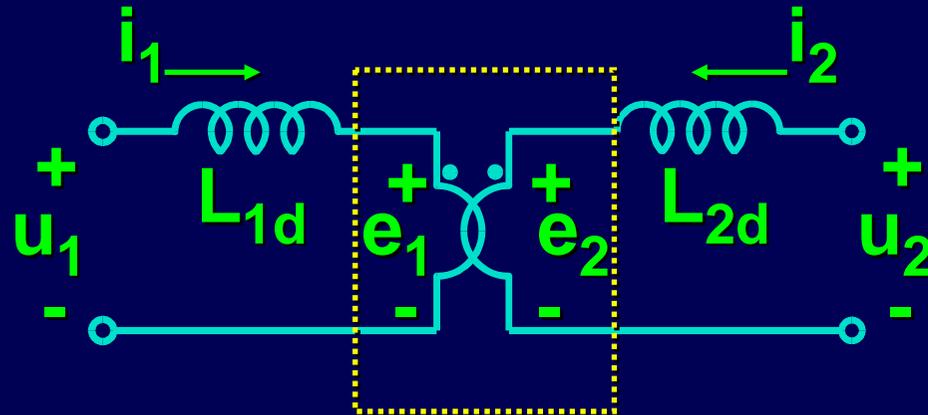
Posto:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = u_1 - L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} \\ e_2 = u_2 - L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} \end{array} \right.$$

si ha:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Circuito equivalente del trasformatore reale



**Trasformatore
ideale**

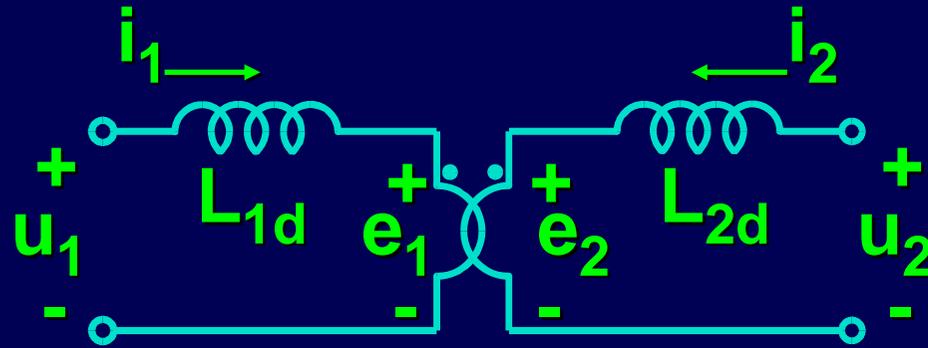
$$u_1 = L_{1d} \cdot \frac{di_1}{dt} + e_1$$

$$u_2 = L_{2d} \cdot \frac{di_2}{dt} + e_2$$

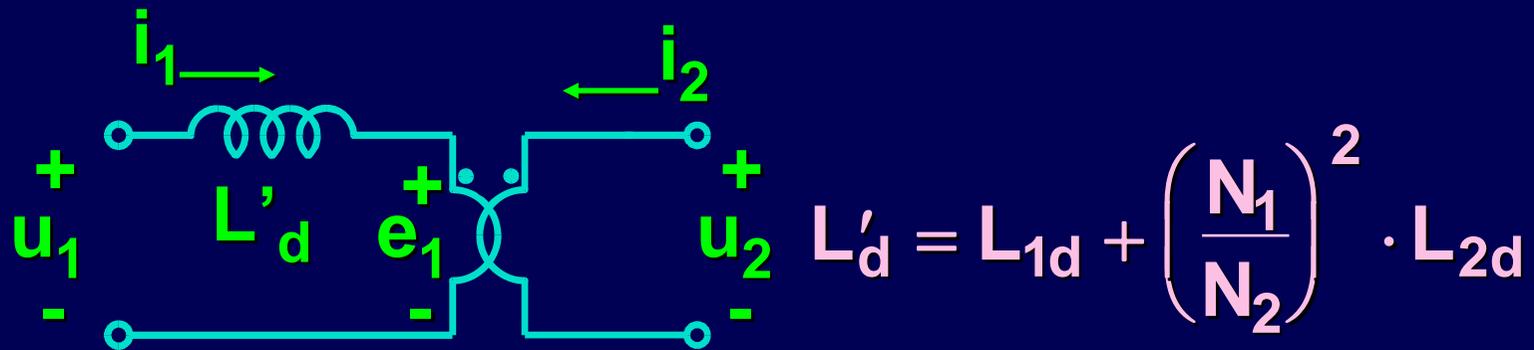
$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1}$$

Circuito equivalente del trasformatore reale



Circuito equivalente semplificato



Corrente magnetizzante

Corrente magnetizzante

$$\Phi(t) = \int \frac{e_1}{N_1} dt$$

Corrente magnetizzante

$$\Phi(t) = \int \frac{e_1}{N_1} dt$$

Al flusso è associata una forza magnetomotrice, che viene fornita dalla sorgente di alimentazione (circuitto primario)

Corrente magnetizzante

$$\Phi(t) = \int \frac{e_1}{N_1} dt$$

Al flusso è associata una forza magnetomotrice, che viene fornita dalla sorgente di alimentazione (circuitto primario)

$$\mathbf{R} \cdot \Phi = N_1 \cdot i_{\mu 1} \quad \rightarrow \quad i_{\mu 1} = \frac{\mathbf{R} \cdot \Phi}{N_1}$$

Corrente magnetizzante

$$\Phi(t) = \int \frac{e_1}{N_1} dt$$

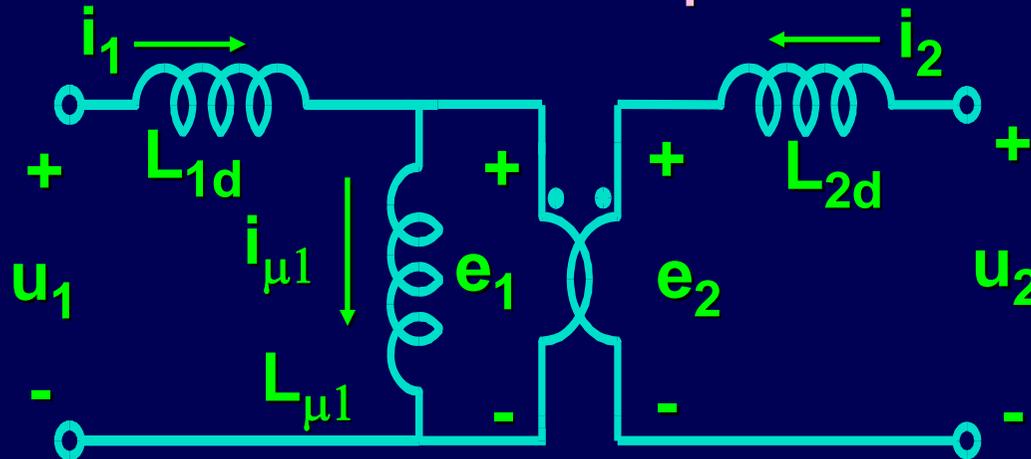
Al flusso è associata una forza magnetomotrice, che viene fornita dalla sorgente di alimentazione (circuitto primario)

$$R \cdot \Phi = N_1 \cdot i_{\mu 1} \quad \rightarrow \quad i_{\mu 1} = \frac{R \cdot \Phi}{N_1}$$

La corrente $i_{\mu 1}$ è la corrente magnetizzante (riferita a primario) del trasformatore

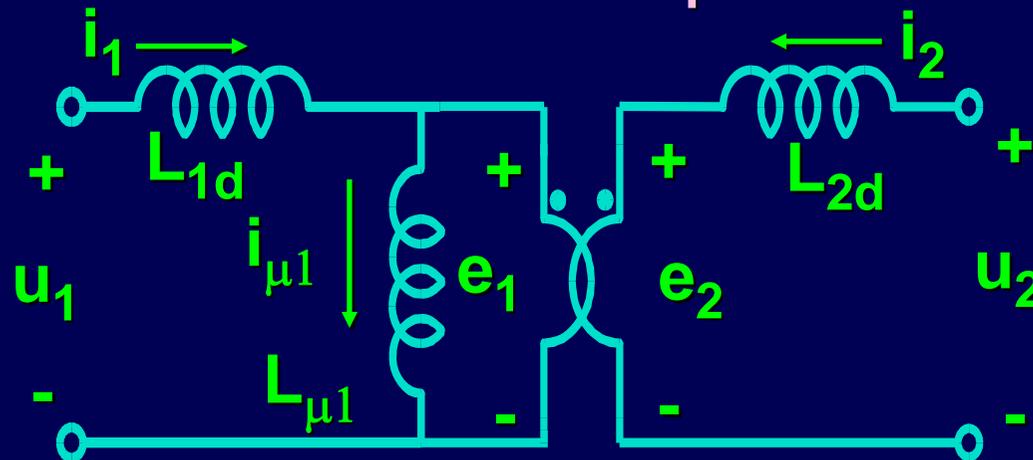
Corrente magnetizzante

La corrente magnetizzante $i_{\mu 1}$ viene associata ad una induttanza equivalente nonlineare (induttanza magnetizzante $L_{\mu 1}$) alimentata alla tensione e_1



Corrente magnetizzante

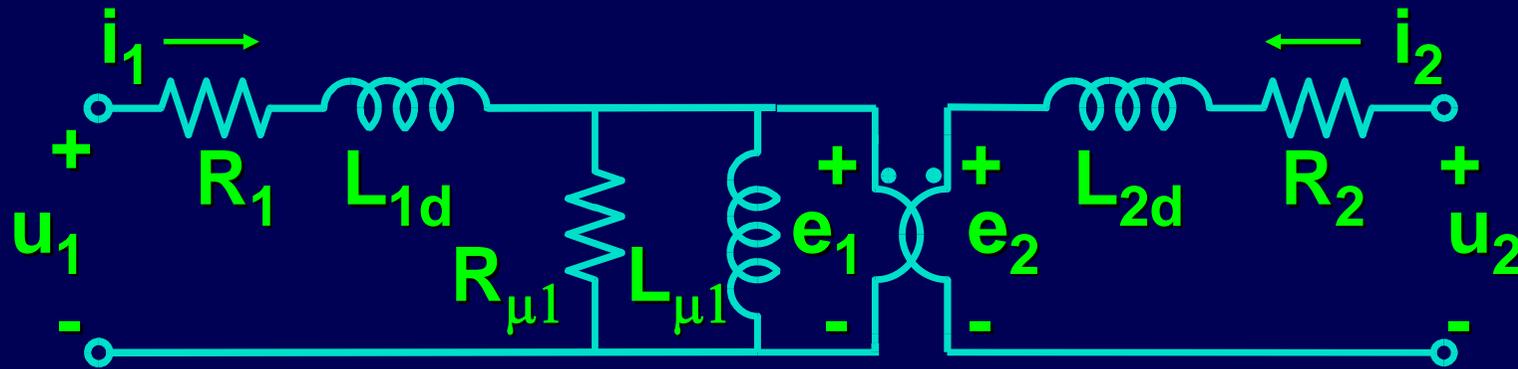
La corrente magnetizzante $i_{\mu 1}$ viene associata ad una induttanza equivalente nonlineare (**induttanza magnetizzante $L_{\mu 1}$**) alimentata alla tensione e_1



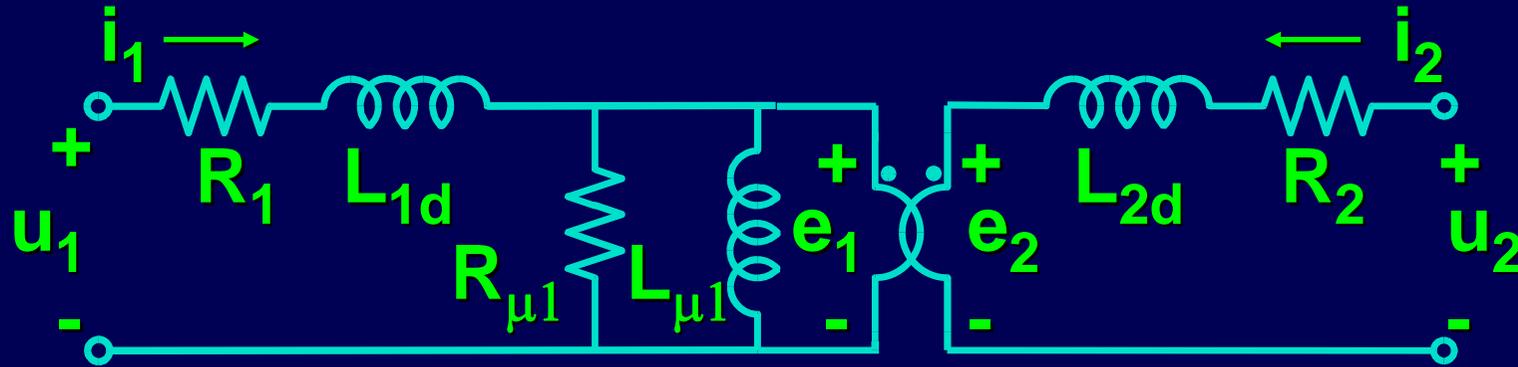
$L_{\mu 1}$ può essere rappresentata anche a secondario

Schema equivalente complessivo

Schema equivalente compressivo

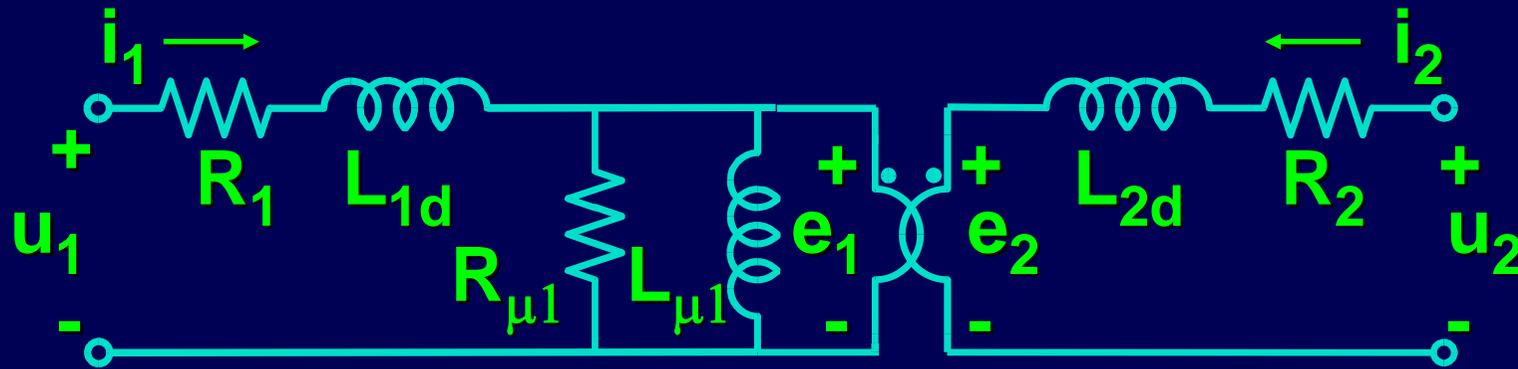


Schema equivalente complessivo



R_1 e R_2 sono le resistenze degli avvolgimenti

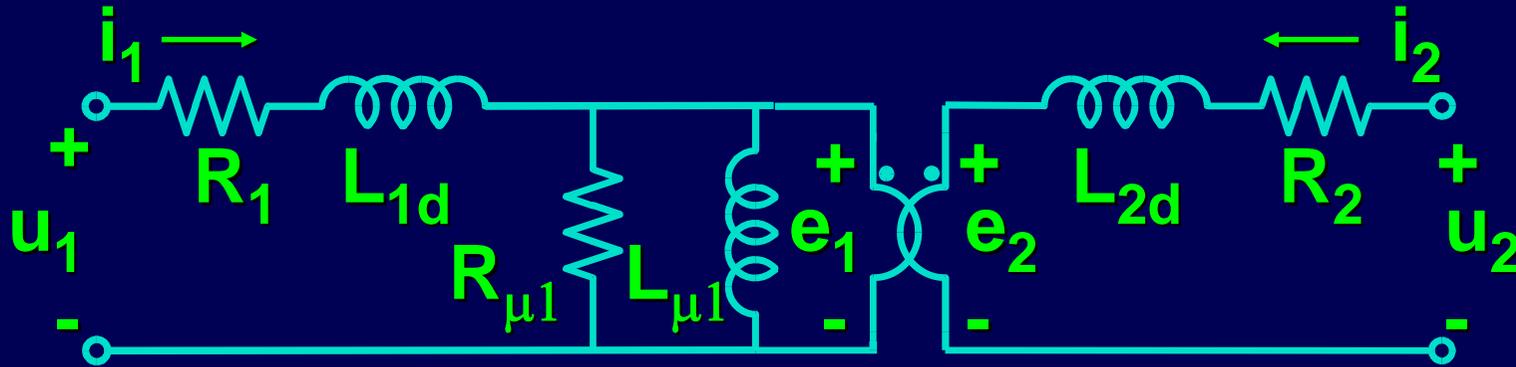
Schema equivalente complessivo



R_1 e R_2 sono le resistenze degli avvolgimenti

$R_{\mu 1}$ tiene conto delle perdite nel nucleo (isteresi e correnti parassite)

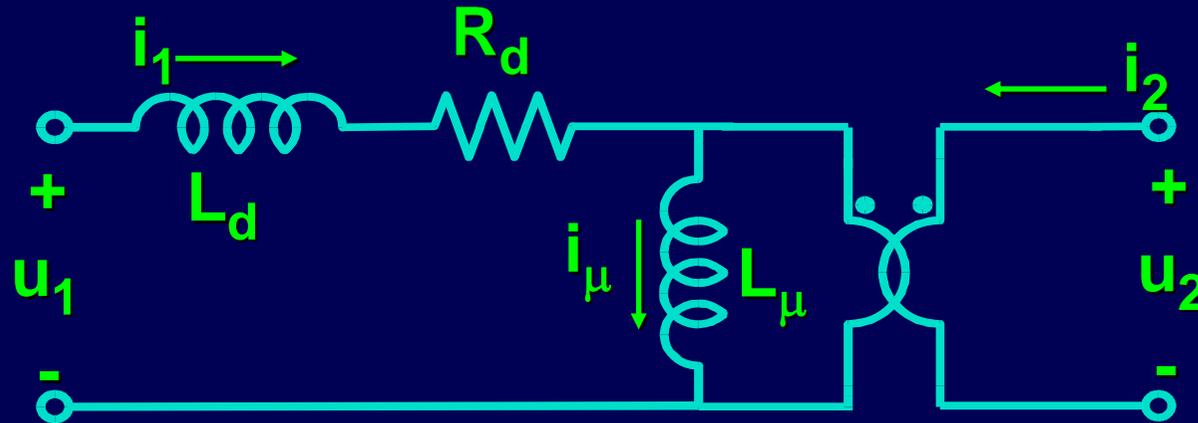
Schema equivalente complessivo



Nota: Il trasformatore reale non conserva la potenza. Vi sono elementi dissipativi (R_1 , R_2 , $R_{\mu 1}$) e di accumulo energetico (L_{1d} , L_{2d} , $L_{\mu 1}$)

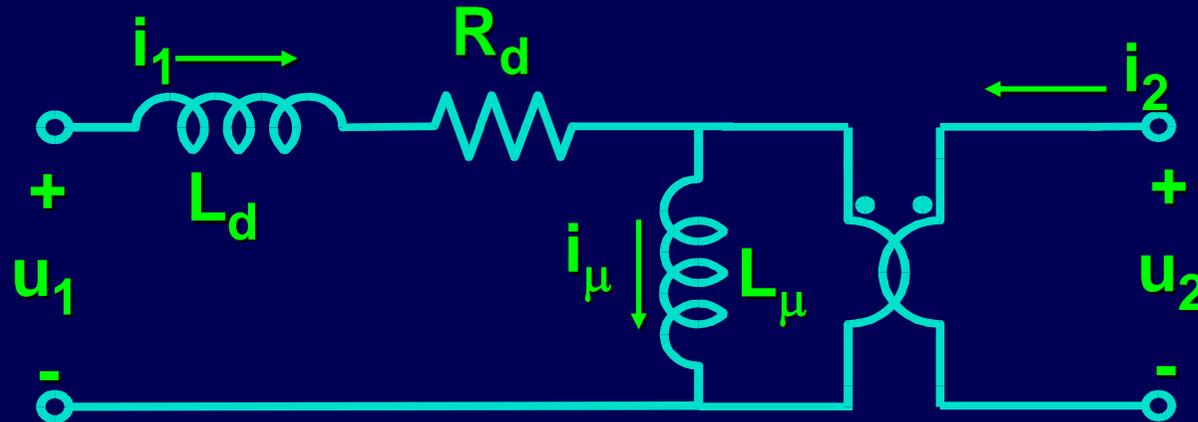
Schema semplificato del trasformatore reale

Schema semplificato del trasformatore reale



$$L_d = L_{1d} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2d} \quad R_d = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

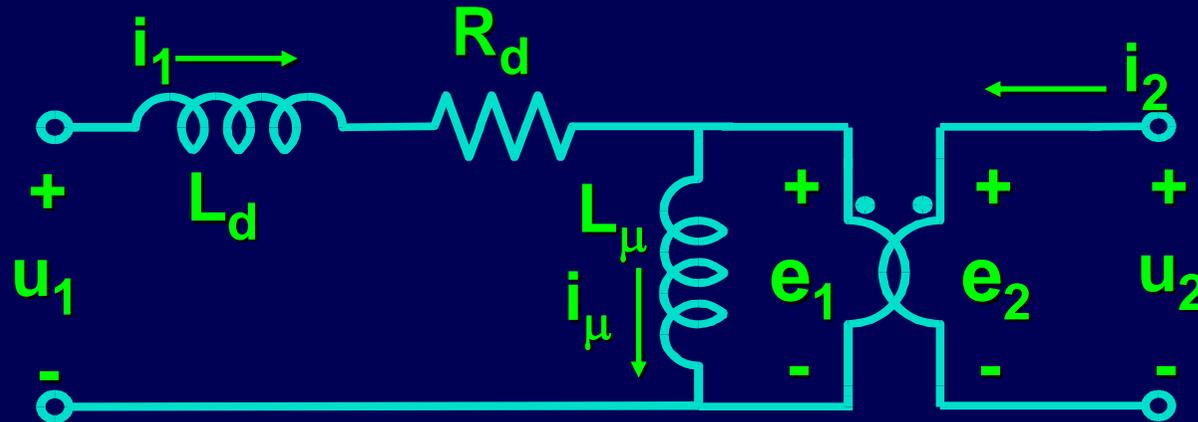
Schema semplificato del trasformatore reale



Ipotesi semplificative:

$$L_d = L_{1d} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2d} \quad R_d = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

Schema semplificato del trasformatore reale

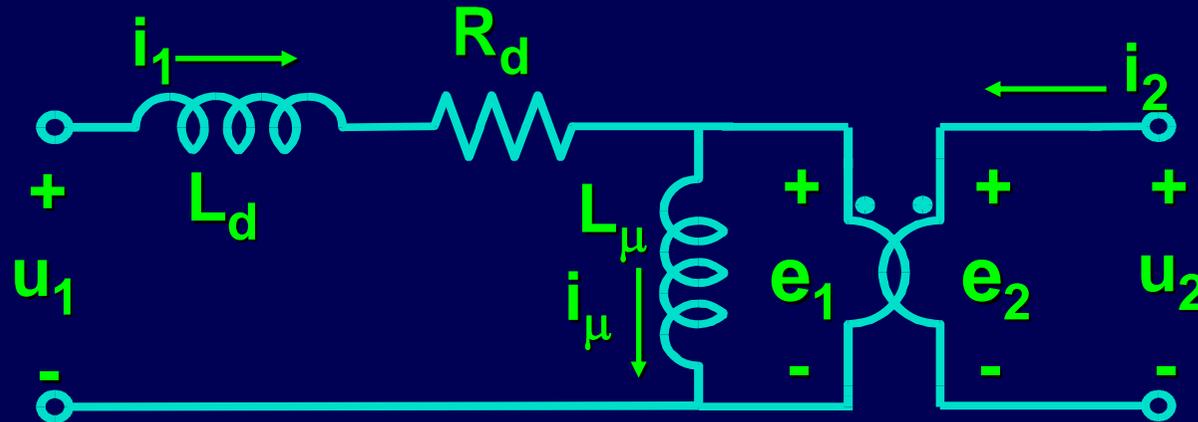


Ipotesi semplificative:

- piccole cadute di tensione: $u_1 \cong e_1$ $u_2 \cong e_2$

$$L_d = L_{1d} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2d} \quad R_d = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

Schema semplificato del trasformatore reale



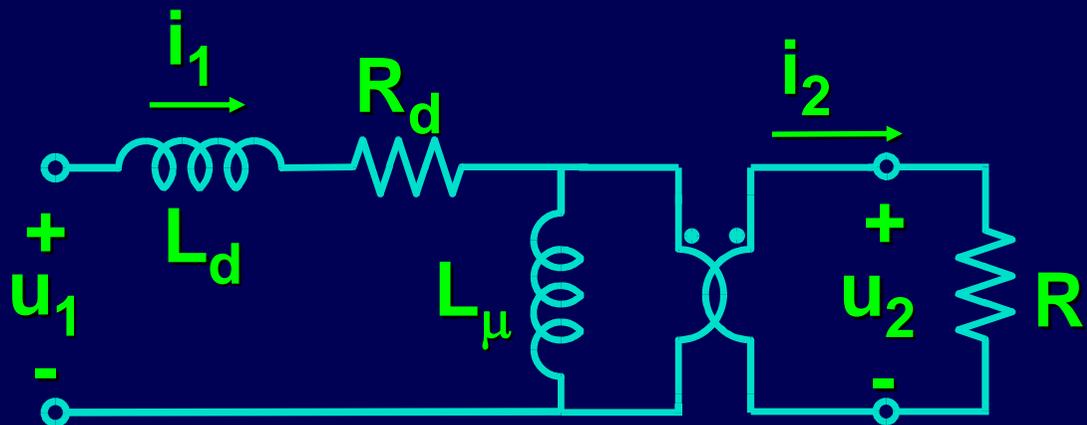
Ipotesi semplificative:

- piccole cadute di tensione: $u_1 \cong e_1$ $u_2 \cong e_2$
- perdite nel nucleo trascurabili: $R_{\mu 1} = \infty$

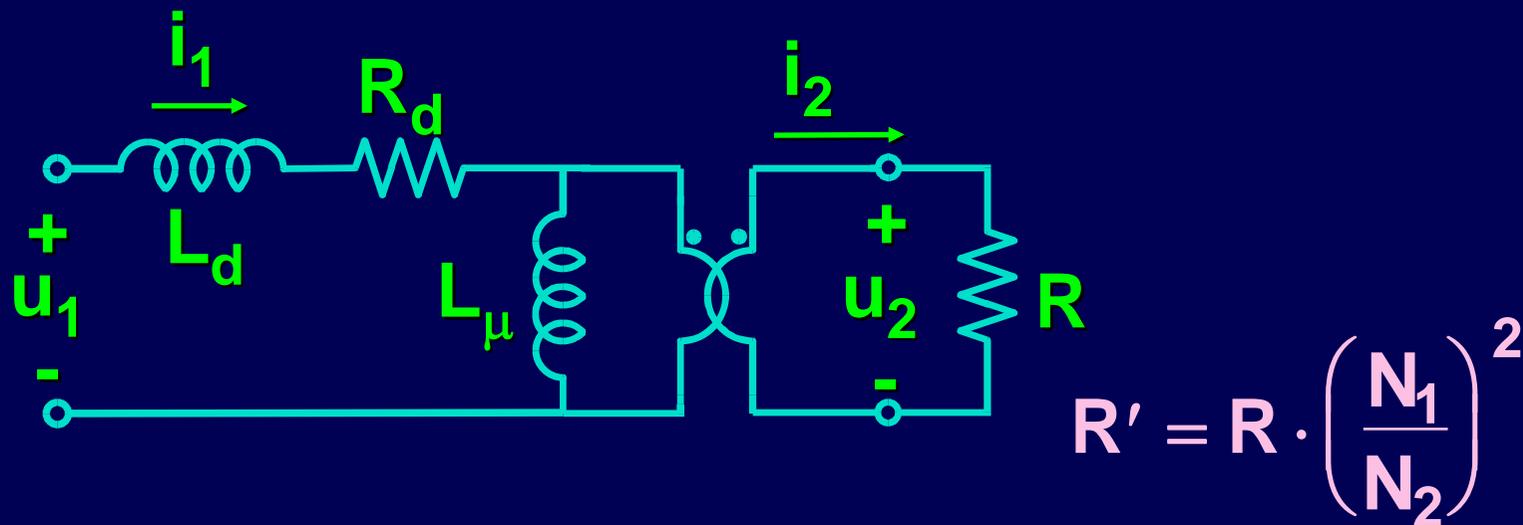
$$L_d = L_{1d} + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{2d} \quad R_d = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2$$

Risposta in frequenza del trasformatore

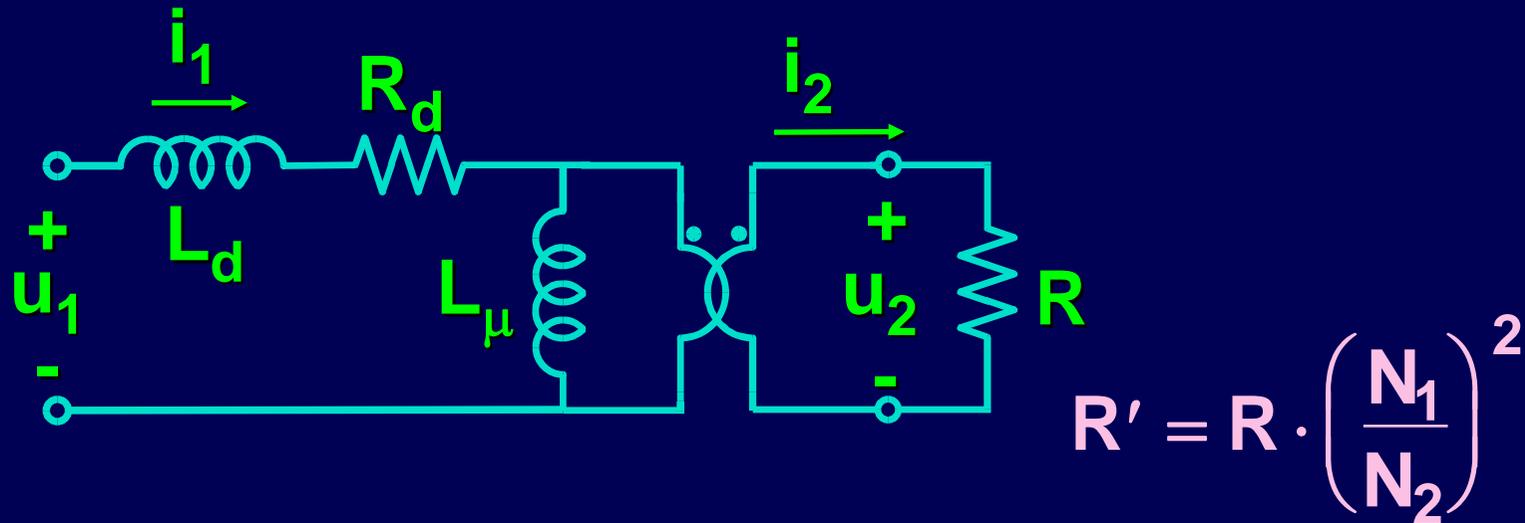
Risposta in frequenza del trasformatore



Risposta in frequenza del trasformatore

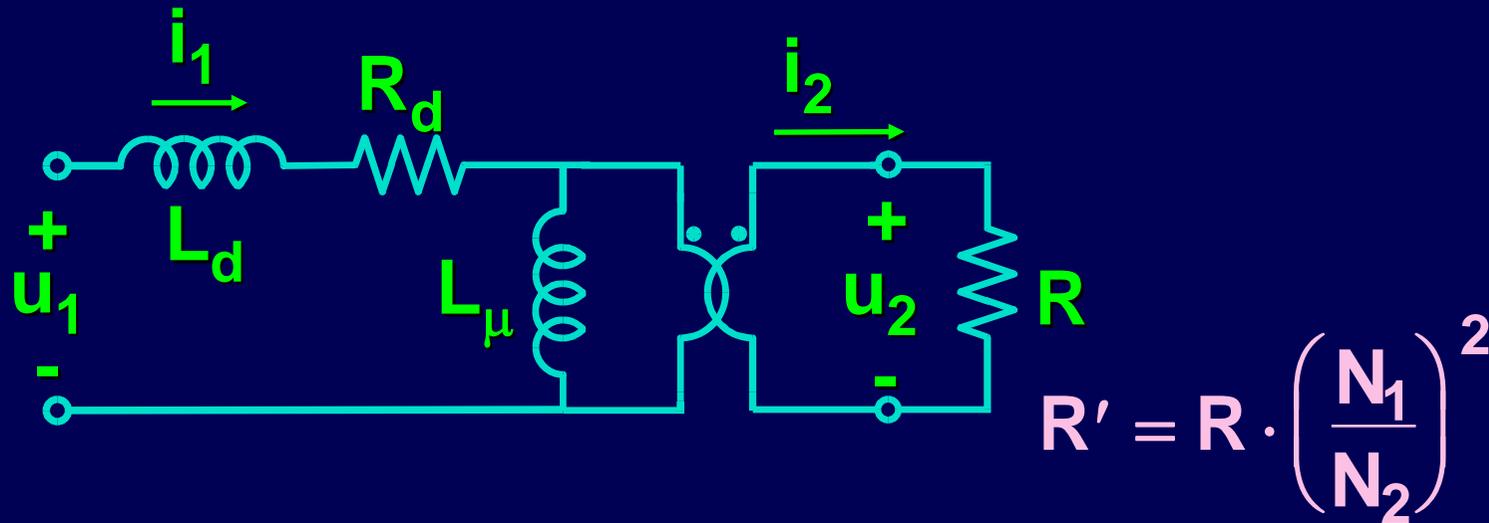


Risposta in frequenza del trasformatore



Ipotesi: $L_\mu \gg L_d$ $R_d \ll R'$

Risposta in frequenza del trasformatore

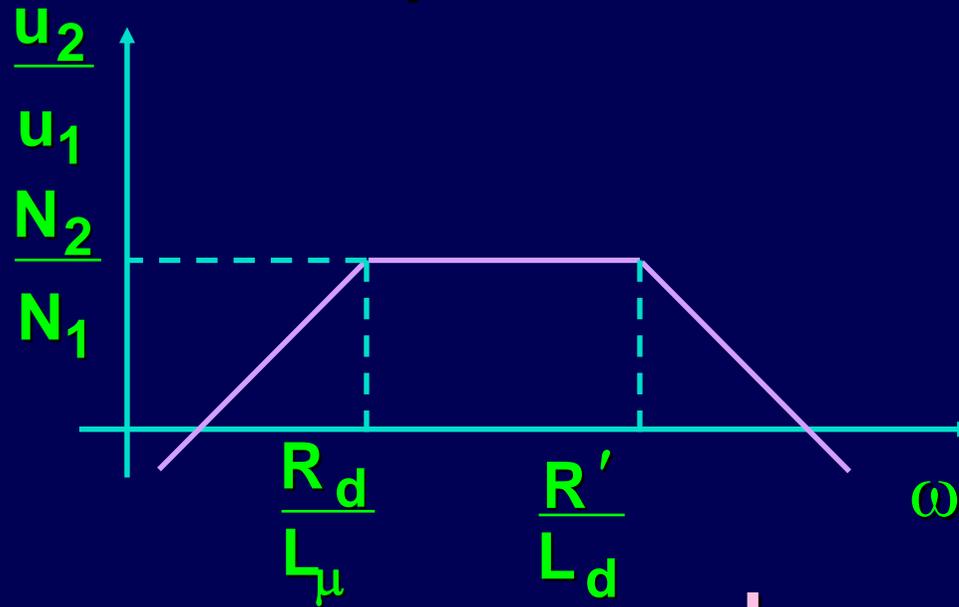


Ipotesi: $L_\mu \gg L_d$ $R_d \ll R'$

Si trova:

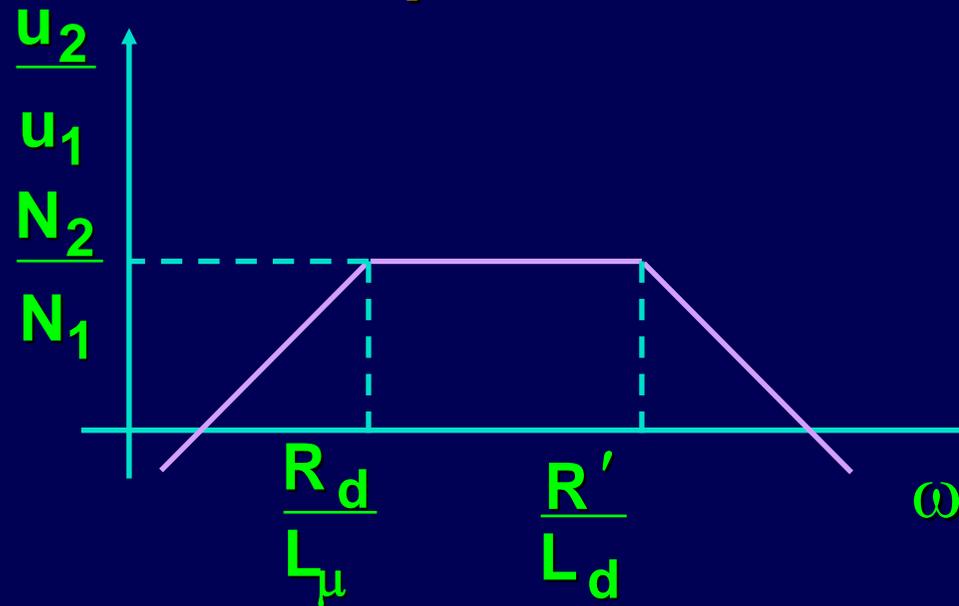
$$\frac{u_2(s)}{u_1(s)} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{s \cdot \frac{L_\mu}{R_d}}{\left(1 + s \cdot \frac{L_\mu}{R_d}\right) \cdot \left(1 + s \cdot \frac{L_d}{R'}\right)}$$

Risposta in frequenza del trasformatore



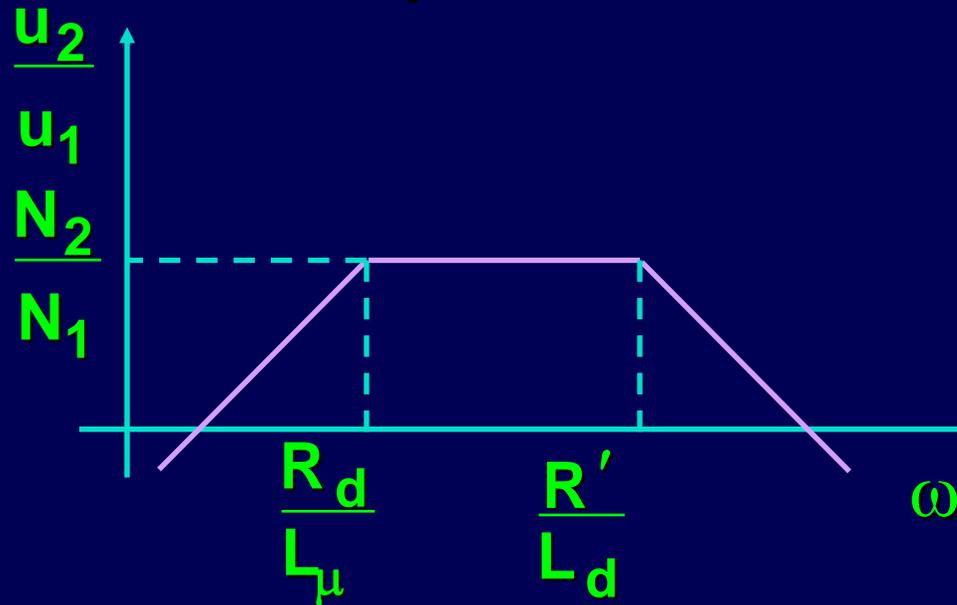
$$\frac{u_2(s)}{u_1(s)} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{s \cdot \frac{L_\mu}{R_d}}{\left(1 + s \cdot \frac{L_\mu}{R_d}\right) \cdot \left(1 + s \cdot \frac{L_d}{R'}\right)}$$

Risposta in frequenza del trasformatore



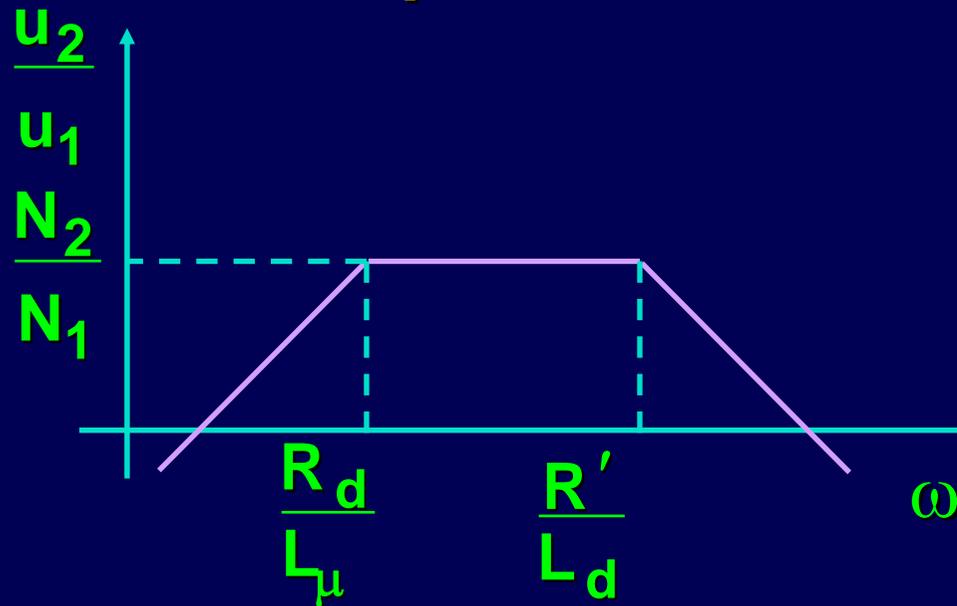
- La banda passante del trasformatore é limitata inferiormente da $\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R_d}{L_\mu}$ (f_{\min}) e superiormente da $\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R'}{L_d}$ (f_{\max})

Risposta in frequenza del trasformatore



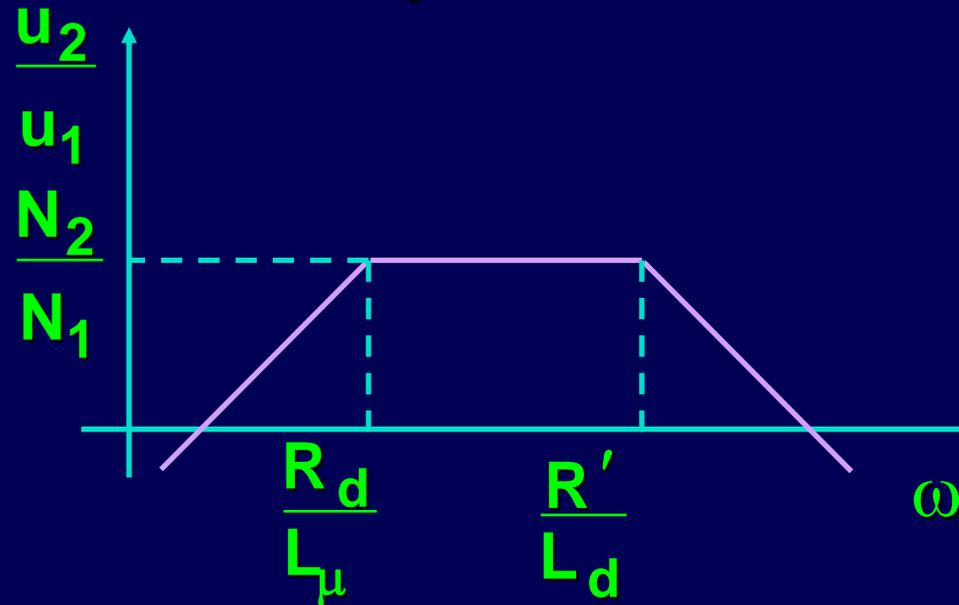
- f_{\min} é una caratteristica del trasformatore

Risposta in frequenza del trasformatore



- f_{\min} é una caratteristica del trasformatore
- f_{\max} dipende dal carico (a vuoto $f_{\max}) = \infty$

Risposta in frequenza del trasformatore



- f_{\min} é una caratteristica del trasformatore
- f_{\max} dipende dal carico (a vuoto $f_{\max}) = \infty$
- A bassa frequenza il trasformatore si comporta come un corto circuito ($R_{cc} = R_d$)

Conclusioni

- **I trasformatori dimensionati per operare ad alta frequenza hanno ingombri contenuti**
- **Essi vanno realizzati con materiali magnetici opportuni (ferriti)**
- **Nel funzionamento ad alta frequenza le induttanze parassite (dispersione e magnetizzazione) causano effetti non trascurabili**
- **I trasformatori hanno limiti di banda passante, sia a frequenza bassa che elevata**