

CONSIDERAZIONI PRATICHE SULL'IMPIEGO DELLE MACCHINE

L'obiettivo di questo capitolo è realizzare una transizione tra l'analisi dei modelli matematici necessari a descrivere le macchine elettriche e gli aspetti pratici delle macchine reali. Nell'eseguire questa transizione si riconosce che le limitazioni delle prestazioni delle macchine sono essenzialmente determinate dalle proprietà dei materiali di cui le macchine sono composte. Infatti, i numerosi e notevoli progressi delle macchine elettriche sono una conseguenza in particolare dei miglioramenti conseguiti nella qualità e nelle caratteristiche degli acciai, dei materiali isolanti e del raffreddamento delle macchine.

La saturazione magnetica è una delle caratteristiche importanti nel collegare la macchina ideale con la macchina reale. Essa viene trattata mediante i circuiti magnetici piuttosto che per mezzo della teoria dei campi. L'approccio con la teoria dei campi, tuttavia, viene usato di frequente per aspetti di dettaglio e per fornire utili indicazioni e verifiche nello sviluppo dell'approccio con circuiti magnetici.

Un altro 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 massima sovratemperatura ammissibile e la determinazione delle perdite sono tutti oggetti della normativa emessa da organizzazioni professionali come IEEE, NEMA, ANSI e CEI. Tali questioni sono ovviamente di grande importanza negli aspetti economici e pratici di un progetto che include macchinario elettrico.

CLASSIFICAZIONE

Una prima classificazione delle macchine elettriche può essere fatta distinguendo le macchine *statiche* e quelle *rotanti*.

MACCHINE STATICHE

Le macchine statiche sono caratterizzate dal fatto che in esse l'energia di ingresso e di uscita sono entrambe elettriche, dove almeno una delle due è in forma alternata.

Appartengono a questa categoria:

1. I *trasformatori*, che trasformano energia elettrica alternata in energia elettrica alternata, mutando i fattori della potenza (tensione e corrente);

MACCHINE ROTANTI

Le macchine rotanti trasformano energia elettrica in meccanica e viceversa.

Appartengono a questa categoria:

1. I *generatori*, che trasformano energia meccanica in energia elettrica;
2. I *motori*, che trasformano energia elettrica in energia meccanica;

Va aggiunto che ogni tipo di macchina rotante è reversibile in quanto elettromagnetica, per cui la trasformazione energetica è consentita nei due sensi (da meccanica ad elettrica e viceversa) solamente alcuni tipi sono impiegati prevalentemente come generatori, mentre altri tipi sono impiegati come motori.

In ogni macchina elettrica si può individuare un circuito magnetico principale accoppiato a due circuiti elettrici distinti. Una dei due circuiti può essere considerato di *eccitazione* in quanto destinato ad imporre il flusso nel circuito magnetico. I due circuiti elettrici possono essere fermi, come nel trasformatore, oppure in movimento relativo tra loro, come nelle macchine rotanti. La presenza di un circuito magnetico il quale accoppia strettamente i due circuiti elettrici, realizzati di solito tramite avvolgimenti, fa sì che gli effetti delle forze elettromotrici indotte siano notevoli e quindi che la

potenza in gioco risulti elevata. Il circuito magnetico, per essere sede di un flusso magnetico variabile nel tempo, sarà laminato allo scopo di diminuire al massimo le perdite per correnti parassite. Allo stesso tempo il materiale impiegato sarà un materiale ferromagnetico dolce per ridurre al massimo le perdite per isteresi. I circuiti magnetici ed i relativi avvolgimenti, compresi gli isolanti, costituiscono le *parti attive* della macchina.

POTENZA DI UNA MACCHINA ELETTRICA

Per potenza di una macchina elettrica si intende la potenza che la macchina può fornire all'esterno, cioè la *potenza in uscita*. Essa si chiama **potenza nominale** della macchina ed è indicata sulla targa della macchina stessa, sulla quale è indicata anche la natura del **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, che deve essere specificato e che in ogni caso deve soddisfare la condizione che l'intervallo fra due successivi periodi di lavoro sia di durata tale che la macchina si riporti a temperatura ambiente.);
- 3) *intermittente* (Il servizio intermittente è caratterizzato da un funzionamento ciclico della macchina con periodi di lavoro alla potenza nominale e successivi periodi di riposo o di funzionamento a vuoto. Quando una macchina deve funzionare in modo intermittente occorre dare il *rapporto di intermittenza*, cioè il rapporto fra la durata del ciclo di lavoro e la durata del ciclo. Sono normali per questo rapporto i valori 15%, 25%, 40%).

Nei motori e nei generatori **a corrente continua** la potenza è espressa in Watt [W]. Quando invece si tratta di macchine la cui potenza di uscita è elettrica in corrente alternata la potenza è espressa in Voltampere [VA]. Infatti, una macchina che fornisca energia elettrica è caratterizzata dalla tensione e dalla corrente che può erogare ai morsetti (tensione e correnti *nominali* o di targa).

Una tensione maggiore di quella nominale può ottenersi, per una data macchina, con una maggiore induzione e quindi con una maggiore corrente di eccitazione. In tal caso le perdite nel ferro e nel rame dell'induttore risultano essere maggiori di quelle corrispondenti al funzionamento nominale. Questo aumento delle perdite dovuto all'aumento di tensione e di corrente non è accettabile se non per brevi intervalli di tempo nei quali la macchina è *sovraccaricata*. L'eventuale sovraccarico e la sua durata debbono essere oggetto di accordi particolari fra il costruttore e l'acquirente

Una macchina elettrica funziona in regime elettrico permanente quando i valori (efficaci e 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 principale), si ha transitorio termico a causa dell'inerzia termica delle varie parti attive e di quelle di supporto, nonché dei mezzi refrigeranti.

PERDITE NELLE MACCHINE ELETTRICHE

Le perdite nelle macchine elettriche possono classificarsi come segue:

- perdite nel ferro per isteresi e per correnti parassite (o di Foucault);
- perdite nel rame per resistenza (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;
- perdite meccaniche, per attrito nei cuscinetti, per resistenza delle spazzole sui collettori e per ventilazione.

Salvo espliciti accordi in contrario, nelle perdite si debbono intendere incluse anche quelle negli accessori facenti parte integrante della macchina (reostati, ventilatori interni). Per i trasformatori si esclude invece la potenza assorbita dagli organi ausiliari.

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:

$$C_p = k_1 B_M^{1.6} f + k_2 \delta^2 B_M^2 f^2$$

La cifra di perdita C_p rende conto delle perdite nel ferro per unità 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, oltre che dall'unità di misura delle varie grandezze. Le perdite nel ferro aumentano per effetto della tranciatura della lamiera dal 7 al 15%. Se dopo la tranciatura le lamiere vengono ricotte si ottiene una diminuzione delle perdite che va dal 10 al 20%.

Solitamente, per le parti assoggettate a flusso magnetico variabile si ricorre al ferro - silicio in quanto l'aggiunta del silicio in piccole quantità fa diminuire sia le perdite per isteresi (riducendo l'area del ciclo di isteresi) sia le perdite per correnti parassite (a seguito dell'aumento di resistività elettrica). Occorre sottolineare però che 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%), con contenuto di impurità molto basso, il cui impiego è limitato a quelle parti non assoggettate a flusso magnetico variabile (poli delle macchine a corrente continua e delle macchine sincrone). Le leghe ferro - silicio sono raggruppate in due categorie:

- La prima categoria comprende le leghe ferro - silicio *isotrope*, cioè le leghe che costituiscono le lamiere laminate a caldo. L'isotropia fa sì che le proprietà magnetiche non varino al variare della direzione del flusso magnetico e quindi che non si abbiano problemi particolari nelle operazioni di taglio e montaggio. Questo tipo di materiale è usato per le macchine rotanti e solo eccezionalmente per i trasformatori. Diversi sono i tipi di lamiere laminate a caldo sia per quanto riguarda lo spessore (0.5 mm oppure 0.35 mm) sia soprattutto per il tenore di silicio che può andare dall'1% al 4.5%, come appare dalla tabella.
- La seconda categoria comprende le leghe ferro - silicio a cristalli orientati, *magneticamente anisotrope*, che caratterizzano le lamiere laminate a freddo. Sono utilizzate universalmente per i trasformatori (salvo quelli di piccola potenza). Il lamierino si ottiene ricorrendo a laminazioni effettuate a freddo, intercalate da trattamenti termici eseguiti a circa 800°C in atmosfera di idrogeno, di leghe ferro - silicio ad alto tenore di silicio (3%) e viene fornito in rotoli. Lo spessore del lamierino è solitamente 0.35 mm, ma per impieghi particolari può arrivare a 0.1 mm. L'anisotropia offerta dalle leghe Fe - Si a cristalli orientati, a differenza delle altre leghe, è tale da presentare

per il flusso una sola direzione ottimale (quella di laminazione) per la quale le caratteristiche magnetiche sono molto buone e le perdite molto basse.

Tipo di materiale	Spessore (mm)	μ_r	B_{max} (T) H=2.5 kA/m	C_p (W/kg)	Denominazione della lamiera
Fe - Si (1÷1.5%)	0.5	3500	1.65	2.2÷2.5	semilegata
Fe - Si (2÷2.5%)	0.5	4000	1.60	1.7÷2.0	legata
Fe - Si (3.5÷4.5%)	0.35	4000	1.55	0.8÷1.0	extra legata
Fe - Si (3.5÷4.5%)	0.5	4000	1.55	1.0÷1.2	extra legata
Fe - Si (3%)	0.35	50000	1.85	0.4÷0.5	cristalli orientati
Fe - Si (3%)	0.28	50000	1.85	0.3÷0.4	cristalli orientati

Per quanto riguarda le perdite per correnti parassite, è noto che occorre 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. Ogni tipo di isolamento comporta un costo differente per la realizzazione del circuito magnetico sia per il materiale sia per la tecnologia impiegata, ma anche per il diverso coefficiente di stipamento realizzabile. Per un circuito magnetico, il coefficiente di stipamento è rappresentato dal rapporto tra l'area effettiva del ferro costituente la sua sezione e l'area apparente della stessa sezione. Solitamente il coefficiente di stipamento è compreso tra 0.9 e 0.95.

Le perdite nei conduttori degli avvolgimenti, dette *perdite nel rame* (P_{cu}), risultano dipendere 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 ohmiche 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/mm²) ed elettriche (resistività massima a 20°C: $1.76 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$). Solo in alcuni casi viene utilizzato l'alluminio (carico di rottura 10 kg/mm², resistività massima a 20°C: $2.8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$) come ad esempio nelle gabbie di scoiattolo 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. Quando è presente un collettore si hanno perdite anche in questa sede. Le perdite meccaniche si dividono in:

- *Perdite per attrito*: Sono dovute ai supporti, i quali durante il funzionamento si riscaldano. Il valore di queste perdite dipende, oltre che dal tipo di cuscinetto impiegato e dal peso della parte rotante, in maniera direttamente proporzionale alla velocità di rotazione.
- *Perdite per ventilazione*: Alla ventilazione è dovuto in tutto o in parte il raffreddamento della macchina stessa. Il valore di queste perdite dipende direttamente dal cubo della velocità di rotazione.

Le perdite che si hanno nelle macchine elettriche si possono dividere in perdite *principali*, che si calcolano come si è visto, e perdite *addizionali*, che vengono trascurate dal calcolo a causa delle notevoli difficoltà incontrate nello studio di questo argomento. Le perdite principali sono dunque quelle che interessano le parti attive (perdite nel rame e perdite nel ferro) e, per le macchine rotanti, le perdite meccaniche. Le perdite addizionali 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.

RISCALDAMENTO DELLE MACCHINE ELETTRICHE

Il calore che deriva dalla trasformazione dell'energia dissipata provoca un aumento di temperatura delle varie parti della macchina rispetto all'ambiente e di conseguenza si ha un passaggio di calore dalla macchina all'ambiente stesso. Nel periodo 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 λ . Detta P_d la potenza costante omogeneamente dissipata nel solido, il bilancio termico infinitesimo si scrive:

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

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

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

dove si è supposto che all'istante iniziale la temperatura del corpo sia uguale alla temperatura ambiente. Si può così affermare che un corpo omogeneo di massa m , 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:

$$\vartheta(t = 5\tau_{th}) = \frac{P_d}{\lambda S}$$

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 pure differenti (carcassa, ecc.). Ogni macchina elettrica è dunque un sistema termico retto da più costanti di tempo; il considerarne una sola, cioè considerare la macchina come se fosse un sol corpo omogeneo, trova la sua motivazione nell'estrema 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.

Per la buona conservazione dei materiali isolanti che si impiegano nelle macchine elettriche allo scopo di isolare fra di loro e dal circuito ferromagnetico i conduttori degli avvolgimenti, è necessario che le temperature medie delle varie parti siano inferiori a determinati valori, che dipendono dalla parte di macchina cui ci si riferisce e dalla natura del materiale isolante impiegato.

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. La **potenza nominale della macchina può pertanto essere stabilita solo per una 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. Le sovratemperature relative alle varie parti della macchina sono stabilite dalle norme CEI in relazione a questa temperatura ambiente. *Si può quindi definire la **potenza nominale della macchina come la potenza che la macchina può dare 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.*** Questi valori limite sono fissati in Italia dalle norme CEI; per gli altri paesi da norme elaborate da analoghe associazioni. La potenza che una macchina può effettivamente dare dipende dalla temperatura ambiente: se questa è minore della temperatura convenzionale, la potenza erogabile è maggiore di quella nominale.

La determinazione delle sovratemperature medie, con buona approssimazione, in sede di calcolo non è facile. Si tratta, infatti, di un corpo non omogeneo in alcune parti del quale ha luogo una trasformazione di energia in forma termica. A maggior ragione non si possono prevedere con precisione accettabile le temperature massime ed i punti in cui esse si manifesteranno. In generale, la determinazione delle sovratemperature si fa sperimentalmente, ma per macchine di potenza superiore a qualche decina di kW, in generale, non è possibile la determinazione in sala prove per le stesse ragioni che vedremo trattando del rendimento.

Le Norme CEI classificano le macchine elettriche anche in base al sistema di raffreddamento. Si hanno quindi: *macchine a ventilazione naturale*, quando non è previsto nessun dispositivo per aumentare la ventilazione; *macchine autoventilate*, quando il rotore è provvisto di mezzi speciali capaci di attivare il movimento dell'aria; *macchine a ventilazione forzata*, nelle quali l'aria per la ventilazione viene spinta nella macchina con mezzi esterni; *macchine raffreddate con acqua o altro liquido*, quando il raffreddamento avviene direttamente a mezzo di acqua o di altro liquido refrigerante; ecc. Le temperature ambiente sono definite diversamente per i vari sistemi di raffreddamento. Tuttavia, la temperatura ambiente di riferimento convenzionale è 40°C per l'aria e 25°C per l'acqua, salvo diversa indicazione nell'ordinazione delle macchine.

VITA DEI DIELETTICI

La vita di una macchina elettrica è strettamente legata alla durata degli isolanti 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 e quindi quella della macchina. Infatti, il rame ed il ferro hanno una durata di gran lunga superiore. Gli isolanti subiscono dunque una degradazione crescente con il tempo e con la temperatura. Si può quindi esprimere la durata t (o vita) di una macchina in funzione della temperatura massima (media) di funzionamento. Il problema però non termina qui dal momento che esiste anche un invecchiamento da sollecitazione elettrica. In questo caso l'invecchiamento del materiale è molto complesso anche perché vi concorrono diverse cause come il calore corrispondente alle perdite dielettriche, le sollecitazioni meccaniche variabili dovute alle forze elettrostatiche alternative, scariche elettriche parziali, ecc.

Nei riguardi delle temperature massime di funzionamento, i materiali isolanti usati nella costruzione di macchine, impianti ed apparecchiature elettriche possono essere raggruppati nelle seguenti **classi di isolamento** (secondo la normativa CEI). L'assegnazione alle classi B, F ed H dei materiali per esse elencati dipende dalle caratteristiche dei materiali collanti di impregnazione e deve risultare da esperienza o prove; l'assegnazione di un materiale non elencato nella tabella ad una determinata classe deriva da accordi tra il costruttore ed il committente e può risultare da esperienza di esercizio o da risultati di prova.

Classe	T _{MAX}	Materiali
Y	90°C	Carta, cotone, seta, fibre artificiali, legno non impregnati solitamente sotto forma di nastro o di tubo.
A	105°C	Carta, cotone, seta, legno impregnati. Se immersi in olio od altro liquido dielettrico appropriato possono anche non essere impregnati.
E	120°C	Materiali simili a quelli in classe A, che l'esperienza o le prove abbiano dimostrato atti a funzionare con 15°C in più di temperatura.
B	130°C	Fibra di vetro, asbesto o amianto, mica impregnati mediante opportuni collanti di natura organica.
F	155°C	Fibra di vetro, asbesto o amianto, mica impregnati mediante opportuni collanti di natura, generalmente ma non necessariamente, organica.
H	180°C	Fibra di vetro, asbesto o amianto, mica impregnati mediante collanti organici a base di silicone.
C	oltre 180°C	Mica, porcellana e materie ceramiche, vetro, quarzo con o senza collanti a base di vetro, cemento o siliceni con qualità superiori di stabilità (oltre 225°C)

La relazione che lega la durata di una macchina (t) con la sua temperatura di lavoro (T) ha un andamento esponenziale. Essa può scriversi nella forma:

$$\text{Log } t = a - bT$$

La relazione fra t e T , in coordinate semilogaritmiche (T in ascisse e $\log t$ in ordinate) si traduce in una retta. Le costanti a e b sono diverse per le varie classi di isolamento.

In figura sono riportate le curve relative alle classi A, B, H. Dalla prima risulta che per una sovratemperatura media di 60°C, cioè per una temperatura media di 40°C + 60°C = 100°C, la durata della macchina è poco più di 10 anni di funzionamento continuo. Tenendo conto che nei punti più caldi la temperatura è almeno 5°C superiore, si ha una temperatura massima di circa 105°C e quindi una durata di circa 7 anni di funzionamento continuo.

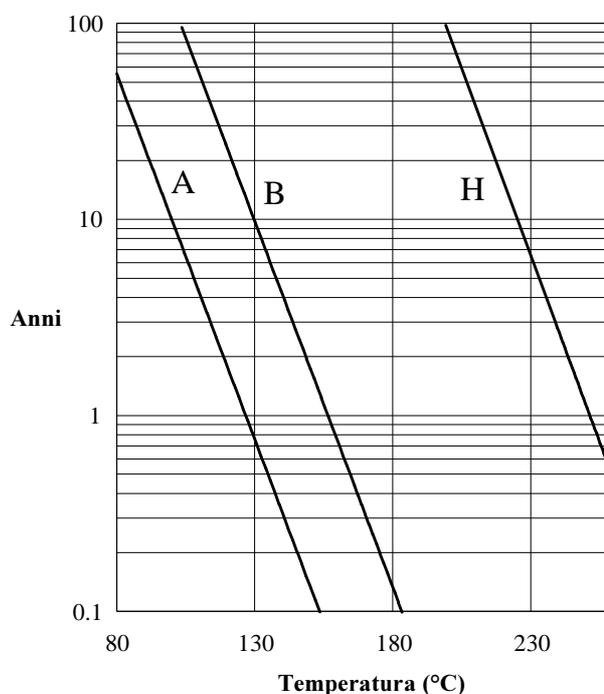


Figura 3.

L'influenza della temperatura sulla durata di una macchina è tale che basta un aumento di 10°C per ridurre la vita a meno della metà. Infatti, ad esempio, per la classe A a 100°C la durata è poco più di 10 anni, mentre a 110°C è poco meno di 5 anni. Tuttavia, è bene rilevare che generalmente una macchina non funziona con continuità per anni ed inoltre la temperatura ambiente non è costantemente pari a 40°C. È così possibile avere durate dell'ordine dei 20-30 anni senza riduzioni della sovratemperatura.

RENDIMENTO

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

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

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, meccanica ed elettrica, 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, ammesso che possa essere effettuata, sarebbe molto elevato;
- 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:

$$\Delta\eta = 0.15 (1-\eta)$$

Se la macchina ha una potenza di ingresso superiore a qualche decina di kVA si hanno rendimenti superiori 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 comunque essere inferiori a tale tolleranza.

L'errore massimo che si può commettere nella determinazione diretta del rendimento è ottenibile dalla (2) differenziandola. I singoli termini della sommatoria vanno considerati in valore assoluto, appunto perché si tratta di determinare l'errore massimo che si può commettere. Infatti, l'errore totale è massimo quando i termini della sommatoria hanno tutti lo stesso segno.

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dP_a}{P_a} + \frac{dP_u}{P_u} \quad (3)$$

in cui dP_a e dP_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). Infatti, la potenza assorbita è uguale alla somma della potenza utile e della potenza dissipata.

La determinazione del rendimento mediante la (4), nella quale si introduce la potenza utile P_u alla quale si vuole riferire il rendimento, non presenta le difficoltà che si hanno nella determinazione del rendimento per via diretta. In particolare, l'errore che si può commettere nella valutazione del rendimento è molto minore di quello da cui può essere affetta la misura della potenza perduta. Dalla (4) si ha, infatti, tenendo presente che la sola grandezza che occorre misurare per determinare il rendimento è la potenza dissipata:

$$\frac{d\eta}{\eta} = \left(\frac{P_d}{P_u + P_d} \right) \frac{dP_d}{P_d} = (1 - \eta) \frac{dP_d}{P_d} \quad (5)$$

L'errore che si può commettere nella determinazione del 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 $\cos \varphi = 1$. 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 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 a corrente alternata si considera il rendimento alle potenze sopra indicate e per i valori 1 e 0.8 del fattore di potenza.

Le Norme CEI stabiliscono che la misura delle varie perdite va fatta secondo la (5) e che qualche perdita sia valutata in modo convenzionale. Ciò al fine di evitare che, a causa dell'impiego di metodi diversi e delle difficoltà che si presentano nella misura di alcune perdite, sorgano delle divergenze sul valore delle perdite e quindi su quello del rendimento. Il rendimento cui si perviene adottando tali criteri si chiama **rendimento convenzionale**. Secondo le Norme CEI, la tolleranza sul valore del rendimento convenzionale è:

$$\Delta\eta = 0.1(1 - \eta)$$

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 (3) 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 (1/4, 2/4, 3/4, 4/4) 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.

Se si tratta con motori o generatori a corrente continua, la potenza utile nominale P_u è la potenza indicata sulla targa. Quando si tratta invece con macchine a corrente alternata la potenza utile P_u è espressa dal prodotto della potenza apparente nominale di targa P_a per il fattore di potenza del cir-

cuito alimentato dalla macchina. Per queste macchine, che forniscono all'uscita potenza elettrica in corrente alternata, la (6) si riscrive quindi:

$$\eta = \frac{\alpha P_a \cos \varphi}{\alpha P_a \cos \varphi + P_{d,1} + P_{d,2}(\alpha)} \quad (7)$$

Tale formula evidenzia la dipendenza del rendimento dal carico e dal fattore di potenza.

ENTI NORMATIVI

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.

Gli intensi scambi commerciali internazionali non consentono ad un paese industrializzato di adottare norme difformi da quelle degli altri paesi. Nell'intento di arrivare ad una normalizzazione 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.

COSTI E TARIFFE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Il costo di produzione dell'energia elettrica comprende varie voci, che si possono così succintamente classificare:

- Costi dovuti al capitale, legati a quello di installazione degli impianti, all'ammortamento del capitale impegnato, agli interessi bancari, ecc. Questi oneri dipendono dalla complessità della centrale e sono quindi legati al tipo di trasformazione energetica che vi si attua;
- Costi di smantellamento, derivanti dagli oneri per la messa fuori esercizio della centrale al termine della sua “vita”;
- Costi di esercizio, corrispondenti alle spese necessarie per la gestione degli impianti di produzione, legati anch'essi alla complessità dell'impianto stesso;
- Costi per l'approvvigionamento del combustibile, dipendenti sia dal tipo di combustibile, sia dalle oscillazioni dei mercati internazionali dell'energia e finanziari.

Riportare dei dati risulta piuttosto aleatorio, dato che i rapporti tra i costi sono molto variabili in conseguenza di eventi politici ed economici ⁽⁰⁾.

Legato al discorso dei costi vi è quello delle tariffe, cioè di come ed in che misura l'utente paga l'energia elettrica alla Società fornitrice. Al fine di stabilire un legame tra le due cose, i costi da considerare possono essere classificati in due categorie:

⁽⁰⁾ L'analisi dei costi di produzione è oggetto dei testi di “Centrali Elettriche” (o libri dai titoli equivalenti), ai quali si rimanda per maggiori informazioni.

- *Costi fissi*, indipendenti dal consumo e dovuti al fatto stesso di mettere a disposizione dell'utente una certa potenza (*spese di potenza*) e una organizzazione commerciale, un servizio di assistenza, ecc. (*spese d'utenza*);
- *Costi proporzionali*, dipendenti dal consumo e legati a quelli di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia.

Vari fattori influiscono sul costo dell'energia elettrica e quindi sulla struttura delle tariffe. In particolare si possono citare:

- *Potenza impegnata*, è una frazione di quella installata, che corrisponde alla somma delle potenze di targa in kW di tutte le macchine installate nello stabilimento, officina, ecc.. Dipende da elementi diversi in quanto non tutte le macchine dell'utenza debbono necessariamente funzionare contemporaneamente. Un maggior valore della potenza impegnata fa aumentare le spese fisse e quindi il costo della fornitura;
- *Potenza massima disponibile*, è la potenza relativa al massimo prelievo consentito all'utente. Qualora l'impianto prelevi una potenza superiore (il sovraccarico viene registrato dall'indicatore di massima potenza installato presso l'utente), l'utente dovrà pagare l'eventuale penale prevista nei contratti;
- *Tensione della fornitura*, aumentando la quale il costo si riduce poiché, a parità di potenza, diminuisce la corrente, con tutti i vantaggi conseguenti;
- *Fattore di potenza*, della cui incidenza si è già detto nel capitolo relativo al rifasamento. In particolare, il CIP 15/93 stabilisce i seguenti valori minimi del fattore di potenza:
 - istantaneo in corrispondenza del massimo carico (0.90),
 - medio mensile al di sotto del quale l'utente è tenuto a non scendere (0.70),
 - medio mensile al di sotto del quale si applica una maggiorazione del prezzo del kWh (0.90);
- *Luogo di consegna*; in linea generale il costo aumenta quanto più il luogo di consumo è distante da quello di produzione. Tuttavia, per ragioni di uniformità legate alla distribuzione dell'energia sull'intero territorio nazionale, questo fattore non influisce sulla struttura delle tariffe;
- *Periodo in cui avviene il consumo*: il costo dell'energia dipende anche dal periodo del giorno, della settimana e dell'anno in cui avviene il consumo. Infatti, vi sono dei periodi di punta in cui vi è maggior richiesta e durante i quali è necessario far funzionare più centrali, con un aggravio delle spese di produzione. Invece nelle ore notturne, nei giorni festivi, nei periodi di ferie la richiesta è minore e la produzione delle centrali funzionanti a tempo pieno (servizio di base) è sufficiente a soddisfare le richieste. Questa maggiore disponibilità rispetto al consumo determina una riduzione delle spese di fornitura, che si traduce in un minor costo mediante l'adozione delle *tariffe migliorarie*, applicate ad utenti con potenza impegnata molto elevata (oltre 500 kW), e che prevedono costi differenziati a seconda del periodo di consumo (Considerato che l'energia elettrica viene prodotta nel preciso istante in cui viene richiesta, è evidente la convenienza del fornitore nel cercare di regolare il modo col quale l'energia viene prelevata per potere di conseguenza regolare la produzione).

Tenendo conto quindi che il costo totale di una fornitura di energia elettrica è divisibile in un costo fisso proporzionale alla potenza impegnata ed in un costo proporzionale all'energia consumata, la tariffa che maggiormente si adegua a tale struttura è quella trinomia, in cui la spesa S [€] relativa ad un certo periodo di fornitura è data da:

$$S = k_0 + k_1P + k_2W$$

in cui P [€W] è la potenza impegnata, W [kWh] è l'energia consumata, k_0 [€] tiene conto delle spese generali, k_1 [€/kW] è il costo unitario della potenza impegnata e k_2 [€/kWh] è il costo unitario dell'energia.