Silvan Andrea
Mat. 634872

Data: 26/03/2002

ELETTRONICA INDUSTRIALE DI POTENZA

Esercitazione 2

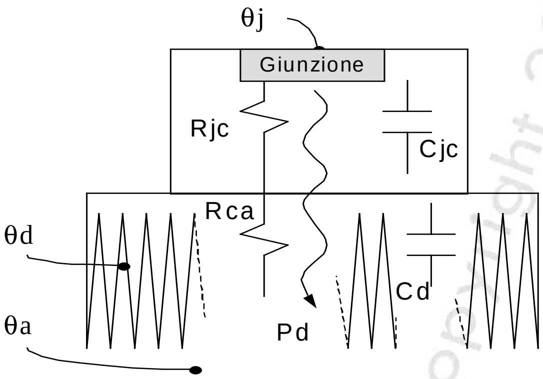
PROPORZIONAMENTO DI UN RAMO DI PONTE RADDRIZZATORE

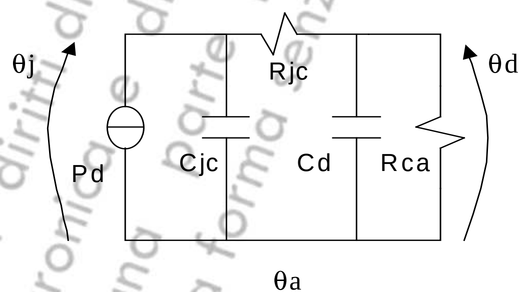
Si chiede il proporzionamento termico di un ramo di ponte raddrizzatore destinato a condurre un'onda rettangolare di corrente avente valore medio pari a Ir=10KA e angolo di conduzione 120°.
Il ramo è costituito da N tiristori eguali, aventi le caratteristiche indicate nei dati allegati.
Ogni tiristore viene montato su un radiatore avente resistenza termica Rca=0,3°C/W, costante termica τd=15' minuti e lambito da un flusso d'aria avente temperatura 40°C (in entrata).
Il ciclo di lavoro è il seguente:
30min: 1 Ir 10sec: 2Ir 10min: 1 Ir 2min: 1,5Ir
Inoltre il ramo deve sopportare una corrente di guasto di forma sinusoidale con valore efficace pari a 6Ir per 10ms e una seconda corrente di valore 4Ir e durata 400ms.

PUNTO 1)

Tracciare l'impedenza termica complessiva in scala lineare e semilogaritmica partendo da giunzione fredda.

Il dimensionamento consiste nel determinare il numero di tiristori da collegare in parallelo per fare in modo che durante il funzionamento, a causa della potenza persa, la temperatura di giunzione θj non superi il valore massimo ammissibile riportato sui data sheets.
Il ponte è costituito da semiconduttori contenuti nei rispettivi case e fissati ad un dissipatore in alluminio estruso con superfici alettate per meglio consentire lo scambio di calore. Per ipotesi si immagina che lateralmente e superiormente al case non possa avvenire scambio di calore, in questo modo si immagina che tutta la potenza persa P_d passi nel dissipatore.
Per semplificare i ragionamenti sulle varie grandezze termiche in gioco si ricorre all'analogia con i circuiti elettrici a costanti concentrate (pur se ovviamente il fenomeno non lo è):





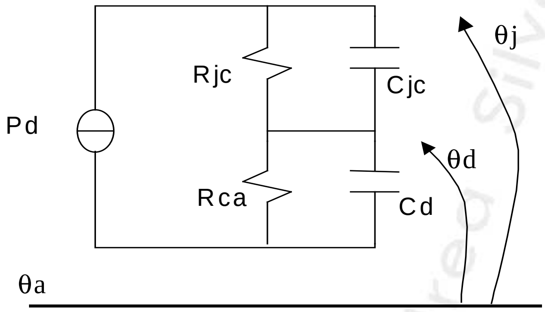
dove:

θ_j = temperatura giunzione
θ_d = temperatura dissipatore
θ_a = temperatura ambiente
R_{jc}= resistenza giunzione-case
R_{ca}= resistenza case-ambiente
C_{jc}= capacità giunzione-case
C_d= capacità dissipatore
P_d = potenza dissipata

La resistenza termica fra giunzione e case R_{jc} si calcola come:

$$R_{jc} = \frac{\theta_{jc}}{P_d}$$

Il circuito equivalente così ottenuto è però del secondo ordine ed è perciò difficile da studiare, in seguito si faranno delle ipotesi in modo da semplificare i calcoli.
Visto il rapporto fra la massa del dissipatore e quella della giunzione generalmente si può supporre $C_j \ll C_d$, si conclude che il transitorio della temperatura di giunzione si esaurisce molto più velocemente del transitorio del dissipatore.



Con l'ipotesi fatta la C_j si carica ed esaurisce il transitorio nei primi istanti di funzionamento senza che la C_d se ne accorga, mentre la seconda parte del transitorio è dominata dal dissipatore. In questo modo si possono studiare i due transitori separatamente e di conseguenza in modo più facile.
La potenza media dissipata in più periodi elementari è:

$$\mathrm{P}_m(t) = \frac{\theta_{jc}}{R_{jc}} + C_j \cdot \frac{\partial \theta_{jc}(t)}{\partial t}$$

$$P_m(t) = \frac{\theta_{ca}}{R_c} + C_d \cdot \frac{\partial \theta_{ca}(t)}{\partial t}$$

dove per le ipotesi fatte sarà:

$$\tau_j = R_{jc} \cdot C_j << \tau_d = R_{ca} \cdot C_d$$

risolvendo le due equazioni differenziali si ottiene:

$$\theta_{jc}(t) = \left[\theta_{jc}(0) - \mathrm{P}_m \cdot R_{jc}\right] \cdot e^{-t/\tau_j} + \mathrm{P}_m \cdot R_{jc}$$

$$\theta_{ca}(t) = \left[\theta_{ca}(0) - \mathrm{P}_m \cdot R_{ca}\right] \cdot e^{-t/\tau_a} + \mathrm{P}_m \cdot R_{ca}$$

si definisce impedenza termica del sistema il rapporto:

$$\mathrm{Z}(t) = \frac{\theta_{ja}(t)}{\mathrm{P}_m} = \frac{\theta_{jc}(t) + \theta_{ca}(t)}{\mathrm{P}_m} = \frac{\theta_{jc}(t)}{\mathrm{P}_m} + \frac{\theta_{ca}(t)}{\mathrm{P}_m} = \mathrm{Z}_{jc}(t) + \mathrm{Z}_{ca}(t)$$

dove:

$$\mathrm{Z}_{jc}(t) = \frac{\theta_{jc}(0)}{\mathrm{P}_m} \cdot e^{-t/\tau_j} + \left(1 - e^{-t/\tau_j}\right) \cdot R_{jc}$$

$$\mathrm{Z}_{ca}(t) = \frac{\theta_{ca}(0)}{\mathrm{P}_m} \cdot e^{-t/\tau_a} + \left(1 - e^{-t/\tau_a}\right) \cdot R_{ca}$$

in entrambe le espressioni il primo addendo è l'impedenza al primo istante, mentre il secondo addendo è l'impedenza a regime.

Ipotizzando che la giunzione sia a regime e dissipi una potenza P_0 si possono riscrivere le equazioni come:

$$Z_{jc}(t) = \frac{R_{jc} \cdot P_0}{P_m} \cdot e^{-t/\tau_j} + \left(1 - e^{-t/\tau_j}\right) \cdot R_{jc}$$

$$Z_{ca}(t) = \frac{R_{ca} \cdot P_0}{P_m} \cdot e^{-t/\tau_a} + \left(1 - e^{-t/\tau_a}\right) \cdot R_{ca}$$

e quindi raccogliendo a fattor comune:

$$Z_{jc}(t) = R_{jc} \cdot \left[\frac{P_0}{P_m} \cdot e^{-t/\tau_j} + \left(1 - e^{-t/\tau_j}\right) \right] = R_{jc} \left[1 + \frac{P_0 - P_m}{P_m} \cdot e^{-t/\tau_j} \right]$$

$$Z_{ca}(t) = R_{ca} \cdot \left[\frac{P_0}{P_m} \cdot e^{-t/\tau_a} + \left(1 - e^{-t/\tau_a}\right) \right] = R_{ca} \left[1 + \frac{P_0 - P_m}{P_m} \cdot e^{-t/\tau_a} \right]$$

se si considera il caso in cui la giunzione è fredda si ha $P_0 = 0$ e quindi semplificando:

$$Z_{jc}(t) = R_{jc} \cdot \left[\left(1 - e^{-t/\tau_j}\right) \right]$$

$$Z_{ca}(t) = R_{ca} \cdot \left[\left(1 - e^{-t/\tau_a}\right) \right]$$

in conclusione l'espressione dell'impedenza termica totale in funzione del tempo partendo da giunzione è:

$$Z(t) = R_{jc} \cdot \left[\left(1 - e^{-t/\tau_j}\right) \right] + R_{ca} \cdot \left[\left(1 - e^{-t/\tau_a}\right) \right]$$

Ora si deve determinare il valore di τ_j da inserire nella formula. La costante di tempo è la durata necessaria al transitorio per raggiungere il 63% del valore di regime. Dai data sheets, ed in particolare dalla figura "A" si ricava che la resistenza termica di giunzione a regime vale:

$$R_{jc-reg} = 0{,}11°C/W$$

Mentre al 63% dell'evoluzione temporale corrisponde una resistenza termica di giunzione pari a:

$$R_{jc-63} = 0{,}0693°C/W$$

a cui corrisponde una costante di tempo:

$$\tau_j = R_{jc-reg} \cdot 0{,}63 = 0{,}7s$$

Utilizzando le caratteristiche del dissipatore date dal testo si ricava l'espressione dell'impedenza termica totale:

$$Z(t) = 0{,}11 \cdot \left(1 - e^{-t/0{,}7}\right) + 0{,}3 \cdot \left(1 - e^{-t/900}\right)$$

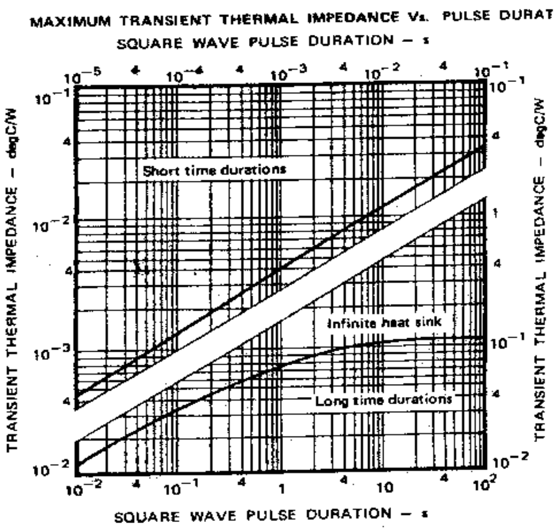
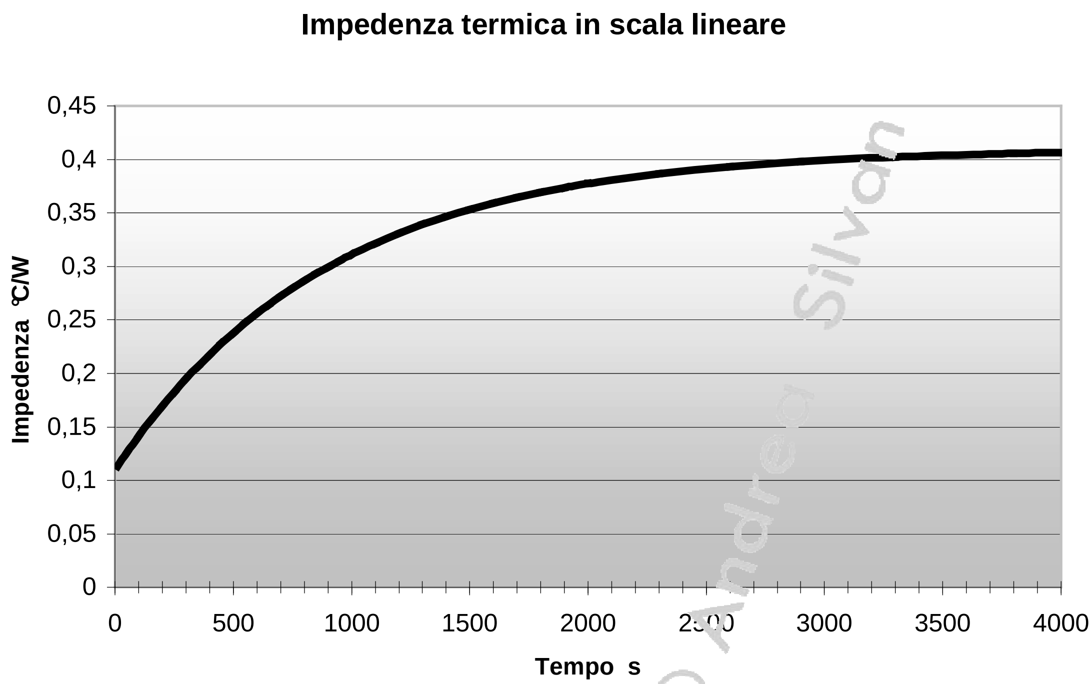
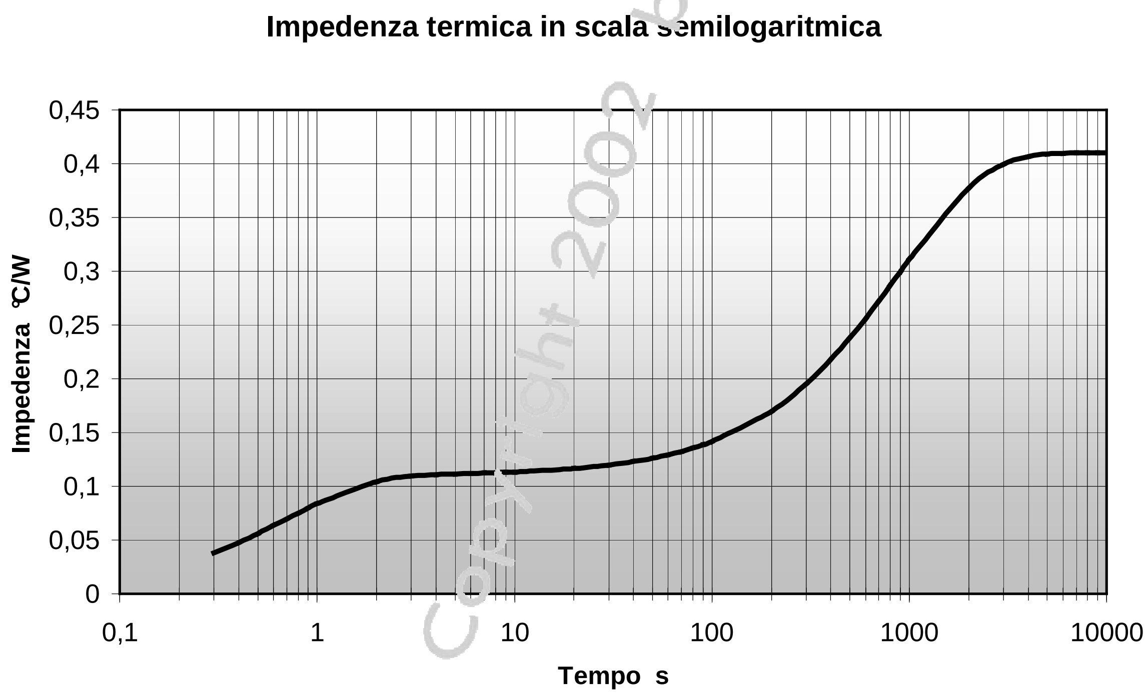


Figura "A"

I seguenti grafici riportano l'andamento dell'impedenza termica totale in scala lineare e semilogaritmica:

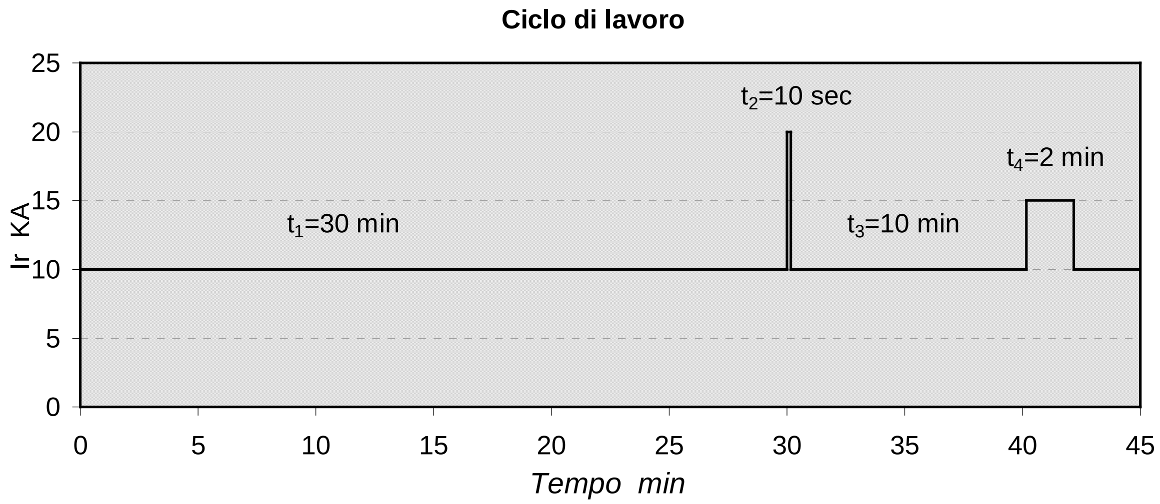




PUNTO 2)

Determinare il numero di tiristori in parallelo.

Il ciclo di funzionamento del ciclo è il seguente:



Per facilitare il calcolo conviene ragionare sul ciclo di lavoro e porre delle ipotesi semplificative. Visto che nel ciclo l'intervallo prevalente è il t_1, si può immaginare che lasciando funzionare a lungo il dissipatore, questo si porterà ad una temperatura leggermente superiore a quella dell'intervallo t_1, infatti si può prevedere che negli intervalli t_2 e t_4 la temperatura non si discosterà molto. Per il dimensionamento conviene considerare il funzionamento più gravoso per le valvole, ossia l'intervallo t_2.

Indicando con **N** il numero di tiristori da porre in parallelo, si può calcolare la temperatura del dissipatore come somma della temperatura ambiente e dell'aumento dovuto al calore sviluppato durante la conduzione nell'intervallo t_1 (per le ipotesi di sopra):

$$\theta_d = R_{ca} \cdot P_d \cdot \left(\frac{I_R}{N} \right) + \theta_a$$

mentre la differenza di temperatura fra giunzione e case più gravosa, nell'intervallo t_2 sarà:

$$\theta_{jc} = R_{jc} \cdot P_d \cdot \left(\frac{2I_R}{N} \right)$$

quindi la temperatura della giunzione sarà:

$$\theta_j = \theta_d + \theta_{jc} = R_{jc} \cdot P_d \cdot \left(\frac{2I_R}{N} \right) + R_{ca} \cdot P_d \cdot \left(\frac{I_R}{N} \right) + \theta_a$$

dalla figura "B" si può ricavare il valore della potenza dissipata in funzione della corrente; scegliendo la curva con angolo di conduzione 120° si ipotizza di approssimarla ad una retta passante per l'origine e per il punto estremo di funzionamento 300°, a cui corrispondono 400W. L'espressione della potenza è perciò:

$$P_d(i_{av}) = \frac{i_{av} \cdot 400}{300} = \frac{4}{3} \cdot i_{av}$$

sostituendo nell'espressione della temperatura di giunzione:

$$\theta_j = \frac{4}{3} R_{jc} \cdot \left(\frac{2I_R}{N} \right) + \frac{4}{3} R_{ca} \cdot \left(\frac{I_R}{N} \right) + \theta_a$$

Utilizzando i valori riportati sui data sheets e dati dal testo si ricava:

$$125°C = \left(\frac{4}{3} \cdot 0{,}11 \cdot \frac{2 \cdot 10^3}{\mathrm{N}} + \frac{4}{3} \cdot 0{,}3 \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\mathrm{N}} + 40 \right) °C$$

approssimando il numero di tiristori all'intero superiore si ha:

$$N \approx 82$$

visto l'elevato valore converrebbe scegliere un tipo di tiristore con portata maggiore, visto lo scopo didattico dell'esercitazione e per non rifare tutti i calcoli lo si suppone accettabile.

Si procede ora alla *verifica* che in tutti gli intervalli la temperatura non superi la massima ammissibile dalla giunzione:

INTERVALLO T_1:

ogni tiristore nell'intervallo t_1 conduce una corrente di:

$$i_{av} = \frac{10000}{82} \mathrm{A} = 122\mathrm{A}$$

dalla caratteristica (figura "B") si ricava:

$$\mathrm{P}_{\substack{\mathrm{PERSA} \\ \mathrm{Singolo\ Ty}}} = 130\mathrm{W}$$

utilizzando questi valori nelle relazioni della temperatura di giunzione si ricava:

$$\theta_c = (0{,}3 \cdot 130 + 40)°C = 79°C$$

$$\theta_j = (0{,}11 \cdot 130 + 0{,}3 \cdot 130 + 40)°C = 94°C$$

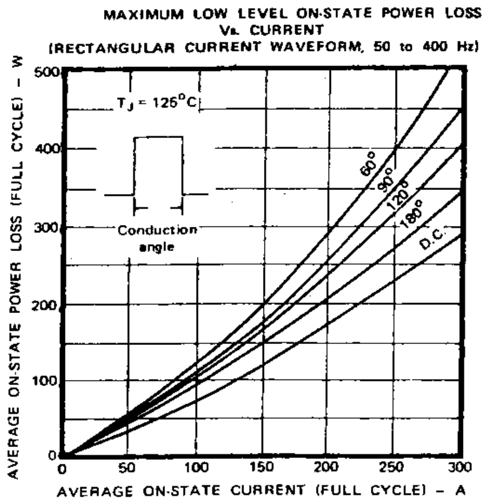


Figura "B"

INTERVALLO T_2:

Per ipotesi la temperatura del case non varia e si mantiene a: $\theta_c = 79°C$.

Mentre per la corrente che percorre ogni singolo tiristore nella fase T_2 procediamo al calcolo come per l'intervallo 1:

$$i_{av} = \frac{20000}{82} \mathrm{A} = 244\mathrm{A}$$

$$\mathrm{P} = 320W$$

$$\theta_c = 79°C$$

$$\theta_j = (0{,}11 \cdot 320 + 79)°C = 114°C$$

114°C è un valore al limite, bisognerebbe aumentare N per tener conto del fatto che la disposizione dei tiristori non è certamente omogenea e quindi alcuni potrebbero essere sottoposti a temperature superiori.

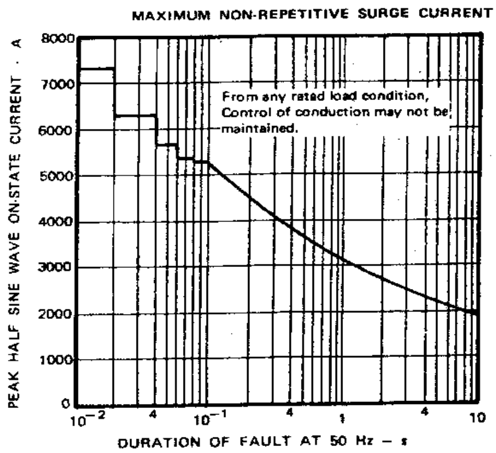


Figura "C"

Oltre alla verifica per il normale funzionamento si deve controllare che i tiristori sopportino la corrente di guasto.In particolare facendo riferimento alla figura "C" si deve verificare che la durata dei picchi sia inferiore a quella ricavabile dalla curva.

Le correnti di guasto e le relative durate sono:

60˙000A per 10 ms
40˙000A per 400 ms

Dividendole per N si ottiene la corrente di guasto per ogni tiristore:

731 A per 10 ms
487 A per 400 ms

Dalla caratteristica (Figura “C”) si può osservare che per i le durate di guasto specificate le correnti sopportabili sono molto superiori ed in particolare di 7˙300A e 3˙700A per rispettivamente 10 ms e 400 ms di durata.

PUNTO 3)

Calcolare le perdite nelle valvole nelle varie condizioni del ciclo di lavoro.

INTERVALLO T_1:

$I_{t1} = 10000\text{A}$ — Corrente totale

$I_{ty1} = \left(\frac{10000}{82}\right)\text{A} = 122\text{A}$ — Corrente in ogni tiristore

$P_{ty1} = 130\text{W}$ — Potenza persa per ogni singolo tiristore ricavata dalla *figura "B" (Pag. 6)*

$P_1 = (82 \cdot 130)\text{W} = 10{,}7\text{kW}$ — Potenza persa complessiva

INTERVALLO T_2:

$$I_{t2} = 20000\text{A}$$

$$I_{ty2} = \left(\frac{20000}{82}\right)\text{A} = 244\text{A}$$

$$P_{ty2} = 320W$$

$$P_2 = (82 \cdot 320)\text{W} = 26{,}2\text{kW}$$

INTERVALLO T_3:

$$I_{t3} = 10000\text{A}$$

$$I_{ty3} = \left(\frac{10000}{82}\right)\text{A} = 122\text{A}$$

$$P_{ty3} = 130\text{W}$$

$$P_3 = (82 \cdot 130)\text{W} = 10{,}7\text{kW}$$

INTERVALLO T_4:

$$I_{t4} = 15000\text{A}$$

$$I_{ty4} = \left(\frac{15000}{82}\right)\text{A} = 183\text{A}$$

$$P_{ty4} = 210\text{W}$$

$$P_4 = (82 \cdot 210)\text{W} = 17{,}2\text{kW}$$

Punto 4)

Calcolare l'andamento della temperatura delle giunzioni durante i cicli di lavoro.

Per ogni intervallo di funzionamento si deve ricavare il transitorio di temperatura valutando le temperature all'inizio e alla fine del periodo (t_1, t_2, t_3, t_4) considerato del ciclo di lavoro.

Intervallo T_1:

$$\theta_{j,fine,t1} = (R_{jc} + R_{ca}) \cdot P_{ty1} + \theta_a = [(0,11 + 0,3) \cdot 130 + 40] = 93,3°C$$

$$\theta_{d,fine,t1} = R_{ca} \cdot P_{ty1} + \theta_a = (0,3) \cdot 130 + 40 = 79°C$$

Intervallo T_2:

Vista l'esigua durata di questo transitorio (10s) possiamo ragionevolmente stare nell'ipotesi che il case-dissipatore non cambi la propria temperatura:

$$\theta_{d,inizio,t2} = \theta_{d,fine,t2} = \theta_{d,fine,t1} = 79°C$$

Invece la temperatura di giunzione andrà valutata sulla base dell'andamento evolutivo esponenziale con il transitorio di τ_1=0,7s :

$$\theta_{jc,t2}(t) = R_{jc} \cdot P_{ty2} \cdot \left[1 - e^{-t/\tau_j}\right] \cdot + \theta_{d,fine,t1}(t) = 0,11 \cdot 320 \cdot (1 - e^{-t/0,7}) + 79$$

la temperatura iniziale e finale (dopo 4-5 costanti di tempo) devono essere:

$$\theta_{jc,t2}(0) = \theta_{jc,t2}\Big|_{0,7s} = 0,11 \cdot 0,63 \cdot 320 + 79 \cong 102°C$$

$$\theta_{jc,t2}(t \le 4 \div 5\tau) = \theta_{jc,t2}\Big|_{3 \div 10s} = 0,11 \cdot 320 + 79 \cong 114°C$$

Intervallo T_3:

In questo intervallo temporale si procede al calcolo come fatto per l'intervallo t_1:

$$\theta_{j,fine,t3} = \theta_{j,fine,t1} = 93,3°C$$

$$\theta_{d,fine,t3} = 79°C$$

Intervallo T_4:

Considerando l'espressione del transitorio in questo intervallo:

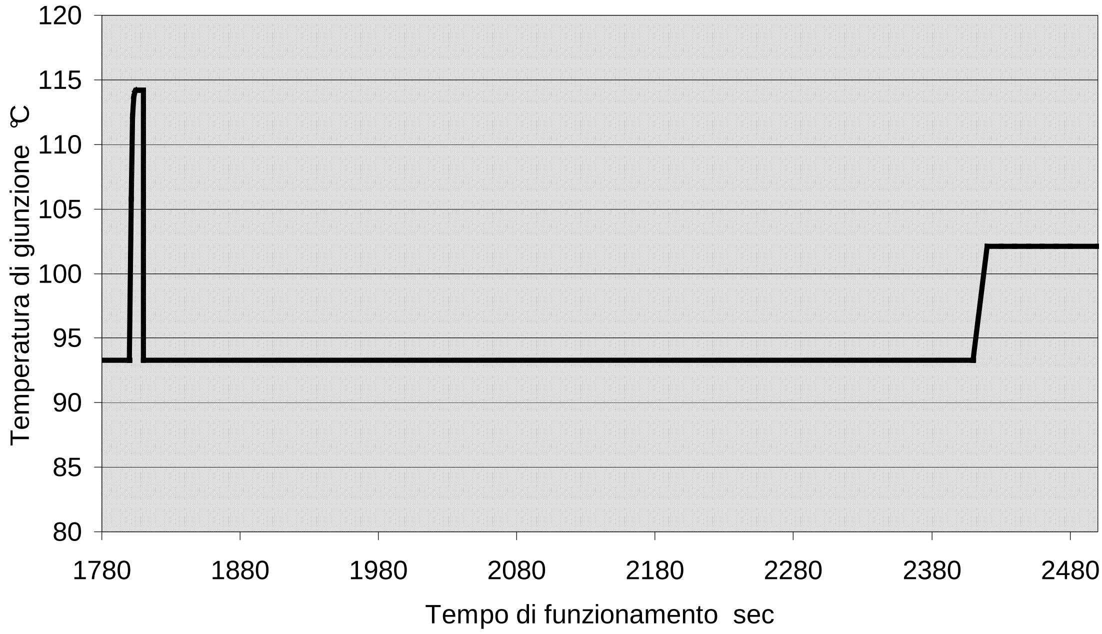
$$\theta_{jc,t2}(t) = R_{jc} \cdot P_{ty4} \cdot \left[1 - e^{-t/\tau_j}\right] \cdot + \theta_{d,fine,t3} = 0,11 \cdot 210 \cdot (1 - e^{-t/0,7}) + 79$$

Ora, procedendo come per il transitorio nell'intervallo t_2, calcoliamo le temperature

$$\theta_{jc,t4}(0,7) = \theta_{jc,t4}\Big|_{0,7s} = 0,11 \cdot 0,63 \cdot 210 + 79 \cong 93,3°C$$

$$\theta_{jc,t4}(t \le 4 \div 5\tau) = \theta_{jc,t4}\Big|_{3 \div 120s} = 0,11 \cdot 210 + 79 \cong 102°C$$

L'andamento della temperatura di funzionamento è riportato nel diagramma seguente, per evidenziare meglio gli intervalli t_2 e t_4 la base dei tempi inizia da 1780 secondi (29min 40sec), anche perché durante tutto l'intervallo t_1 che dura 1800 secondi (30min) la temperatura rimane costante.



PUNTO 5)

Determinare la portata dell' aria necessaria per avere un incremento della temperatura dell'aria di 10°C.

Per ogni singolo tiristore la potenza persa vale:

$$P_m = \frac{P_{ty1} \cdot t_1 + P_{ty2} \cdot t_2 + P_{ty3} \cdot t_3 + P_{ty4} \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = 134{,}5W$$

La potenza totale persa si ottiene moltiplicando per il numero N di tiristori:

$$P_{tot} = P_m \cdot N = (134{,}5 \cdot 82)W = 11kW$$

la portata d'aria in massa tale da non superare un incremento di 10°C è:

$$q = \frac{P_{tot}}{C \cdot \Delta\theta_{max}} = \left(\frac{11000}{1013 \cdot 10}\right)\frac{Kg}{s} = 1{,}086\frac{Kg}{s}$$

Il *peso specifico dell'aria è circa* 1,29 Kg, quindi la portata volumetrica risulta:

$$Q = \left(\frac{1{,}086}{1{,}29}\right)\frac{m^3}{s} = 0.84\frac{m^3}{s}$$