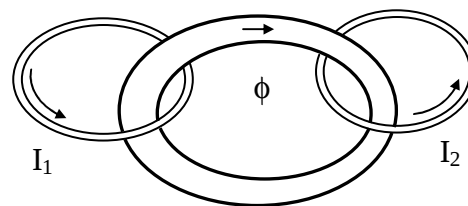


PERDITE, RISCALDAMENTO E RENDIMENTO NELLE MACCHINE ELETTRICHE

In ogni macchina elettrica si può individuare un circuito magnetico principale accoppiato a due circuiti elettrici distinti. I due circuiti elettrici possono essere fermi, come nel trasformatore, oppure in movimento relativo tra loro^(o), come nelle macchine rotanti (a seconda dei casi sono detti “a primario” e “a secondario”, “di statore” e “di rotore”, “di eccitazione” e “di indotto”, ecc.).



La presenza di un circuito magnetico, che accoppia i due circuiti elettrici, fa sì che le tensioni indotte siano notevoli e quindi che la potenza in gioco risulti elevata. Il circuito magnetico, realizzato in materiale ferromagnetico dolce, è solitamente laminato allo scopo di ridurre le perdite. I circuiti magnetici e gli avvolgimenti, compresi gli isolanti, costituiscono le *parti attive* della macchina.

Un gruppo di problemi, tra loro interconnessi, comune a tutti i tipi di macchine è costituito dalle perdite e dalla necessità di dissipare il calore da esse generato. La potenza nominale della macchina è strettamente connessa con la sua capacità di funzionare a temperature compatibili con una ragionevole durata di vita dell'isolamento e della macchina nel suo complesso. I problemi riguardanti la potenza nominale, la determinazione delle perdite e la massima sovratemperatura ammissibile sono tutti oggetti della normativa emessa da organizzazioni come CEI^(*). Tali questioni sono ovviamente di grande importanza negli aspetti economici e pratici di ogni progetto che include macchinario elettrico.

Per **potenza nominale** di una macchina elettrica si intende la potenza che la macchina può fornire all'esterno, cioè la *potenza in uscita*. Essa è indicata sulla targa della macchina^(**), insieme al tipo di **servizio**:

- 1) *continuo* (In servizio continuo la macchina deve fornire la sua potenza nominale per un periodo di tempo indefinito.);
- 2) *di durata limitata* (Il servizio di durata limitata è caratterizzato dal funzionamento della macchina alla potenza nominale per un periodo di tempo convenuto. L'intervallo fra due successivi periodi di lavoro deve essere di durata tale che la macchina si riporti a temperatura ambiente.);
- 3) *intermittente* (Il servizio intermittente è un funzionamento ciclico della macchina con periodi di lavoro alla potenza nominale e successivi periodi di riposo. Il servizio intermittente è definito dal *rapporto di intermittenza*, cioè il rapporto fra la durata del periodo di lavoro e durata del ciclo.).

^(o) La prima classificazione delle macchine elettriche è fatta distinguendo tra macchine statiche e macchine rotanti. Nelle macchine statiche l'energia di ingresso e di uscita sono elettriche (come per i trasformatori). Le macchine rotanti trasformano invece energia elettrica in meccanica e viceversa. Appartengono a questa categoria i generatori, che trasformano energia meccanica in energia elettrica ed i motori, che trasformano energia elettrica in energia meccanica. Va aggiunto che ogni macchina elettrica è reversibile, per cui la trasformazione energetica è consentita nei due sensi. Tuttavia, in pratica alcuni tipi sono impiegati prevalentemente come generatori, mentre altri tipi sono impiegati come motori.

^(*) Il Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) è una associazione senza fine di lucro che ha lo scopo di “stabilire i requisiti che devono avere i materiali, le macchine, le apparecchiature e gli impianti elettrici perché essi rispondano alle regole della buona elettrotecnica, ed i criteri coi quali detti requisiti debbono essere controllati”. Fondato nel 1907 dall'AEI è stato ricostruito nel 1964 ad iniziativa del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), dell'AEI (Associazione Elettrotecnica ed elettronica Italiana), dell'ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) e dell'ANIE (Associazione Nazionale Industrie Elettriche ed elettroniche). La compilazione delle norme per l'accettazione, il collaudo, l'unificazione, la protezione di materiali, macchinari, impianti, ecc. è di competenza del CNR. Tramite un'apposita convenzione il CNR ha affidato al CEI tali compiti nel settore elettrotecnico ed elettronico.

Nell'intento di arrivare ad una normalizzazione internazionale per quanto possibile uniforme sono sorti gli organi normativi internazionali IEC (International Electrotechnical Commission) e CEEel (International Commission on Rule for the Approval of Electrical Equipment). La IEC raccoglie tutti i paesi industrializzati del mondo; la CEEel agisce in sede europea e tratta prevalentemente dell'unificazione delle prove di laboratorio e del loro riconoscimento reciproco fra paesi diversi.

^(**) Nei motori e nei generatori DC la potenza è espressa in Watt [W]. Se invece si tratta di macchine la cui potenza di uscita è elettrica in AC la potenza è espressa in Voltampere [VA].

Sulla targa sono riportati anche la tensione e dalla corrente che la macchina può erogare ai terminali (tensione e correnti *nominali* o di targa). Tensioni o correnti maggiori di quelle nominali causano perdite maggiori di quelle corrispondenti al funzionamento nominale. Questo aumento delle perdite non è accettabile se non per brevi intervalli di tempo nei quali la macchina è in *sovraccarico*.

Una macchina elettrica funziona in regime elettrico permanente quando i valori (efficaci o massimi) delle grandezze elettriche e magnetiche non cambiano al trascorrere del tempo; inoltre il regime termico è permanente quando la temperatura delle varie parti della macchina si mantiene costante nel tempo. Tra i funzionamenti possibili sono importanti: 1) il *funzionamento permanente a carico nominale*, al quale fanno riferimento i dati di targa; 2) il *funzionamento a vuoto*; 3) il *funzionamento in corto circuito*.

Una macchina elettrica funziona *in regime transitorio* quando le grandezze meccaniche, elettriche e termiche non hanno raggiunto i rispettivi valori del regime permanente. Più precisamente si ha transitorio meccanico a causa del momento di inerzia della parte rotante nel suo complesso, si ha transitorio elettrico a causa della costante di tempo dei due circuiti elettrici (accoppiati dal circuito magnetico), si ha transitorio termico a causa dell'inerzia termica delle varie parti attive e di supporto, nonché dei mezzi refrigeranti.

1. PERDITE NELLE MACCHINE ELETTRICHE

Le perdite nelle macchine elettriche possono classificarsi come segue:

- perdite nel ferro per isteresi e per correnti parassite;
- perdite nel rame per conduzione (perdite ohmiche);
- perdite addizionali nel rame, nelle masse metalliche vicine agli avvolgimenti per correnti parassite e nei lamierini per bave ed imperfetto isolamento;
- perdite negli isolanti (solitamente trascurabili);
- perdite meccaniche, per attrito (nei cuscinetti, delle spazzole sui collettori) e per ventilazione.

Salvo espliciti accordi in contrario, nelle perdite si includono anche quelle negli accessori facenti parte integrante della macchina (reostati, ventilatori interni).

Le perdite nei circuiti magnetici, dette **perdite nel ferro**, per isteresi e per correnti parassite dipendono dall'induzione massima B_M , dalla frequenza f , dallo spessore δ e dalla qualità dei lamierini secondo la relazione:

$$C_p = k_1 B_M^{1.6} f + k_2 \delta^2 B_M^2 f^2 \quad (1)$$

La cifra di perdita C_p rende conto delle perdite nel ferro per unità di volume (o di peso) come somma di quelle per isteresi e di quelle per correnti parassite. I coefficienti fisici k_1 e k_2 dipendono dal tipo di lamierino. Solitamente, per le parti assoggettate a flusso magnetico variabile si ricorre al ferro - silicio in quanto l'aggiunta del silicio fa diminuire sia le perdite per isteresi (riducendo l'area del ciclo) sia le perdite per correnti parassite (a seguito dell'aumento di resistività). Tuttavia l'aumento del tenore di silicio comporta un aumento di fragilità della lamiera tanto che non è possibile oltrepassare il 5%. Esistono anche lamiere di ferro dolce (tenore di carbonio $< 0.08\%$), il cui impiego è limitato a quelle parti non assoggettate a flusso magnetico variabile (poli delle macchine a corrente continua e delle macchine sincrone).

Per quanto riguarda le perdite per correnti parassite, è necessario ridurre il più possibile lo spessore dei lamierini e garantire che ogni lamierino, una volta montato, sia effettivamente isolato da quelli adiacenti. L'isolamento si ottiene con operazioni di verniciatura o di trattamento chimico superficiale.

Le perdite nei conduttori degli avvolgimenti, dette **perdite nel rame**, dipendono dal quadrato della corrente che scorre nei conduttori stessi. Sono dunque perdite che dipendono fortemente dal carico. In ogni caso i conduttori devono essere di bassa resistenza elettrica per ridurre le perdite o-

hmiche e le cadute di tensione presentate dagli avvolgimenti. Il materiale di gran lunga più usato per i conduttori è il rame elettrolitico ricotto per le sue buone qualità meccaniche (carico di rottura fino a 30 kg/mm^2) ed elettriche (resistività a 20°C : $17.6 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$). Solo in alcuni casi viene utilizzato l'alluminio (carico di rottura 10 kg/mm^2 , resistività a 20°C : $28 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$) come ad esempio nelle gabbie delle macchine asincrone.

Nelle macchine rotanti, alle perdite elencate in precedenza, si aggiungono le **perdite meccaniche**, pressoché indipendenti dallo stato elettrico della macchina ma fortemente influenzate dalla velocità della parte rotante. Le perdite meccaniche si dividono in perdite per attrito (dovute ai cuscinetti, sono proporzionali alla velocità di rotazione) e perdite per ventilazione (per il raffreddamento della macchina, sono proporzionali al cubo della velocità di rotazione). Quando è presente un collettore si hanno perdite per attrito anche in questa sede.

Oltre alle perdite principali che interessano le parti attive (rame e ferro) e, per le macchine rotanti, alle perdite meccaniche si hanno anche **perdite addizionali** che interessano invece tutte le parti metalliche della macchina. Queste sono essenzialmente perdite per correnti parassite dovute alla disuniforme distribuzione della corrente nei conduttori, alla disuniforme distribuzione dell'induzione nei circuiti magnetici e ai flussi magnetici variabili che investono le parti metalliche della macchina. Tali perdite dipendono quindi dalla forma, dalle dimensioni e dalla disposizione dei conduttori, dei circuiti magnetici, delle parti metalliche della macchina, oltre che dalla forma d'onda della grandezza cui la perdita è dovuta. Dato che la loro determinazione è molto difficile, solitamente sono valutate come una percentuale fissa delle perdite principali, variabile a seconda del tipo di macchina.

La ripartizione delle perdite nei vari tipi dipende dal tipo di macchina elettrica, dalla tecnologia costruttiva, dai materiali impiegati, dalla potenza nominale, ecc. Ad esempio, la tabella mostra una possibile ripartizione delle perdite in un tipico motore Asincrono (perdite totali = 100%).

perdite nel ferro	20 %
perdite nel rame a statore	37 %
perdite nel rame a rotore	18 %
perdite meccaniche	9 %
perdite addizionali	16 %

2. RISCALDAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

Le perdite provocano un aumento di temperatura delle varie parti della macchina rispetto all'ambiente e quindi si ha un passaggio di calore dalla macchina all'ambiente stesso. Durante il transitorio del fenomeno termico, la temperatura delle varie parti aumenta e quindi aumenta la potenza termica ceduta all'ambiente. A regime si tende a raggiungere per ogni parte della macchina un valore di temperatura tale che la potenza termica ceduta all'ambiente eguagli la potenza dissipata. In queste condizioni il fenomeno termico è a regime e nessuna sensibile variazione di temperatura si avrà fino a quando non si manifesterà, a causa di un cambiamento nelle condizioni di funzionamento della macchina, una variazione della potenza dissipata, a parità di temperatura ambiente, oppure una variazione di temperatura ambiente, a parità di potenza dissipata.

Si consideri per semplicità, al posto della macchina, un corpo omogeneo di massa m e calore specifico c , di conduttività termica infinita e superficie esterna S . Si supponga che tale corpo sia immerso in un ambiente a temperatura T_a e scambi calore con l'ambiente per convezione (naturale o forzata) con un coefficiente di scambio termico h . Detta P_d la potenza costante omogeneamente dissipata nel solido, il bilancio termico infinitesimo si scrive:

$$P_d dt = c m dT + h S (T - T_a) dt$$

Tale equazione, detta $\tau_{th} = (c m / h S)$ la *costante di tempo termica*, ammette la soluzione:

$$T = T_a + (P_d/hS)(1 - e^{-t/\tau_{th}})$$

dove si è supposto che $T(t = 0) = T_a$. Si può così affermare che un corpo omogeneo, entro il quale a partire da un certo istante $t = 0$ si viene a produrre una potenza termica costante (P_d), si riscalda con

legge esponenziale raggiungendo la temperatura finale (a meno dell'1%) dopo un intervallo di tempo uguale a 5 volte la costante di tempo τ_{th} : il corpo è affetto dunque da inerzia termica. In base a quanto detto, introducendo la sovratemperatura $\vartheta = T - T_a$, si può scrivere:

$$\vartheta(t = 5\tau_{th}) = P_d/hS$$

Per una data potenza resa si hanno determinate perdite e quindi, a regime termico, determinate sovratemperature delle varie parti della macchina rispetto all'ambiente. Per una data potenza resa, quindi, le temperature delle varie parti sono funzione della temperatura ambiente e assumono valori diversi per temperature ambienti diverse^(o). La **potenza nominale della macchina** può pertanto essere stabilita solo per una data temperatura ambiente. Le norme CEI stabiliscono che la potenza nominale di una macchina sia riferita alla temperatura ambiente convenzionale di 40°C per raffreddamento ad aria in circuito chiuso^(oo). Le sovratemperature relative alle varie parti della macchina sono stabilite in relazione a questa temperatura ambiente. Si può quindi definire la **potenza nominale della macchina** come la potenza che la macchina può erogare funzionando nel modo previsto (servizio continuo, di durata limitata o intermittente), alla temperatura ambiente convenzionale senza che le temperature delle varie parti superino i limiti stabiliti. Quindi la potenza che una macchina può effettivamente erogare dipende dalla temperatura ambiente: se questa è minore della temperatura convenzionale, la potenza erogabile è maggiore di quella nominale.

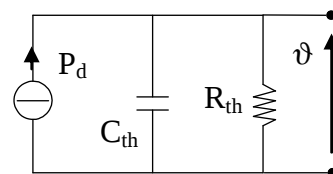
La vita di una macchina elettrica è strettamente legata alla durata degli isolanti (**vita dei dielettrici**) e questa alla temperatura. I materiali isolanti, per la loro natura fisica e chimica, sono molto sensibili alle sollecitazioni termiche (temperatura) ed elettriche (campo elettrico) le quali accelerano i processi di degradazione del materiale causando l'accorciamento della vita del dielettrico (tempo previsto alla rottura) e quindi quella della macchina. Infatti, il rame ed il ferro hanno una durata, dovuta alla loro stabilità chimica, di gran lunga superiore.

Con il termine **invecchiamento termico** si intende quindi la progressiva perdita, dovuta alle sollecitazioni termiche che l'isolante subisce, di quelle proprietà che avevano determinato il suo utilizzo ed il relativo dimensionamento nella realizzazione della macchina in cui è utilizzato. Esiste anche un invecchiamento da sollecitazione elettrica. In questo caso l'invecchiamento è molto complesso anche perché vi concorrono diverse cause come il calore corrispondente alle perdite dielettriche, le sollecitazioni meccaniche dovute alle forze elettrostatiche alternative, scariche elettriche parziali, ecc.

I materiali isolanti usati nella costruzione di macchine, impianti ed apparecchiature elettriche sono raggruppati in **classi termiche** (corrispondenti alla temperatura massima che gli isolanti possono sopportare senza perdere le loro proprietà dielettriche). Le classi termiche di maggior interesse nella realizzazione delle macchine elettriche sono quelle con temperatura massima 130°C, 155°C e

^(o) In pratica una macchina elettrica completa è un corpo non omogeneo dove la produzione di calore avviene nelle parti attive caratterizzate da potenze termiche diverse, da masse e da calori specifici diversi e dove esistono altre parti termicamente conduttrici (carcassa). Ogni macchina elettrica è dunque un sistema termico retto da più costanti di tempo; il considerarne una sola trova la sua motivazione nella semplicità di tale assunzione che, pur essendo grossolana, consente di arrivare a conclusioni realistiche. Così per le Norme CEI la *costante di tempo termica equivalente* è la costante di tempo che, utilizzata in sostituzione delle costanti di tempo delle singole parti, consente di determinare approssimativamente l'evoluzione della temperatura in un avvolgimento a seguito di una variazione a gradino della corrente.

Posto C_{th} = cm, capacità termica, e $R_{th} = 1/hS$, resistenza termica, la costante di tempo termica si può rappresentare come $\tau_{th} = C_{th} R_{th}$. In effetti il comportamento termico di un corpo omogeneo può essere descritto da una rete elettrica "equivalente" di tipo RC come mostrato in figura. L'analogia tra le soluzioni di circuiti elettrici e termici può essere portata avanti per calcolare sovratemperature in configurazioni più complesse. Valgono infatti per i circuiti termici leggi analoghe alle leggi di Kirchhoff, purché sia possibile individuare senza ambiguità nodi, rami e maglie.



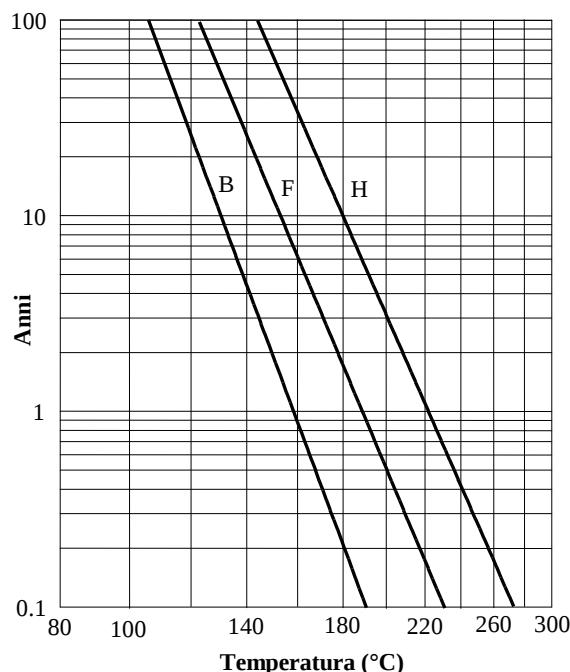
^(oo) Le Norme CEI classificano le macchine elettriche anche in base al sistema di raffreddamento. Si hanno quindi: macchine a ventilazione naturale; macchine auto ventilate, macchine a ventilazione forzata, macchine raffreddate con acqua o altro liquido refrigerante. La temperatura ambiente convenzionale di riferimento è 40°C per l'aria e 25°C per l'acqua, salvo diversa indicazione.

180°C (ex classi B, F, ed H). La relazione che lega la vita di una macchina (t_v) con la sua temperatura di lavoro (T) ha un andamento decrescente con T. Tale **curva di vita termica** può scriversi nella forma $\text{Log } t_v = M + N/T$, dove le costanti M ed N sono diverse per le varie classi di isolamento. Solitamente si fa uso di diagrammi in cui è riportato in ordinata il logaritmo decimale del tempo di vita espresso in ore (o in anni), ed in ascissa il termine $1/T$ espresso in gradi centigradi (la scala delle ascisse non è lineare). In figura sono riportate le curve relative alle classi B, F e H.

La temperatura massima ammissibile è la temperatura che, mantenuta costante per tutta la vita operativa del materiale, provoca il deterioramento del materiale nel tempo stabilito in fase di progetto^(*). Tuttavia durante la sua vita operativa l'isolante è tipicamente sottoposto ad una sollecitazione termica variabile nel tempo (ad esempio la macchina può trovarsi in condizioni di assenza di carico o di sovraccarico, oltre che a carico nominale). Si supponga che il materiale sia sottoposto a cicli termici rettangolari (dove t_k è la durata del ciclo k e T_k la relativa temperatura costante)^(**). La rottura è prevista quando (regola di Miner)

$$\frac{t_1}{t_v(T_1)} + \frac{t_2}{t_v(T_2)} + \dots + \frac{t_k}{t_v(T_k)} \geq 1$$

dove $t_v(T_k)$ è la durata di vita corrispondente a T_k , deducibile dalla curva di vita termica.



3. RENDIMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

Il rendimento di una macchina è espresso dal rapporto fra la potenza utile (o potenza di uscita) e la potenza assorbita (o potenza di ingresso):

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (2)$$

La determinazione sperimentale del rendimento potrebbe quindi effettuarsi misurando le due potenze P_u e P_a . Per le macchine elettriche questo metodo è applicabile solo quando la potenza sia relativamente piccola (intorno al kVA) per una serie di ragioni, che sono le stesse che rendono impossibile la determinazione delle sovratemperature in sede di collaudo:

- È necessario disporre della potenza necessaria per alimentare la macchina;
- Deve esistere la possibilità di utilizzare o dissipare la potenza di uscita per un tempo sufficiente ad esaurire il transitorio termico;
- Il costo di una tale prova è tanto più elevato quanto maggiori sono le potenze in gioco;
- Gli errori nella misura delle potenze potrebbero dare luogo ad un errore nel rendimento superiore alla tolleranza ammessa dalle Norme.

Le Norme CEI ammettono una tolleranza sul rendimento effettivo espressa da $\Delta\eta \leq 0.15 (1-\eta)$. Se la macchina ha una potenza di ingresso superiore a qualche decina di kVA si hanno rendimenti su-

^(*) L'influenza della temperatura sulla durata di una macchina è tale che basta un aumento di 10 °C per ridurne la vita a meno della metà. Ad esempio, per la classe B, a 130 °C la durata è poco più di 10 anni, mentre a 140 °C è poco meno di 5 anni.

^(**) In effetti nel passaggio da una temperatura all'altra si verificano i transitori termici. Per semplicità si ammette che il passaggio da una temperatura all'altra avvenga istantaneamente, per cui i cicli termici sono rettangolari (la costante di tempo termica è tipicamente dell'ordine dei minuti, per cui questa ipotesi è giustificabile).

periori all'85%. In tal caso la tolleranza risulterebbe inferiore al 2%. Gli errori ammissibili nella determinazione del rendimento mediante la misura delle due potenze devono essere inferiori a tale tolleranza.

L'errore massimo che si può commettere nella determinazione diretta del rendimento è ottenibile dalla (2) differenziandola (se gli errori sono sufficientemente piccoli); i singoli termini vanno considerati in valore assoluto, appunto perché si tratta di determinare l'errore massimo che si può commettere:

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta P_a}{P_a} + \frac{\Delta P_u}{P_u} \quad (3)$$

in cui ΔP_a e ΔP_u sono i valori assoluti degli errori assoluti della misura di P_a e P_u , rispettivamente. Tenuto conto che con l'uso di buoni strumenti l'approssimazione della misura della potenza è contenuta tra 0.5 ed 1%, risulta che l'errore relativo massimo sul rendimento è compreso tra 1 e 2% e quindi può superare la tolleranza ammessa.

Per i motivi sopra indicati, il rendimento delle macchine elettriche si determina misurando la potenza dissipata P_d ed introducendola nella espressione:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_d} \quad (4)$$

Tale espressione è del tutto equivalente alla (2) dato che $P_a = P_u + P_d$. Tuttavia, la determinazione del rendimento mediante la (4), nella quale si introduce una potenza utile P_u nota alla quale si vuole riferire il rendimento (solitamente quella nominale), non presenta le difficoltà che si hanno nella determinazione del rendimento per via diretta. In particolare, l'errore sul rendimento è molto minore di quello sulla potenza dissipata. Infatti dalla (4) si ha, tenendo presente che la sola grandezza che occorre misurare è la potenza dissipata:

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta P_d}{P_u + P_d} = (1 - \eta) \frac{\Delta P_d}{P_d} \quad (5)$$

L'errore sul rendimento è quindi uguale a quello della misura di P_d , ridotto del fattore $(1 - \eta)$, che è sempre molto piccolo nel caso delle macchine elettriche. Per fare un esempio, consideriamo un trasformatore da 1000 kVA con un rendimento pari a 0.985 a pieno carico e $\cos \phi = 1$. La potenza dissipata è pari quindi a 15.23 kW. Anche se supponiamo di commettere un errore grave nella determinazione delle perdite, per esempio del 5%, si ha un errore sul rendimento molto modesto. Infatti, tale errore vale, secondo la (5), 0.75%.

Il rendimento cui si perviene adottando la (4) si chiama **rendimento convenzionale**. Secondo le Norme CEI, la tolleranza sul valore del rendimento convenzionale è $\Delta\eta \leq 0.1(1 - \eta)$. Riprendendo l'esempio del trasformatore da 1000 kVA, la tolleranza sul valore del rendimento convenzionale risulta 1.5%, quindi doppia dell'errore commesso. Per superare la tolleranza ammessa occorrerebbe commettere nella determinazione delle perdite un errore superiore al 10%.

Si è già visto implicitamente che il rendimento varia con il carico e con il fattore di potenza. Per mettere in evidenza questa dipendenza si può scrivere la (4) nella seguente forma:

$$\eta = \frac{\alpha P_u}{\alpha P_u + P_{d,1} + P_{d,2}(\alpha)} \quad (6)$$

In questa relazione α è la frazione della potenza nominale che rappresenta il carico al quale si vuole determinare il rendimento, $P_{d,1}$ è la parte della potenza perduta che, a tensione costante, si può ritenere indipendente dal carico e $P_{d,2}$ è la parte della perdite che dipendono dal carico^(*).

Il valore del rendimento nei vari tipi di macchina elettrica dipende anche dalla tecnologia costruttiva, dai materiali impiegati, dalla potenza nominale, ecc. La tabella mostra i valori tipici del rendimento per alcune tipologie di macchine elettriche (valori orientativi).

Trasformatore	95% - 99%
Macchina Asincrona	75% - 92%
Macchina Sincrona	85% - 95%
Macchine DC	70% - 80%

Per ogni macchina elettrica, in particolare, il rendimento cresce all'aumentare della potenza nominale della macchina stessa. Per capirne la ragione si consideri un trasformatore monofase (ma la stessa analisi si può adattare anche alle altre macchine elettriche) e si supponga di volerne realizzare un'altro simile, cioè con le dimensioni lineari (altezza, larghezza, profondità) moltiplicate per un fattore di scala k , a parità di tecnologia costruttiva, materiali impiegati (e loro utilizzo), frequenza e fattore di potenza (del carico). Se le sezioni nel trasformatore iniziale sono indicate con S ed i volumi con τ , la macchina scalata avrà quindi sezioni e volumi pari a $S_{Cu}' = k^2 S_{Cu}$, $S_{Fe}' = k^2 S_{Fe}$ (Cu ed Fe indicano rame e ferro rispettivamente) e $\tau' = k^3 \tau$. Se per il trasformatore iniziale la corrente e la tensione nominali a primario sono, in valore efficace, $I_n = J_{Cu} S_{Cu}$ e $V_n = \omega N B_{Fe} S_{Fe}$, il trasformatore scalato avrà quindi (a parità di frequenza, numero di spire e utilizzo dei materiali impiegati, ossia fissati i valori efficaci o le ampiezze della densità di corrente nel rame e del campo di induzione nel ferro) $I_n' = k^2 I_n$ e $V_n' = k^2 V_n$. Quindi la potenza apparente $N_n = I_n V_n$ diventa $N_n' = I_n' V_n' = k^4 I_n V_n = k^4 N_n$. Analogamente, a parità di fattore di potenza, la potenza attiva nominale è $P_n' = k^4 P_n$. Se si elimina k utilizzando la relazione tra i volumi si ha $(P_n'/P_n)^{1/4} = (\tau'/\tau)^{1/3}$ ovvero $(P_n')^{1/4}/(\tau')^{1/3} = (P_n)^{1/4}/(\tau)^{1/3} = \text{costante}$ (la macchina iniziale ha volume e potenza nominale note). Pertanto, al variare delle dimensioni la potenza nominale varia proporzionalmente alla potenza $4/3$ del volume, ovvero: $P_n \sim \tau^{4/3}$ (**).

Le perdite nel rame (a primario, ma a secondario si procede analogamente) $P_{d(Cu)} = (J_{Cu}^2/\sigma_{Cu}) \tau_{Cu}$ diventano $P_{d(Cu)}' = k^3 P_{d(Cu)}$. Le perdite nel ferro $P_{d(Fe)} = C_p \tau_{Fe}$ diventano $P_{d(Fe)}' = k^3 P_{d(Fe)}$ (mantenendo costante lo spessore δ dei lamierini, il materiale e l'ampiezza del campo di induzione nel ferro, la cifra di perdita (1) è costante). Quindi, per il trasformatore iniziale, la potenza dissipata è $P_d = P_{d(Cu)} + P_{d(Fe)} + P_{d,add}$. Tenendo conto delle le perdite addizionali come una percentuale fissa delle perdite nel rame e nel ferro si ha quindi $P_d' = k^3 P_d$. Dalla (4) si ha quindi $\eta'/(1 - \eta') = P_n'/P_d' = k^4 P_n/(k^3 P_d) = k \eta/(1 - \eta)$. Ovvero il rendimento è una funzione crescente del fattore di scala (cioè della potenza nominale, o del volume): $\eta/(1 - \eta) \sim P_n^{1/4}$. Ad esempio, se si applica questa analisi ad una macchina Asincrona da 1 kW con rendimento 76%, si ottengono a 10 kW e 50 kW, rendimenti (plausibili) rispettivamente pari a 85% e 89%.

(*) Per le macchine DC la potenza utile P_u è la potenza nominale (o di targa). Per le macchine AC la potenza utile è espressa dal prodotto della potenza apparente nominale per il fattore di potenza del circuito alimentato dalla macchina. Il rendimento di una macchina viene generalmente dato per una potenza P_u pari alle seguenti frazioni della potenza nominale: 1/4, 1/2, 3/4 ed 1. Quando si tratta di generatori AC si considera il rendimento alle potenze sopra indicate e per i valori 1 e 0.8 del fattore di potenza.

(**) Questa relazione conferma la correlazione intuitiva tra volumi crescenti e potenze nominali crescenti per le macchine elettriche. In realtà l'esponente è compreso tra 1 e 1.3 dato che la tecnologia costruttiva deve cambiare con le dimensioni della macchina. Infatti, basti notare che gli spessori degli isolamenti scalano con k , ma la tensione scala con k^2 , quindi il campo elettrico (medio) negli isolanti scala come k . Dato che si ha la rottura dell'isolamento quando il campo elettrico è pari alla rigidità dielettrica (che dipende dal materiale isolante) è chiaro che all'aumentare di k (cioè delle dimensioni) si deve aumentare più che proporzionalmente lo spessore di isolamento, ovvero cambiare isolante, ovvero ridurre la sezione del ferro, ecc...