

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

Il rendimento di un trasformatore è definito come rapporto tra potenza resa e potenza assorbita:

$$\text{rendimento} = \frac{\text{potenza resa}}{\text{potenza assorbita}} = \frac{\text{potenza resa}}{\text{potenza resa} + \text{perdite}}$$

Sebbene il rendimento di un trasformatore sia sempre piuttosto elevato (generalmente non inferiore al 96%), è utile capire in quale situazione questo rendimento sia massimo.

Per procedere con questo calcolo, occorre definire le perdite di un trasformatore che si distinguono in:

- perdite a vuoto
- perdite a carico

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

PERDITE A VUOTO:

sono dette “perdite nel ferro”, dipendono dal quadrato della tensione e sono praticamente indipendenti dal carico.

Esistono ogniqualvolta il trasformatore è alimentato.

Hanno sede nel nucleo ferromagnetico in cui è presente un flusso d'induzione sinusoidale.

Sono dovute alle perdite per isteresi e alle perdite per correnti parassite (o di Foucault).

Possono essere ridotte migliorando la qualità dei lamierini magnetici.

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

PERDITE A CARICO:

sono le perdite nei conduttori degli avvolgimenti, dette “perdite nel rame”.

Dipendono dal quadrato della corrente che scorre nei conduttori stessi e quindi dipendono fortemente dal carico.

Esistono solo se circola una corrente di carico.

Sono dovute principalmente alle perdite per effetto Joule nei conduttori.

Ad esse si aggiungono le perdite addizionali, che sono dovute agli effetti dei flussi magnetici variabili nel tempo che investono i conduttori e le altre parti metalliche dei trasformatori.

Possono essere ridotte aumentando la sezione dei conduttori e con una opportuna disposizione degli avvolgimenti in modo da ridurre le perdite addizionali.

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

Le perdite a vuoto a tensione nominale P_0 e le perdite a carico a corrente nominale P_{cn} sono stabilite durante il progetto del trasformatore.

Si definisce r il rapporto tra perdite a carico nominale P_{cn} e perdite a vuoto a tensione nominale P_0 :

$$r = \frac{P_{cn}}{P_0}$$

Valori tipici del rapporto r variano tra 5 e 7.

Esistono valori standard fissati dalle norme CEI per le perdite nei trasformatori, che sono pertanto classificati come trasformatori a perdite normali e trasformatori a perdite ridotte.

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

Perdite a vuoto, perdite a carico nominale e rendimento a carico nominale
per trasformatori con perdite normali e con perdite ridotte

(N.B. il rendimento nominale aumenta all'aumentare della potenza nominale)

Perdite
normali:

Potenza nominale A_n	Potenza resa nominale (cosfi=0,85)	Perdite a vuoto P_0		Perdite a carico nominale P_{cn}		$r=P_{cn}/P_0$	Perdite totali a carico nominale P_0+P_{cn}	Rendimento a carico nominale $P_n/(P_n+P_0+P_{cn})$
kVA	kW	W	%	W	%		W	%
50	42,5	190	0,45%	1100	2,59%	5,8	1290	97,05%
100	85	320	0,38%	1750	2,06%	5,5	2070	97,62%
160	136	460	0,34%	2350	1,73%	5,1	2810	97,98%
250	212,5	650	0,31%	3250	1,53%	5,0	3900	98,20%
400	340	930	0,27%	4600	1,35%	4,9	5530	98,40%
600	510	1300	0,25%	6500	1,27%	5,0	7800	98,49%
1000	850	1700	0,20%	10500	1,24%	6,2	12200	98,59%
1600	1360	2600	0,19%	17000	1,25%	6,5	19600	98,58%
2000	1700	3200	0,19%	22000	1,29%	6,9	25200	98,54%
2500	2125	3800	0,18%	26500	1,25%	7,0	30300	98,59%

Perdite
ridotte:

Potenza nominale A_n	Potenza resa nominale (cosfi=0,85)	Perdite a vuoto P_0		Perdite a carico nominale P_{cn}		$r=P_{cn}/P_0$	Perdite totali a carico nominale P_0+P_{cn}	Rendimento a carico nominale $P_n/(P_n+P_0+P_{cn})$
kVA	kW	W	%	W	%		W	%
50	42,5	150	0,35%	850	2,00%	5,7	1000	97,70%
100	85	250	0,29%	1400	1,65%	5,6	1650	98,10%
160	136	360	0,26%	1850	1,36%	5,1	2210	98,40%
250	212,5	520	0,24%	2600	1,22%	5,0	3120	98,55%
400	340	740	0,22%	3650	1,07%	4,9	4390	98,73%
600	510	1040	0,20%	5200	1,02%	5,0	6240	98,79%
1000	850	1300	0,15%	9000	1,06%	6,9	10300	98,80%
1600	1360	2000	0,15%	13000	0,96%	6,5	15000	98,91%
2000	1700	2400	0,14%	16000	0,94%	6,7	18400	98,93%
2500	2125	2900	0,14%	21000	0,99%	7,2	23900	98,89%

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

Definiamo il rendimento di un trasformatore in funzione del suo fattore di carico:

$$\eta = \frac{x \cdot P_n}{x \cdot P_n + P_0 + x^2 \cdot P_{cn}}$$

dove:

x = fattore di carico = potenza resa/potenza resa nominale (%)

P_n = potenza resa nominale = $A_n \cos\varphi$ (W)

A_n = potenza nominale (VA)

$\cos\varphi$ = fattore di potenza

P_0 = perdite a vuoto a tensione nominale (W)

P_{cn} = perdite a carico nominali (W)

Il rendimento di un trasformatore con rapporto r fissato varia al variare del carico e quindi al variare di x .

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI**CALCOLO DELLA CONDIZIONE DI RENDIMENTO MASSIMO DI UN TRASFORMATORE**

$$\eta = \frac{x \cdot P_n}{x \cdot P_n + P_0 + x^2 \cdot P_{cn}}$$

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{P_n \cdot (x \cdot P_n + P_0 + x^2 \cdot P_{cn}) - x \cdot P_n \cdot (P_n + 2x \cdot P_{cn})}{(x \cdot P_n + P_0 + x^2 \cdot P_{cn})^2}$$

$$\frac{d\eta}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad x \cdot P_n^2 + P_n \cdot P_0 + x^2 \cdot P_n \cdot P_{cn} - x \cdot P_n^2 - 2x^2 \cdot P_n \cdot P_{cn} = 0$$


$$\Rightarrow \quad P_n \cdot P_0 - x^2 \cdot P_n \cdot P_{cn} = 0$$


$$\Rightarrow \quad P_0 = x^2 \cdot P_{cn}$$

il rendimento è massimo quando le perdite a vuoto sono uguali alle perdite a carico

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

VALORI TIPICI DELLE PERDITE E DEL FATTORE DI CARICO

condizione di rendimento massimo: $x^2 = \frac{P_0}{P_{cn}}$  $x = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cn}}}$

$r = \frac{P_{cn}}{P_0}$  $x = \sqrt{\frac{1}{r}}$ condizione di rendimento massimo

Valori tipici:

Potenza nominale: $A_n = 1000 \text{ kVA}$

Perdite a carico nominale: $P_{cn} = 10000 \text{ W} = 10 \text{ kW}$

Perdite a vuoto: $P_0 = 1600 \text{ W} = 1,6 \text{ kW}$



$$r = 10000/1600 = 6,25$$

$$x^2 = 1/r = 1/6,25 = 0,16$$

$$x = 0,4 = 40\%$$

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI**RENDIMENTO MASSIMO DI UN TRASFORMATORE**

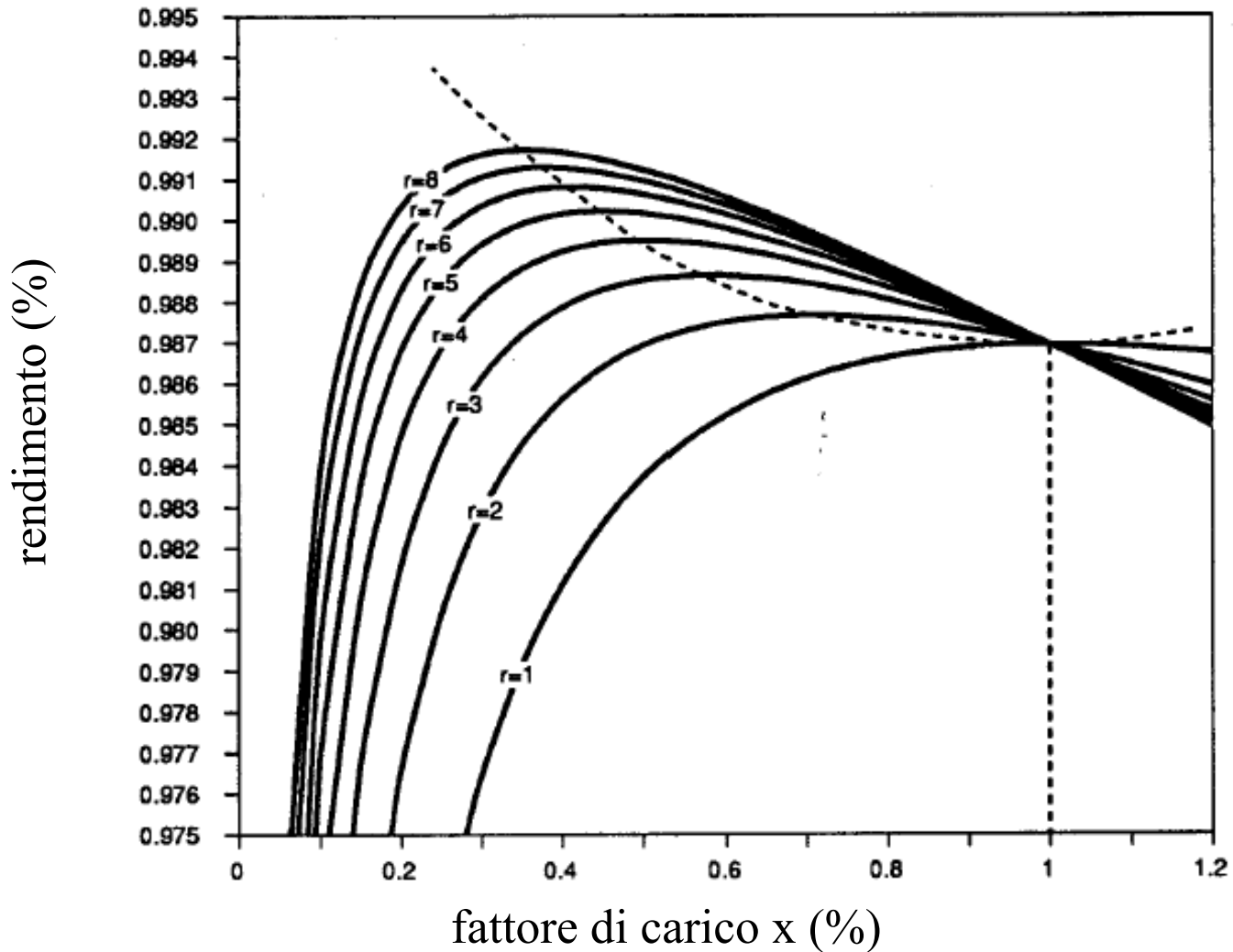
Sostituendo nell'espressione del rendimento il valore $x = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cn}}}$ si ha:

$$\eta = \frac{\sqrt{P_0/P_{cn}} \cdot P_n}{\sqrt{P_0/P_{cn}} + P_0 + P_0} = \frac{1}{1 + \frac{2P_0\sqrt{P_{cn}}}{\sqrt{P_0P_n}}} = \frac{1}{1 + \frac{2\sqrt{P_0P_{cn}}}{P_n}}$$

A parità di altre condizioni, il valore del rendimento diminuisce al diminuire del valore del $\cos\varphi$ del carico.

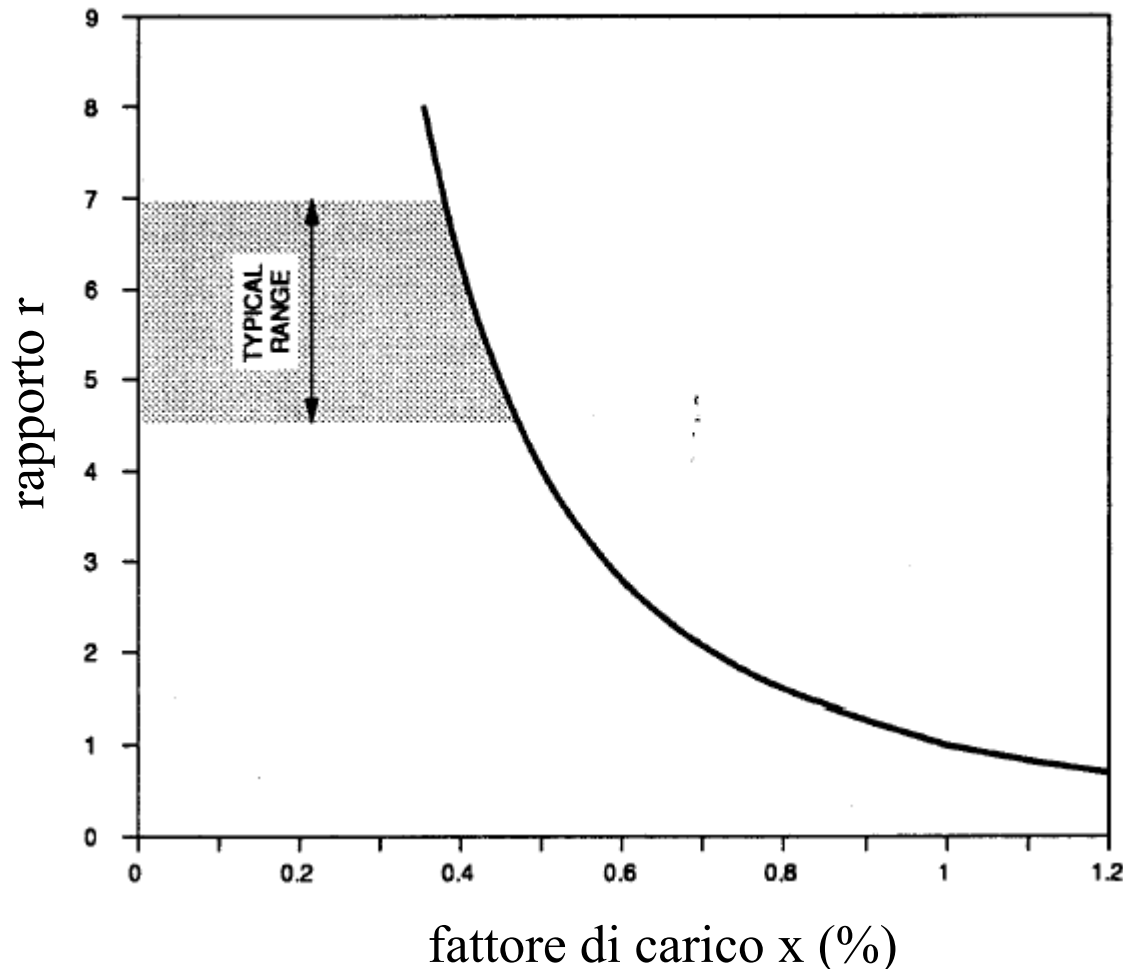
RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

RENDIMENTO IN FUNZIONE DEL FATTORE DI CARICO x E DEL RAPPORTO r



RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

RAPPORTO r IN FUNZIONE DEL FATTORE DI CARICO x IN CONDIZIONI DI RENDIMENTO MASSIMO



All'aumentare del valore di r , il rendimento massimo si raggiunge per valori sempre più bassi del fattore di carico x .

Per r variabile tra 5 e 7, il rendimento risulta massimo per x variabile tra il 50% e il 40%.

RENDIMENTO DEI TRASFORMATORI

RENDIMENTO DI UN TRASFORMATORE PER DIVERSI VALORI DEL FATTORE DI CARICO

$$r = \frac{P_{cn}}{P_0} = \frac{10500 \text{ W}}{1700 \text{ W}} = 6,2$$

Potenza nominale A_n	Potenza resa nominale P_n (cosfi=0,9)	Fattore di carico (x)	Potenza resa (xP_n)	Perdite a vuoto (P_0)	Perdite a carico ($P_{cn}x^2$)	Perdite totali ($P_0+P_{cn}x^2$)	Rendimento $xP_n/(xP_n+P_0+P_{cn}x^2)$
kVA	kW	%	kW	W	W	W	%
1000	900	120%	1080	1700	15120	16820	98,47%
1000	900	110%	990	1700	12705	14405	98,57%
1000	900	100%	900	1700	10500	12200	98,66%
1000	900	90%	810	1700	8505	10205	98,76%
1000	900	80%	720	1700	6720	8420	98,84%
1000	900	70%	630	1700	5145	6845	98,93%
1000	900	60%	540	1700	3780	5480	99,00%
1000	900	50%	450	1700	2625	4325	99,05%
1000	900	40%	360	1700	1680	3380	99,07%
1000	900	30%	270	1700	945	2645	99,03%
1000	900	20%	180	1700	420	2120	98,84%
1000	900	10%	90	1700	105	1805	98,03%