Università degli Studi di Bologna
Scuola di Ingegneria e Architettura
“Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica”

Metodologie di Progettazione delle Macchine Elettriche M

Transitori termici e Tipi di Servizio

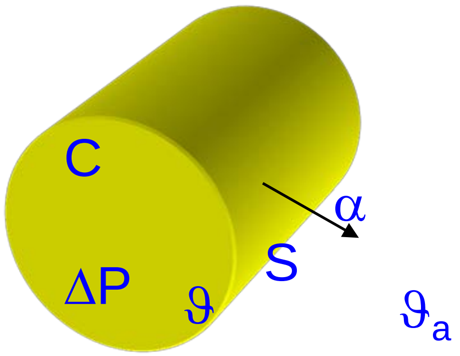
Prof. Giovanni Serra
Dipartimento di
Ingegneria dell’Energia Elettrica e dell’Informazione “G. Marconi”
Università degli Studi di Bologna
Viale Risorgimento, 2
40136 Bologna
Tel. 051-2093582/ Fax 051-2093588
e-mail: giovanni.serra@mail.ing.unibo.it

Analisi dei transitori termici

Bilancio energetico

Si considera la macchina costituita da materiale omogeneo, di conducibilità infinita (temperatura uniformemente distribuita)

ϑ	temperatura della macchina
ϑ_a	temperatura ambiente
S	superficie di scambio termico
C	capacità termica della macchina
ΔP	potenza trasformata in calore nella macchina
α	coefficiente di scambio termico per convezione ed irraggiamento



$$\Delta P \, dt = C \, d\vartheta + \alpha S (\vartheta - \vartheta_a) \, dt$$

Analisi dei transitori termici

Bilancio energetico

Con semplici passaggi si ottiene

$$\Delta P = C\frac{d\vartheta}{dt} + \alpha S(\vartheta - \vartheta_a)$$

$$\frac{d(\vartheta - \vartheta_a)}{dt} + \frac{\alpha S}{C}(\vartheta - \vartheta_a) = \frac{\Delta P}{C}$$

$$\boxed{\frac{d\Theta}{dt} + \frac{\alpha S}{C}\Theta = \frac{\Delta P}{C}}$$

Analisi dei transitori termici

Evoluzione della sovratemperatura

Integrando l'equazione differenziale si ottiene

$$\Theta = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B \qquad \tau = \frac{C}{\alpha S} = \frac{\Theta_r C}{\Delta P}$$

Integrale generale integrale particolare

Inserendo le condizioni

t = ∞ $\Theta = \Theta_r$ sovratemperatura di regime $\Theta_r = \frac{\Delta P}{\alpha S}$

t = 0 $\Theta = \Theta_0$ sovratemperatura iniziale

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_r - \Theta_0)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

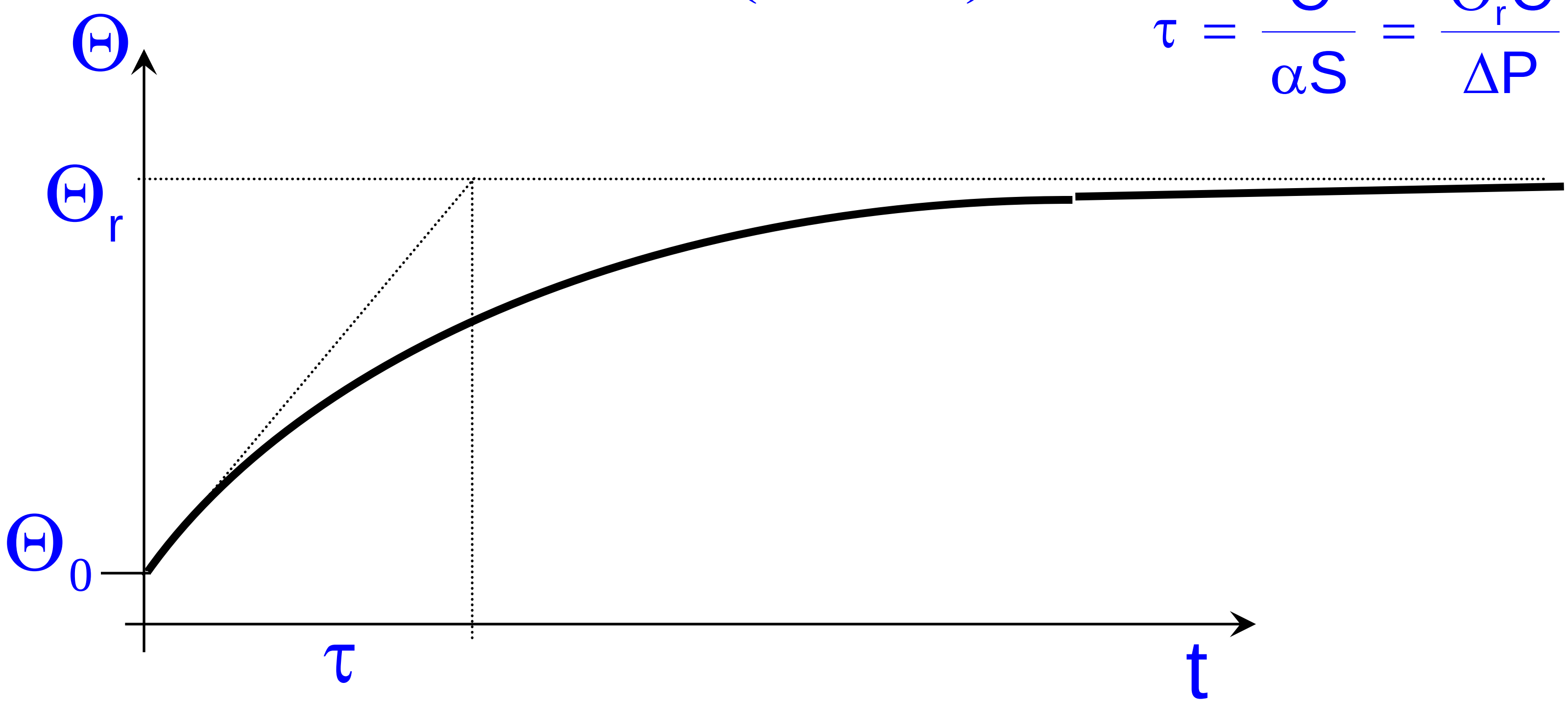
Analisi dei transitori termici

Evoluzione della sovratemperatura

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_r - \Theta_0)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$\Theta_r = \frac{\Delta P}{\alpha S}$$

$$\tau = \frac{C}{\alpha S} = \frac{\Theta_r C}{\Delta P}$$



Analisi dei transitori termici

Costante di tempo termica di una macchina

La costante di tempo termica della macchina può esprimersi

$$\tau = \frac{C}{\alpha S} = \frac{\Theta_r C}{\Delta P} \equiv \Theta_r$$

$$C = \sum cG \qquad \Delta P = \sum pG$$

Perdite specifiche

Calori specifici   Peso parti componenti

Macchine rotanti: $\tau = 0.4 - 1.6$ ore

Servizio intermittente

Successione periodica di intervalli:

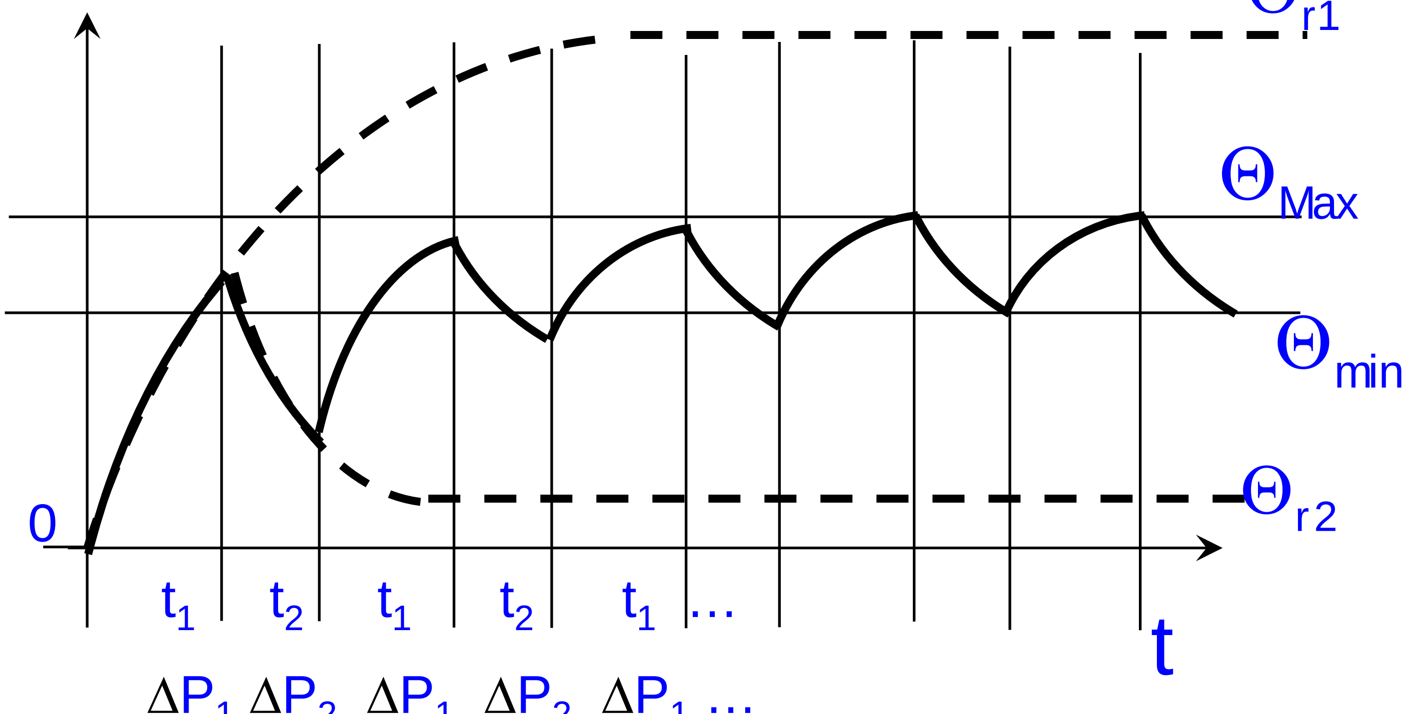
t_1	ΔP_1
t_2	ΔP_2
t_1	ΔP_1
t_2	ΔP_2

…..

$$\tau = \frac{C}{\alpha S}$$

$$\Theta_{r1} = \frac{\Delta P_1}{\alpha S}$$

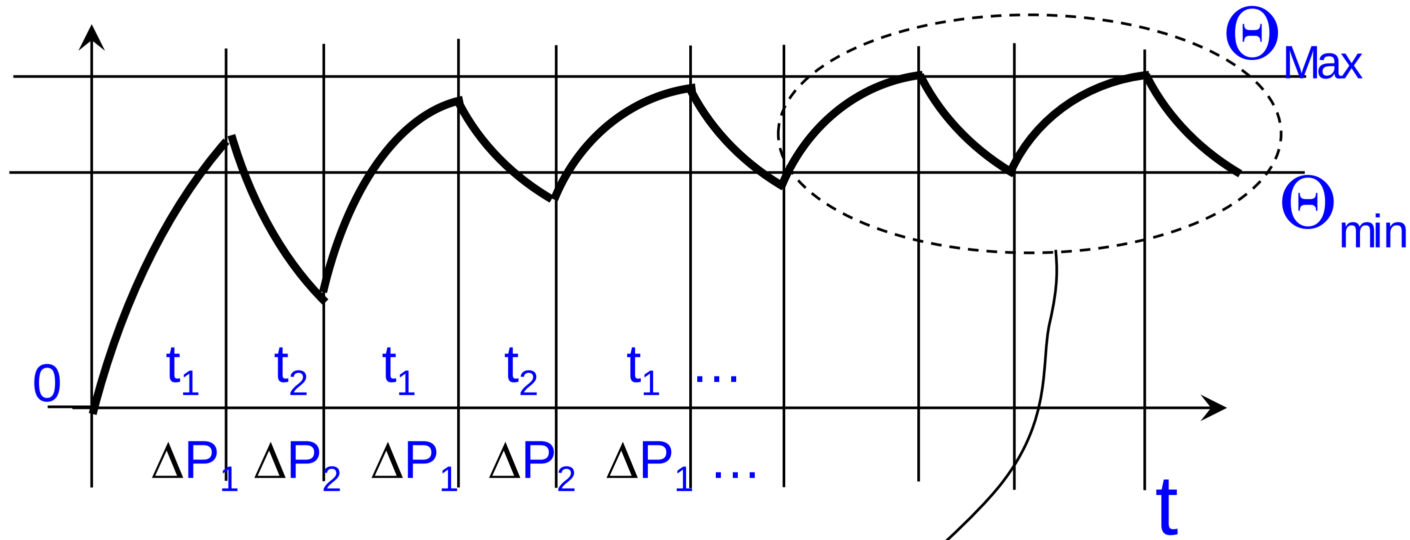
$$\Theta_{r2} = \frac{\Delta P_2}{\alpha S}$$



$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_r - \Theta_0)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Analisi dei transitori termici

Servizio intermittente



$$\begin{cases} \Theta_{Max} = \Theta_{min} + \left(\Theta_{r1} - \Theta_{min}\right)\left(1 - e^{-t_1/\tau}\right) \\ \Theta_{min} = \Theta_{Max} + \left(\Theta_{r2} - \Theta_{Max}\right)\left(1 - e^{-t_2/\tau}\right) \end{cases}$$

Analisi dei transitori termici

Servizio intermittente

$$\begin{cases} \Theta_{Max} = \Theta_{min} + \left(\Theta_{r1} - \Theta_{min}\right)\left(1 - e^{-t_1/\tau}\right) \\ \Theta_{min} = \Theta_{Max} + \left(\Theta_{r2} - \Theta_{Max}\right)\left(1 - e^{-t_2/\tau}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Theta_{Max} = \Theta_{min} e^{-t_1/\tau} + \Theta_{r1}\left(1 - e^{-t_1/\tau}\right) \\ \Theta_{min} = \Theta_{Max} e^{-t_2/\tau} + \Theta_{r2}\left(1 - e^{-t_2/\tau}\right) \end{cases}$$

Analisi dei transitori termici

Servizio intermittente

$$\begin{cases} \Theta_{Max} = \Theta_{min} e^{-t_1/\tau} + \Theta_{r1}\left(1 - e^{-t_1/\tau}\right) \\ \Theta_{min} = \Theta_{Max} e^{-t_2/\tau} + \Theta_{r2}\left(1 - e^{-t_2/\tau}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Theta_{Max} = \dfrac{\Theta_{r1}A + \Theta_{r2}B(1-A)}{C} \\ \Theta_{min} = \dfrac{\Theta_{r2}B + \Theta_{r1}A(1-B)}{C} \end{cases}$$

$$A = 1 - e^{-t_1/\tau}$$

$$B = 1 - e^{-t_2/\tau}$$

$$C = 1 - e^{-(t_1+t_2)/\tau}$$

Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento inerziale

Bilancio energetico nel tempo dt

$$C_m\,\omega_c\,dt = dE_{cin} + dE_{diss}\,, \qquad \text{ma} \quad C_m = J\,d\omega_m/dt$$

quindi risulta

$$J\,\omega_c\,d\omega_m = J\,\omega_m\,d\omega_m + dE_{diss}$$

$$E_{diss} = J\int_{\omega_{mi}}^{\omega_{mf}}(\omega_c - \omega_m)\,d\omega_m = J\left[\omega_c\omega_m - \frac{\omega_m^2}{2}\right]_{\omega_{mi}}^{\omega_{mf}} = \frac{1}{2}J\omega_c^2$$

Se $\omega_{mi} = 0$ ed $\omega_{mf} = \omega_c$

Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento inerziale

$$E_{diss} = J\int_{\omega_{mi}}^{\omega_{mfi}} (\omega_c - \omega_m)\,d\omega_m = J\left[\omega_c\omega_m - \frac{\omega_m^2}{2}\right]_{\omega_{mi}}^{\omega_{mf}} = \frac{1}{2}J\omega_c^2$$

Ovvero, durante un avviamento inerziale, **<u>l'energia dissipata per effetto Joule nel rotore corrisponde all'energia cinetica accumulata nelle masse rotanti</u>**.

Una simile quantità di energia viene dissipata nell'avvolgimento statorico

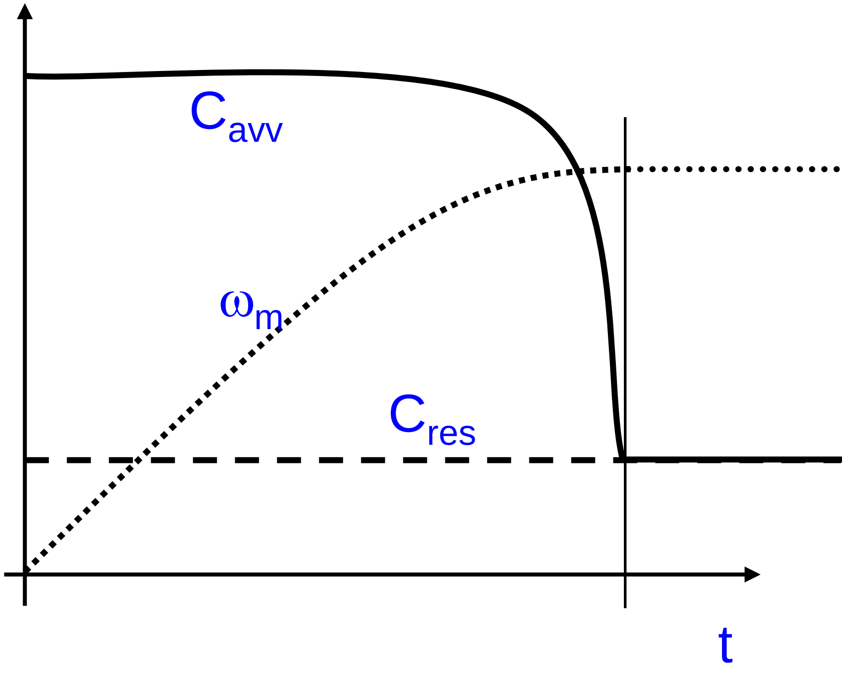
- Tempo di avviamento

Momento di inerzia totale, motore + carico

$$Tavv = \frac{J}{C_{motrice} - C_{resistente}} \omega_{finale}$$

Unità di misura SI

Valori medi durante l'avviamento



Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento a carico con coppia resistente C_{res}

Bilancio energetico nel tempo dt

$$C_m \, \omega_c \, dt = dL + dE_{cin} + dE_{diss},$$

essendo $(C_m - C_{res}) = J \, d\omega_m / dt$, e $dL = C_{res} \, \omega_m \, dt$

risulta

$$J \, \omega_c \, d\omega_m + C_{res} \, \omega_c \, dt = C_{res} \, \omega_m \, dt + J \, \omega_m \, d\omega_m + dE_{diss}$$

$$J \, (\omega_c - \omega_m) d\omega_m + C_{res} \, (\omega_c - \omega_m) \, dt = dE_{diss}$$

$$E_{diss} = J \int_{\omega_{mi}}^{\omega_{mf}} (\omega_c - \omega_m) d\omega_m + \int_0^{Tavv} C_{res} (\omega_c - \omega_m) dt =$$

Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento a carico con coppia resistente C_{res}

$$E_{diss} = J\int_{\omega_{mi}}^{\omega_{mf}} (\omega_c - \omega_m)\,d\omega_m + \int_0^{Tavv} C_{res}(\omega_c - \omega_m)\,dt =$$

$$= J\left[\omega_c\omega_m - \frac{\omega_m^2}{2}\right]_{\omega_{mi}}^{\omega_{mf}} + \int_0^{Tavv} C_{res}(\omega_c - \omega_m)\,dt =$$

$$= \frac{1}{2}J\omega_c^2 + \int_0^{Tavv} C_{res}(\omega_c - \omega_m)\,dt$$

Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento a carico con coppia resistente C_{res}

$$E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + \int_0^{Tavv} C_{res}(\omega_c - \omega_m)dt$$

La soluzione esatta risulta dipendente dalle funzioni $C_{res}(t)$ e $\omega_m(t)$.

Ipotesi:

- C_{res}=COST (= coppia nominale del motore nel servizio previsto)
- $\omega_m = \omega_c\, t / T_{avv}$ (variazione lineare nel tempo T_{avv}, $\Rightarrow$ coppia di avviamento praticamente costante)

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{C_m - C_{res}}{J} = \frac{\omega_c}{T_{avv}}$$

$$E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + \int_0^{Tavv} C_{res}\omega_c dt - \frac{C_{res}\omega_c}{T_{avv}} \int_0^{Tavv} t\, dt$$

Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento a carico, coppia resistente C_{res}

$$E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + \int_0^{Tavv} C_{res}\omega_c dt - \frac{C_{res}\omega_c}{T_{avv}} \int_0^{Tavv} t\, dt$$

$$E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + C_{res}\omega_c T_{avv} - \frac{C_{res}\omega_c}{2} T_{avv}$$

$$E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + \frac{C_{res}\omega_c}{2} T_{avv} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + \frac{C_{res}\omega_c}{2} \frac{J\omega_c}{C_m - C_{res}}$$

$$E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 + \frac{1}{2} J\omega_c^2 \frac{C_{res}}{C_m - C_{res}} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 \left(1 + \frac{C_{res}}{C_m - C_{res}} \right)$$

$$\boxed{E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 \frac{C_m}{C_m - C_{res}}}$$

Potenza dissipata durante un avviamento

Avviamento a carico, coppia resistente C_{res}

$$\boxed{E_{diss} = \frac{1}{2} J\omega_c^2 \frac{C_m}{C_m - C_{res}}}$$

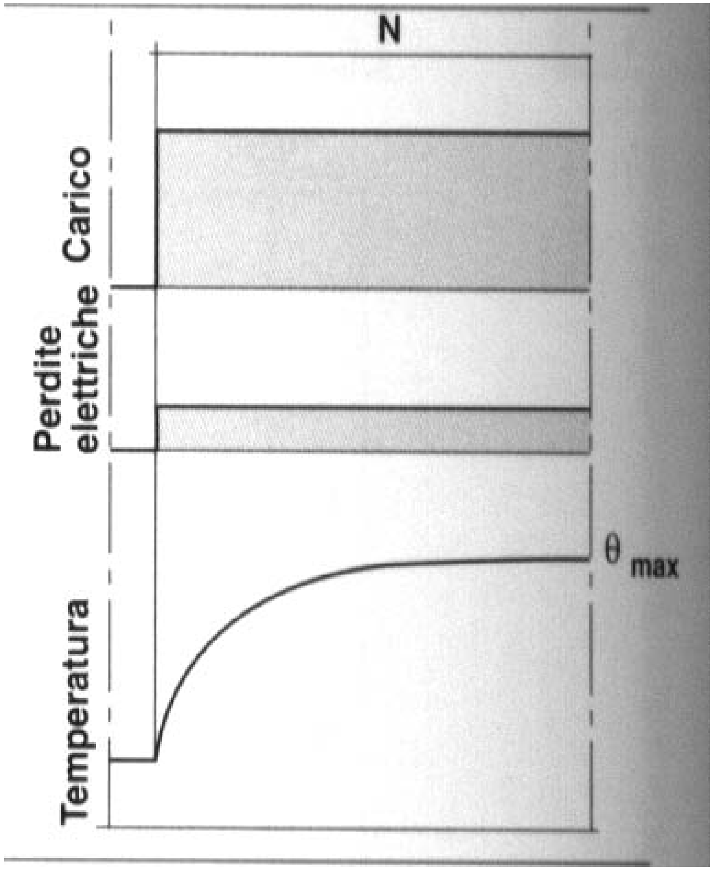
La relazione ottenuta, pur con le ipotesi semplificative introdotte, evidenzia l'aumento dell'energia dissipata imputabile all'aumento del tempo di avviamento, conseguenza della coppia frenante applicata.

Tipi di Servizio

CEI EN60034 - 1

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S1

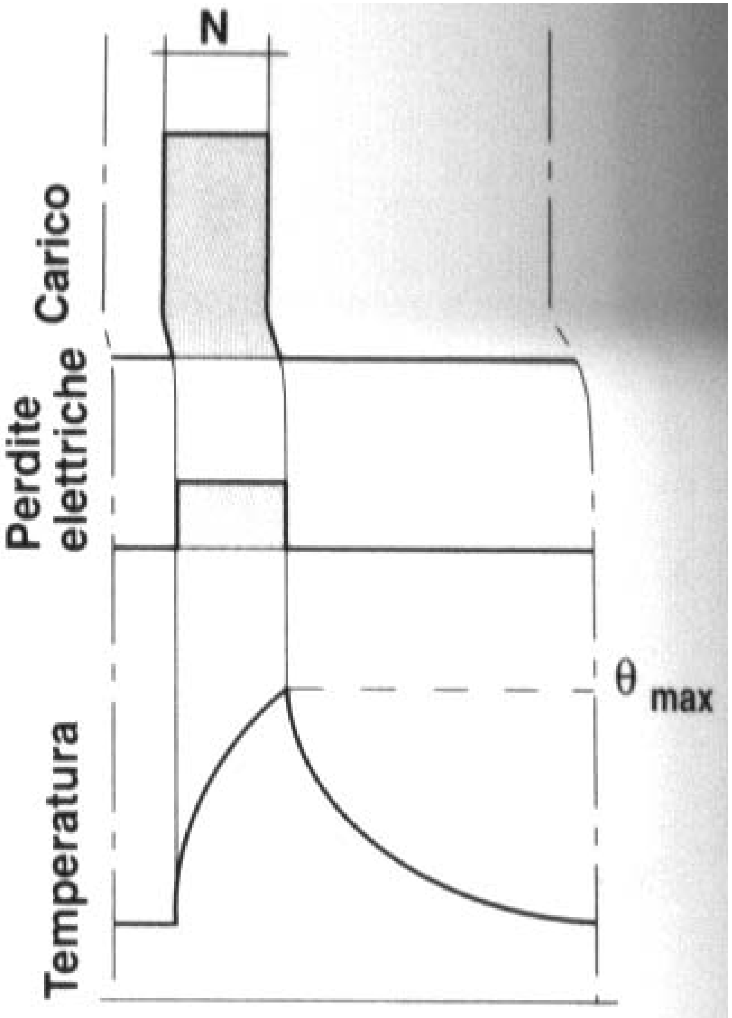


Servizio continuo

Funzionamento del motore a carico costante per un periodo di tempo indefinito, comunque sufficiente a raggiungere l'equilibrio termico

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S2



Servizio di durata limitata

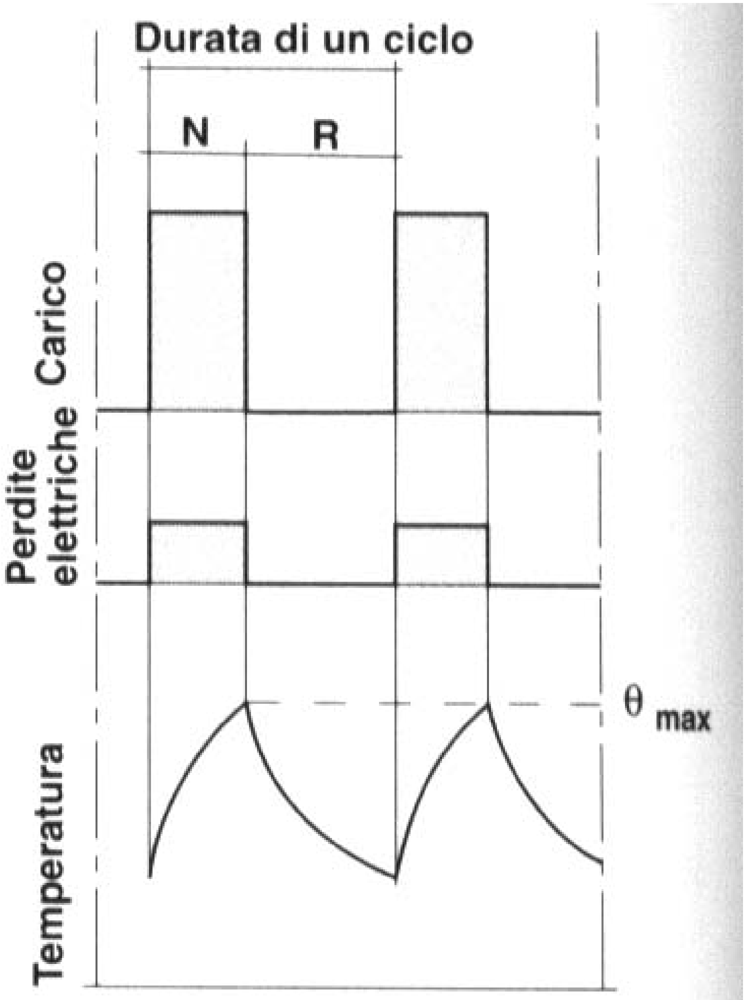
Funzionamento del motore a carico costante per un <u>periodo di tempo limitato</u>, <u>insufficiente</u> a raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un periodo di riposo sufficiente a riportare il motore a temperatura ambiente

Esempio

S2 60 minuti

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S3



Servizio intermittente periodico

Funzionamento del motore secondo un ciclo comprendente un periodo di tempo a carico costante (N) ed un periodo di tempo di riposo (R). La corrente di avviamento non influisce sulle temperature.

$$\frac{N}{N+R} \times 100\%$$

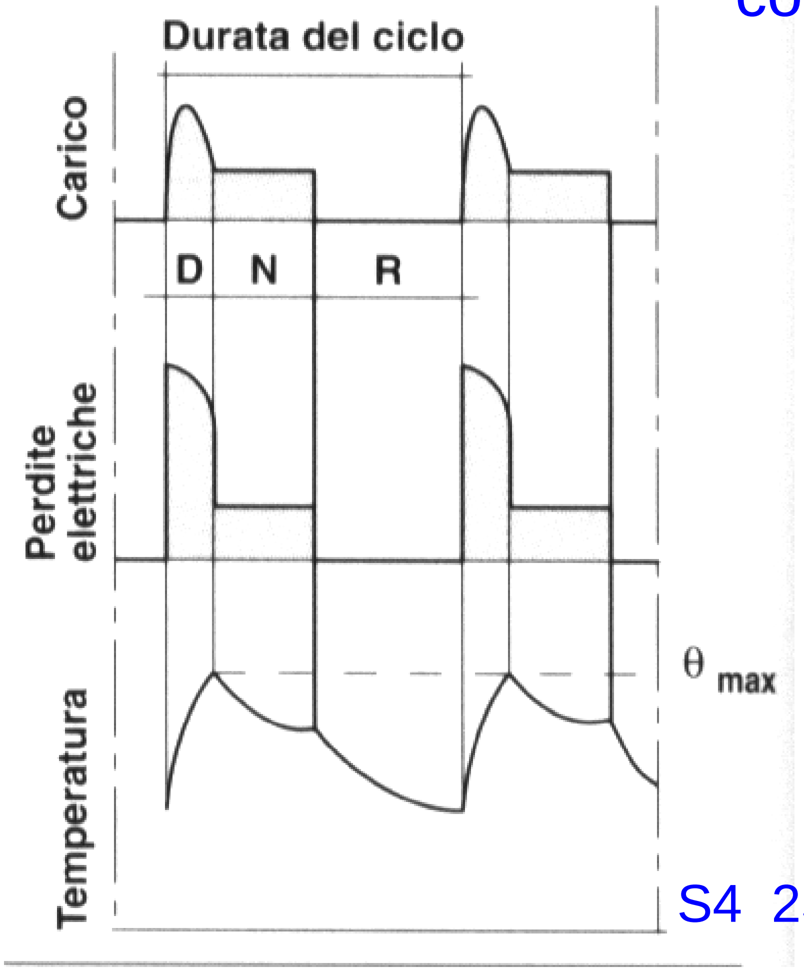
Rapporto di intermittenza

Esempio

S3 25%

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S4



Servizio intermittente periodico con **avviamenti** che influenzano il riscaldamento

Funzionamento del motore secondo un ciclo comprendente un tempo di avviamento notevole (D), un periodo di funzionamento a carico costante (N) e un periodo di tempo di riposo (R).

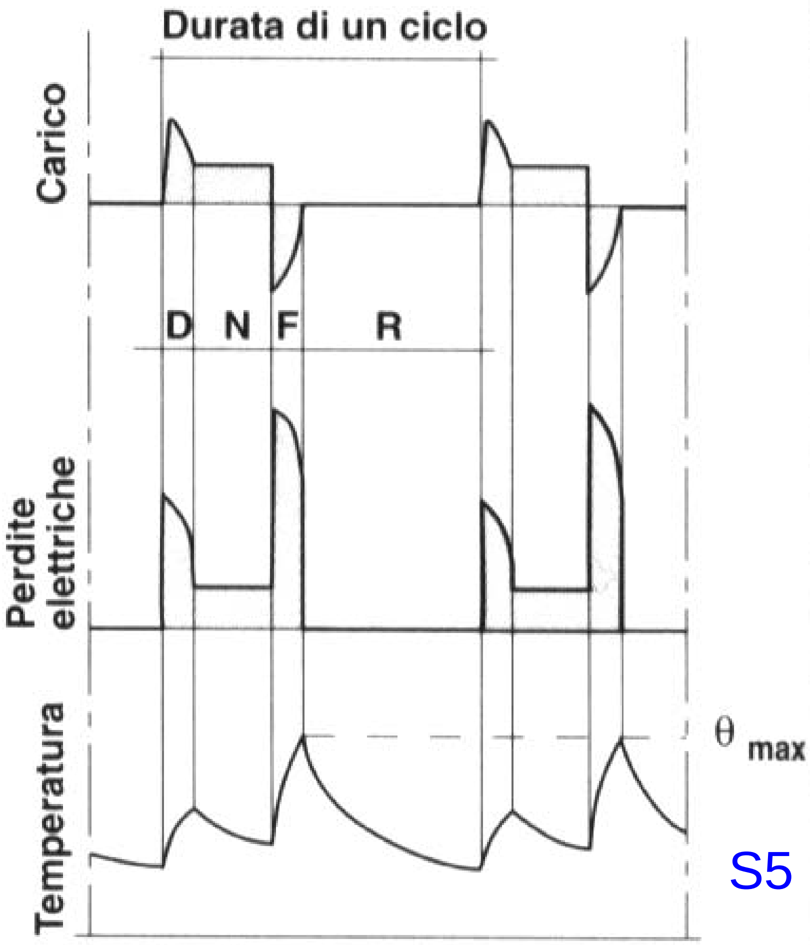
$$\frac{D+N}{D+N+R} \times 100\%$$ Rapporto di durata di ciclo

Esempio

S4 25% $J_M = 0.15$ Kg m^2 $J_{ext} = 0.7$ Kg m^2

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S5



Servizio intermittente periodico con **avviamenti e e frenature** che influenzano il riscaldamento

Funzionamento del motore come S4 ma con l'aggiunta di una frenatura elettrica

$$\frac{D+N+F}{D+N+F+R} \times 100\%$$

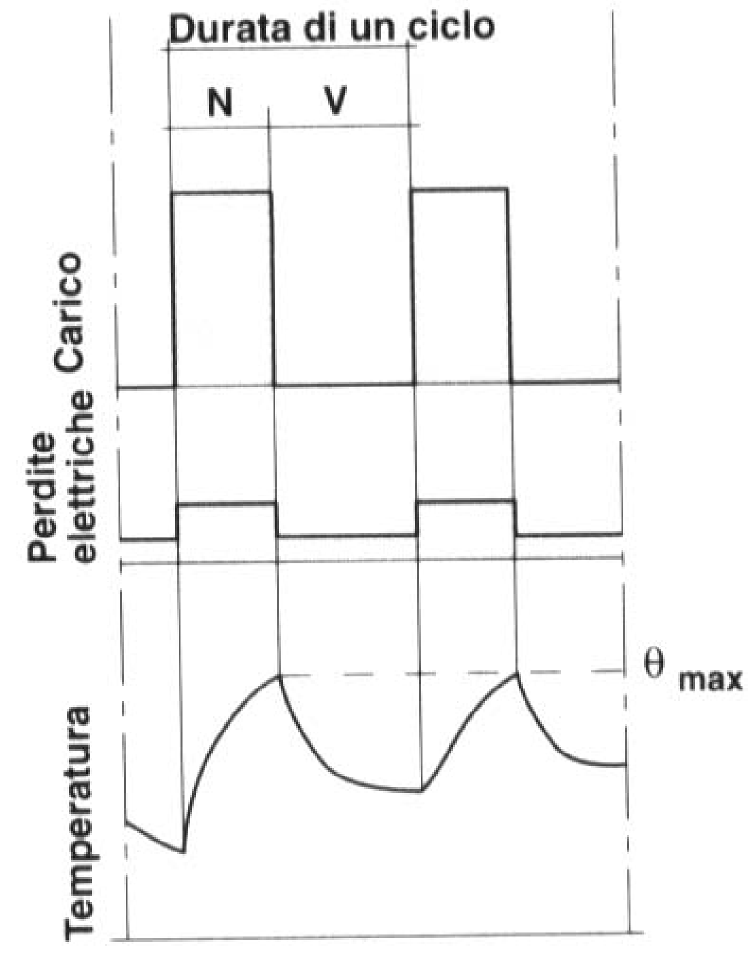
Rapporto di durata di ciclo

Esempio

S5 25% $J_M = 0.15$ Kg m^2 $J_{ext} = 0.7$ Kg m^2

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S6



Servizio ininterrotto periodico **con carico** intermittente

Funzionamento del motore secondo cicli identici comprendenti un periodo di funzionamento a carico costante ed un periodo a vuoto senza alcun tempo di riposo

$$\frac{N}{N+V} \times 100\%$$

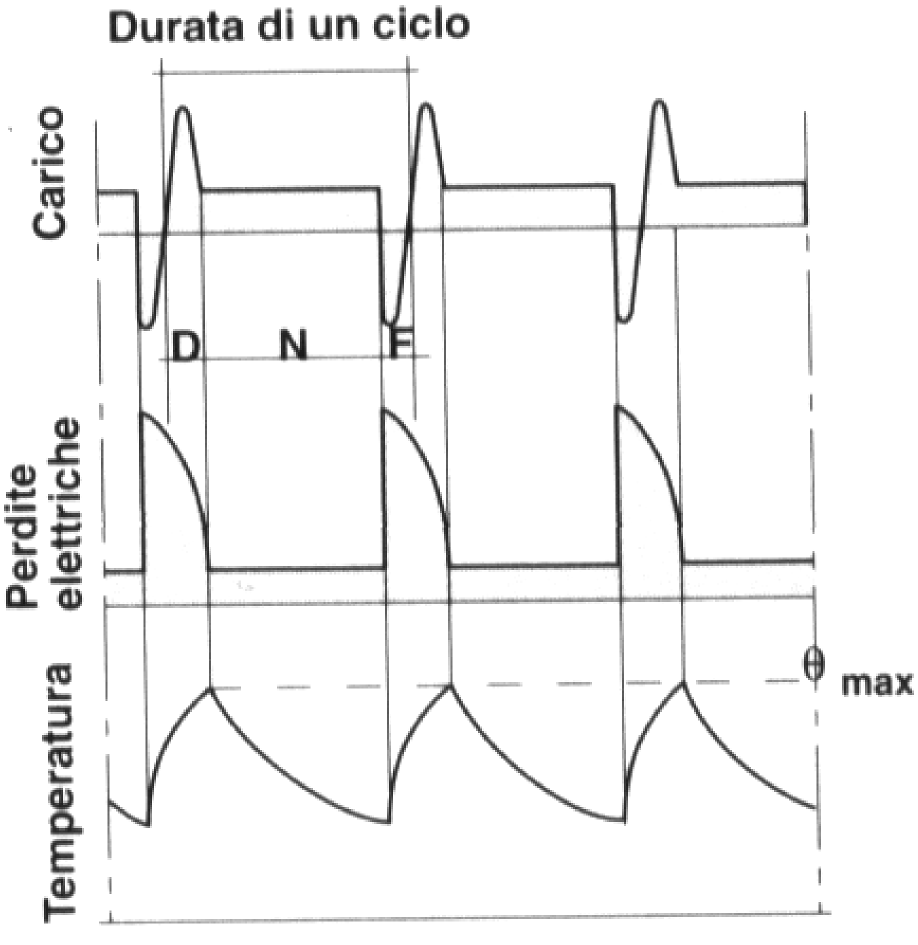
Rapporto di intermittenza

Esempio

S6 25%

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S7



Servizio intermittente periodico con **frenatura elettrica** che influenza il riscaldamento

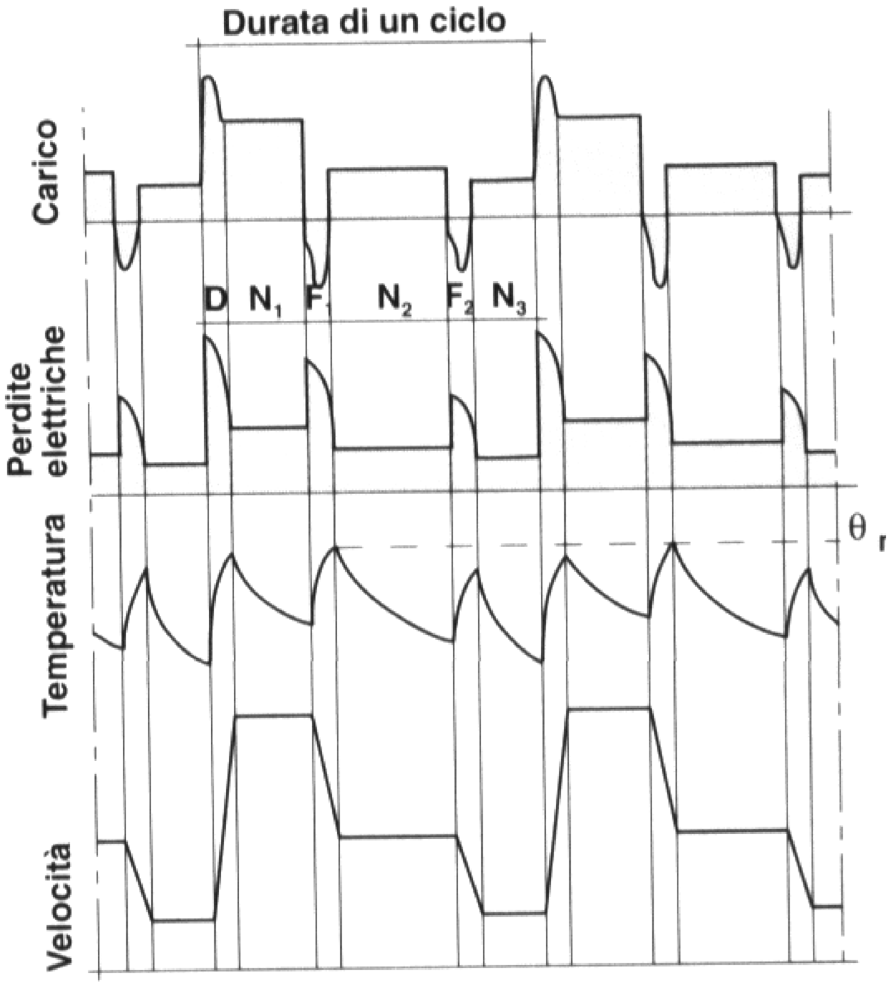
Funzionamento del motore come il servizio S5 ma senza periodo di riposo

Esempio

S7 $J_M = 0.4$ Kg m^2 $J_{ext} = 7.5$ Kg m^2

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

- Servizio S8



Servizio ininterrotto periodico con **variazioni periodiche della velocità e del carico**

Funzionamento del motore secondo un ciclo comprendente un periodo di funzionamento a carico costante seguito da un altro con diverso carico costante e diversa velocità, non esiste periodo di riposo.

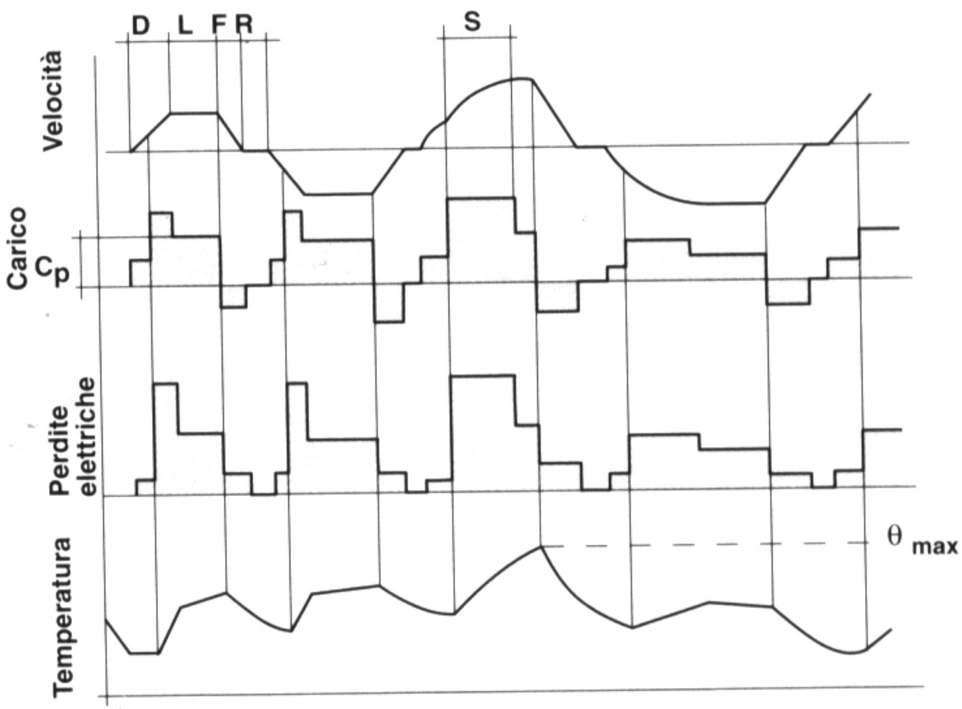
$$\frac{D + N_1}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \times 100\%$$

$$\frac{F_1 + N_2}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \times 100\%$$

$$\frac{F_2 + N_3}{D + N_1 + F_1 + N_2 + F_2 + N_3} \times 100\%$$

Tipi di servizio - Norme CEI EN60034-1/IEC 34-1

❑ Servizio S9



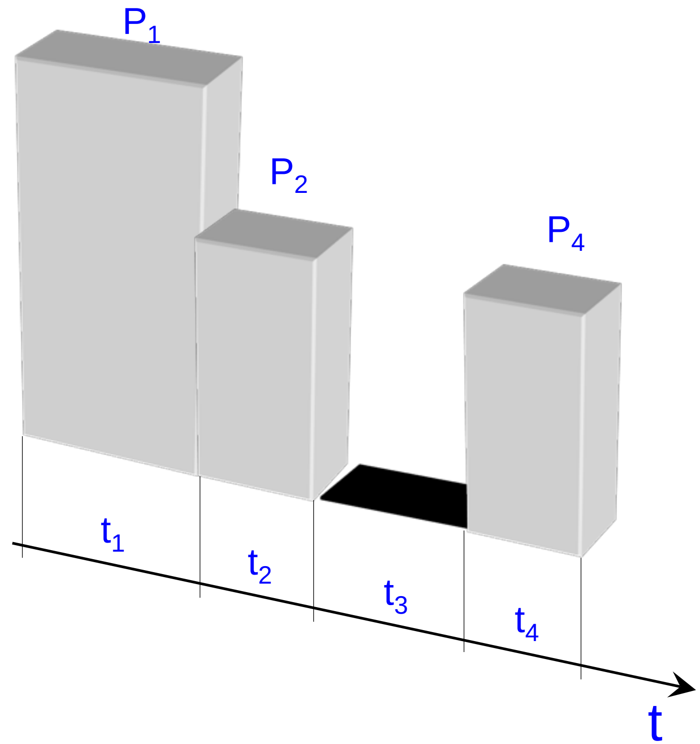
Servizio con **variazioni non periodiche della velocità e del carico**

Servizio in cui generalmente il carico e la velocità variano in modo non periodico nel campo di funzionamento ammissibile. Questo servizio comprende sovraccarichi frequentemente applicati che possono essere largamente superiori ai valori di pieno carico

Potenza termicamente equivalente

- Potenza termicamente equivalente

$$P_t = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3/4 + t_4}}$$



Espressione valida per

$$0.3\,P_n \le P_{1,2,4} \le 1.5\,P_n$$

F i n e