

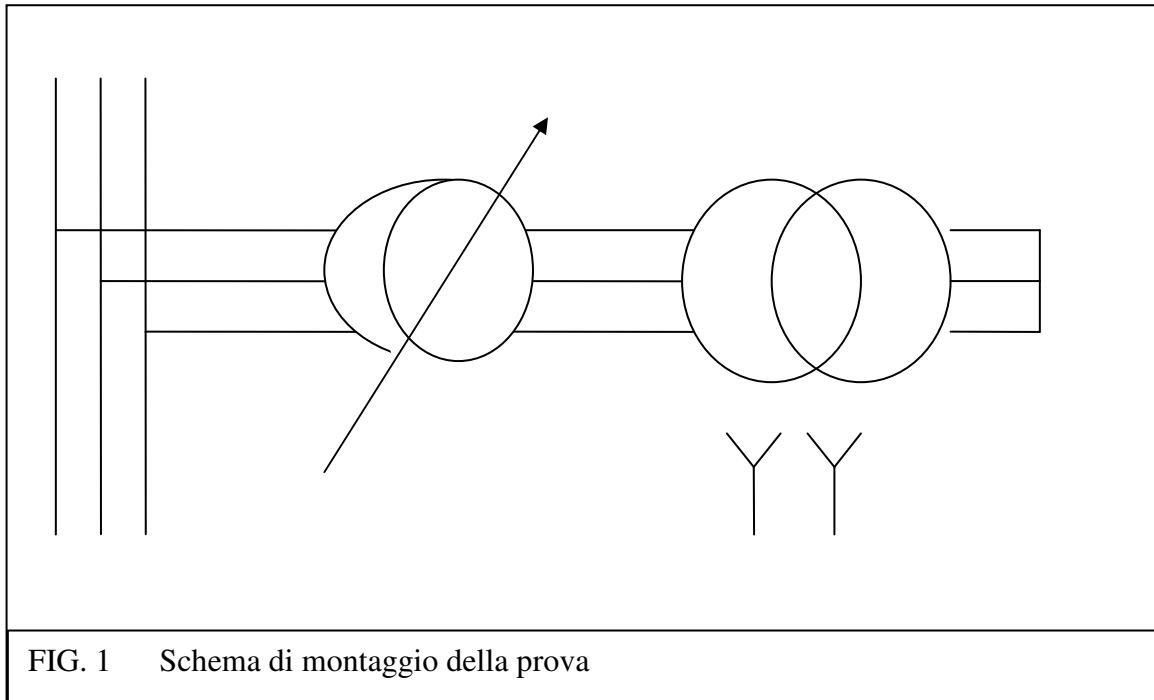


UNIVERSITÀ DI PISA
FACOLTÀ di
INGEGNERIA

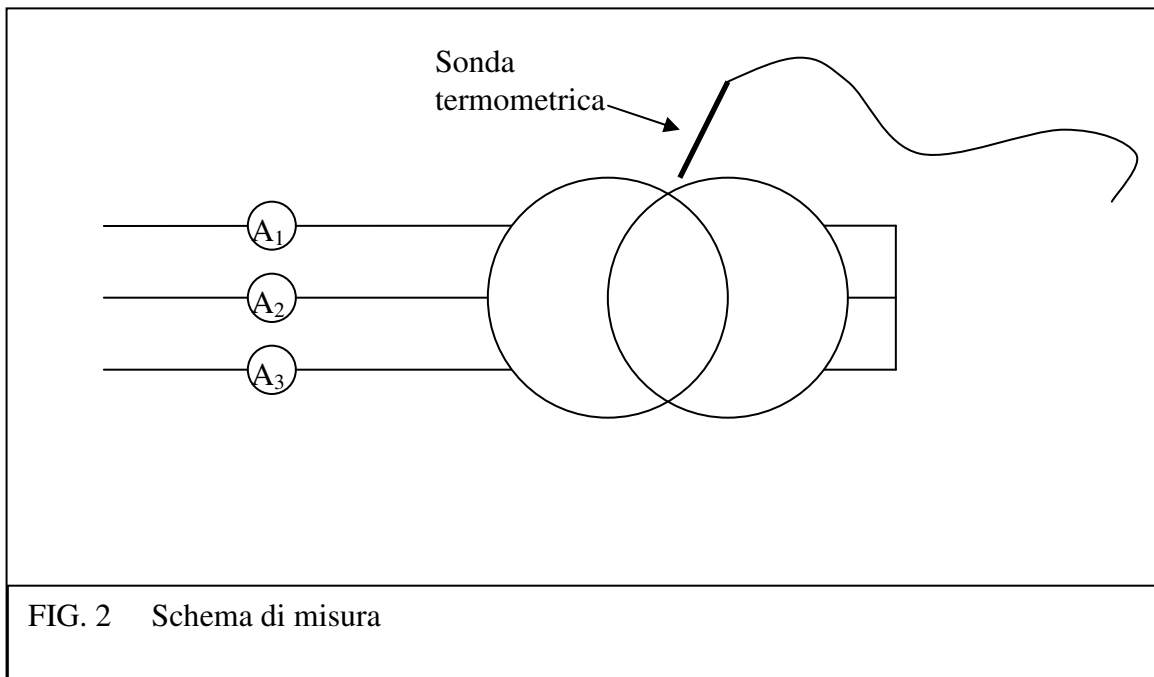
PROVE TERMICHE SUL TRASFORMATORE:

Studente:	Giovanni Canní,
matricola:	271091
materia:	prove su macchine
docente:	Ing. Mauro Lemmi Gigli
data:	08/11/2005

SCHEMA DI PRINCIPIO:



SCHEMA DI MISURA:



ATTREZZATURA E STRUMENTAZIONE ADOPERATA:

ATTREZZATURA ADOPERATA		
DENOMINAZIONE	QUANTITA'	NOTE
Autotrasformatore	2	Trifase a rapp. variabile sotto carico

Tab. 1 attrezzatura adoperata

STRUMENTAZIONE ADOPERATA		
DENOMINAZIONE	QUANTITA'	NOTE
amperometro	6	
Trasduttore di temperatura	2	

Tab 1 bis strumentazione adoperata

Macchina in prova:

2 Trasformatori gemelli:

 $S_n = 2500 \text{ VA}$

Servizio continuo S1

 $f = 50 \text{ Hz}$ $V_1/V_2 = 220/380 \text{ V}$ (Collegamento Yy) $I_{1n} = 6,56 \text{ A}$ $I_{2n} = 3,80 \text{ A}$

Classe di isolamento: E

VALORI DESUNTI DALLE MISURE:

lunghezza giogo:	25 cm		Bobina quadrata:	9 cm	lato esterno
larghezza giogo:	6 cm			6 cm	lato interno
altezza colonna:	14 cm		spessore:	1,5 cm	
T ° ambiente:	22 °C				
Resistenza avv. A freddo:			R _{avvolg} (BT):	0,688 Ω	
			R _{avvolg} (AT):	1,428 Ω	
Resistenza avv. A caldo:			R _{avvolg} (BT):	0,825 Ω	T=71,5 °C
			R _{avvolg} (AT):	1,712 Ω	T=71,5 °C

Tab. 2a valori misurati nel banco 1

t (minuti)	T (°C)	t (minuti)	T (°C)	t (minuti)	T (°C)	t (minuti)	T (°C)
0	22	16	43	32	56.5	48	66
1	23	17	44	33	57	49	66.5
2	25	18	45	34	58	50	67
3	26	19	45	35	58.5	51	68
4	28	20	46	36	59	52	68.5
5	29	21	47	37	60	53	69
6	31	22	48	38	60.5	54	69
7	32	23	49	39	61	55	69.5
8	33	24	50	40	61.5	56	70
9	35	25	51	41	62	57	70.5
10	36	26	51	42	63	58	71
11	37	27	52	43	63	59	71
12	38	28	53	44	64	60	71.5
13	39	29	54	45	64.5	61	72
14	40	30	55	46	65	62	72
15	42	31	55.5	47	65.5	63	72.5

Tab. 2b Valori misurati nel banco 1 "riscaldamento"

t (minuti)	T (°C)	t (minuti)	T (°C)	t (minuti)	T (°C)	t (minuti)	T (°C)
0	72.5	8	62	16	56	24	51
1	71	9	61	17	55	25	50
2	70	10	60.5	18	54.5	26	50
3	68	11	59.5	19	54	27	49
4	67	12	59	20	53	28	48.5
5	65	13	58	21	52.5	29	48
6	64	14	57	22	52	30	48
7	63	15	56.5	23	51		

Tab. 2c Valori misurati nel banco 1 "raffreddamento"

riscaldamento in sovraccarico		riscaldamento in sovraccarico		riscaldamento in sovraccarico		riscaldamento in sovraccarico		riscaldamento in sovraccarico		riscaldamento in sovraccarico	
t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]
0	21	150	35.7	300	51.6	450	64	600	77.1	750	90.7
30	22	180	38.9	330	53.5	480	65.8	630	79.8	780	93
60	25.5	210	42.4	360	56.1	510	68.7	660	82.5	810	95.5
90	28.8	240	44.8	390	58.6	540	71.6	690	85.4		
120	32.4	270	48.1	420	61	570	74.6	720	88		

ciclo termico (50%)				ciclo termico (25%)			
raffreddamento		riscaldamento		raffreddamento		riscaldamento	
t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]	t [sec]	T [°C]
2280	91.7	2610	82.5	2910	86.6	3360	76.2
2340	89.6	2640	82.9	2940	85.8	3390	76.2
2400	87.7	2670	84	2970	85	3420	78
2460	86.1	2700	85.3	3000	84.3	3450	81.2
2520	84.4	2730	86.7	3030	83.5	3480	84.5
2580	83	2760	88.2	3060	82.7	3510	88
		2790	89.4	3090	82	3540	88.6
		2820	90.6	3120	81.4		
		2850	91.7	3150	80.7		
		2880	92.6	3180	80		
				3210	79.3		
				3240	78.7		
				3270	78.1		
				3300	77.4		
				3330	76.8		

Tab. 2d Valori misurati nel banco 2 "cicli termici"

DESCRIZIONE DELLA PROVA ED ELABORAZIONE DEI DATI:

E' stata eseguita la prova di cui all'oggetto al fine di caratterizzare il comportamento termico di una macchina elettrica in attinenza al modello del corpo omogeneo e verificarlo sperimentalmente.

La prova si è articolata in due parti eseguite utilizzando due trasformatori gemelli (con medesimo schema di montaggio e di misura) su due banchi di prova diversi, di seguito indicati con "banco A" e "Banco B".

DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA TERMICA DEL TRASFORMATORE:

Dai dati geometrici del trasformatore in prova (Tab. 2a) riportati in tabella 3 e in fig. 2bis È possibile calcolare la resistenza termica e la capacità termica del trasformatore in prova:

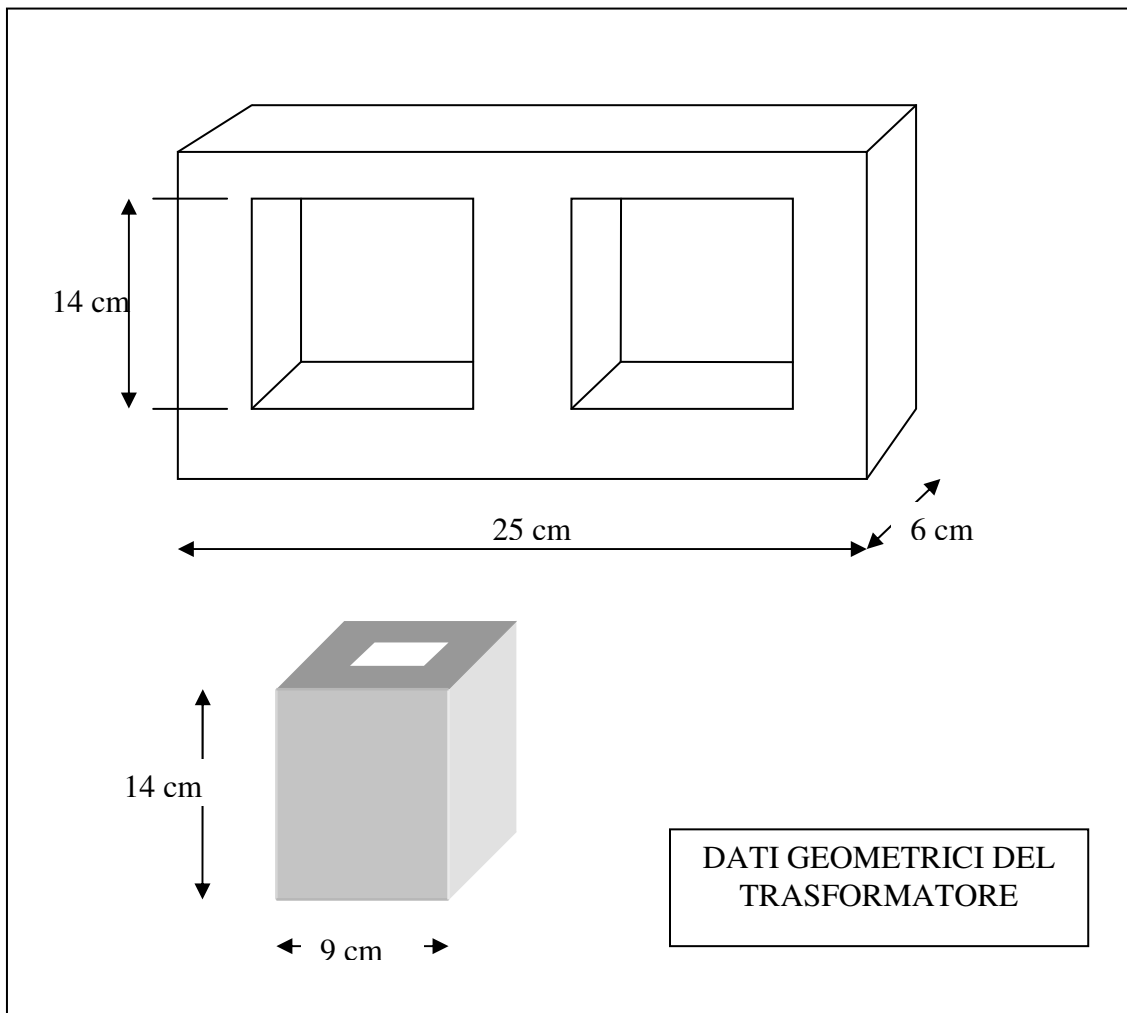


Fig. 2 bis dati geometrici del trasformatore

Densità del ferro: $\delta_{fe} = 7,86 \text{ [kg][dm]}^{-3}$	Calore specifico del ferro: $cp_{fe} = 448 \text{ [j][kg]}^{-1} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$
Densità del rame: $\delta_{Cu} = 8,92 \text{ [kg][dm]}^{-3}$	Calore specifico del rame: $cp_{Cu} = 387 \text{ [j][kg]}^{-1} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$
Coefficiente di temperatura $\alpha = 0,0039 \text{ [}^{\circ}\text{C]}^{-1}$	Fattore correttivo delle perdite nel rame (per tenere conto anche delle perdite nel ferro) = 1,2
Variazione media della resistenza media degli avvolgimenti lato AT = $0,239 \text{ }[\Omega]$	Variazione media della resistenza media degli avvolgimenti lato BT = $0,173 \text{ }[\Omega]$
Resistenza media degli avvolgimenti lato BT (a caldo) = $0,86 \text{ }[\Omega]$	Resistenza media degli avvolgimenti lato AT (a caldo) = $1,7 \text{ }[\Omega]$

Tab. 3 dati fisici dei materiali costituenti il trasformatore e valori calcolati

Calcolo della capacità termica del trasformatore:

Nucleo magnetico (con riferimento alla fig. 2 bis):

$$\begin{aligned}
 V_{fe} &= 3 \cdot 6^2 \cdot 14 + 2 \cdot 6^6 \cdot 25 = 3,3 \cdot 10^3 \text{ [cm]}^3 & \Rightarrow & \text{Volume ferro} = 3,3 \text{ [dm]}^3 \\
 m_{fe} &= V_{fe} \cdot \delta_{fe} = 3,3 \cdot 7,86 = 25,9 \text{ [kg]} & \Rightarrow & \text{Massa ferro} = 26 \text{ [kg]} \\
 C_{tfe} &= cp_{fe} \cdot m_{fe} = 11,65 \cdot 10^3 \frac{\text{[j]}}{[^{\circ}\text{C}]} & \Rightarrow & \text{capacità termica ferro} = 12\text{E3 [j][}^{\circ}\text{C]}^{-1}
 \end{aligned}$$

Avvolgimenti (con riferimento alla fig. 2 bis):

$$\begin{aligned}
 V_{Cu} &= 3 \cdot 0,7 \cdot 14 \cdot (9^2 - 6^2) = 1,32 \cdot 10^3 \text{ [cm]}^3 & \Rightarrow & \text{Volume rame (bobine)} = 1,9 \text{ [dm]}^3 \\
 & & & \text{Nota: } 0,7 = \text{coefficiente di riempimento delle bobine} \\
 m_{Cu} &= V_{Cu} \cdot \delta_{Cu} = 1,9 \cdot 8,92 = 16,9 \text{ [kg]} & \Rightarrow & \text{massa rame} = 17 \text{ [kg]} \\
 C_{tCu} &= cp_{Cu} \cdot m_{Cu} = 6,58 \cdot 10^3 \frac{\text{[j]}}{[^{\circ}\text{C}]} & \Rightarrow & \text{capacità termica rame} = 7\text{E3 [j][}^{\circ}\text{C]}^{-1}
 \end{aligned}$$

La capacità termica totale risulta, pertanto

$$C_t = C_{tCu} + C_{tfe} = 12 + 7 = 19 \frac{\text{[kj]}}{[^{\circ}\text{C}]} \Rightarrow \underline{\underline{\text{Capacità termica tot.} = 19 \text{ [kj][}^{\circ}\text{C]}^{-1}}}$$

Calcolo della resistenza termica del trasformatore:

La variazione della resistenza elettrica degli avvolgimenti da freddo a caldo consentono di stimare la variazione di temperatura del trasformatore (dai valori misurati nel banco B)

$$\Delta\Theta_{regime(medio)} = \frac{\frac{\Delta R_{AT}}{R_{AT22} \cdot \alpha} + \frac{\Delta R_{BT}}{R_{BT22} \cdot \alpha}}{2} = \frac{\frac{0,239}{1,37 \cdot 0,0039} + \frac{0,173}{0,72 \cdot 0,0039}}{2} = 53,2[^\circ\text{C}]$$

Variazione della temperatura del trasformatore = 53 [°C]

Con riferimento alla classe di isolamento del trasformatore, tale sovratemperatura risulta plausibilmente quella prevista per il funzionamento in servizio continuo.

A regime è valida la seguente legge, nell'ipotesi di corpo omogeneo, temperatura ambiente costante e perdite di macchina costanti:

$$R_t = \frac{\Delta\Theta}{1,2 \cdot P_{Cu}} = \frac{\Delta\Theta}{1,2 \cdot (3 \cdot R_{BT} \cdot I_{BT}^2 + 3 \cdot R_{AT} \cdot I_{AT}^2)} = \frac{53}{1,2 \cdot (3 \cdot 0,86 \cdot 6,56^2 + 3 \cdot 1,7 \cdot 3,8^2)} = 0,239 \frac{[^\circ\text{C}]}{[\text{W}]}$$

Resistenza termica del trasformatore = 0,24 [°K][W]⁻¹

CALCOLO DELLA COSTANTE DI TEMPO TERMICA:

La costante di tempo termica della macchina, secondo il modello del corpo omogeneo, è pertanto:

$$\tau_t = C_t \cdot R_t = 19 \cdot 10^3 \cdot 0,239 = 4541[\text{sec.}] \cong 75'$$

Ovvero 1 ora e 15 minuti

PROVA DI RISCALDAMENTO (BANCO A):

Nel banco A è stata svolta, partendo da temperatura ambiente, una prova di funzionamento in servizio continuo, ovvero un riscaldamento a corrente nominale (e tensione ridotta con l'avvolgimento BT chiuso in cortocircuito) di durata maggiore della costante di tempo termica della macchina. Ad intervalli di tempo regolari è stata rilevata la temperatura (fig.3). Da tale curva sarebbe possibile estrapolare la costante di tempo termica soltanto conoscendo il valore asintotico di regime. Ciò avrebbe comportato una durata considerevole della prova. Infatti, dal valore della costante di tempo stimato nel paragrafo precedente si calcola che per raggiungere il regime termico il trasformatore avrebbe impiegato circa 5 - 6 ore.

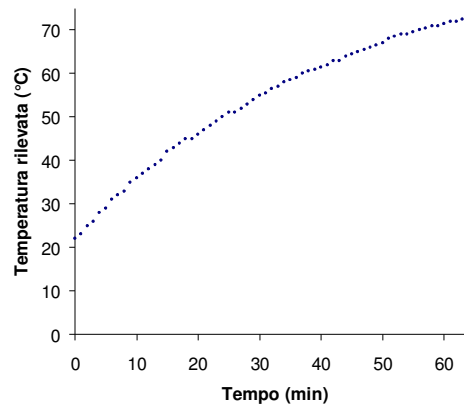


Fig.3 curva di riscaldamento (banco A)

PROVA DI RAFFREDDAMENTO (BANCO A):

Per limitare la durata della prova, si è sfruttata la successiva curva di raffreddamento (ovvero l'andamento della temperatura dopo aver aperto il circuito di alimentazione della macchina) per desumere tale costante (Fig. 4). In questa seconda istanza, infatti, il valore di temperatura asintotico è noto, trattandosi della temperatura ambiente (supposta costante). Partendo dai valori misurati, è sufficiente calcolarne l'esponenziale interpolante, ottenendo:

$$\theta_{macc}(t) - \theta_{ambiente} = 48,54 \cdot e^{-\frac{t}{46}} \Rightarrow \tau = 46' \quad (1)$$

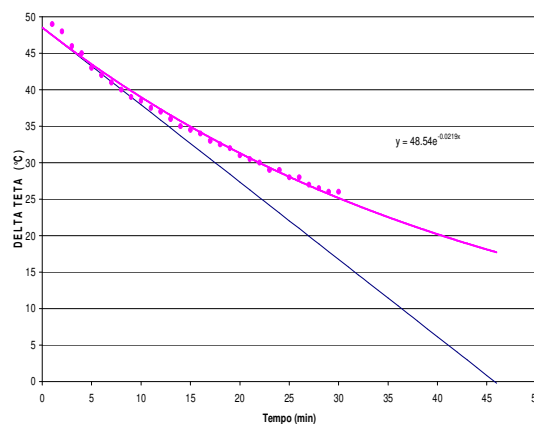


Fig.4 curva di raffreddamento (banco A)

PROVA DI RISCALDAMENTO (BANCO B)

E' stata eseguita una prova in corto a corrente doppia della nominale ($I_1 = 7,6 \text{ A}$), imponendo, di conseguenza, delle perdite nel rame pari a quattro volte le perdite nominali:

$$P_{Cu_{no\ min\ ale}} = 3 \cdot (R_{1media} \cdot I_1^2 + R_{2media} \cdot I_2^2) = 3 \cdot (0,86 \cdot 6,56^2 + 1,7 \cdot 3,8^2) = 185[W]$$

$$P_{Cu_{sovracc}} = 3 \cdot (R_{1media} \cdot I_1^2 + R_{2media} \cdot I_2^2) = 3 \cdot (0,86 \cdot 13,12^2 + 1,7 \cdot 7,6^2) = 739[W]$$

$$P_{sovracc} \cong 1,2 \cdot P_{Cu_{sovracc}} = 886[W]$$

In queste condizioni, partendo da temperatura ambiente, è stata misurata la temperatura del trasformatore, per mezzo di una sonda termometrica, ad intervalli di tempo di 30'' (valori riportati in tab. 2d). Tale condizione di carico è stata interrotta allorché la temperatura del trasformatore ha raggiunto un valore prossimo a quello limite previsto per la classe di isolamento nominale (classe E), con un opportuno margine di sicurezza per tener conto della effettiva anisotropia termica del trasformatore. Se non fosse stata interrotta la prova, la temperatura avrebbe seguito l'andamento di fig. 5 (tracciato in rosso) ottenuto con opportuna interpolazione. Il valore atteso di temperatura a regime sarebbe stato:

$$\theta_{macc} - \theta_{ambiente} = P_{sovracc} \cdot R_T = 886 \cdot 0,24 = 213[^\circ C] \Rightarrow \theta_{macc} = 234[^\circ C]$$

La curva di interpolazione tende invece ad un asintoto di c.ca $270^\circ C$. Tale discrepanza è evidentemente dovuta al fatto che nel calcolo della resistenza termica è stata fatta l'inattendibile ipotesi che il trasformatore fosse un corpo omogeneo (tuttavia anche la curva di interpolazione ha un'attendibilità non soddisfacente).

Merita attenzione anche la tempistica della prova. Infatti, considerando la costante di tempo termica, precedentemente calcolata, si ha un tempo teorico di raggiungimento della temperatura $\theta=95^\circ C$ pari a:

$$t^* \cong \frac{\Delta\Theta_{95^\circ}}{\Delta\Theta_{regime}} \cdot \tau_t = \frac{95 - 22}{175 - 22} \cdot 4541 = 2166'' \cong 36'$$

Mentre il tempo effettivo di raggiungimento della temperatura $\theta=95^\circ C$ è stato $t^*=810'' \sim 14'$. Anche questa inesattezza è adducibile alle deficienze del modello adottato.

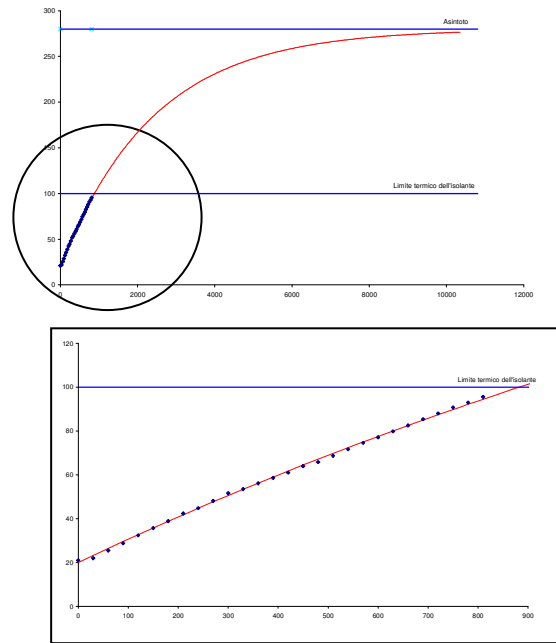


Fig 5 Riscaldamento in sovraccarico

Ciclo al 50% ($I = 1,4 I_n$)

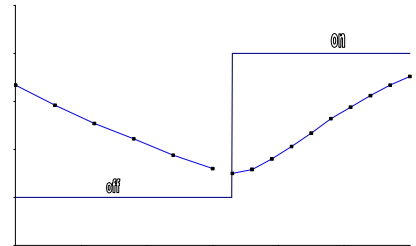
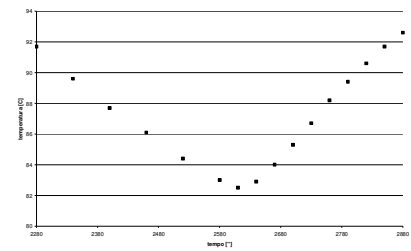
raggiunta la temperatura di c.ca 95° C è stata ridotta la corrente di alimentazione fino al valore nominale ed è stata mantenuta per il tempo necessario a stabilizzare la temperatura attorno al valore nominale di regime (96,1 °C). Si è quindi proceduto ad imporre alla macchina un ciclo termico al 50% con potenza media pari al valore nominale:

$$\bar{P} = 1,2 \frac{P_{Cu}}{2} = 1,2 \cdot \frac{3 \cdot 1,7 \cdot (1,4 \cdot 3,8)^2 + 3 \cdot 0,9 \cdot (1,4 \cdot 6,6)^2}{2} = 225[W]$$

$$\Rightarrow \Delta\Theta = R_t \cdot \bar{P} = 0,24 \cdot 225 = 54[^\circ C]$$

$$\Delta\theta_{medieffettivo}=65[^\circ C]$$

Confrontando la temperatura iniziale e finale del ciclo, rispettivamente pari a 91,7 [°C] e 92,6 [°C], si verifica che ai fini del comportamento termico del trasformatore è rilevante unicamente il valore medio della potenza persa, ovvero il valore medio del quadrato della corrente.



Ciclo al 25% ($I = 2 I_n$)

Potenza media persa:

$$\bar{P} = 1,2 \frac{P_{Cu}}{4} = 1,2 \cdot \frac{3 \cdot 1,7 \cdot (2 \cdot 3,8)^2 + 3 \cdot 0,9 \cdot (2 \cdot 6,6)^2}{4} = 229[W]$$

$$\Rightarrow \Delta\Theta = R_t \cdot \bar{P} = 0,24 \cdot 229 = 55[^\circ C]$$

$$\Delta\theta_{medieffettivo}=59[^\circ C]$$

Confrontando la temperatura iniziale e finale del ciclo, rispettivamente pari a 86,6 [°C] e 88,6 [°C], si verifica nuovamente che ai fini del comportamento termico del trasformatore è rilevante unicamente il valore medio della potenza persa, ovvero il valore medio del quadrato della corrente.

