

R. BUCCIANTI, A. DI GERLANDO, P. SPADA

APPLICABILITÀ DEL METODO CALORIMETRICO
PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI
ENERGETICHE DEI MOTORI ASINCRONI
DI BASSA TENSIONE

L'ENERGIA ELETTRICA

N° 5 1986

Applicabilità del metodo calorimetrico per la valutazione delle prestazioni energetiche dei motori asincroni di bassa tensione (*)

SOMMARIO

Allo scopo di permettere una più accurata caratterizzazione energetica dei motori asincroni trifase di bassa tensione, in condizioni il più possibile simili a quelle di esercizio, viene presentata e discussa una modalità di impiego del metodo calorimetrico, particolarmente rivolta a queste macchine. L'assenza di un circuito di raffreddamento geometricamente definito, dovuta al fatto che la ventilazione è sostenuta da una ventola calettata direttamente sull'albero del motore e gli scambi termici avvengono essenzialmente tra la carcassa e l'aria che la lambisce, ha imposto uno studio sperimentale delle condizioni al contorno, in termini di temperatura e velocità dell'aria. Sulla base di questa analisi preliminare, si è definita la struttura del dispositivo calorimetrico, descritto in dettaglio sia dal punto di vista costruttivo che dei dispositivi di misura. A conferma della validità dell'applicazione proposta del metodo calorimetrico, vengono infine presentati e discussi i risultati sperimentali di una serie di rilievi condotti (con il metodo calorimetrico e con il metodo diretto) su di un motore di potenza pari a 3 kW.

1. PREMESSA

L'attuale esigenza di una più attenta caratterizzazione energetica e funzionale delle macchine e degli apparecchi utilizzati nei processi industriali, dovuta anche ai ben noti vincoli energetici ed economici, rende evidente la necessità di un affinamento delle metodologie di prova delle macchine. È indispensabile infatti poter valutare correttamente anche le differenze di prestazioni, correlate ai recenti progressi conseguiti in fase sia di progettazione sia di realizzazione delle macchine, con riferimento a condizioni di prova il più possibile simili a quelle di esercizio e consentendo così all'utilizzatore finale di effettuare confronti basati su valori prossimi a quelli reali. In questa ottica rivestono particolare importanza le prove sui motori asincroni trifase unificati di bassa tensione sui

quali, per la loro larga diffusione e per il loro consumo globale di energia [1], sono stati sviluppati studi e ricerche che hanno già consentito la realizzazione di "serie" con prestazioni energetiche migliorate rispetto a quelle tipiche delle soluzioni usuali. L'esigenza di una più completa caratterizzazione di questi motori è già sentita in ambito normativo, come risulta dalle recenti norme IEEE Std 112 [2] che introducono importanti varianti e correzioni nella misura del rendimento con il metodo diretto. Questa metodologia, ulteriormente precisata, viene consigliata dalla NEMA [3] per la definizione delle prestazioni dei motori di bassa tensione. In realtà, però, anche l'impiego, nel metodo diretto, di procedure più sofisticate ed il ricorso a strumentazione di elevata precisione trovano forti vincoli di applicazione nel caso di macchine con elevati valori di rendimento o con presenza di armoniche nell'alimentazione.

(*) Ricerca eseguita nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica, CNR-ENEA, Contratto ENEA

(**) Ing. Roberto Buccianti - CESI, Milano
Ing. Antonino Di Gerlando - Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano
Ing. Patrizia Spada - CESI, Milano

Un'alternativa al metodo diretto, soprattutto in queste condizioni limite, può essere offerta dal metodo calorimetrico che, basandosi sulla misura delle perdite, non è influenzato direttamente dal valore del rendimento o dal contenuto armonico della alimentazione.

Nel seguito vengono analizzate le principali problematiche relative all'applicazione del metodo calorimetrico ai motori unificati di bassa tensione e vengono presentati e discussi alcuni rilievi sperimentali ottenuti con un dispositivo di misura, appositamente realizzato e descritto in dettaglio.

2. PROBLEMATICHE RELATIVE ALLA APPLICAZIONE DEL METODO CALORIMETRICO

Il metodo calorimetrico per la determinazione delle perdite di una macchina [4-5-6-7] comporta la misura della potenza termica ceduta al fluido di raffreddamento della macchina, funzionante al regime termico del carico prefissato.

La misura si basa sul rilievo del salto entalpico del fluido refrigerante tra le sezioni di ingresso e di uscita della macchina e sulla misura della sua portata.

Nell'ipotesi di potere trascurare la differenza dei termini cinetici (sezioni di ingresso e di uscita del fluido pressoché uguali) e considerando l'aria come fluido refrigerante, la potenza P_p , ceduta al fluido in condizioni di regime, si può valutare tramite l'espressione:

$$(1) \quad P_p = c_p \rho Q \Delta\theta \text{ [W]}$$

dove:

c_p	: calore specifico medio	[JK ⁻¹ kg ⁻¹]
ρ	: densità dell'aria	[kgm ⁻³]
Q	: portata volumica	[m ³ s ⁻¹]
$\Delta\theta$: salto termico del fluido refrigerante	[K]

E' opportuno sottolineare come la determinazione della differenza di temperatura, $\Delta\theta$, richieda il rilievo corretto della temperatura stessa, θ , nelle sezioni di uscita e di entrata, valutata secondo la relazione (ρ costante nella sezione):

$$(2) \quad \theta = \frac{\int_A T v dA}{\int_A v dA}$$

dove:

A = area della sezione considerata

T, v = temperatura e velocità puntuali.

Nel caso di macchine con un circuito di raffreddamento ben definito risulta sufficientemente agevole la misura della potenza scambiata con il motore tra le due sezioni, fisicamente precisabili, di entrata e di uscita del fluido refrigerante.

La ventilazione dei motori unificati di bassa tensione e' però generalmente ottenuta facendo lambire al flusso d'aria, sostenuto da una ventola calettata direttamente sull'albero, la carcassa del motore, opportunamente aleettata.

Deve essere notato come anche il lavoro meccanico della ventola del motore sul fluido refrigerante si degradi in forma termica e possa essere quindi misurato con metodi calorimetrici.

Per la corretta valutazione della potenza ceduta dal motore al fluido refrigerante, senza perturbarne in modo significativo i meccanismi di scambio, si pone quindi la necessità di fissare le superfici di contorno del fluido refrigerante e le sezioni di misura della portata dell'aria e del suo salto termico.

Cio' può essere realizzato effettuando rilievi preliminari di temperatura e di velocità dell'aria nell'intorno della macchina ed identificando quindi le superfici che soddisfano le seguenti condizioni:

- isotermicità rispetto alla temperatura dell'aria all'entrata della ventola di raffreddamento;
- velocità dell'aria nulla.

In questo modo si possono individuare infinite superfici, tra le quali le più significative ai fini della misura, sono quelle più prossime alla macchina.

Sostituendo superfici fisiche a quelle ideali così identificate non si altera il comportamento termico della macchina a meno di una frazione, generalmente trascurabile, della quota parte delle perdite dissipate per irraggiamento.

A questo proposito, e' però opportuno notare che le attuali norme non pongono vincoli precisi sui meccanismi di scambio termico nella prova con il metodo diretto, limitandosi ad esempio a fissare le condizioni circa la temperatura e la velocità dell'aria in prossimità della macchina senza vincolare altri fattori influenzanti quali il collegamento termico del motore con il basamento, la presenza di dispositivi di fissaggio non previsti nella configurazione di esercizio e l'effetto dell'irraggiamento sulle superfici circostanti.

Con l'adozione di queste superfici di contorno il rilievo della potenza dissipata dal motore si può quindi ricondurre, anche per i motori di bassa tensione, a misure di temperatura e portata volumica del fluido refrigerante, che dovrebbero, in linea di principio, tenere anche conto degli andamenti del calore specifico e della densità tra le sezioni estreme di misura.

Per ridurre la complessità della misura dei diversi parametri in giuoco e contenere di conseguenza anche gli errori loro correlati, si e' utilizzato un metodo [8] che riconduce la determinazione della potenza dissipata a misure puramente elettriche e termiche (a loro volta rilevabili con metodi elettrici) senza dover misurare la portata del fluido di raffreddamento. Come risulta dallo schema riportato in fig. 1, inserendo a valle del motore un resistore, dissipante una potenza nota, P_d , e lambito dalla stessa portata d'aria che interessa il motore, il rapporto dei salti di temperatura tra le sezioni a monte ed a valle del motore e tra quelle a monte ed a valle del resistore e' proporzionale al rapporto delle potenze in giuoco.

Infatti, con riferimento allo schema di fig. 1, essendo

$$(3) \quad \rho Q = \text{cost}$$

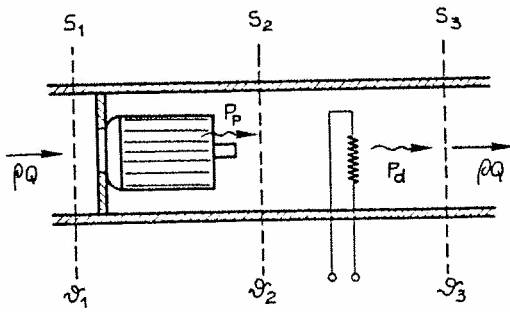


Fig. 1 Schema di principio del metodo calorimetrico utilizzato per la misura delle perdite sui motori asincroni di b.t.

si ha:

$$(4) \quad \frac{P_p}{P_d} = \frac{c_{p1-2}}{c_{p2-3}} \cdot \frac{v_2 - v_1}{v_3 - v_2}$$

dove c_{p1-2} e c_{p2-3} sono i calori specifici medi dell'aria rispettivamente tra le sezioni 1-2 e le sezioni 2-3. Poiché le variazioni di calore specifico, a titolo costante, tra le diverse sezioni risultano estremamente contenute in conseguenza dei ridotti salti termici in giuoco, come risulta dal diagramma di fig. 2, e' possibile assumere che il rapporto tra i calori specifici sia pari all'unita', commettendo un errore del tutto trascurabile (dell'ordine del per mille).

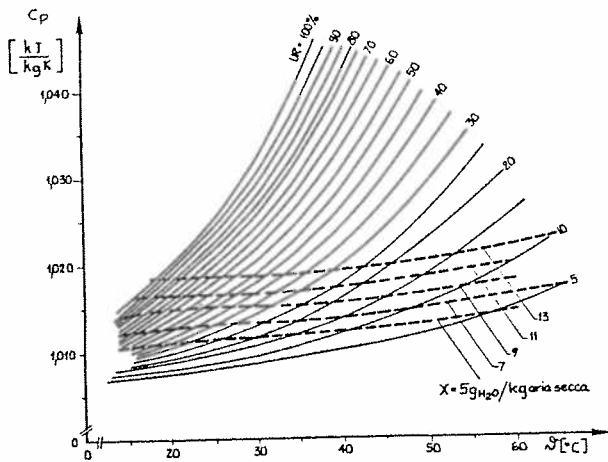


Fig. 2 Andamento del calore specifico dell'aria in funzione della temperatura per diversi valori di titolo, X, e di umidita' relativa, U.R.

In definitiva, quindi, la misura della potenza dissipata dal motore si riconduce all'espressione:

$$(5) \quad P_p = P_d \frac{v_2 - v_1}{v_3 - v_2}$$

dove tutte le grandezze possono essere misurate con metodi elettrici.

La realizzazione pratica di un dispositivo di misura basato su questi principi richiede ovviamente la definizione precisa della superficie di contorno del motore, la realizzazione di opportuni trasduttori di temperatura e la presenza di un dispositivo di estrazione dell'aria per compensare le perdite di carico lungo il condotto.

3. DISPOSITIVO DI PROVA

Per acquisire i criteri di dimensionamento per la realizzazione di dispositivi di prova idonei al rilievo delle prestazioni energetiche su motori di potenza compresa tra 1 e 22 kW, sono state effettuate diverse misure

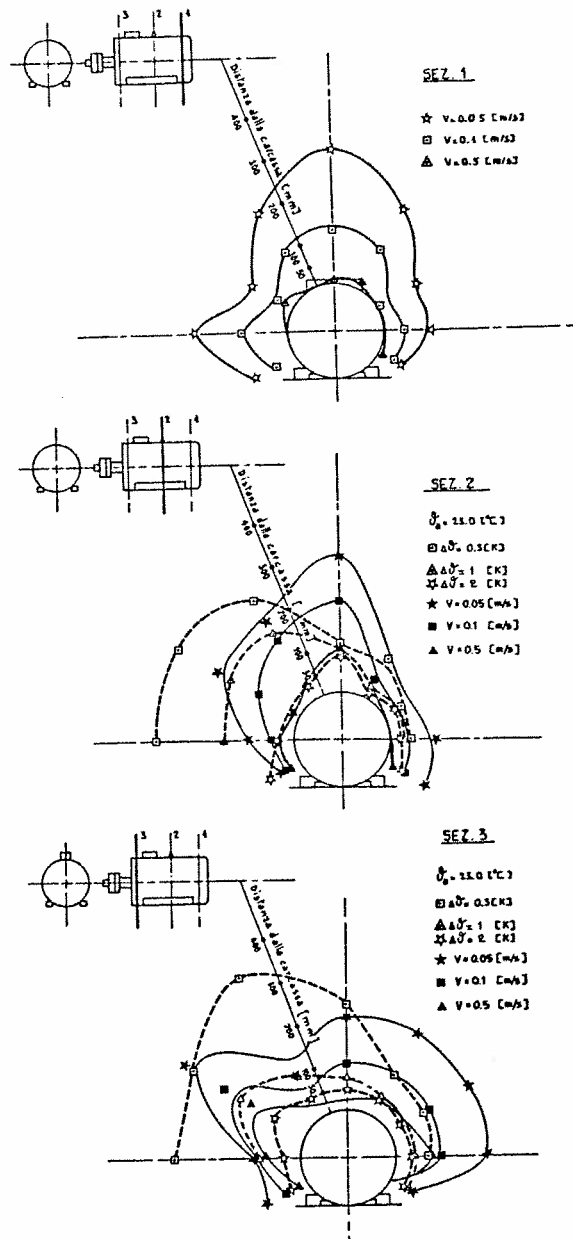


Fig. 3 Esempio di campi di velocità e temperatura rilevati sperimentalmente in diverse sezioni trasversali di un motore avente $P_n = 2,2$ kW, funzionante a pieno carico.

preliminari con lo scopo di valutare i campi di velocità e di temperatura dell'aria circostante i motori durante normali prove a carico, a regime termico stabilizzato.

Alcuni esempi degli andamenti di velocità e temperatura dell'aria in diverse sezioni trasversali, rilevati su di un motore con potenza nominale di 2,2 kW, sono riportati in fig. 3.

Una prima determinazione delle superfici fisiche di contorno può essere effettuata considerando un cilindro, coassiale con il motore, di raggio tale che i valori medi di velocità e sovratemperatura rispetto all'ambiente in ogni sezione, trasversale e longitudinale, siano rispettivamente dell'ordine di 0,1 m/s e 1 K. L'andamento della distanza, d , tra la carcassa del motore e la superficie del cilindro così identificato è riportato in fig. 4 in funzione della potenza dei motori considerati. A questo proposito è interessante notare come il rapporto tra questa distanza ed il diametro, D , della carcassa sia risultato, per i motori esaminati, pressoché costante e dell'ordine di 0,4.

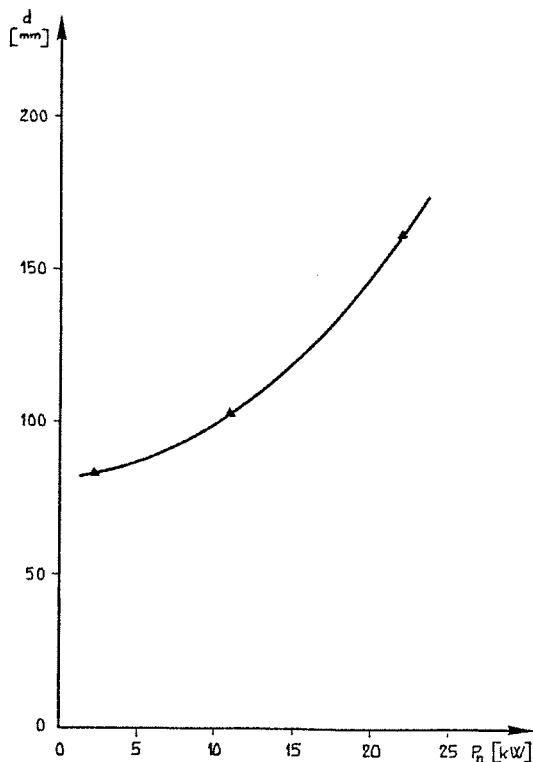


Fig. 4 Andamento della distanza, d , tra la carcassa del motore e la superficie di un cilindro ideale, cui corrispondono condizioni medie di velocità e sovratemperatura dell'aria dell'ordine rispettivamente di 0,1 m/s e 1 K, in funzione della potenza nominale dei motori.

Poiché però la realizzazione pratica del dispositivo richiede l'adozione di pareti piane, almeno per la zona corrispondente al basamento, si è ritenuto opportuno evidenziare l'influenza, sulla temperatura del motore, di

pareti piane (termicamente non conduttrici) poste nelle sue immediate prossimità. In particolare, sono stati eseguiti rilievi, con un motore di potenza nominale pari a 3 kW e funzionante a pieno carico, variando la distanza, d' , tra la carcassa e le pareti poste lateralmente e superiormente al motore stesso, con una chiusura dal lato opposto accoppiamento in cui si è predisposto un foro in corrispondenza della presa d'aria. La fig. 5 riporta l'andamento della differenza di sovratemperatura della macchina (valutata come media su sette termocoppie distribuite sulla carcassa) rispetto al funzionamento in aria libera, in funzione della distanza d' . Si nota come l'influenza delle pareti piane divenga trascurabile agli effetti termici (differenze di sovratemperatura inferiori a 1 K) per distanze d' maggiori od uguali a 0,3 D (con D diametro della carcassa). Tenendo conto dell'area disponibile per il passaggio del fluido con la configurazione adottata e con quella cilindrica ideale, descritta precedentemente, si osserva che i valori sperimentali trovati confermano le indicazioni ottenute tramite i rilievi di temperatura e velocità dell'aria in condizioni di motore "libero".

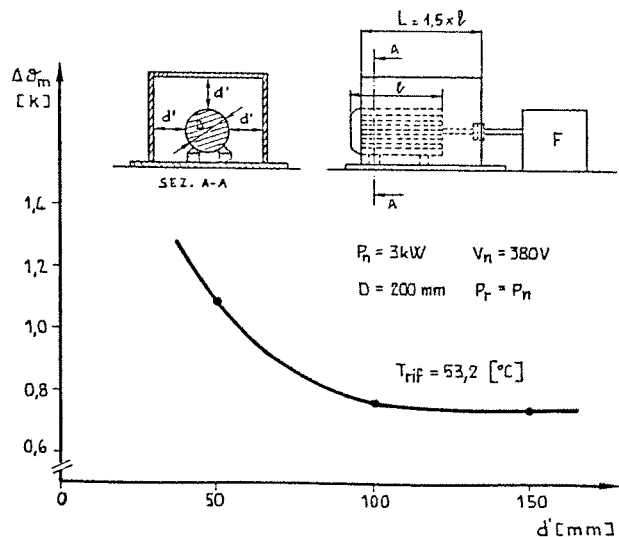
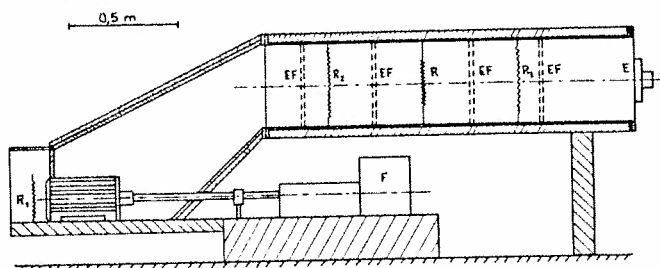
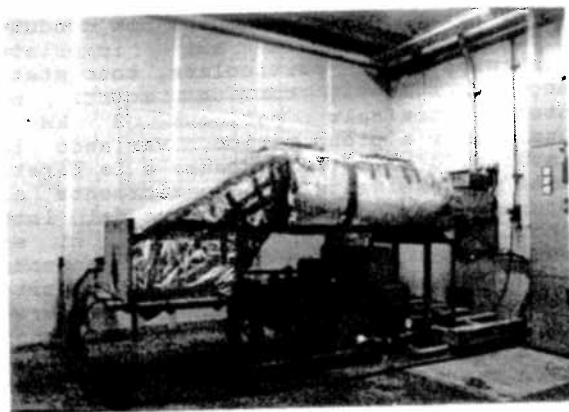


Fig. 5 Andamento della differenza di sovratemperatura della carcassa di un motore ($P_n = 3$ kW) funzionante a pieno carico in funzione della distanza, d' , tra la carcassa stessa e le pareti piane poste in prossimità, rispetto alla corrispondente sovratemperatura in aria libera.

Sulla base di queste indicazioni, è stato realizzato il dispositivo di misura mostrato in fig. 6, idoneo per prove su motori con potenza nominale sino a circa 3 kW. L'apparecchio calorimetrico è composto essenzialmente da due parti:

- camera motore;
- tunnel di misura.

La prima parte comprende tutta la zona circostante il motore ed è stata realizzata in legno con una coibentazione di circa 50 mm in lana di roccia su tutte



EF - equalizzatore di flusso
 R₁, R₂, R₃ - Termosonde
 R - dissipatore
 E - estrattore
 F - freno

Fig. 6 Vista e dimensioni principali del dispositivo calorimetrico realizzato per prove su motori con potenza nominale sino a circa 3 kW.

le pareti. E' opportuno sottolineare come la limitazione di potenza, indicata per il dispositivo calorimetrico realizzato, sia dovuta essenzialmente alla camera motore le cui dimensioni devono essere variate per permettere l'inserimento di motori di potenza superiore. Per permettere il collegamento del motore al dispositivo frenante (in questo caso anche dispositivo di misura per consentire il confronto dei risultati) e' stato necessario porre il tunnel di misura al di sopra del freno stesso, raccordando opportunamente, con pareti inclinate, le due parti del dispositivo calorimetrico.

Il tunnel di misura, pure dotato di coibentazione con caratteristiche analoghe a quelle della camera motore, e' stato realizzato con un tubo di PVC del diametro di 400 mm e comprende:

- Dispositivi di rilievo delle temperature, realizzati con griglie costituite con un cavo di tipo coassiale in cui il conduttore interno (in acciaio ramato) e' l'elemento termosensibile e lo schermo esterno, lambito direttamente dal flusso d'aria, svolge la duplice funzione di aumentare la costante di tempo termica (unitamente al materiale isolante interposto) e di proteggere la misura dall'effetto dell'accumulo di eventuali cariche elettrostatiche. In fig. 7 e' riportata una vista del particolare

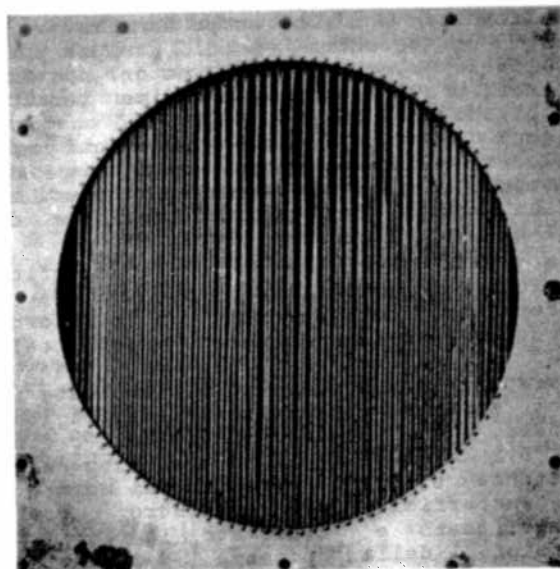


Fig. 7 Vista di una sonda per la misura di temperatura nel dispositivo calorimetrico.

della termosonda e del telaio di sostegno. Questi dispositivi sono montati sia all'interno dell'apparecchio che all'imboccatura della camera motore, questo ultimo per il rilievo della temperatura ambiente. La misura, per variazione di resistenza, e' effettuata con la tecnica dei quattro morsetti, prelevando il segnale di tensione direttamente alle estremita' del tratto di conduttore costituente la griglia ed interessato quindi alla misura. Per utilizzare direttamente i rilievi di resistenza nella determinazione delle perdite, l'eq. (5) diviene:

$$(5) \quad P_p = P_d \frac{(R_2/R_{20}) - (R_1/R_{10})}{(R_3/R_{30}) - (R_2/R_{20})}$$

dove R₁, R₂, R₃ sono i valori di resistenza durante la prova ed R₁₀, R₂₀, R₃₀ sono i corrispondenti valori in condizioni isoterme di riferimento.

- Resistore di dissipazione, costituito da un conduttore di nickel-cromo uniformemente distribuito nella sezione e dimensionato per potere dissipare una potenza di circa 600 W in aria in quiete con sovratemperatura dell'ordine di 20 K.
- Equalizzatori di flusso, realizzati con coppie di lamiere forate disposte in modo da assicurare il completo sfalsamento dei fori sui due piani. Questi equalizzatori consentono in realta' non solo di favorire l'uniformita' cinematica e termica del fluido nel tunnel di misura ma permettono anche una completa schermatura delle termosonde dal calore irraggiato dal resistore di dissipazione.

- Estrattore per la compensazione delle perdite di carico nel tunnel di misura, costituito da un ventilatore centrifugo a velocità variabile.

Il motore è montato all'interno della camera mediante supporti isolati termicamente dal banco e con un collegamento meccanico realizzato tramite un giunto in materiale plastico per evitare ponti termici con l'esterno.

4. RILIEVI PRELIMINARI SUL DISPOSITIVO CALORIMETRICO

Al fine di verificare l'influenza dei diversi parametri al contorno e per definire correttamente la metodologia da seguire nell'esecuzione delle prove sono stati effettuati numerosi rilievi preliminari sul dispositivo descritto precedentemente.

Tra questi, particolarmente significativi sono la taratura delle termosonde e la verifica dell'influenza della portata d'aria di ventilazione e della potenza dell'elemento dissipatore.

Le prove sono state condotte utilizzando un motore asincrono trifase a quattro poli di potenza nominale pari a 3 kW, le cui caratteristiche salienti sono riportate in tab. I.

Tabella I Caratteristiche nominali del motore sul quale sono stati effettuati i rilievi calorimetrici.

- Potenza nominale, P _n	W	3000
- Servizio	-	S1
- Collegamento	-	Δ/Y
- Tensione nominale, V _n	V	220/380
- Corrente nominale, I _n	A	11,4/6,6
- Fattore di potenza nominale	-	0,81
- Rendimento nominale	-	0,85
- Frequenza nominale	Hz	50
- Velocità nominale	giri/min	1430
- Classe di isolamento	-	B
- Forma costruttiva	-	B3
- Grado di protezione	-	IP44

Taratura delle termosonde

La linearità della risposta con la temperatura è stata verificata nel campo da 18 a 65°C ponendo le termosonde in una camera termicamente controllata ed ottenendo un indice di correlazione che si scosta dall'unità di meno di 1×10^{-4} con un coefficiente di temperatura, α , a 20°C pari a $3,84 \times 10^{-3}$ [K⁻¹]. Si sono ripetute poi le misure con le sonde inserite nel dispositivo calorimetrico con il ventilatore estrattore in funzione ed il motore in prova non alimentato. Alla temperatura ambiente di 20°C si sono rilevati gli stessi valori già misurati, alla corrispondente temperatura, in camera termica e precisamente:

R ₁₀	= 13,720 Ω	(sonda ambiente)
R ₂₀	= 8,868 Ω	(sonda a valle del motore)
R ₃₀	= 8,815 Ω	(sonda a valle del dissipatore)

È importante sottolineare come l'utilizzo di questi valori nell'eq. (6) non richieda la conoscenza della temperatura di riferimento ma imponga unicamente la isotermicità delle sonde stesse in fase di taratura.

La temperatura di riferimento viene invece impiegata, nell'ambito del presente lavoro, esclusivamente per consentire di riportare i valori diretti di temperatura e sovratemperatura nei grafici.

Portata d'aria di ventilazione

Il ventilatore di estrazione deve sopperire alle perdite di carico introdotte dal tunnel di misura e mantenere quindi una portata quanto più prossima a quella naturalmente sostenuta dalla ventola del motore. A questo scopo è necessario misurare la portata, o un suo indice univoco, sul motore in ambiente libero (nelle diverse condizioni di carico previste per i rilievi) ed assicurarne la costanza anche dopo l'inserimento del motore nel dispositivo di misura.

Come indice di portata si è ritenuto opportuno adottare l'indicazione di un anemometro a ventola di dimensioni comparabili con la griglia di ingresso dell'aria di ventilazione del motore e posizionato in asse con l'albero del motore stesso.

Con il motore a carico nominale, sono stati effettuati rilievi della sua temperatura, con termocoppie inserite direttamente in alcune cave e sulle testate di matassa, variando tramite l'estrattore la portata d'aria di ventilazione in un intorno di quella propria del motore in aria libera, determinata precedentemente mediante l'indice di portata. La fig. 8 mostra l'andamento delle sovratemperature così misurate in funzione della portata, espressa in valore relativo rispetto alla portata, Q_n, rilevata sullo stesso motore a carico nominale in ambiente libero. Nella stessa figura sono anche riportate le corrispondenti sovratemperature rilevate, con le medesime termocoppie, sul motore funzionante in ambiente libero allo stesso carico. Si nota come l'inserimento nel dispositivo di misura e la variazione di portata non provochino disuniformità nella distribuzione assiale di temperatura, lasciando sostanzialmente inalterate le differenze di temperatura tra le diverse parti di macchina. Alla portata nominale si riscontrano differenze di sovratemperatura dell'ordine del grado tra le due condizioni di prova. È interessante notare come questa differenza di sovratemperatura, per altro accettabile anche ai fini di misura delle perdite, porti il motore nella camera ad una temperatura inferiore rispetto alla corrispondente situazione in aria libera. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che la presenza fisica delle pareti di contorno, soprattutto verso il lato accoppiamento della macchina, favorisce un migliore utilizzo del fluido refrigerante. Considerando che variazioni di 2 K nella temperatura media della macchina provocano differenze nelle

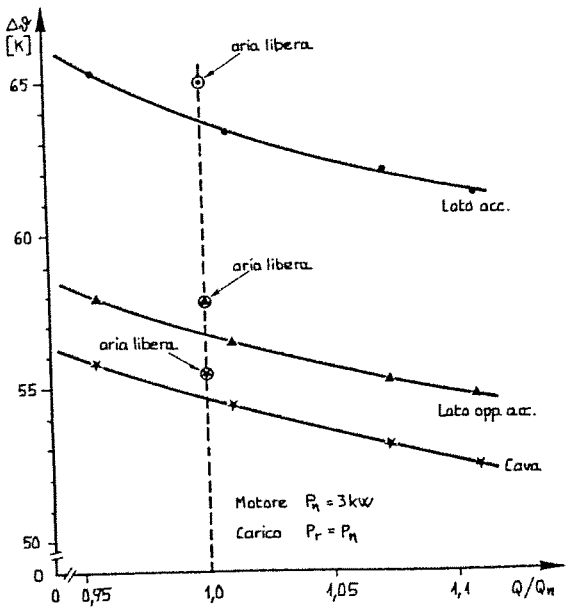


Fig. 8 Andamento della sovratemperatura di diversi parti di un motore da 3 kW, funzionante a pieno carico, in funzione della portata dell'aria di ventilazione, espressa in valore relativo rispetto alla portata in aria libera. In figura sono anche riportate le sovratemperature misurate, allo stesso carico, in aria libera.

perdite complessive inferiori a 0,5 %, si e' ritenuto accettabile assicurare nel corso delle prove il mantenimento della portata entro il $\pm 5\%$ della corrispondente portata, a pari carico, del motore in ambiente libero. E' opportuno inoltre sottolineare come la variazione di portata, sostenuta dall'estrattore, comporti anche una corrispondente variazione del lavoro meccanico di ventilazione del motore. La tolleranza indicata, basata essenzialmente sull'effetto termico, puo' comunque essere ritenuta valida anche sotto questo ultimo aspetto.

Potenza dell'elemento dissipatore
L'aspetto critico da prendere in considerazione per l'elemento dissipatore e' costituito dalla possibilita' che la sua potenza termica alteri il comportamento delle termosonde poste a monte ed a valle. Per contenere questi effetti indesiderati, il suo dimensionamento e' stato effettuato, come gia' indicato, curando di limitarne la sovratemperatura e si e' poi proceduto ad una verifica sperimentale della sua influenza sulle sonde R_2 ed R_3 . Variando la potenza del dissipatore e la portata dell'estrattore entro i campi di pratico impiego non si sono rilevate variazioni apprezzabili di comportamento delle resistenze di misura R_2 ed R_3 .

Sono stati inoltre eseguiti rilievi di temperatura in condizioni di transitorio termico iniziale e durante la fase di regime, al fine di evidenziare sia le costanti di tempo termiche in giuoco sia la stabilita' della misura, a regime raggiunto.

Il transitorio termico iniziale, rilevato nelle tre sezioni di misura del dispositivo e con una termocoppia in cava, e' riportato in fig. 9 (motore a carico nominale e potenza del dissipatore pari a 600 W).

E' presente una modesta variazione della temperatura ambiente che viene comunque mantenuta entro ± 1 K nel corso dell'intera prova. L'andamento della temperatura dell'avvolgimento del motore indica come il suo transitorio non sia ancora esaurito nell'arco di tempo considerato (70 min). Il suo confronto con gli andamenti di temperatura nelle sezioni a valle ed a monte del dissipatore mostra come l'intero dispositivo di misura segua, dopo circa 50 ÷ 60 min, l'andamento di temperatura imposto dal motore. Cio' e' evidenziato dal fatto che le derivate delle temperature a monte ed a valle del dissipatore e della temperatura rilevata sul motore diventano praticamente uguali.

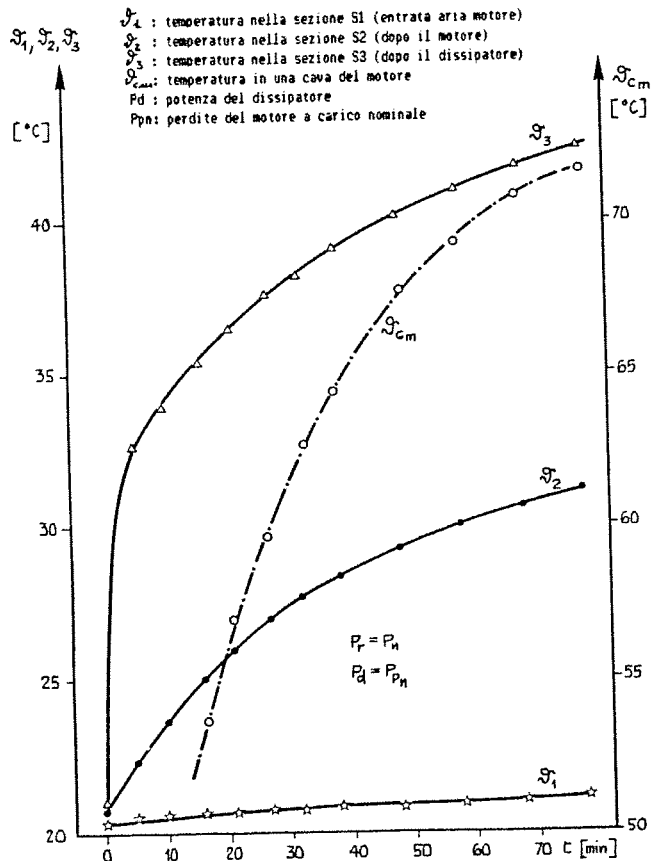


Fig. 9 Andamento delle temperature, rilevate nelle tre sezioni di misura ed in una cava del motore, durante la fase di transitorio iniziale del dispositivo calorimetrico e del motore funzionante a pieno carico (potenza dissipatore 600 W).

La situazione di regime, dopo circa cinque ore dall'avviamento della macchina, e' mostrata in fig. 10 con una scala espansa delle temperature che evidenzia come, a fronte di variazioni

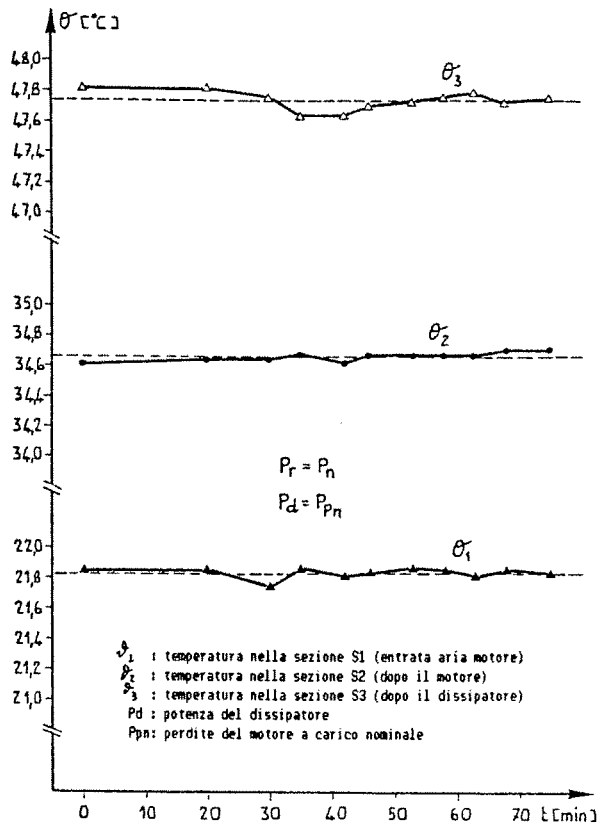


Fig.10 Andamento delle temperature, rilevate nelle tre sezioni di misura, in condizioni di regime del dispositivo calorimetrico e del motore (funzionante a pieno carico), dopo circa cinque ore dall'avviamento.

della temperatura ambiente contenute entro $\pm 0,1K$ nell'arco di un'ora, si siano avute variazioni della temperatura nelle sezioni di misura, rispettivamente a monte ed a valle del dissipatore, dello stesso ordine di grandezza.

5. MODALITA' DEI RILIEVI SPERIMENTALI ED ERRORI DI MISURA

Le prove sono state condotte sullo stesso motore impiegato per le misure preliminari descritte precedentemente e si sono rilevati i rendimenti e le perdite, in differenti condizioni di carico, con il metodo calorimetrico e con il metodo diretto, questo ultimo utilizzato sia contemporaneamente al rilievo con il calorimetro che con il motore in aria libera.

Durante tutti i rilievi la tensione di alimentazione e' stata mantenuta pari alla nominale con una tolleranza di $\pm 0,25\%$ ed un grado di dissimmetria inferiore a $0,2\%$.

La ripetibilita' della potenza meccanica resa, ai diversi carichi di riferimento, e' stata assicurata entro $\pm 1\%$, rendendo cosi' confrontabili direttamente i risultati sperimentali con il dispositivo calorimetrico e con il metodo diretto in

aria libera senza necessita' di dover ricorrere ad ulteriori estrapolazioni od interpolazioni.

L'escursione della temperatura ambiente e' stata contenuta entro $\pm 1K$ nel corso della singola prova, con una stabilita' dell'ordine di $\pm 0,1K$ durante la fase finale dei rilievi in condizione di regime.

Nelle prove di tipo calorimetrico, si e' installato il motore all'interno del dispositivo collegandolo meccanicamente ad un freno elettromagnetico a correnti parassite del quale si e' misurata la coppia di reazione, corrispondente alla coppia motrice dopo le opportune correzioni per tenere conto delle perdite di accoppiamento.

La potenza del dissipatore e' stata mantenuta dello stesso ordine di grandezza delle perdite del motore, assicurando la costanza della sua tensione di alimentazione entro $\pm 0,25\%$. E' stata inoltre assicurata, con il ventilatore di estrazione, la portata del fluido di raffreddamento entro $\pm 5\%$ della corrispondente portata in aria libera, con una stabilita' di $\pm 1\%$ nel corso della prova.

Durante tutti i rilievi con il metodo calorimetrico si e' proceduto alla contemporanea valutazione del rendimento con il metodo diretto. I rilievi calorimetrici, in particolare, sono stati effettuati tramite la media di almeno dieci valori per ogni grandezza in giuoco nel corso di un'ora, dopo il raggiungimento del regime termico.

Un dettagliato studio degli errori propri del metodo diretto e del metodo calorimetrico [9] richiede l'analisi delle singole fonti di errore, tra le quali le principali possono essere cosi' sintetizzate:

- errori per disturbi nelle condizioni di regime;
- errori nella identificazione delle condizioni di prova;
- errori legati alla precisione della strumentazione.

L'elevata stabilita' imposta alle condizioni al contorno e l'esame, precedentemente descritto, delle condizioni di prova consentono di porre l'attenzione essenzialmente sugli errori correlabili alla strumentazione utilizzata, le cui caratteristiche salienti sono riportate in tab. II.

In considerazione del limitato numero di strumenti costituenti la "catena di misura" e per confrontare, in modo il piu' possibile omogeneo, il metodo calorimetrico con il metodo diretto, si e' ritenuto preferibile adottare come indice l'errore massimo, valutato secondo la teoria classica degli errori.

Per quanto riguarda l'errore massimo complessivo nella valutazione del rendimento con il metodo diretto, la fig. 11 ne sintetizza l'andamento nel campo di potenza resa sino a $3kW$ per rendimento pari a $0,7$ e $0,9$ con fattore di potenza unitario. Poiche' i wattmetri elettronici utilizzati (con inserzione diretta) non presentano variazioni

Tabella II Principali caratteristiche della strumentazione

MISURE DI GRANDEZZE MECCANICHE		
Strumento	Caratteristiche	Errore
- Freno dinamometrico a correnti parassite	Coppia frenante max: 39,2 Nm	0,01 % lettura ± 0,02 % f.s.
- Trasduttore di forza	Carico nominale: 196,2 N	0,06 % lettura ± 0,04 % f.s.
- Trasduttore di velocità angolare (contatore di impulsi)		0,01 % lettura ± 0,3 giri/min
- Anemometro a mulinello		1 % lettura

MISURE DI GRANDEZZE ELETTRICHE		
Strumento	Caratteristiche	Errore
- Wattmetro elettronico (potenza motore)	Tensione 150-300 V Corrente 2-5-10-20 A Tensione di uscita 0-5 V	0,02 % f.s.
- Wattmetro elettrodinamico (potenza dissipatore)	Tensione 150-300 V Corrente 2,5-5 A	classe 0,5
- Microohmetro elettronico	Portata 20 ohm	0,05 % lettura ± 1 mohm
- Voltmetro elettronico (4 1/2 cifre)	DC: 2-20-200-1200 V AC: 2-20-200-1000 V	0,04 % ± 1 digit 0,5 % ± 15 digit

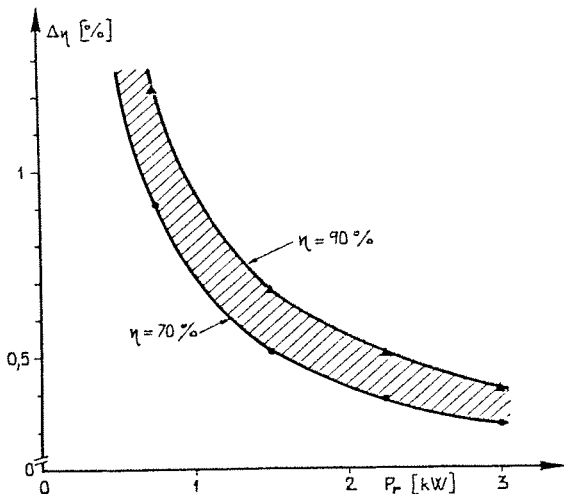


Fig.11 Errore massimo stimato in funzione della potenza meccanica resa nella valutazione del rendimento con il metodo diretto con la strumentazione di tab. II (fattore di potenza unitario).

rilevanti di errore al variare del fattore di potenza, l'andamento riportato in figura puo' essere considerato valido per tutti i valori di questo parametro. Le valutazioni sull'errore nella determinazione delle perdite con il metodo diretto richiedono invece necessariamente di fissare i valori di rendimento e verranno quindi presentate nel seguito sulla base dei risultati sperimentali.

Per quanto concerne invece gli errori propri del metodo calorimetrico nella valutazione delle perdite, l'eq. (6) consente un agevole calcolo della propagazione dell'errore massimo che risulta, con i metodi della teoria classica degli errori, dato dall'espressione:

$$(7) \dot{\epsilon}_{pc} = \dot{\epsilon}_{pd} + 2 \dot{\epsilon}_r \frac{(R_2/R_{20})(R_3/R_{30} - R_1/R_{10})}{(R_2/R_{20} - R_1/R_{10})(R_3/R_{30} - R_2/R_{20})}$$

dove:

$\dot{\epsilon}_{pd}$ = errore relativo nella misura della potenza del dissipatore
 $\dot{\epsilon}_r$ = errore relativo nella determinazione dei singoli rapporti delle resistenze di misura (considerato uguale per tutti i rapporti)

Si nota come l'errore nella determinazione della potenza del dissipatore appaia direttamente, mentre l'errore nella misura del rapporto delle resistenze venga amplificato dalle differenze, tra numeri non molto diversi, presenti al denominatore. L'errore sul singolo rapporto e' in realta' assimilabile direttamente all'errore nella valutazione della resistenza durante la prova poiche' il valore isoterma di riferimento di ogni resistenza risulta determinato sulla base di un elevato numero di rilievi che consentono di attenuare sensibilmente gli errori accidentali. La stessa strumentazione e' inoltre impiegata sia in fase di taratura che successivamente per i rilievi delle resistenze durante le prove, limitando

quindi fortemente anche l'influenza di eventuali errori sistematici. Nell'ipotesi di considerare preponderanti gli errori accidentali, legati anche alle fluttuazioni locali ed al contorno, rispetto a quelli sistematici, e' lecito inoltre ritenere che la media dei rilievi, effettuata su dieci misure nell'arco di un'ora, porti ad una riduzione complessiva dei singoli errori secondo le relazioni:

$$(8) \quad \dot{\epsilon}'_r = \dot{\epsilon}_r / \sqrt{10} \quad \dot{\epsilon}'_{pd} = \dot{\epsilon}_{pd} / \sqrt{10}$$

La valutazione numerica dell'errore secondo questa formulazione verra' condotta sulla base degli effettivi risultati sperimentali nel paragrafo successivo.

Un'ulteriore elaborazione della eq. (7) consente di porre direttamente in evidenza l'influenza dei parametri di prova sull'errore complessivo di misura, ottenendo:

$$(9) \quad \dot{\epsilon}_{pc} \approx \dot{\epsilon}_{pd} + 2 \dot{\epsilon}_r \frac{1}{\alpha} \frac{P_{pn}}{\Delta \theta_n} \left[(1/P_p) + (1/P_d) \right]$$

dove:

α = coefficiente di temperatura del materiale delle termosonde

P_{pn} = perdite del motore a carico nominale

P_p = perdite del motore al carico generico

P_d = potenza del dissipatore

$\Delta \theta_n$ = salto termico tra le sezioni a monte ed a valle del motore al carico nominale.

Si nota come, mentre il primo termine di errore risulta legato unicamente alla precisione di misura della potenza dell'elemento dissipatore, il secondo termine risenta non solo della precisione nel rilievo della singola resistenza, $\dot{\epsilon}_r$, ma anche dei parametri costruttivi del dispositivo calorimetrico e delle

condizioni di prova. Il materiale delle termosonde, infatti, interviene tramite il suo coefficiente di temperatura, α , mentre le "caratteristiche nominali" del motore sono rappresentate dal rapporto tra le sue perdite a pieno carico ed il corrispondente salto di temperatura dell'aria di raffreddamento. I termini P_p e P_d , che compaiono come somma dei loro reciproci, influenzano con lo stesso peso il secondo termine di errore.

Da un punto di vista costruttivo si evidenzia quindi l'opportunita' di utilizzare per le termosonde materiali con elevato coefficiente di temperatura, mentre da un punto di vista operativo si nota la convenienza di mantenere elevata la potenza del dissipatore, anche in condizioni di basse perdite del motore. E' comunque importante ricordare che l'errore reale del metodo calorimetrico risente anche di altri fattori, non riconducibili alla strumentazione utilizzata, e difficilmente valutabili a priori quali, ad esempio, la disuniformita' dei campi di temperatura e velocita' dell'aria sull'elemento di misura della temperatura e le inevitabili fluttuazioni delle grandezze di alimentazione e delle condizioni ambientali (queste ultime presenti ovviamente anche nei rilievi con il metodo diretto).

6. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

I rilievi eseguiti possono essere cosi' classificati:

- misure, con il dispositivo calorimetrico, delle perdite a vuoto (motore non accoppiato al freno)
- misure delle perdite con il dispositivo calorimetrico in varie condizioni di carico e contemporaneo rilievo con il metodo diretto (motore accoppiato al freno)

Tabella III Risultati sperimentali con il metodo calorimetrico e con il metodo diretto

CARICO	MOTORE IN ARIA LIBERA		MOTORE NEL DISPOSITIVO CALORIMETRICO				DIFFERENZE					
	Metodo diretto		Metodo diretto		Metodo calorimetrico		Perdite		Rendimento			
	P_{p1} W	η_1 %	P_{p2} W	η_2 %	P_{p3} W	η_3 %	$P_{p3}-P_{p2}$ W	$P_{p3}-P_{p1}$ W	$\eta_3-\eta_2$ %	$\eta_3-\eta_1$ %		
Vuoto non accoppiato	184 ±2	-	187 ±2	-	190 ±8	-	3	1,6	6	3,2	-	-
0,25 Pn	209 ±13	78,2 ± 1,0	217 ±13	77,4 ±1,0	222 ±10	76,8 ±1,1	5	2,3	13	5,9	-0,6	-1,4
0,50 Pn	268 ±13	84,9 ± 0,6	276 ±13	84,4 ±0,6	279 ±9	84,2 ±0,5	3	1,1	11	3,9	-0,2	-0,7
0,75 Pn	375 ±15	85,7 ± 0,5	387 ±15	85,3 ±0,5	396 ±10	84,9 ±0,4	9	2,3	21	5,3	-0,4	-0,8
Pn	581 ±17	83,8 ± 0,4	579 ±17	83,8 ±0,4	587 ±9	83,6 ±0,2	8	1,4	6	1,0	-0,2	-0,2

LEGENDA

P_n Potenza nominale del motore in prova (3 kW)

P_p Potenza persa

η Rendimento

c) determinazione delle perdite con il metodo diretto in varie condizioni di carico con il motore in aria libera (motore accoppiato e non accoppiato).

Il primo tipo di rilievo consente un'immediata verifica della precisione del metodo calorimetrico in quanto consente il confronto diretto tra la potenza elettrica assorbita e la potenza dissipata.

I rilievi di tipo b) consentono pure lo stesso confronto ma con l'incertezza (maggiore del caso precedente) legata alla necessita' di valutare le perdite come differenza nel metodo diretto. Le misure effettuate in aria libera consentono infine, nell'ambito della precisione e della ripetibilita' del metodo diretto, di verificare l'influenza dell'intero dispositivo calorimetrico sulle prestazioni energetiche della macchina in prova.

Con riferimento al motore di potenza nominale pari a 3 kW, le cui caratteristiche salienti sono riportate nella gia' citata tab. I, i risultati dei diversi rilievi sono sintetizzati nella tab. III, dove si evidenziano le differenze riscontrate nelle perdite e nei rendimenti sia tra la misura calorimetrica e quella contemporanea con il metodo diretto, sia tra la misura calorimetrica e quella con il metodo diretto in aria libera. Nella stessa tabella sono anche riportati gli errori attribuibili ad ogni grandezza, secondo quanto indicato nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda il rilievo calorimetrico in se', i risultati delle prove tipo a) e b) mostrano un ottimo accordo, con differenze, nella valutazione delle perdite, molto contenute e comunque entro i limiti calcolati di errore in tutte le condizioni di misura. Questo fatto viene evidenziato nel grafico di fig. 12 che permette di confrontare le differenze riscontrate (con i due metodi di misura) nella valutazione delle perdite con gli errori stimati per i due metodi e con la corrispondente incertezza complessiva (somma dei due errori). E' opportuno notare come la discontinuita' presente nella curva di errore della potenza con il metodo calorimetrico sia legata ad una variazione di portata del wattmetro per la misura della potenza del dissipatore. Il confronto con i risultati del metodo diretto in aria libera, richiede una preventiva analisi dei risultati ottenuti, nei due casi, con il metodo diretto. Come appare dalla fig. 13, che riporta gli andamenti dei rendimenti (con i corrispondenti errori massimi stimati) in funzione della potenza resa, i risultati ottenuti sono entro gli errori previsti nel metodo di misura con la strumentazione utilizzata e, da questo punto di vista, confermano che l'introduzione della macchina nel dispositivo calorimetrico non ne ha alterato sostanzialmente le prestazioni energetiche. Osservando pero' che le differenze tra i rendimenti nelle due misure

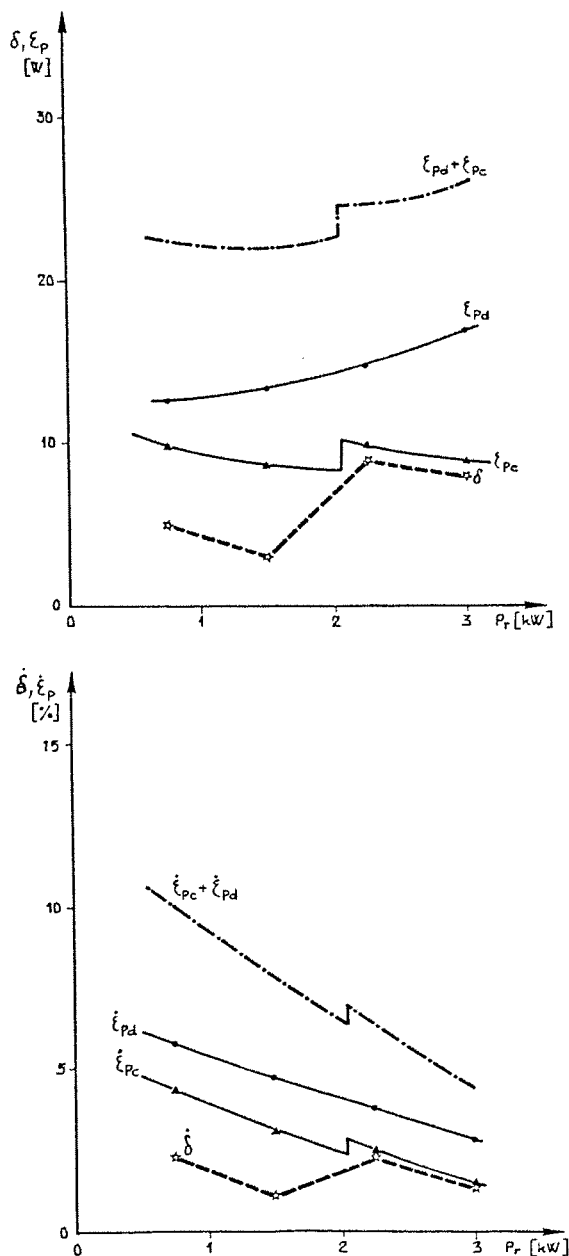


Fig.12 Differenze, δ , nella valutazione contemporanea delle perdite con il metodo calorimetrico e con il metodo diretto. In figura sono anche riportati gli errori massimi stimati per i due metodi (ξ_{pc} per il metodo calorimetrico ed ξ_{pd} per il metodo diretto) e la incertezza complessiva (somma degli errori).

(sempre con il metodo diretto), non mostrano oscillazioni intorno allo zero ma tendono ad annullarsi al crescere della potenza, e' possibile ipotizzare un'influenza, per altro modesta, soprattutto ai bassi carichi. Il confronto tra i risultati ottenuti con il metodo calorimetrico e quelli corrispondenti (rilevati pero' con prove differenti) in aria libera risente quindi delle incertezze denunciate precedentemente ma, come risulta dalla fig. 14, conferma che le differenze delle perdite

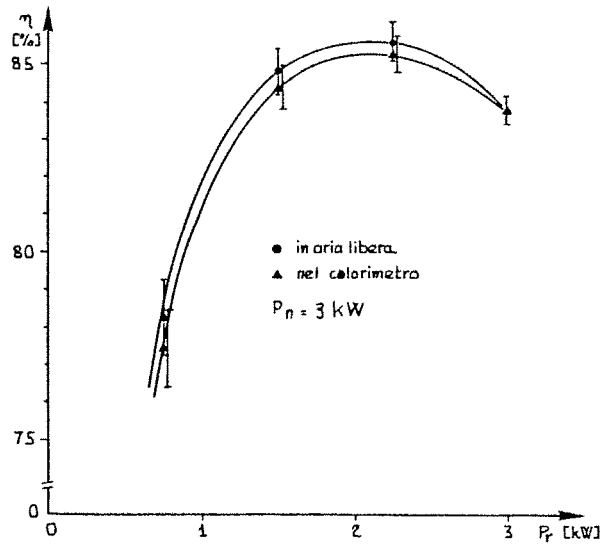


Fig. 13 Andamenti dei rendimenti rilevati con il metodo diretto, con il motore inserito nel dispositivo calorimetrico ed in aria libera, in funzione della potenza resa. In figura sono anche riportati gli errori attribuibili ad ogni misura.

sono tendenzialmente decrescenti all'aumentare della potenza resa e si riducono a circa l'uno per cento a carico nominale. Per meglio inquadrare la significatività di queste differenze è utile ricordare che la tolleranza, t , imposta dalla attuale Norma CEI 2-3 sul rendimento è data dall'espressione $t = 0,15 (1 - \eta)$, sarebbe di 2,5 punti di rendimento al carico nominale con un corrispondente errore sulle perdite del 18 %, di un ordine di grandezza superiore rispetto alle differenze riscontrate a pieno carico in tutte le condizioni di misura.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La realizzazione di un primo dispositivo di tipo calorimetrico per la misura delle perdite su motori asincroni trifase di bassa tensione ha consentito di verificare l'applicabilità di questa metodologia anche per macchine nelle quali non si è in presenza di un circuito di raffreddamento fisicamente definito. L'impiego di un motore di taglia ridotta (potenza nominale pari a 3 kW) ha certamente aumentato le difficoltà di misura della potenza dissipata, compresa tra 200 e 600 W nelle condizioni di funzionamento a vuoto ed a pieno carico, ma ha consentito, anche in queste condizioni limite, di evidenziare le potenzialità di applicazione ed i pregi insiti in questo metodo. Tra questi ultimi è importante sottolineare la possibilità di effettuare un controllo della precisione del dispositivo calorimetrico durante la prova a vuoto, con motore non accoppiato, confrontando direttamente la misura del calorimetro con quella, esclusivamente elettrica, di potenza assorbita dal motore in prova. Per quanto riguarda

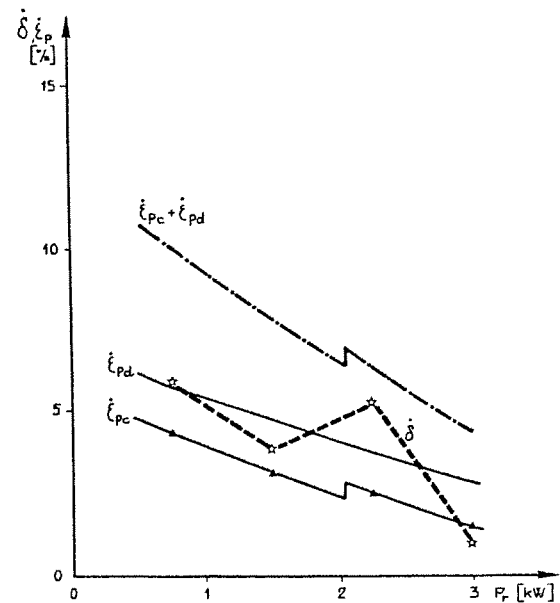
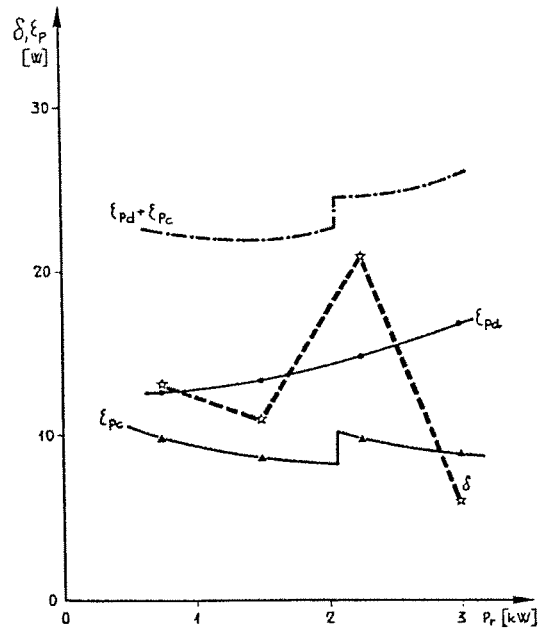
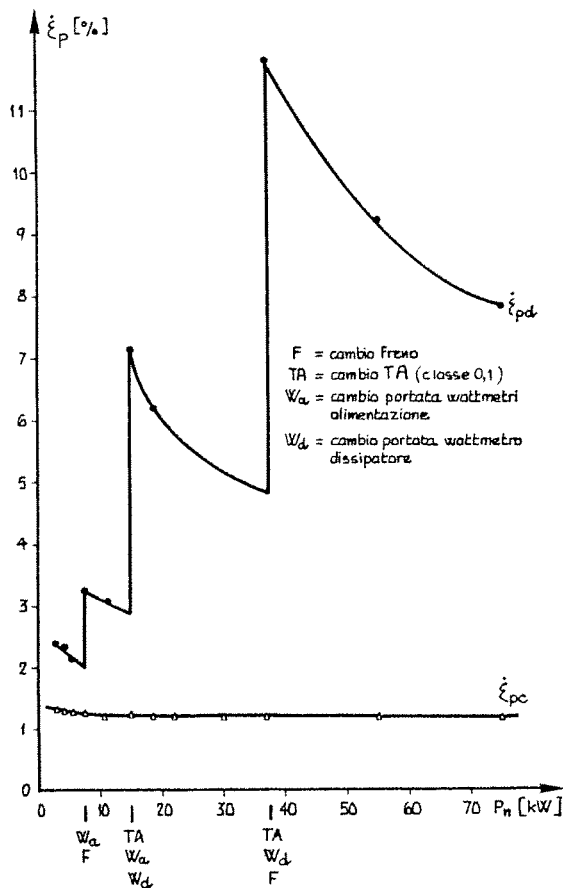


Fig. 14 Differenze, δ , nella valutazione delle perdite con il metodo calorimetrico e con il metodo diretto utilizzato sul motore in aria libera. In figura sono anche riportati gli errori massimi stimati per i due metodi (ϵ_{Pc} per il metodo calorimetrico e ϵ_{Pd} per il metodo diretto) e la incertezza complessiva (somma degli errori).

inoltre l'applicabilità del metodo calorimetrico per motori di taglia superiore rispetto a quella del motore utilizzato in questa analisi, la fig. 15 mostra chiaramente come l'errore stimabile nelle perdite con questo metodo in funzione della potenza nominale dei motori sia nettamente inferiore a quello, stimato, proprio del metodo diretto, pur ipotizzando anche per questo ultimo strumentazione di elevata precisione, simile a quella usata nel corso delle prove.



P_n [kW]	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0
η_m [%]	76,0	77,7	79,7	80,8	83,3	84,4	85,7	87,9

P_n [kW]	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0
η_m [%]	89,5	89,9	90,2	91,0	91,7	91,9	92,4	92,8

Fig.15 Andamenti degli errori massimi stimati (in valore relativo) nella valutazione delle perdite con il metodo calorimetrico, ξ_{pc} , e con il metodo diretto, ξ_{pd} , (con strumentazione di caratteristiche simili a quelle riportate in tab. II) in funzione della potenza nominale dei motori. Nella tabella in figura e' anche riportata la corrispondenza assunta tra rendimento e potenza nominale, tipica di una serie di normale produzione.

E' opportuno sottolineare che gli errori indicati sono stati valutati come errori massimi dovuti alle sole catene di misura e rappresentano, di conseguenza, condizioni di riferimento che possono tradursi in realta' unicamente ricorrendo ad un attento controllo di tutte le grandezze influenzanti al contorno. La necessita' di effettuare le misure soltanto in condizioni di regime termico e la relativa complessita' dell'intero dispositivo vincolano ovviamente l'impiego del metodo calorimetrico a prove di tipo o speciali oppure a prove di verifica della precisione di banchi prova

tradizionali. Per questa ultima applicazione, dove puo' essere necessario incrementare la gia' buona precisione del metodo, si sta sviluppando un dispositivo che riconduce la misura della potenza dissipata dal motore unicamente a quella dell'elemento dissipatore, imponendo salti termici uguali nella camera motore e nel tunnel di misura, rilevati con metodi di zero di elevata precisione intrinseca.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. I. Vistoli per le proficue discussioni nel corso del lavoro.

Manoscritto ricevuto l'8 maggio 1986

BIBLIOGRAFIA

- [1] R.Buccianti, G.Tontini, I.Vistoli Considerazioni sui metodi per la determinazione del rendimento dei motori asincroni trifase di bassa tensione Riunione Annuale AEI - Riva del Garda 1984
- [2] ANSI-IEEE Standard 112 - 1978 Test procedure for polyphase induction motors and generators
- [3] NEMA MG1 - 1978 Motors and generators Part 12 - Test and performance a.c. fractional and integral horsepower motors
- [4] CEI 2-13 1980 Norme per la misura delle perdite con il metodo calorimetrico delle macchine elettriche rotanti
- [5] H. de Bourg Détermination calorimétrique des pertes des alternateurs et des reactances CIGRE - Rapport n. 119 - 1964
- [6] M.Schwarz Nouveau laboratoire de mécanique des fluides et d'essai thermique pour machines électriques Revue Brown Boveri - n. 10 - 1968
- [7] H.Strupp Détermination des pertes des machines électriques ouvertes par une méthode calorimétrique utilisant l'air Revue Brown Boveri - n.10 Tome 55
- [8] A.Barbagelata Sulla misura delle perdite per via calorimetrica Comunicazione alla sezione AEI di Milano - Febbraio 1931 L'Elettrotecnica - Marzo 1931
- [9] A.Armanini, G.Ganassini, F.Reggiani, E.Sesto Metodi calorimetrici per la determinazione del rendimento delle macchine sincrone Parte I: teoria, errori, strumentazione Riunione Annuale AEI - 1967