

## CARATTERISTICHE NOMINALI DI UNA MACCHINA ELETTRICA

Le norme CEI definiscono per le macchine elettriche diversi **tipi di servizio**, cioè condizioni di funzionamento cui fanno riferimento convenzionalmente i costruttori, i venditori e gli utilizzatori delle macchine. Questa classificazione è preliminare anche alla definizione delle *caratteristiche nominali* di una macchina, la quale può avere ad es. una diversa potenza nominale a seconda che essa sia costruita per funzionare in modo continuativo oppure saltuario. I principali servizi specificati dalle norme [Norme CEI 2-3 par. 4] sono i seguenti:

### **SERVIZIO CONTINUO o SERVIZIO S1 [4.1].**

*Funzionamento a carico costante di durata sufficiente al raggiungimento dell'equilibrio termico.*

Si prevede cioè che la macchina rimanga in funzione continuativamente per un tempo uguale o superiore a quello richiesto per raggiungere il proprio **equilibrio termico**, quando cioè la temperatura nei diversi punti della macchina e in particolare negli avvolgimenti ha raggiunto un valore di temperatura costante (senza superare i limiti previsti per gli isolanti scelti).

### **SERVIZIO DI DURATA LIMITATA o SERVIZIO S2 [4.2].**

*Funzionamento a carico costante per un periodo di tempo determinato, inferiore a quello richiesto per raggiungere l'equilibrio termico, seguito da un periodo di riposo sufficiente a ristabilire l'uguaglianza fra la temperatura della macchina e quella del fluido di raffreddamento, con una tolleranza di 2°C.*

In questo caso la temperatura della macchina non raggiunge mai un valore stazionario, ma si mantiene sempre al di sotto del valore di regime termico. Se a una macchina costruita per funzionare in servizio S1, si applicano le condizioni del servizio S2 con uno stesso carico, la macchina raggiungerà certamente una temperatura inferiore a quella di regime prevista nel servizio S1, e in base a cui sono stati scelti i suoi isolanti; essa risulterà pertanto sottoutilizzata. In questo caso è possibile attribuire a questa stessa macchina una potenza nominale superiore, limitatamente al servizio S2; essa cioè, nel funzionamento di durata limitata, sarà in grado di trascinare carichi superiori a quelli previsti per il servizio continuo, senza danneggiare il suo sistema di isolamento.

### **SERVIZIO INTERMITTENTE o SERVIZIO S3 [4.3].**

*Sequenza di cicli di funzionamento identici, ciascuno comprendente un periodo di funzionamento a carico costante e un periodo di riposo. In questo servizio il ciclo è tale che la corrente di avviamento non influenza la sovratemperatura in maniera significativa.*

Anche in questo caso la macchina non funziona in modo continuativo. A differenza del caso precedente, l'intermittenza fa sì che non necessariamente la temperatura scenda durante la fase di riposo al valore della temperatura dei refrigeranti. Valgono inoltre le stesse considerazioni del caso precedente per quanto riguarda un possibile incremento di potenza rispetto al caso S1.

## CARATTERISTICHE NOMINALI DI UNA MACCHINA ELETTRICA

Le **caratteristiche nominali** di una macchina elettrica sono infine definite, per ciascuno dei servizi sopra descritti e per numerosi altri previsti dalle norme, come *le indicazioni fornite dal costruttore sul carico e le condizioni in cui la macchina può funzionare conformemente alle norme stesse.*

In pratica il costruttore è tenuto a definire i valori delle grandezze elettriche, meccaniche e termiche e le

condizioni di installazione per i quali la macchina, per un dato tipo di servizio, può funzionare correttamente, garantendo le prestazioni per cui è costruita e assicurando al tempo stesso la sicurezza per il personale e per la macchina stessa.

Le grandezze nominali da definire possono variare a seconda del tipo di macchina e possono descrivere gli aspetti elettrici (tensione, corrente, frequenza elettrica), quelli meccanici (coppia elettromagnetica, velocità, accelerazione), quelli termici (temperatura in punti accessibili della macchina) o particolari condizioni dell'ambiente in cui può essere installata (Altitudine, Temperatura esterna, Inquinamento chimico, presenza di polveri, ambiente con gas esplosivo).

Il parametro più importante per determinare la scelta di una macchina e le modalità di funzionamento è la **potenza nominale** legata essenzialmente ai limiti termici della macchina. Essa è la potenza che la macchina può erogare, in un certo tipo di servizio, alle condizioni elettriche e meccaniche nominali (tensione, corrente, fattore di potenza, frequenza, velocità di rotazione) senza superare i limiti di temperatura ammessi per la classe di materiali isolanti usata, anche in relazione al tipo di raffreddamento impiegato.

La definizione di potenza nominale può variare da macchina a macchina, si deve tuttavia ricordare che essa è generalmente una **potenza resa**.

Per un *trasformatore* o un *generatore in alternata* essa è la **potenza elettrica** apparente misurata ai morsetti della macchina in volt ampère (VA e spesso in kVA). Viene anche fornita l'indicazione del fattore di potenza.

Per un **generatore in continua** è la potenza elettrica (attiva) disponibile ai morsetti espressa in watt (W o kW).

Per un motore è la **potenza meccanica** disponibile all'albero e misurata in watt (W e spesso in kW). Si ricordi che in alcuni paesi e nella pratica si può trovare, benché non corretta, l'espressione della potenza meccanica in cavalli vapore (1 cavallo vapore (HP) equivale a 745,7 W)

Nel definire e misurare le grandezze nominali di una macchina le norme fanno usualmente riferimento a misure effettuate alla temperatura del refrigerante utilizzato e in particolare

per l'aria: 40°C

per l'acqua: 25°C

Si è visto in questo paragrafo come per definire la potenza che una macchina può erogare nel rispetto dei suoi limiti termici sia fondamentale conoscere il comportamento termico delle macchine elettriche.

## **Metodi di raffreddamento – Classificazione**

Il raffreddamento di una macchina elettrica avviene attraverso il fenomeno di trasmissione del calore prodotto al suo interno verso un elemento a temperatura inferiore, secondo i principi della fisica. L'elemento di raffreddamento è un fluido (aria, acqua, olio) che è messo a contatto con gli elementi attivi della macchina, ne assorbe il calore riducendone la temperatura, mentre la propria aumenta e viene quindi trasportato lontano dalla macchina stessa, mentre altro fluido refrigerante a temperatura più bassa lo sostituisce.

Il meccanismo più semplice di raffreddamento è quello che avviene quando la macchina è immersa nell'aria, a temperatura ambiente, senza elementi di ventilazione. L'aria immediatamente vicina alla macchina si riscalda e quindi si allontana per convezione, lasciando il posto ad altra aria a temperatura più bassa. È un metodo semplice, poco costoso, adatto nei casi in cui le perdite sono ridotte e la macchina non è chiusa in casse o sistemi di protezione che limitino il movimento libero dell'aria stessa; ad es. nei trasformatori "a secco" o nel caso di motori di piccola potenza che non prevedano sovraccarichi.

È possibile utilizzare l'acqua come refrigerante, grazie alla sua caratteristica di maggiore conduttanza termica, (capacità di trasportare maggiore quantità di calore a parità di salto termico).

In questo caso però non è possibile realizzare un contatto diretto tra elementi attivi della macchina (ferro e

avvolgimenti in rame) e refrigerante. Si rende necessario quindi l'impiego di un circuito costituito da canali o tubi isolati che scorrono all'interno del ferro o dei conduttori stessi, predisposti in fase costruttiva. Questo metodo implica maggiore complessità costruttiva e costi, ma è necessario quando la potenza in gioco diventa significativa.

Un modo per aumentare l'efficienza del raffreddamento consiste nel forzare il ricambio del refrigerante forzandone lo scorrimento mediante ventilatori (per l'aria e i gas) o pompe (per l'acqua, l'olio o altri liquidi).

Un semplice metodo per realizzare la ventilazione consiste ad es. nel calettare sull'albero stesso delle pale di ventilazione, che ruotano, senza bisogno di sorgenti di potenza esterne, insieme all'albero stesso. La capacità di raffreddamento dipende in questo modo dalla velocità di rotazione dell'albero e non sempre è sufficiente rispetto alle esigenze della macchina. Ad es. il raffreddamento non funziona quando la macchina si è fermata dopo un ciclo di lavoro; come conseguenza occorre molto tempo per smaltire il calore accumulato e raffreddare la macchina, come si richiede per es. nei cicli a durata limitata. In questo caso è opportuno prevedere una sorgente di ventilazione (o di pompaggio) esterna e separata dalla macchina stessa, con una propria sorgente di energia.

Quando la quantità di calore da eliminare è elevata può essere opportuno introdurre più di un circuito di raffreddamento: uno *primario* a contatto diretto con la macchina, e uno *secondario* a temperatura inferiore che scambia calore con il primo: ad es. un circuito chiuso di raffreddamento ad olio, messo a contatto con l'aria esterna a temperatura ambiente.

Tutti i metodi per aumentare il raffreddamento implicano come si vede maggiore complessità e maggiori costi, ma spesso sono necessari per la sicurezza di esercizio, o comunque si giustificano dal punto di vista economico, dal momento che una macchina con un raffreddamento più efficiente può operare più a lungo e con un incremento della potenza nominale.

Il tipo di raffreddamento della macchina è indicato sulla targa da un codice caratterizzato dal prefisso **IC**, prescritto dalle norme CEI (CEI EN 60034-6) del tipo:

**IC N<sub>d</sub> L<sub>1</sub> N<sub>1</sub> L<sub>2</sub> N<sub>2</sub>**

in cui:

**N<sub>d</sub>** è un numero che rappresenta la *disposizione* del circuito di raffreddamento. Ad es. **0** indica la circolazione libera, **1, 2 e 3**, diversi sistemi di circolazione in tubi o canali a circuito a perno; **4** raffreddamento attraverso la superficie esterna della macchina; **5-9** sistemi con scambiatori di calore montati all'interno o all'esterno della macchina.

**L<sub>1</sub>** è una lettera che denota il tipo di fluido del circuito refrigerante primario: **A** aria, **W** acqua, **H** idrogeno, **N** azoto, **F** freon, **U** olio.

**N<sub>1</sub>** è un numero che denota il metodo di circolazione del fluido. Ad es. **0** convezione libera; **1** autocircolazione (es. ventilatore calettato sull'albero e mosso da quest'ultimo); **5** dispositivo indipendente per il pompaggio o la ventilazione, alimentato da una sorgente separata e incorporato nella macchina; **6** come il 5, ma montato sulla macchina; **7** quando la circolazione si ottiene da un dispositivo separato dalla macchina (es una rete di distribuzione dell'acqua, o un condotto di gas sotto pressione).

**L<sub>2</sub> N<sub>2</sub>** come i precedenti, ma riferiti al circuito refrigerante secondario, se questo è presente.

Ad es. Generatore **IC7H1W7** indica una macchina in cui il circuito di raffreddamento primario è costituito da idrogeno che circola in un circuito chiuso, senza dispositivi di forzatura separati (**H1**); attraverso uno scambiatore di calore incorporato nella macchina (**7**), il circuito primario cede il calore al circuito secondario costituito da un circuito in cui circola acqua forzata dalla pressione della rete idrica (**W7**).

## COMPORTAMENTO TERMICO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

Le macchine elettriche sono sedi di perdite prodotte durante la trasformazione energetica, che si manifestano sotto forma di calore. L'importanza di questo fenomeno si deduce da quanto appena visto a proposito della definizione delle caratteristiche nominali delle macchine elettriche.

Per ridurre i problemi di sicurezza e assicurare un funzionamento buono e se possibile efficiente delle macchine stesse si deve prevedere un sistema di raffreddamento.

Importanti elementi di valutazione di questo apparato, oltre a quelli strettamente legati al processo termico, e che saranno illustrati ampiamente nel seguito, sono il costo e l'ingombro.

Il sistema di raffreddamento può essere elementare: lasciato cioè al semplice meccanismo di asportazione del calore da parte dell'aria circostante la macchina stessa; oppure può prevedere complessi dispositivi che richiedono la costruzione di apposite condutture e dispositivi frigoriferi che utilizzano acqua o gas.

Vi sono evidentemente sostanziali differenze di costo e pertanto i meccanismi più efficienti e costosi di raffreddamento si troveranno su macchine importanti per l'applicazione o per le dimensioni e per le quali migliorare il rendimento energetico comporta un risparmio sostanziale che può ben presto coprire i relativi costi di costruzione.

Per molte applicazioni anche l'ingombro del sistema di raffreddamento può essere determinante. Si pensi ad es. ai numerosi motori che devono governare il movimento di un robot a numerosi gradi di libertà. Essi devono tutti trovare posto in una struttura meccanica che per sua natura deve essere flessibile, leggera e poco ingombrante.

### Fenomeni di scambio termico all'interno di una macchina elettrica.

I principali meccanismi di scambio termico qui richiamati sono la *trasmissione* (dalla macchina al refrigerante) e l'*accumulo* (nelle masse della macchina).

#### Trasmissione del calore.

Essa avviene fra due corpi a diversa temperatura e si manifesta mediante *radiazione o convezione*. Quest'ultimo meccanismo è quello prevalente nelle macchine elettriche, nelle quali la maggior parte del calore è asportata dal fluido refrigerante che viene a contatto con le parti surriscaldate.

È possibile scrivere le relative equazioni di scambio termico a partire dall'espressione della **quantità di calore  $Q$**  trasmessa [J] da un corpo a temperatura  $\mathcal{G}_1$  ad uno a temperatura  $\mathcal{G}_2$ .

$$Q = (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2)(\alpha_R S_R + \alpha_{CV} S_{CV}) dt \quad (1.1)$$

dove:

$(\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2)$  è espressa in [°C]

$S_R$  e  $S_{CV}$  indicano la superficie di scambio termico per radiazione e convezione rispettivamente, espressa in [m<sup>2</sup>]

$\alpha_R$   $\alpha_{CV}$  sono rispettivamente coefficienti di trasmissione del calore per radiazione e convezione relativamente al particolare tipo di materiali (macchina e refrigerante) e sono espressi in [W/°C m<sup>2</sup>]

Per semplicità si possono introdurre un coefficiente complessivo  $\alpha_T$  e una superficie equivalente di scambio termico  $S_T$ , che tengono conto del fenomeno complessivo. In questo caso l'equazione

diventa:

$$Q = (\vartheta_1 - \vartheta_2) \alpha_T S_T dt \quad (1.2)$$

**Tabella 1 -  $\alpha_R$  E  $\alpha_{cv}$  DI ALCUNI REFRIGERANTI**

Refrigerante	$\alpha_R$ [W/ C m <sup>2</sup> ]	$\alpha_{cv}$ [W/ C m <sup>2</sup> ]
Aria naturale	6	8
Aria forzata (ventilazione)		50
Olio naturale	~ 0	11
Olio forzato (pompaggio)		350-600
Acqua naturale	~ 0	60
Acqua forzata		1100-4500

Per analogia con i circuiti elettrici si utilizzano anche alcuni parametri che rappresentano la conduzione del calore e caratterizzano un determinato sistema per il quale si possa definire una superficie equivalente di scambio termico.

$R_T = 1/(S_T \alpha_T)$  Resistenza termica [°C/W]

$G_T = 1/R_T$  Conduttanza termica [W/°C]

## Accumulo del calore

Il calore si accumula in un corpo in modo proporzionale alla sua massa e soprattutto in funzione delle sue caratteristiche fisiche, rappresentate sinteticamente dal parametro *capacità termica specifica* (per unità di massa), indicato con  $c$ , tipico dei diversi materiali, le cui dimensioni sono [J/°C kg].

Valori tipici di  $c$  per i materiali di interesse per le macchine elettriche sono i seguenti

- Rame  $c_{Cu} = 400$  J/°C kg
- Ferro  $c_{Fe} = 500$  J/°C kg
- Olio  $c_{Ol} = 1500$  J/°C kg

Per una parte omogenea di materiale di massa  $m$  si può definire il parametro *capacità termica*:

$$C = c m \text{ [J/°C]}$$

La relazione che descrive il calore accumulato ( $Q_A$  [J]) in una massa omogenea di materiale è la seguente:

$$Q_A = mcd\theta = Cd\theta \quad (1.3)$$

## Equazione complessiva di scambio termico

È possibile descrivere in forma sintetica lo scambio termico per una macchina o una parte di essa, utilizzando un bilancio energetico. Si consideri un elemento infinitesimo isoterma, sede di perdite che producono calore e immerso in un fluido refrigerante a temperatura costante  $\vartheta_{REF}$ .

Nell'ipotesi di considerare solamente i fenomeni termici sopra descritti (trasmissione e accumulo) vale la seguente equazione differenziale, che esprime il concetto per cui il calore prodotto dalle perdite viene in parte trasmesso e in parte accumulato nella massa del refrigerante:

$$P dt = mc d\mathcal{G} + (\mathcal{G} - \mathcal{G}_{REF}) \alpha_T S_T dt \quad (1.4)$$

ovvero:

$$P = C \frac{d\mathcal{G}}{dt} + \frac{1}{R_T} \mathcal{G} = C \frac{d\mathcal{G}}{dt} + G_T \mathcal{G} \quad (1.5)$$

Il significato dei simboli è quello già descritto precedentemente, mentre nella seconda delle equazioni riportate si è supposto  $\mathcal{G}_{REF} = 0$ . Nel caso specifico  $\mathcal{G}_0$  è la temperatura del refrigerante e svolge il ruolo di temperatura di riferimento (temperatura ambiente).

Con questa ipotesi si attribuisce al generico  $\mathcal{G}$  il significato di **sovratemperatura** rispetto a quella di riferimento. Si ricordi a tale proposito che la temperatura di riferimento assunta convenzionalmente dalle Norme CEI è pari rispettivamente a 40°C per l'aria e 25°C per l'acqua.

Nell'ipotesi di considerare l'intera macchina elettrica come un unico corpo omogeneo dal punto di vista termico (tutti i suoi punti quindi, dal mantello ai conduttori interni, si devono considerare alla stessa temperatura), l'equazione sopra riportata descrive l'andamento delle principali grandezze termiche, a partire dalla temperatura.

Il transitorio termico può essere quindi ricavato dalla risoluzione dell'equazione (1.5) che può essere riscritta come:

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{P}{C} - \frac{1}{R_T C} \mathcal{G} \quad (1.6)$$

La soluzione (equazione differenziale del I ordine a coefficienti costanti) è la seguente:

$$\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_{REG} + (\mathcal{G}_0 - \mathcal{G}_{REG}) e^{-t/\tau} \quad (1.7)$$

in cui:

$\mathcal{G}_{REG} = P R_T$  è il valore della temperatura a regime;  $\tau = R_T C$  è la costante di tempo termica (in analogia con la costante di tempo in un circuito elettrico);  $\mathcal{G}_0 = \mathcal{G}(t=0)$  ha qui il significato di temperatura della macchina all'istante iniziale

Si osserva quindi che il valore di regime della temperatura raggiunta da una macchina dipende solamente dal valore delle perdite e dalla resistenza termica, a sua volta legata alla natura del refrigerante, ma anche alle modalità di refrigerazione. Un sistema con ventilazione, ad es. risulterà più efficace di un sistema ad aria ferma e sarà quindi in grado di asportare più calore; ne risulta un coefficiente di trasmissione del calore  $\alpha_T$  e quindi una *conduttanza termica più elevata e una resistenza termica inferiore*. Risulta in conclusione che la macchina così raffreddata raggiungerà, a parità di perdite, una temperatura di regime inferiore a quella che si avrebbe senza ventilazione.

Si noti anche che la capacità termica non influisce invece sulla temperatura a regime, ma solamente sul transitorio.

*Valori tipici delle costanti di tempo termiche sono dell'ordine di alcune decine di minuti per macchine piccole (pochi kW) o a raffreddamento forzato e raggiungono alcune ore per macchine*

di potenza elevata (centinaia o migliaia di kW).

**Esempio 1. Riscaldamento di una macchina elettrica.**

Si consideri il fenomeno di riscaldamento di una macchina, ad es. un motore elettrico, inizialmente ferma e a temperatura ambiente. Se il motore viene acceso e fatto funzionare in maniera regolare e continuativa, esso produrrà una quantità di perdite espresse da una potenza complessiva  $P$  che si manifestano sotto forma di calore. La temperatura della macchina quindi passerà dal valore ambiente al valore di regime, pari al valore massimo previsto per quella condizione di funzionamento  $\mathcal{G}_{REG} = PR_T = \mathcal{G}_{MAX}$ . Nella (1.7) si deve quindi considerare  $\mathcal{G}_0 = \mathcal{G}_{REF} = 0$  (secondo la convenzione per cui le temperature del refrigerante sono assunte come riferimento e pari a 0).

Si ha quindi il seguente transitorio:

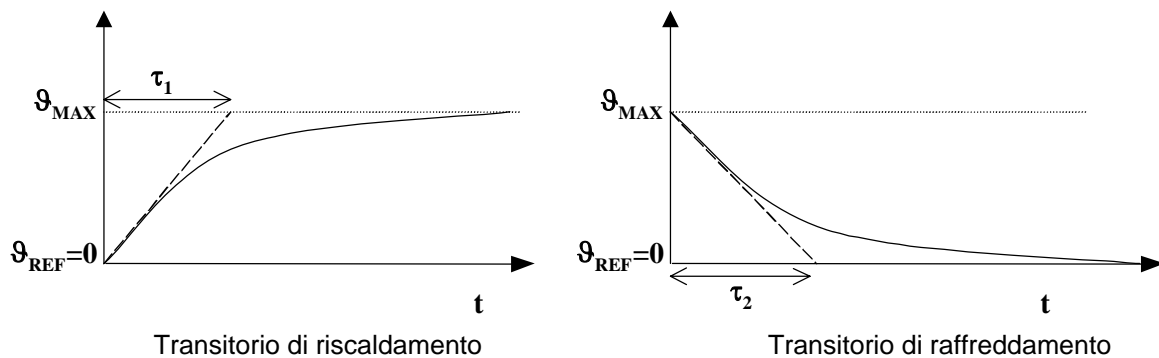
$$\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_{MAX}(1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (1.8)$$

**Esempio 2. Raffreddamento di una macchina elettrica.**

Si supponga ora che il motore dell'Esempio 1, dopo aver raggiunto la temperatura di regime, venga spento. Venendo meno le sorgenti di perdite, queste ultime si ridurranno a zero e si stabilirà un transitorio di raffreddamento che riporterà la macchina alla temperatura ambiente del refrigerante in cui è immersa, purché la macchina non venga riaccesa. In questo caso la temperatura di regime risulta pari a  $\mathcal{G}_{REG} = PR_T = 0$  dal momento che  $P = 0$  (Si ricordi che questo valore è sempre da considerare come sovratemperatura e coincide in pratica con la temperatura del refrigerante). La temperatura iniziale è invece il valore della temperatura massima raggiunta al termine del precedente transitorio:  $\mathcal{G}_0 = \mathcal{G}_{MAX}$ .

Si ha quindi il seguente transitorio:

$$\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_{MAX}e^{-t/\tau_2} \quad (1.9)$$



Si noti che nelle equazioni(1.8) e(1.9) si sono indicati due diversi valori della costante di tempo termica. Accade infatti di frequente che la refrigerazione agisca diversamente in fase di riscaldamento e di raffreddamento. È possibile ad es. che durante il riscaldamento, quando il motore è acceso, sia anche funzionante un sistema di ventilazione che migliora lo scambio termico; quando il motore viene spento (fase di raffreddamento) la ventilazione è generalmente sospesa. In questo caso il coefficiente di scambio termico diminuisce e pertanto la costante termica durante il raffreddamento risulta diversa, e in particolare più lunga, rispetto alla fase di riscaldamento.

L'equazione vista può essere usata per rappresentare schematicamente i fenomeni termici di una macchina elettrica, nell'ipotesi di considerare la macchina come una massa uniforme circondata dal refrigerante, con una ben determinata costante di tempo termica.

I limiti di questo modello appaiono immediatamente se si considera un motore reale, costituito da diverse sezioni, in cui le perdite sono distribuite diversamente nelle varie parti (decine W/kg per il rame, 1-5 W/kg per il ferro).

Si aggiunga a questo che anche il fluido refrigerante non sempre costituisce una massa unica, ma può essere distribuito anche all'interno della macchina e agire con diverse modalità.

Infine la struttura essenzialmente anisotropa della macchina elettrica non consente l'ipotesi di isoterma.

Tuttavia in molti casi queste equazioni semplificate possono fornire una prima indicazione del comportamento termico di massima della macchina ai fini del suo dimensionamento e del suo impiego.

### **Esempio 3. Parametri termici e dimensionamento meccanico delle macchine elettriche.**

Si consideri una macchina elettrica della quale sono generalmente noti i seguenti dati.

*Potenza dissipata totale* (si ricava dal rendimento  $P_{dissipata} = \frac{P_n(1-\eta)}{\eta}$ )

*Classe di isolamento dei conduttori* (fornisce, vedi tabella X, la temperatura massima che può raggiungere a regime)

*Temperatura del refrigerante* (secondo le norme 40 °C per l'aria, 25°C per l'acqua)

Dalla equazione a regime si ricava come già visto la relazione:

$$P = G_T \vartheta_{REG} \quad (1.10)$$

e quindi si può valutare la **conduttanza termica** [W/°C]

$$G_T = \frac{P}{\vartheta_{REG}} \quad (1.11)$$

Si vede quindi che, una volta fissata la classe di isolamento,  $G_T$  e  $P$  devono essere proporzionali, ma mentre le perdite  $P$  dipendono dalla massa dei materiali attivi (Fe, Cu) e dal loro sfruttamento ( $Wb/m^2$ ;  $A/mm^2$ ). In sostanza esse sono legate, a parità di sfruttamento al volume della macchina. Si può quindi stabilire una relazione di proporzionalità:

$$P \equiv \ell^3$$

in cui si indica con  $\ell$  la dimensione lineare della macchina.

D'altra parte la conduttanza  $G_T = \alpha_T S_T$  e dipende, a parità di condizioni di raffreddamento ( $\alpha_T$ ), dalla superficie di scambio termico. Si deve pertanto stabilire che

$$G_T \equiv \ell^2$$

Si può allora concludere che se una macchina è stata correttamente progettata per una determinata taglia (potenza/dimensione fisica), non è possibile estenderne automaticamente il progetto a una taglia superiore aumentandone le dimensioni lineari. Le perdite infatti aumenterebbero più di quanto il sistema di raffreddamento ( $G_T$ ) sarebbe in grado di compensare. Si deve piuttosto



prevedere un progetto per cui l'efficacia del raffreddamento aumenti di un ulteriore fattore proporzionale a  $\ell$ .

Questo si può ottenere:

- migliorando il sistema di raffreddamento (es. passando da aria ferma ad aria ventilata);
- aumentando la superficie di scambio termico (ad es. con alettature)

Macchine disegnate con questi criteri si dicono *simili*.

Si può osservare che per macchine simili, dal momento che risulta  $G_T \equiv \ell^3$  vale anche la relazione:

$$\tau = \frac{C_T (\equiv \ell^3)}{G_T (\equiv \ell^3)} = \text{costante}$$

ovvero la costante di tempo termica non cambia per macchine simili (anche di potenza diversa).

### **RISOLUZIONE NUMERICA DI PROBLEMI RELATIVI AL REGIME E AL COMPORTAMENTO TERMICO DELLE MACCHINE ELETTRICHE.**

#### ***Esercizio 1 – Aumento delle prestazioni col miglioramento del sistema di raffreddamento.***

Una macchina elettrica è caratterizzata dai seguenti dati:

Massa:  $m = 4 \text{ kg}$

Capacità termica specifica:  $c = 450 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$

Superficie di scambio termico:  $S = 0,05 \text{ m}^2$

Coefficiente di scambio termico:  $\alpha_T = 15 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$

Perdite complessive  $P = 75 \text{ W}$

Si calcolino la costante di tempo termica  $\tau$  e la temperatura massima a regime  $\mathcal{G}_{REG}$  della macchina.

Si calcolino gli stessi parametri qualora il coefficiente di scambio termico sia aumentato a  $\alpha_T = 50 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$

$$\tau = R_T C = \left[ \frac{1}{S_T \alpha_T} \right] \cdot [mc] = 2400 \text{ s} = 40 \text{ min}$$

$$\mathcal{G}_{REG} = PR_T = \frac{P}{S_T \alpha_T} = 100^\circ\text{C}$$

Portando il valore di  $\alpha_T$  a  $50 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$

$$\tau' = R_T' C = \left[ \frac{1}{S_T \alpha_T'} \right] \cdot [mc] = 720 \text{ s} = 12 \text{ min}$$

$$\mathcal{G}_{REG}' = PR_T' = 30^\circ\text{C}$$

Si osservi che gli isolanti sono sottoutilizzati in questa seconda ipotesi, dal momento che potrebbero sopportare una temperatura di regime pari a 100 °C. La macchina in effetti, con il nuovo sistema di raffreddamento, potrebbe dissipare una maggiore quantità di perdite e precisamente aumentare la propria potenza fino ad un valore tale per cui le perdite risultino pari a:

$$P' = \mathcal{G}_{MAX} / R_T' = 250W$$

*NB Il fatto che le perdite siano aumentate circa di un fattore 3 non significa che la potenza erogata sia anch'essa triplicata. Infatti si può valutare in prima approssimazione che la potenza resa aumenti in modo proporzionale alla corrente (a parità di tensione), mentre le perdite (principalmente nei conduttori) aumentano quadraticamente con la corrente. In conclusione ad un incremento di perdite di un fattore 3 corrisponde un incremento minimo di corrente, e quindi di potenza, pari a un fattore  $\sqrt{3} = 1,73$ . Una valutazione più precisa dipende dalla conoscenza di altri dati sulle perdite.*

### Esercizio 2 - Incremento di potenza per un servizio di durata limitata

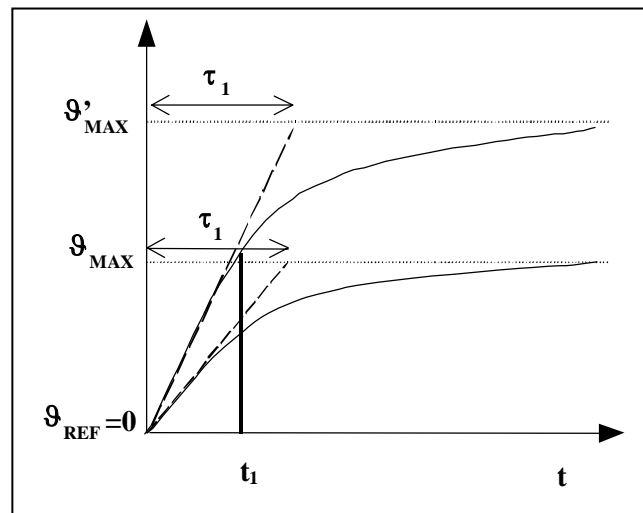
Una macchina elettrica è caratterizzata dai seguenti dati:

Costante di tempo termica:  $\tau = 40min$

Temperatura massima:  $\mathcal{G}_{MAX} = 100^\circ C$

Perdite complessive  $P = 75 W$

Si valuti il tempo massimo di funzionamento ammesso in servizio a durata limitata, se si vuole dissipare una quantità doppia di perdite complessive.



L'espressione del transitorio si ricava dalla (1.8)

$$\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_{MAX} (1 - e^{-t/\tau_1})$$

Se aumentano le perdite, mentre rimane immutata la costante di tempo, aumenta il valore di regime della temperatura, di un fattore pari all'incremento delle perdite. Detto  $P'$  il valore delle nuove perdite si ha allora:

$$\mathcal{G}(t) = \mathcal{G}_{MAX}' (1 - e^{-t/\tau_1}) = \mathcal{G}_{MAX} \frac{P'}{P} (1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (1.12)$$

Nella nuova condizione di funzionamento, la macchina seguirà il transitorio (II). Si calcola perciò l'istante  $t_1$  in cui la temperatura raggiunge il valore massimo consentito per gli isolanti e pari proprio a  $\mathcal{G}_{MAX}$ . In quell'istante la macchina dovrà essere spenta, per evitare che la temperatura superi il valore consentito e  $t_1$  rappresenta quindi la durata massima richiesta. Il problema si può risolvere analiticamente sostituendo, nella (1.12),  $\mathcal{G}_{MAX}$  a  $\mathcal{G}(t)$ :

$$\mathcal{G}_{MAX} = \mathcal{G}_{MAX} \frac{P'}{P} (1 - e^{-t_1/\tau_1}) \quad (1.13)$$

da cui:

$$t_1 = \tau_1 \ln \frac{P'}{P' - P} = 27,7 \text{ min} \quad (1.14)$$

**Esercizio 3 - Incremento di potenza per un servizio intermittente.**

La temperatura massima in servizio continuo di una macchina è  $\mathcal{G}_{MAX} = 130^\circ C$ . La sua costante di tempo termica  $\tau_1$  di riscaldamento a motore ventilato è di 25 min, mentre quella di raffreddamento  $\tau_2$  a motore fermo è di 100 min.

Si valuti la temperatura massima di regime per un servizio intermittente caratterizzato da  $t_1=10$  min (macchina funzionante) e  $t_2=10$  min (macchina ferma).

L'andamento a regime della temperatura è costituito di tratti di esponenziale crescenti e decrescenti, con valore massimo  $\mathcal{G}_1$  e minimo  $\mathcal{G}_2$ , caratterizzati dalle rispettive costanti di tempo. Si veda una rappresentazione grafica in figura, dove si è tralasciata, per comodità di rappresentazione, una parte del transitorio.

Per quanto riguarda il funzionamento a regime si può dare anche l'espressione analitica dei diversi tratti. Per il tratto crescente vale la relazione:

$$\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2 = (\mathcal{G}_{MAX} - \mathcal{G}_2)(1 - e^{-t_1/\tau_1})$$

Per il tratto decrescente

$$\mathcal{G}_2 = \mathcal{G}_1 e^{-t_2/\tau_2}$$

Risolviendo il sistema si ottiene :

$$\mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_{MAX} \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_1}}}{1 - e^{-\left(\frac{t_1}{\tau_1} + \frac{t_2}{\tau_2}\right)}}$$

Sostituendo infine  $\mathcal{G}_{MAX} = 130^\circ C$  e  $t_1 = t_2 = 10 \text{ min}$  si ricava:

$$\mathcal{G}_1 = 109^\circ C .$$