



Ricerca di Sistema elettrico

Definizione di procedure e sviluppo di algoritmi per la stima delle incertezze di misura delle grandezze di interesse del costituendo laboratorio per la sorveglianza del mercato elettrico in accordo con ISO/IEC 17025 e JCGM 100:2008 (GUM)

E. Fiorucci, A. Ometto, M. Villani



Università
dell'Aquila
D.I.I.E.

Report RdS/PAR2017/002

DEFINIZIONE DI PROCEDURE E SVILUPPO DI ALGORITMI PER LA STIMA DELLE INCERTEZZE DI MISURA DELLE
GRANDEZZE DI INTERESSE DEL COSTITUENDO LABORATORIO PER LA SORVEGLIANZA DEL MERCATO ELETTRICO
IN ACCORDO CON ISO/IEC 17025 E JCGM 100:2008 (GUM)

E. Fiorucci, A. Ometto, M. Villani (Università dell'Aquila)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: Processi e macchinari industriali

Obiettivo: Potenziamento della facility per la sperimentazione e verifica di motori elettrici ad alta efficienza

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Definizione di procedure e sviluppo di algoritmi per la stima delle incertezze di misura delle grandezze di interesse del costituendo laboratorio per la sorveglianza del mercato elettrico in accordo con ISO/IEC 17025 e JCGM 100:2008 (GUM)"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Maria Anna Segreto



Responsabile scientifico Uni L'Aquila: prof. Edoardo Fiorucci



Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 CARATTERISTICHE ED OBIETTIVO DEL COSTITUENDO LABORATORIO PER LA SORVEGLIANZA DEL MERCATO ELETTRICO.....	6
2.1 GRANDEZZE DI MISURA DI INTERESSE DEL LABORATORIO.....	6
2.2 STRUMENTAZIONE IN DOTAZIONE AL LABORATORIO.....	6
2.2.1 <i>Misurazioni di coppia e velocità angolare</i>	7
2.2.2 <i>Misurazioni di grandezze elettriche: tensione, corrente, potenza attiva, potenza apparente, fattore di potenza e frequenza</i>	7
2.2.3 <i>Misurazioni di resistenza degli avvolgimenti</i>	9
2.2.4 <i>Misurazioni di temperatura</i>	9
2.2.5 <i>Sistema di alimentazione</i>	9
3 ISO/IEC 17025 E JCGM 100:2008 (GUM): CONSIDERAZIONI ED OSSERVAZIONI METROLOGICHE PER LA MISURA DELLE GRANDEZZE DI INTERESSE DEL COSTITUENDO LABORATORIO.....	9
3.1 LA NORMA ISO/IEC 17025 IN BREVE.....	9
3.2 IMPORTANZA DELLA STIMA DELL'INCERTEZZA DI MISURA.....	10
3.3 LA GUIDA JCGM 100:2008 (GUM).....	11
3.3.1 <i>Incerezze di categoria A</i>	11
3.3.2 <i>Incerezze di categoria B</i>	11
3.3.3 <i>Considerazioni sull'incertezza composta</i>	12
3.3.4 <i>Combinazione delle incerezze di categoria A e B</i>	13
3.4 VALUTAZIONE DELL'INCERTEZZA NELLE MISURAZIONI DELLE GRANDEZZE DI INTERESSE OTTENIBILI CON LA STRUMENTAZIONE IN DOTAZIONE.....	13
3.4.1 <i>Incerezza nelle misurazioni di coppia</i>	14
3.4.2 <i>Incerezza nella misurazione di velocità angolare</i>	14
3.4.3 <i>Incerezza nella misurazione di tensione</i>	15
3.4.4 <i>Incerezza nella misurazione di corrente</i>	16
3.4.5 <i>Incerezza nella misurazione di potenza attiva</i>	17
3.4.6 <i>Incerezza nella misurazione di potenza apparente</i>	30
3.4.7 <i>Incerezza nella misurazione di fattore di potenza</i>	31
3.4.8 <i>Incerezza nella misurazione di frequenza</i>	31
3.4.9 <i>Incerezza nella misurazione di resistenza degli avvolgimenti</i>	32
3.4.10 <i>Incerezza nella misurazione di temperatura</i>	32
4 NORMA IEC 60034-2-1:2014.....	33
4.1 IL CONTESTO.....	33
4.2 OSSERVAZIONI SULLE VARIAZIONI RISPETTO ALL'EDIZIONE PRECEDENTE.....	34
4.3 STRUMENTAZIONE.....	35
4.4 CONSIDERAZIONI METODOLOGICHE GENERALI.....	36
5 SVILUPPO DI PROCEDURE OPERATIVE PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE PER LA DETERMINAZIONE DEL RENDIMENTO DEI MOTORI ASINCRONI.....	38
6 DETERMINAZIONE DELLE INCERTEZZE COMPOSTE IN ACCORDO CON IEC 60034-2-1:2014 E JCGM 100:2008 (GUM).....	54
6.1 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE TEMPERATURE E DELLA RESISTENZA DEGLI AVVOLGIMENTI.....	54
6.2 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DEL FATTORE DI CORREZIONE DELLA TEMPERATURA.....	54
6.3 L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE.....	55
6.4 INCERTEZZA DELLE RESISTENZE INTERPOLATE PER LA PROVA A CARICO VARIABILE.....	56
6.5 INCERTEZZA DELLE RESISTENZE INTERPOLATE PER LA PROVA A VUOTO.....	57
6.6 INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE COSTANTI DURANTE LE PROVE A VUOTO.....	58
6.7 INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE PER ATTRITO E VENTILAZIONE ALLA VELOCITÀ SINCRONISMO.....	59

6.8	INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE NEL FERRO.....	60
6.9	INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELLA TENSIONE INTERNA DA UTILIZZARE NEL CALCOLO DELLE PERDITE NEL FERRO IN CORRISPONDENZA DEI PUNTI DELLA PROVA A CARICO VARIABILE.....	61
6.10	INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELLO SCORRIMENTO E PERDITE DI ROTORE CORRETTE IN TEMPERATURA	62
6.11	INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELLO POTENZA ELETTRICA IN INGRESSO, CORRETTA IN TEMPERATURA	63
6.12	INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELLO POTENZA MECCANICA.....	63
6.13	INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELLE PERDITE PER ATTRITO E VENTILAZIONE IN FUNZIONE DELLO SCORRIMENTO DELLA PROVA NOMINALE E DELLE PROVE A CARICO VARIABILE.....	64
6.14	L'INCERTEZZA NELLA MISURAZIONE DELLE PERDITE ADDIZIONALI A CARICO.....	64
6.15	L'INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELL'EFFICIENZA CON IL METODO INDIRECTO	66
7	L'INCERTEZZA NELLA DETERMINAZIONE DELL'EFFICIENZA CON IL METODO DIRETTO	66
8	SVILUPPO DI ALGORITMI DI CALCOLO DELLE VARIE TIPOLOGIE DI GRANDEZZE E RELATIVE INCERTEZZE PER LA DETERMINAZIONE DEL RENDIMENTO.....	67
8.1	ELENCO DELLE GRANDEZZE IN INGRESSO.....	67
8.2	ELENCO DELLE GRANDEZZE CALCOLATE	69
8.3	IMPLEMENTAZIONE DELLA LIBRERIA DI FUNZIONI PER IL CALCOLO DELLE GRANDEZZE E DELLE RELATIVE INCERTEZZE COMPOSTE ...	73
8.3.1	<i>Calcolo della temperatura degli avvolgimenti di statore.....</i>	74
8.3.2	<i>Calcolo della potenza meccanica erogata</i>	74
8.3.3	<i>Calcolo del fattore di riporto alla temperatura del fluido di raffreddamento.....</i>	75
8.3.4	<i>Calcolo delle perdite negli avvolgimenti di statore</i>	75
8.3.5	<i>Calcolo delle resistenze interpolate nella prova a carico variabile</i>	76
8.3.6	<i>Calcolo delle resistenze interpolate nella prova a vuoto.....</i>	77
8.3.7	<i>Calcolo delle perdite costanti.....</i>	77
8.3.8	<i>Calcolo delle perdite per attrito e ventilazione alla velocità di sincronismo</i>	78
8.3.9	<i>Calcolo delle tensioni interne per la determinazione delle perdite nel ferro.....</i>	80
8.3.10	<i>Calcolo delle perdite nel ferro.....</i>	81
8.3.11	<i>Calcolo delle scorrimento</i>	83
8.3.12	<i>Calcolo delle perdite negli avvolgimenti di rotore</i>	83
8.3.13	<i>Calcolo delle perdite per attrito e ventilazione.....</i>	84
8.3.14	<i>Calcolo delle perdite residue.....</i>	84
8.3.15	<i>Calcolo dei coefficienti di regressione e di correlazione per le perdite addizionali.....</i>	85
8.3.16	<i>Calcolo delle perdite addizionali a carico</i>	87
8.3.17	<i>Calcolo delle perdite totali e del rendimento indiretto.....</i>	87
8.3.18	<i>Calcolo del rendimento diretto</i>	88
8.4	DIAGRAMMA DI FLUSSO DELL'ALGORITMO COMPLESSIVO DI CALCOLO DEL RENDIMENTO INDIRECTO CON INCERTEZZA COMPOSTA	88
9	CONCLUSIONI.....	89
10	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	90
11	CURRICULA.....	91

Sommario

La sorveglianza del mercato elettrico dei motori asincroni richiede la realizzazione di laboratori che siano equipaggiati con strumentazione di alte prestazioni, in accordo con le normative internazionali vigenti e òp stato dell'arte nel settore delle misure elettriche di potenza, e soprattutto, la definizione di procedure e sviluppo di algoritmi per la stima delle incertezze di misura delle grandezze di interesse. Le principali norme che devono essere seguite sono la ISO/IEC 17025, la JCGM 100:2008 (GUM) e la IEC 60034-2-1.

In questo documento sono stati presentati risultati di un'intensa attività di ricerca dedicata alla elaborazione delle procedure di misura delle grandezze dirette e derivate coinvolte nell'elaborazione del rendimento dei motori, in termini operativi per la redazione di procedure per l'esecuzione delle prove corredate di schede per la registrazione dei dati.

E' stata svolta un'accurata valutazione delle incertezze tipo ed estese, ottenibili con la strumentazione in dotazione al laboratorio, nel procedimento di misurazione delle grandezze direttamente misurabili, quali tensioni, correnti, potenze attiva ed apparente, fattore di potenza, coppia, velocità di rotazione, resistenze degli avvolgimenti e temperatura dei motori e dell'aria di raffreddamento; sono state inoltre valutate analiticamente le relazioni che definiscono le incertezze per le grandezze derivate, quali ad esempio perdite negli avvolgimenti, nel ferro, per attrito e ventilazione ed addizionali, necessarie alla determinazione sperimentale del rendimento con metodo indiretto, nonché le incertezze coinvolte nel procedimento di calcolo del metodo diretto.

E' stata successivamente elaborata una libreria di funzioni per il calcolo di dette grandezze e delle loro incertezze tipo, corredata di un diagramma di flusso che potrà essere utilizzato per successive attività volte all'implementazione di un software di calcolo automatico di perdite, rendimento ed incertezze.

I risultati presentati potranno essere proficuamente utilizzati nel processo di accreditamento metrologico del laboratorio, sia per le definizioni delle incertezze ottenibili che nella redazione del manuale di qualità che conterrà le procedure per l'esecuzione delle misurazioni e l'elaborazione dei risultati.

1 Introduzione

La sorveglianza del mercato elettrico [1] dei motori asincroni richiede la determinazione sperimentale delle prestazioni e del rendimento dei motori mediante la realizzazione di laboratori che siano equipaggiati con strumentazione di alte prestazioni, in accordo con le normative internazionali vigenti, e soprattutto, la definizione di procedure e sviluppo di algoritmi per la stima delle incertezze di misura delle grandezze di interesse [2]. Le principali norme che devono essere seguite sono la ISO/IEC 17025 [3] e la JCGM 100:2008 (GUM) [4] e la IEC 60034-2-1:2014 [5].

Un primo obiettivo questo documento è quello di definire le grandezze di interesse del laboratorio, la misura delle quali dovrà poi essere gestita secondo procedure certificate; successivamente, dopo una sintesi della normativa ISO/IEC 17025 [2] e la JCGM 100:2008 (GUM) [4] verranno definite le incertezze tipo ed incertezze estese ottenibile nelle misurazioni dirette con la strumentazione già descritta.

Segue poi l'analisi della norma IEC 60034-2-1:2014 [5], che prescrive le modalità per l'esecuzione delle prove volte a misurare il rendimento dei motori asincroni; a valle di ciò, sono determinate per via analitica le espressioni delle incertezze tipo combinate ottenibile per tutte le grandezze coinvolte nella procedura di prova, con metodi indiretto e diretto.

Sono quindi elaborate e proposte procedure operative per l'esecuzione guidata delle prove e la gestione dei dati di misura.

Infine, sono implementate librerie per il calcolo delle grandezze e delle relative incertezze tipo, con il diagramma di flusso per l'algoritmo complessivo per la determinazione del rendimento con la relativa incertezza tipo composta.

2 Caratteristiche ed obiettivo del costituendo laboratorio per la sorveglianza del mercato elettrico

2.1 Grandezze di misura di interesse del laboratorio

Il laboratorio ha come obiettivo primario l'esecuzione di prove per la determinazione del rendimento dei motori asincroni, principalmente con il metodo cosiddetto della separazione delle perdite, il quale richiede l'esecuzione di misurazioni di grandezze elettriche e meccaniche delle quali bisogna specificare le metodologia di misura, l'intervallo dei valori e l'incertezza della strumentazione da impiegare[1].

Le grandezze di tipo termico sono la temperatura dei motori in equilibrio con l'ambiente, prima di qualsiasi forma di alimentazione o prova. Si dovrà misurare anche la temperatura del fluido di raffreddamento, che in prima analisi si considererà l'aria presente all'interno del laboratorio stesso [2].

Grandezze di tipo meccanico sono coppia e velocità di rotazione del motore, mentre le misurazioni di tipo elettrico sono le resistenze degli avvolgimenti di statore e/o rotore, la frequenza delle tensioni di alimentazione, i valori efficace medi delle tensioni di alimentazione e delle correnti di linea del motore in prova, le potenze attive totali assorbite.

Da queste misurazioni dirette, corredate delle corrispondenti incertezze tipo, è possibile ottenere le grandezze indirette con le relative incertezze composte che saranno utilizzabili per la determinazione del rendimento [4-9].

2.2 Strumentazione in dotazione al laboratorio

Il laboratorio è corredato di strumentazione adatta ad effettuare le misurazioni sopra riportate in diversi intervalli di misura; infatti, per quanto sia possibile utilizzare trasduttori di coppia e banchi dinamometrici di grande taglia anche per prove su motori di taglia piccola, ciò non è opportuno dal punto di vista dell'incertezza di misura in quanto comporterebbe un utilizzo dei trasduttori, di coppia in primis, a percentuali del fondo scala troppo basse [2].

Nel laboratorio sono quindi presenti 3 banchi attivi a recupero di energia per le prove, in conformità con le specifiche della norma IEC 60034-2-1[5], di motori asincroni delle seguenti caratteristiche principali:

Tabella 1 – taglie dei motori che possono essere provati in conformità con la norma IEC 60034-2-1

Potenza nominale del banco freno [kW]	Potenza nominale del motore [kW]	Numero di poli
5.65	Minima	0.55 2
	Massima	4 2
		1.8 4
		1.5 6
34	Minima	2.2 2
	Massima	22 2
		18.5 4
		18.5 6
85	Minima	15 2
	Massima	55 2
		45 4
		30 6

2.2.1 Misurazioni di coppia e velocità angolare

Per quanto concerne le misurazioni delle coppia e della velocità angolare, il laboratorio è dotato di tre torsimetri di marca Kistler serie 4503/A, che hanno le seguenti caratteristiche:

- 1) Per il banco di potenza nominale 5.65 kW:
 - Fondo scala 50 Nm
 - Precisione +/- 0.05% del fondo scala
 - Carico di rottura 3 volte il fondo scala
 - Numero massimo di giri 12000 rpm
 - Sensore di misura della velocità da 60 impulsi a giro
- 2) Per il banco di potenza nominale 34 kW:
 - Fondo scala 350 Nm
 - Precisione +/- 0.05% del fondo scala
 - Carico di rottura 3 volte il fondo scala
 - Numero massimo di giri 8000 rpm
 - Sensore di misura della velocità da 60 impulsi a giro
- 3) Per il banco di potenza nominale 85 kW:
 - Fondo scala 1000 Nm
 - Precisione +/- 0.05% del fondo scala
 - Carico di rottura 3 volte il fondo scala
 - Numero massimo di giri 8000 rpm
 - Sensore di misura della velocità da 60 impulsi a giro

Il condizionamento e l'acquisizione dei segnali in uscita dai torsimetri è effettuata con il dispositivo di condizionamento, acquisizione e visualizzazione Kistler 4700B, con precisione dell'ordine dello 0.05% e possibilità di gestione remota da PC via collegamento USB.

2.2.2 Misurazioni di grandezze elettriche: tensione, corrente, potenza attiva, potenza apparente, fattore di potenza e frequenza

La misurazione delle grandezze elettriche [10] è eseguita con il power analyzer Yokogawa, modello WT500. Lo strumento consente di effettuare in modo simultaneo le misurazioni della frequenza delle tensioni di alimentazione, i valori efficace medi delle tensioni di alimentazione e delle correnti di linea del motore in

prova, le potenze attive totali assorbite, se sono considerate solo le grandezze di interesse per lo scopo del laboratorio.

Per quanto concerne le misurazioni di frequenza della forme d'onda, il WT500 consente precisioni dell'ordine di 0.06% del valore misurato, con la selezione sia di canali di tensione che di corrente.

Per quanto riguarda le misurazioni di tensione, se si considerano misurazioni in regime sinusoidale, le principali caratteristiche del WT500 sono le seguenti (fattore di cresta delle forme d'onda pari a 3) :

Fondo scala nella misura di tensione: 15, 30, 60, 100, 150, 300, 600 e 1000 V

Fondo scala nella misura di corrente (inserzione diretta): 500 mA, 1, 2, 5, 10, 20 e 40 A

Fondo scala nella misura di corrente (con sensore esterno): 50, 100, 200, 500 mV , 1, 2, 5 e 10 V

Per quanto concerne l'incertezza di misura, nell'intervallo di frequenza 45-66 Hz, lo strumento consente di ottenere precisioni dello 0.1% del valore misurato più lo 0.1% del valore del fondo scala impostato.

In termini di misura di potenza attiva, il fondo scala della misura di potenza si ottiene in ipotesi di fattore di potenza unitario, che coincide in queste condizioni con la potenza apparente, considerando il prodotto dei fondo scala di tensione e corrente impostati nella singola misurazione.

Per fattore di potenza unitario, analogamente a quanto riportato per le misurazioni di tensione e corrente, nell'intervallo di frequenza 45-66 Hz, lo strumento consente di ottenere precisioni dello 0.1% del valore misurato più lo 0.1% del valore del fondo scala anche per le misurazioni di potenza attiva.

Nel caso di fattore di potenza minore di uno, si dovrà correggere il valore di precisione, considerando un l'effetto dello sfasamento ϕ della corrente rispetto alla tensione, e l'errore d'angolo δ introdotto dai circuiti dello strumento; l'addendo da introdurre è quantificabile come il prodotto di $\tan(\phi) \cdot \delta$ per il valore di potenza attiva misurata. Per lo strumento considerato, si ha $\delta=0.2\%$.

Nel caso in cui il fattore di potenza fosse pari a 0, come precisione si considera lo 0.2% del valore di potenza apparente misurata, espressa come prodotto dei valori efficaci di tensione e corrente.

Per poter effettuare misurazioni di corrente senza inserzione diretta del power analyzer, nel caso di correnti eccedenti i 40 A, il laboratorio è equipaggiato con tre trasduttori di corrente di alte prestazioni, del tipo LEM IT 700-S ULTRASTAB, caratterizzati da precisioni dello 0.00535 % per valori efficaci di corrente fino a 500 A (700 di picco o DC), con errore di linearità dell'ordine di 3 ppm. Il rapporto di tali trasduttori è 700 A/ 400 mA in termini di grandezze di picco, per cui possono essere utilizzati collegati agli ingressi di corrente selezionando il fondo scala 500 mA, moltiplicando il risultato di misura per il rapporto indicato.

La misurazione di potenza apparente può essere ottenuta come prodotto tra i valori efficaci di tensione e corrente, oppure ottenuta direttamente dallo strumento. In questo secondo caso, lo strumento consente di ottenere una precisione data dalla somma delle precisioni delle misurazioni di tensione e corrente già sopra descritte.

La misurazione del fattore di potenza, nel caso di forme d'onda sinusoidali indicato come $\cos\phi$ con ϕ angolo di sfasamento tra tensione e corrente, può essere ottenuta come rapporto tra i valori misurati di potenza attiva e di potenza apparente, oppure ottenuta direttamente dallo strumento. In questo secondo caso, lo strumento consente di ottenere una precisione che è espressa come $\pm \left[\left(\cos\phi - \frac{\cos\phi}{1.0002} \right) + |\cos\phi - \cos(\phi + \text{asin}(0.002))| \right]$ più la risoluzione.

Per la misurazione della frequenza, lo strumento consente di ottenere una precisione di +/- 0.06% con una risoluzione di 0.0001 Hz.

2.2.3 Misurazioni di resistenza degli avvolgimenti

Per la misurazione delle resistenze degli avvolgimenti su motori non alimentati, è utilizzato lo strumento Resistomat 2316 prodotto da Buster, che consente di ottenere una precisione dello 0.03% + 3 volte la risoluzione, con i seguenti fondo scala: 2 m Ω (risoluzione 0.0001 m Ω), 20 m Ω (risoluzione 0.001 m Ω), 200 m Ω (risoluzione 0.01 m Ω), 2 Ω (risoluzione 0.0001 Ω), 20 Ω (risoluzione 0.001 Ω), 200 Ω (risoluzione 0.01 Ω), 2 k Ω (risoluzione 0.1 Ω), 20 k Ω (risoluzione 1 Ω) e 200 k Ω (risoluzione 10 Ω). Consente la compensazione in temperatura, e la misurazione su circuiti fortemente induttivi

Per quanto concerne la misurazione degli avvolgimenti con motore alimentato, il laboratorio è equipaggiato con lo strumento Elettrotest Resistance Meter 60 che consente di misurare resistenze con fondo scala 2, 20, 200 e 2000 Ω con precisione dello 0.5% del fondo scala con tensioni alternate fino a 500 V e correnti fino a 60 A a frequenza di rete.

2.2.4 Misurazioni di temperatura

Le misurazioni di temperatura della superficie dei motori è eseguita mediante termocoppie, collegate ad un sistema di condizionamento ed acquisizione dati. Le termocoppie più adatte sono quelle di tipo T, rame-costantina, o per intervallo di funzionamento le più adatte alla misurazioni delle temperature superficiali dei motori, a freddo e durante le prove a carico. E' possibile reperire termocoppie tipo T ad elevata precisione, che garantiscono precisioni di +/- 0.5 K. L'acquisizione dei segnali in uscita dalle termocoppie è eseguibile con sistemi dedicati come il modulo National Instruments NI 9210 serie C, che consente l'acquisizione di 4 canali di temperatura con precisione di +/- 0.7 K per termocoppie di tipo T nell'intervallo 0 -200 °C. Si noti che le due precisioni, della termocoppia e del canale di acquisizione del modulo devono essere opportunamente combinate per determinare la precisione complessiva della misurazione della corrente.

La misurazione della temperatura del fluido di raffreddamento, nel caso dei motori che si andranno a provare aria ambiente, può essere effettuata con sistemi che consentono l'acquisizione da PC, e che offrono precisioni di +/-0.3 K per temperature fino a da -40 a 85 °C; si considera il dispositivo Higrowin HC2-WIN-USB prodotto da Rotronic Instruments.

2.2.5 Sistema di alimentazione

Le tensioni di alimentazione che vengono adottate per le misure sulle prestazioni dei motori asincroni devono essere a bassa distorsione, e prive di dissimmetrie. Per conseguire tale obiettivo, il laboratorio è equipaggiato con un alimentatore trifase Elettrotest HPS200KVA, che consente di ottenere in modo programmato tensioni di fase da 0 a 300 V, con correnti fino a 228 A per una potenza complessiva di 200 kVA a frequenze tra 50 e 80Hz. L'alimentatore offre due differenti fondo scala, 150 e 300 V; la risoluzione è di 0.025% del fondo scala con precisione minore di 0.5%. La stabilità della tensione è minore dello 0.1%, e la distorsione minore di 0.6%. La risoluzione della frequenza della tensione è 0.02 Hz, con precisione di 100 ppm.

3 ISO/IEC 17025 e JCGM 100:2008 (GUM): considerazioni ed osservazioni metrologiche per la misura delle grandezze di interesse del costituendo laboratorio

3.1 La norma ISO/IEC 17025 in breve

Le principali caratteristiche della norma ISO/IEC 17025 [3] sono state ampiamente presentate e discusse nel report di Ricerca di Sistema Elettrico dal titolo: "Sviluppo di un protocollo contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009", a valle del quale si collocano le attività attualmente in corso presentate nel presente documento. [2]

E' pertanto utile in questa sede soffermarsi solo sulle novità introdotte nella versione italiana aggiornata al 2018 della norma, e presentare in dettaglio le osservazioni metrologiche pertinenti al Laboratorio.

La norma ISO/IEC 17025 indica i requisiti generali per la competenza dei laboratori ad effettuare prove e/o tarature, compreso il campionamento; trova applicazione nell'esecuzione di prove e tarature eseguite utilizzando metodi normalizzati, non-normalizzati e metodi sviluppati da laboratori. In quanto più stringente della norma ISO 9001, i laboratori che operano e si strutturano in conformità alla ISO/IEC 17025 operano anche in conformità alla ISO 9001; il viceversa non è implicitamente vero.

L'edizione del 2018 è la versione italiana della ISO/IEC 17025:2017 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", e sostituirà l'edizione del 2005 che però continuerà a valere, ai fini dell'accreditamento, nel periodo di transizione fino al 30 novembre 2020.

Tra le principali novità, vi è l'inserimento della definizione di laboratorio, quale organismo che svolge attività di prova (testing), taratura (calibration) o campionamento associato a successiva prova o taratura (sampling).

Per quanto concerne la presentazione dei risultati delle prove o tarature effettuate e le relative dichiarazioni di conformità, si rimarca la necessità che il laboratorio documenti le regole decisionali adottate tenendo conto delle fonti e indichi il livello di rischio corrispondente.

Inoltre, nel rapporto di prova o nel certificato di taratura si dovrà riportare chiaramente: i) i risultati cui si riferisce la dichiarazione di conformità; ii) le norme, le parti di queste o le specifiche in generale che i risultati soddisfano o meno; iii) le regole decisionali che sono state adottate, qualora non siano già definite da norme e regolamenti o presenti nelle specifiche.

Si osserva che, in confronto con la precedente edizione, è consentita maggiore flessibilità nella stesura e gestione della documentazione; essa infatti è richiesta nella misura effettivamente necessaria per garantire una esecuzione regolare e coerente delle attività di laboratorio e la validità dei risultati.

Interessante è l'evoluzione nella gestione delle informazioni, poiché nella nuova versione si inseriscono requisiti aggiuntivi inerenti il sistema informativo e le tecnologie informatiche, come presa d'atto del passaggio ormai acclarato dall'utilizzo della documentazione cartacea alla gestione informatizzata delle registrazioni.

Viene ribadito ulteriormente il principio della competenza, verso cui devono tendere tutte le azioni del laboratorio: il laboratorio dovrà reperire personale, infrastrutture, dotazioni, sistemi e servizi di supporto, necessari per gestire ed eseguire le proprie attività in modo ottimale. Il personale dovrà essere qualificato per le competenze ad esso assegnate che riguardino i risultati delle attività di laboratorio: si dovranno prendere in considerazione requisiti di istruzione, qualifica, formazione, conoscenza tecnica, abilità ed esperienza.

3.2 Importanza della stima dell'incertezza di misura

Si osserva che uno degli obiettivi primari della norma è inerente lo svolgimento corretto delle prove e delle misurazioni, con particolare attenzione all'incertezza di misura.

Questo aspetto è al centro del presente documento, per cui è utile riportare al riguardo una parte della documentazione redatta dall'ente Accredia e reperibile sul sito www.accredia.it; si tratta dello schema per auto-valutazione MD-09-34-DL rev.00 – Self Assessment – schema UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018 [11].

In esso sono presenti diversi requisiti, tra i quali vi sono i requisiti di processo; l'incertezza di misura è contemplata all'interno di questo ambito. Al punto 7.2 è riportato:

“Descrivere le modalità adottate dal Laboratorio per la scelta dei metodi di prova e di taratura, per la stima dell’incertezza di misura e per l’utilizzo di tecniche statistiche per l’analisi dei dati.

Descrivere le modalità adottate dal Laboratorio per:

- la verifica delle prestazioni richieste
- la validazione dei metodi e/o di eventuali loro modifiche
- la verifica di idoneità delle caratteristiche prestazionali.

Descrivere le modalità adottate dal Laboratorio per:

- lo sviluppo di metodi interni (ove applicabile)
- i criteri per il riesame periodico della validazione
- criteri per la ri-validazione dei metodi stessi.”

Segue poi il punto 7.6: “Valutazione dell’incertezza di misura”:

“Descrivere le modalità adottate dal Laboratorio per la valutazione dell’incertezza di misura per le specifiche prove in accreditamento e per le tarature effettuate internamente.”

3.3 La guida JCGM 100:2008 (GUM)

Se consideriamo quanto prescritto nella JCGM 100:2008 (GUM) [4], l’incertezza nelle misurazioni è generalmente costituita da diverse componenti, raggruppabili in due categorie in funzione del modo in cui i loro valori sono determinati:

- A per quelle incertezze ottenute applicando metodi statistici ad una serie di dati sperimentali ; L’incertezza di tipo A fa riferimento ad \bar{x} come stima del valore sperato del misurando e $\sigma(x)$ come stima della dev. std. della media.
- B per quelle incertezze non ottenute mediante osservazioni ripetute, ma che vengono descritte, valutate e limitate con altri metodi, quali ad esempio:
 - l’esperienza dell’operatore,
 - i risultati di esperimenti collaterali,
 - gli effetti noti delle grandezze di influenza,
 - una scelta di strumenti di caratteristiche superiori,
 - l’adozione di opportune condizioni ambientali,

Le incertezze di tipo B non possono essere ridotte con metodi statistici.

3.3.1 Incertezze di categoria A

Le incertezze di categoria A sono dovute alla presenza di processi di rumore casuale. Di esse è possibile dare una descrizione statistica e quindi individuare un processo di stima per ridurre, o eliminarne, l’influenza. Si considerino n osservazioni indipendenti x_i della grandezza x ottenute nelle stesse condizioni sperimentali.

Introdotta una opportuna distribuzione di probabilità, solitamente ma non necessariamente gaussiana (è sufficiente sia simmetrica), si calcola il valore medio \bar{x} ed è immediato ricavare la varianza sperimentale e lo scarto quadratico medio, chiamato *scarto tipo u*. La stima del valore sperato è la *media aritmetica* delle osservazioni x .

3.3.2 Incertezze di categoria B

Per quanto concerne le incertezze di categoria B, queste vengono valutate non con l’analisi statistica, ma in qualsiasi altro modo. La stima delle incertezze di tipo B è effettuata a priori, ed è basata su informazioni non provenienti dall’esperimento in oggetto, ma precedenti ad esso.

Tali informazioni possono provenire da:

- misurazioni effettuate da se o da altri durante prove precedenti ed indipendenti,....;
- certificati di taratura, relazioni di prova, registri di laboratorio,....;
- documentazione tecnica di strumentazione o impianti...;
- manuali d'uso, relazioni di collaudo, ... ;
- letteratura tecnica: libri, manuali, elenchi di costanti, ... ;
- esperienza del personale del laboratorio.

Come già detto, l'incertezza di tipo sistematico è prodotto dall'interazione di molteplici sorgenti di scarti di tipo sistematico. Se questi sono quantità note, la misura può essere corretta; se i vari scarti non sono noti (perché dovuti a molteplici fattori non quantificabili) la misura non può essere corretta.

In questo caso si deve ipotizzare un'opportuna distribuzione di probabilità, per ognuna delle singole fonti di incertezza, per poter trattare assieme le incertezze dovute a cause diverse.

Il passo successivo è quello di combinare in una sola cifra tutte le stime delle incertezze di categoria B.

3.3.3 Considerazioni sull'incertezza composta

Qualora le grandezze di cui sia necessario determinare il valore sperimentale non siano ottenibili mediante una misurazione diretta, e sia comunque possibile esprimere una relazione analitica che leghi la grandezza da determinare, o misurando y , ad un numero N di altre grandezze indipendenti e direttamente misurabili x_i , il misurando può essere determinato mediante la detta relazione $y = f(x_1, \dots, x_N)$. In questo caso, risulta necessario determinare l'incertezza tipo composta di y , impiegando la seguente espressione:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (1)$$

Dove le $u(x_i)$ sono le incertezze che si ottengono nella misurazione delle grandezze x_i .

Nel caso di grandezze direttamente misurabili non indipendenti, come si è visto per la determinazione delle perdite nel ferro e delle perdite addizionali a carico nella IEC 60034-2-1:2014, l'espressione dell'incertezza composta deve tener conto di altri contributi, e si modifica nel modo seguente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i, x_j)} =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i, x_j)} \quad (2)$$

Il parametro $u(x_i, x_j)$ rappresenta la covarianza delle grandezze x_i e x_j , $Cov(x_i, x_j)$; se $x_i = x_j$ allora la covarianza coincide con la varianza.

La covarianza rappresenta il grado di dipendenza statistica tra la stima di due grandezze, ed è nulla se queste non siano effettivamente dipendenti tra loro.

La covarianza è stimata a partire dai dati ottenuti con N misurazioni x_i e x_j , e dati i valori medi di x_i e x_j pari a $X_i = E(x_i)$ e $X_j = E(x_j)$, si può esprimerla come:

$$Cov(x_i, x_j) = E\{[x_i - E(x_i)] \cdot [x_j - E(x_j)]\} = E(x_i \cdot x_j) - E(x_i) \cdot E(x_j) \quad (3)$$

$$Cov(x_i, x_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=j=1}^N (x_i - X_i)(x_j - X_j) \quad (4)$$

La covarianza $Cov(x_i, x_j)$ è positiva se x_i e x_j variano rispetto alla media nello stesso modo (se x_i supera la media, anche x_j si comporta parimenti), ed è negativa se varia in modo opposto, e zero se le oscillazioni di x_i e x_j hanno oscillazioni indipendenti rispetto alle rispettive medie.

Quindi è necessario determinare la covarianza in caso di grandezze correlate.

Il coefficiente di correlazione $r(x_i, x_j)$ può essere introdotto con la relazione seguente:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)} \quad (5)$$

l'espressione finale che si ottiene è la seguente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i, x_j)} =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)} \quad (6)$$

A tale relazione per l'espressione dell'incertezza composta si deve far ricorso, ad esempio, nella misurazione delle grandezze quali perdite nel ferro ed addizionali, in riferimento allo scopo del presente documento.

Si può già evincere la complessità delle procedure per la determinazione dell'incertezza di misura dell'efficienza con il metodo indiretto, che è conseguente a queste osservazioni.

3.3.4 Combinazione delle incertezze di categoria A e B

Qualora per la misurazione di una grandezza si debbano considerare sia l'incertezza di categoria A u_A che N diverse incertezze di categoria B u_{Bi} , per determinare l'incertezza tipo composta si ricorre alla combinazione quadratica seguente:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + \sum_{i=1}^N u_{Bi}^2} \quad (7)$$

3.4 Valutazione dell'incertezza nelle misurazioni delle grandezze di interesse ottenibili con la strumentazione in dotazione

In accordo con quanto richiesto dalla norma ISO/IEC 17025 [3] e seguendo le indicazioni della guida JCGM 100:2008 (GUM) [4], è necessario descrivere le metodologie utilizzate per valutare l'incertezza delle misurazioni delle grandezze di interesse; si tratta quindi di valutare, a priori, l'incertezza delle misurazioni descritte al paragrafo 2.1.

In base a quanto sopra descritto riguardo le categorie A e B di incertezza, si osserva che in questo documento è opportuno far riferimento solo alla categoria B, per differenti motivazioni. In primis, nella valutazione delle incertezze effettuata prima dello svolgimento di prove ed esperimenti, è possibile definire solo incertezze le cui informazioni siano note a priori, quali documentazione tecnica di strumentazione, manuali d'uso, relazioni di collaudo e certificati di taratura.

Per la determinazione delle componenti di incertezza di categoria B, è necessario introdurre una opportuna distribuzione di probabilità; è possibile ricorrere a densità di probabilità uniformi, triangolare, ad "U" o gaussiane. Per le applicazioni di nostro interesse, si adotta la densità di probabilità uniforme, rettangolare, illustrata in Fig. 1, per ogni sorgente di incertezza considerata, poiché è ragionevole supporre che il valore vero della grandezza misurata sia all'interno di una banda di ampiezza 2σ senza però la possibilità di supporre che vi sia all'interno di questa una zona a probabilità maggiore o minore.

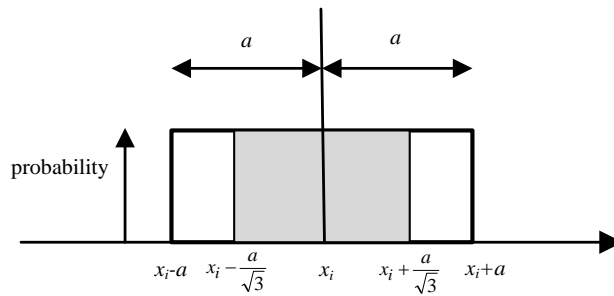


Fig. 1. - Il valore atteso x_i al centro di una distribuzione uniforme.

Per questo tipo di densità di probabilità, si considera come incertezza tipo l'espressione seguente, in cui a rappresenta la semi ampiezza dell'intervallo considerato:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Inoltre, per quanto concerne la strumentazione che è stata descritta al capitolo 2.2, si può assumere che essa consenta lo svolgimento di misurazioni in modalità automatica con possibilità di ottenere grandezze già mediate su un numero anche significativamente alto di campioni, con il conseguente risultato di avere contributi di incertezza di categoria A, espressi come scarto tipo, molto contenuti e, per esperienza, usualmente trascurabili rispetto alle sopra descritte incertezze di tipo B.

In accordo con la norma ISO/IEC 17025 [3], nel riportare l'incertezza di misura, si farà riferimento prima all'incertezza tipo u che sarà espressa analiticamente a partire dalle specifiche della strumentazione di misura adottata, e successivamente verrà indicata l'incertezza estesa U , per valutare la quale si dichiarerà un fattore di copertura $k=2$, con livello di fiducia 95%.

Si precisa che tale differenziazione è legata alla necessità di distinguere tra le incertezze tipo u che verranno inserite nelle procedure di calcolo dell'incertezza composta descritte nel seguito per la determinazione delle perdite e del rendimento dei motori, e le incertezze estese U che possono essere già considerate come risultati conclusivi del procedimento di misurazione al momento in cui esso sia terminato.

3.4.1 Incertezza nelle misurazioni di coppia

La misurazione della coppia è effettuata con tre trasduttori, che hanno classe di precisione 0.05% del fondo scala; i fondo scala sono 50 Nm, 350 Nm e 1000 Nm rispettivamente. I segnali in uscita sono nell'intervallo +/- 5 V.

Il primo trasduttore, di portata 50 Nm, è utilizzato in abbinamento al banco freno da 5.65 kW. Nell'ipotesi di una densità di probabilità uniforme di ampiezza $2a_{T1}$ pari a 0.05 Nm, si ottiene un'incertezza tipo $u(T_1)$ di +/- 0.015 Nm, ed un'incertezza estesa $U(T_1)$ pari a +/- 0.03 Nm.

Il secondo trasduttore, di portata 350 Nm, è utilizzato in abbinamento al banco freno da 34 kW. Nell'ipotesi di una densità di probabilità uniforme di ampiezza $2a_{T2}$ pari a 0.35 Nm, si ottiene un'incertezza tipo $u(T_2)$ di +/- 0.10 Nm, ed un'incertezza estesa $U(T_2)$ pari a +/- 0.2 Nm.

Il terzo trasduttore, di portata 1000 Nm, è utilizzato in abbinamento al banco freno da 85 kW. Nell'ipotesi di una densità di probabilità uniforme di ampiezza $2a_{T3}$ pari a 1 Nm, si ottiene un'incertezza tipo $u(T_3)$ di +/- 0.3 Nm, ed un'incertezza estesa $U(T_3)$ pari a +/- 0.6 Nm.

3.4.2 Incertezza nella misurazione di velocità angolare

La misurazione di velocità angolare è effettuata con i medesimi trasduttori sopra citati, che, in modo identico tra loro, trasmettono onde quadre in modalità TTL con 60 impulsi a giro, pari a un impulso ogni 0.017 giri. Per le velocità di rotazione considerate per motori asincroni di 6, 4 e 2 poli si considera un intervallo di velocità da 800 a 3000 rpm, pertanto si hanno tra i 48000 e 180000 impulsi per al minuto, con incertezza di conteggio di +/-1 impulso al minuto.

In termini di giri al minuto, considerando anche le prestazioni dello strumento di condizionamento ed acquisizione dei segnali, è realistico ipotizzare una densità di probabilità uniforme di ampiezza $2a_{rpm}$ pari a 0.06 rpm, da cui si ha un'incertezza tipo $u(n)$ di +/-0.02 giri al minuto, ed un'incertezza estesa $U(n)$ pari a +/- 0.04 giri al minuto.

3.4.3 Incertezza nella misurazione di tensione

La misurazione di tensione è effettuata con il power analyzer WT 500, strumento multifunzione che consente la misurazione simultanea delle tensioni efficaci di fase con differenti fondo scala: 15, 30, 60, 100, 150, 300, 600 e 1000 V. Nell'intervallo di frequenze 45-66 Hz, lo strumento consente di ottenere precisioni dello 0.1% del valore misurato più lo 0.1% del valore del fondo scala impostato. L'incertezza tipo $u(V)$ quindi è funzione del valore misurato, secondo l'espressione:

$$u(V) = \frac{(0.001 \cdot v_m + 0.001 \cdot V_R)}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

dove v_m rappresenta il valore misurato, e V_R il fondo scala impostato. L'incertezza estesa $U(V)$ è data dalla relazione seguente:

$$U(V) = \frac{2 \cdot (0.001 \cdot v_m + 0.001 \cdot V_R)}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

In Figura 2 è riportato l'andamento della incertezza estesa in funzione della tensione misurata, al variare del fondo scala, nelle ipotesi che ogni misurazione sia eseguita con il fondo scala minimo selezionabile.

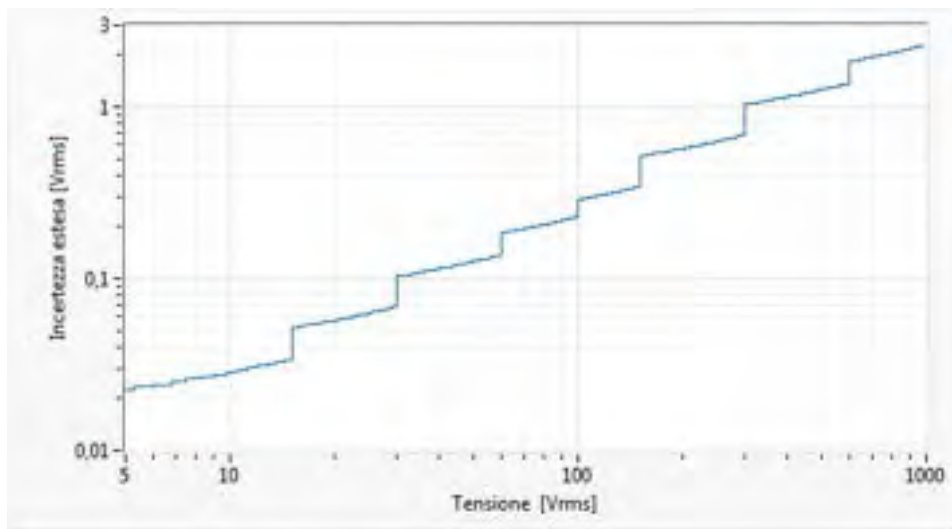


Fig.2. - Incertezza estesa nella misurazione di tensione.

Per le misurazioni di tensione su sistemi trifase, con riferimento all'inserzione dei tre canali voltmetrici rispetto ad un centro stella artificiale (sistema trifase a quattro fili) il WT500 calcola il modulo medio V_M delle tre tensioni efficaci di fase V_1 , V_2 e V_3 :

$$V_M = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3} \quad (11)$$

Nelle ipotesi realistiche di sistema di tensioni di alimentazioni pressoché simmetrico, l'incertezza tipo e l'incertezza estesa di V_M si possono assumere identiche a quelle sopra determinate in riferimento ad una generica tensione di fase.

3.4.4 Incertezza nella misurazione di corrente

La misurazione di corrente è effettuata con il power analyzer WT 500, strumento multifunzione che consente la misurazione simultanea delle correnti efficaci di linea con differenti fondo scala: 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 e 40 A. Nell’intervallo di frequenze 45-66 Hz, lo strumento consente di ottenere precisioni dello 0.1% del valore misurato più lo 0.1% del valore del fondo scala impostato. L’incertezza tipo quindi è funzione del valore misurato, secondo l’espressione:

$$u(I) = \frac{(0.001 \cdot i_m + 0.001 \cdot I_R)}{\sqrt{3}} \tag{12}$$

dove i_m rappresenta il valore misurato, e I_R il fondo scala impostato. L’incertezza estesa è data dalla relazione seguente:

$$U(I) = \frac{2 \cdot (0.001 \cdot i_m + 0.001 \cdot I_R)}{\sqrt{3}} \tag{13}$$

In Figura 3 è riportato l’andamento della incertezza estesa in funzione della corrente misurata, al variare del fondo scala, nelle ipotesi che ogni misurazione sia eseguita con il fondo scala minimo selezionabile.

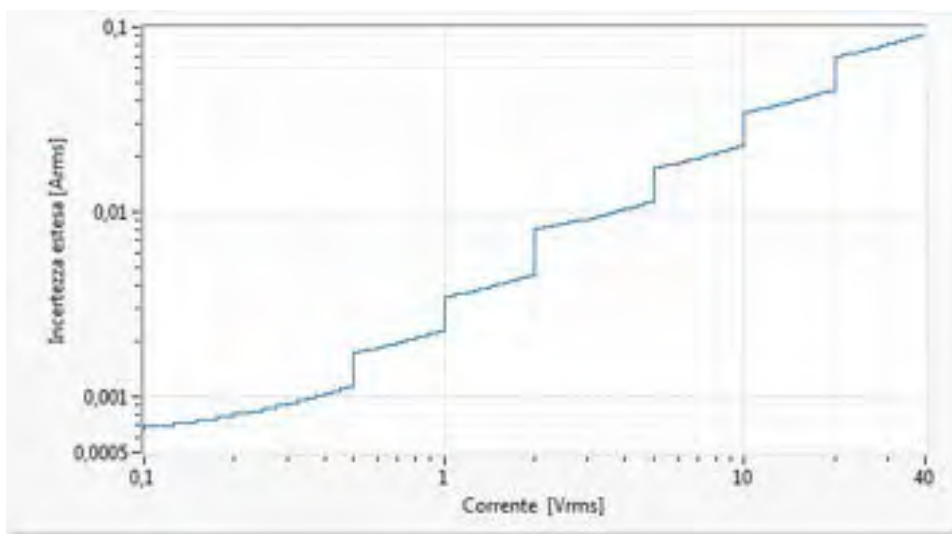


Fig.3. - Incertezza estesa nella misurazione di corrente.

Le misurazioni di correnti di valore superiore a 40 A, fino a 500 sono effettuate con tre trasduttori di corrente LEM IT 700-S ULTRASTAB, rapporto 700 A/ 400 mA in termini di grandezze di picco , con precisioni dello 0.00535 %. Per determinare l’incertezza complessiva che tenga conto dell’incertezza dei trasduttori e del power analyzer, si considera che i trasduttori siano collegati agli ingressi di corrente selezionando il fondo scala 0.5 A, moltiplicando il risultato di misura per il rapporto indicato; sia ha:

$$I_\alpha = \alpha \cdot i \tag{14}$$

Con I_α corrente di fase misurata con il trasduttore, α rapporto del sensore ed i corrente misurata dal power analyzer.

Si ha $\alpha=1750$, con $u(\alpha) = \frac{0.0000535}{\sqrt{3}} = 0.000031$, ed $u(i) = \frac{0.001 \cdot i + 0.00005}{\sqrt{3}}$

L'incertezza tipo composta per la misurazione di I , $u(I_\alpha)$ è:

$$u(I_\alpha) = \sqrt{i^2 \cdot u_\alpha^2 + \alpha^2 \cdot u_i^2} \cong \alpha \cdot u_i = 1750 \cdot \frac{(0.001 \cdot i + 0.00005)}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

considerato trascurabile il valore estremamente contenuto di $u(\alpha)$. L'incertezza estesa per la misura di corrente con i trasduttori $U(I_\alpha)$ è:

$$U(I_\alpha) = 3500 \cdot \frac{(0.001 \cdot i + 0.00005)}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

espressa in termini di corrente misurata dal power analyzer.

Si riporta in Figura 4 il grafico dell'incertezza estesa $U(I_\alpha)$ in funzione della corrente di fase.

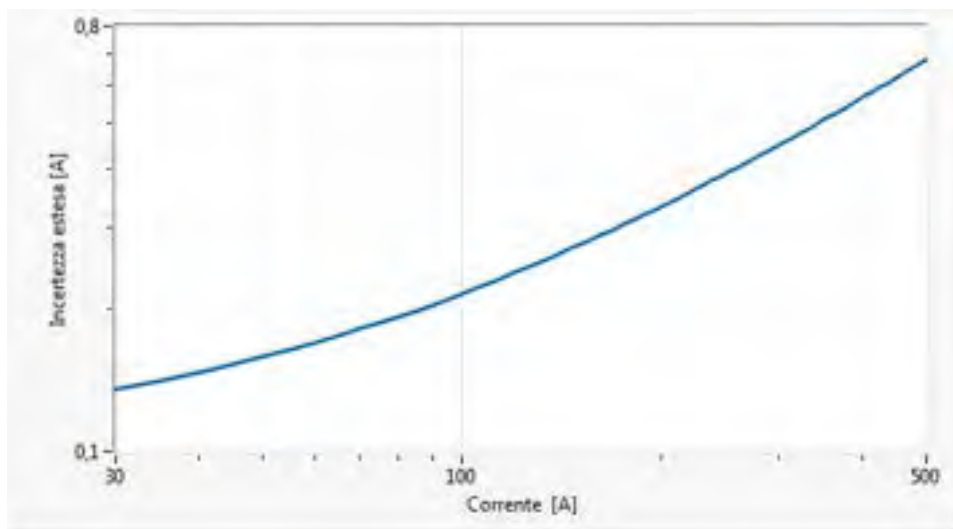


Fig.4. - Incertezza estesa nella misurazione di corrente con i trasduttori.

Per le misurazioni di tensione su sistemi trifase, con riferimento all'inserzione dei tre canali amperometrici (sistema trifase a quattro fili) il WT500 calcola la il modulo medio I_M delle tre correnti efficaci di fase I_1 , I_2 e I_3 :

$$I_M = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (17)$$

Nelle ipotesi realistiche di sistema di correnti assorbite pressoché equilibrato, l'incertezza tipo e l'incertezza estesa di I_M si possono assumere identiche a quelle sopra determinate in riferimento ad una generica corrente di linea.

3.4.5 Incertezza nella misurazione di potenza attiva

In termini di misura di potenza attiva, il fondo scala della misura di potenza si ottiene in ipotesi di fattore di potenza unitario, che coincide in queste condizioni con la potenza apparente, considerando il prodotto dei

fondo scala di tensione e corrente impostati nella singola misurazione. In riferimento a misurazioni di potenza per un solo collegamento monofase, con il power analyzer WT500 si hanno i seguenti fondo scala.

Tabella 2. Combinazioni dei fondo scala di tensione e corrente per la determinazione dei fondo scala di potenza

FS corrente \ FS tensione	0.5 A	1 A	2 A	5 A	10 A	20 A	40 A
15 V	7.5 W	15 W	30 W	75 W	150 W	300 W	600 W
30 V	15 W	30 W	60 W	150 W	300 W	600 W	1200 W
60 V	30 W	60 W	120 W	300 W	600 W	1200 W	2400 W
100 V	50 W	100 W	200 W	500 W	1000 W	2000 W	4000 W
150 V	75 W	150 W	300 W	750 W	1500 W	3000 W	6000 W
300 V	150 W	300 W	600 W	1500 W	3000 W	6000 W	12000 W
600 V	300 W	600 W	1200 W	3000 W	6000 W	12000 W	24000 W
1000 V	500 W	1000 W	2000 W	5000 W	10000 W	20000 W	40000 W

Per fattore di potenza unitario per le misurazioni di potenza attiva, in regime sinusoidale e frequenza di alimentazione nell'intervallo di frequenze 45-66 Hz, lo strumento consente precisioni dello 0.1% del valore misurato più lo 0.1% del valore del fondo scala.

L'incertezza tipo quindi è funzione del valore misurato, secondo l'espressione:

$$u(P) = \frac{(0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R)}{\sqrt{3}} \tag{18}$$

dove p_m rappresenta il valore misurato, e P_R il fondo scala impostato. L'incertezza estesa è data dalla relazione seguente:

$$U(P) = \frac{2 \cdot (0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R)}{\sqrt{3}} \tag{19}$$

Nelle Figure seguenti sono riportati gli andamenti della incertezza estesa in funzione della corrente misurata, al variare del fondo scala di corrente, con valore determinato del fondo scala di tensione per ogni curva, nelle ipotesi che ogni misurazione sia eseguita con il fondo scala minimo selezionabile sia per la tensione che per la corrente.

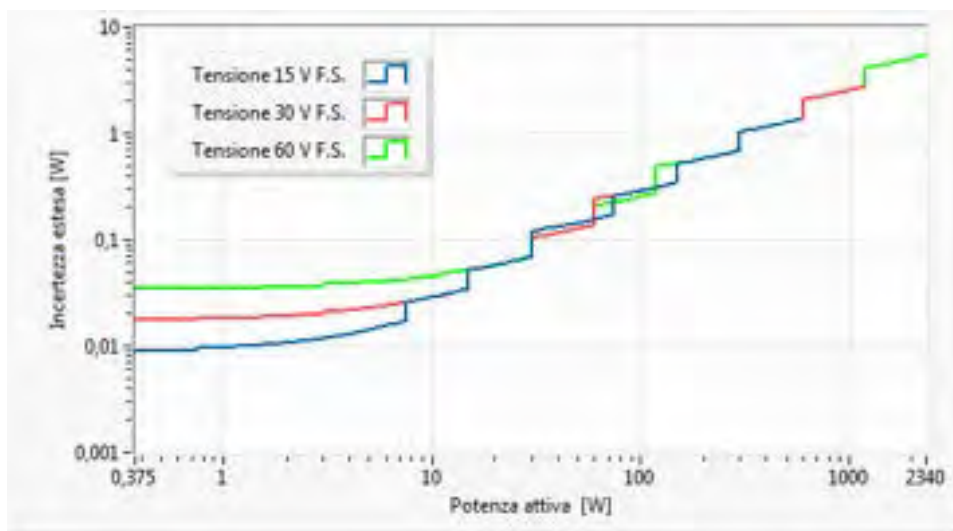


Fig.5a. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza unitario.

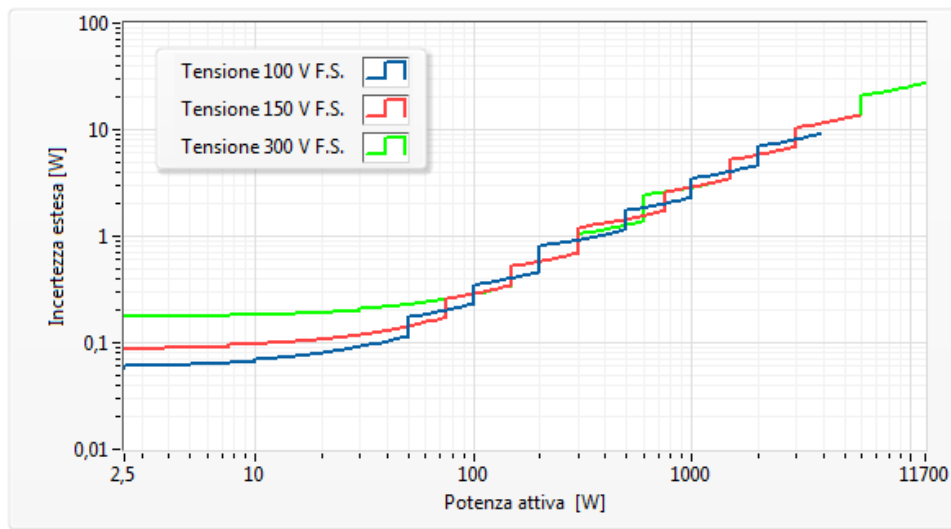


Fig.5b. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza unitario.

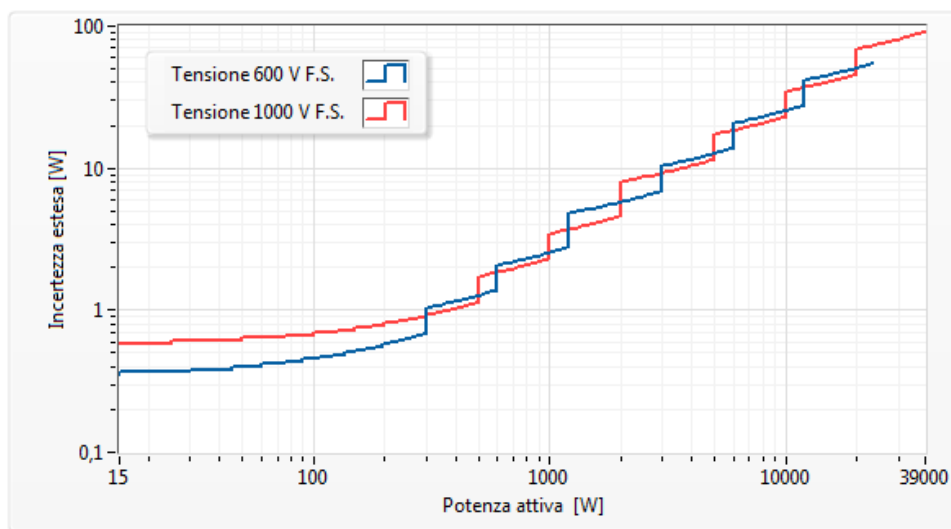


Fig.5c. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza unitario.

Nel caso di fattore di potenza minore di uno, si dovrà correggere il valore di incertezza, considerando un l'effetto dello sfasamento ϕ della corrente rispetto alla tensione, e l'errore d'angolo δ introdotto dai circuiti dello strumento; l'addendo da introdurre è quantificabile come il prodotto di $\tan(\phi) \cdot \delta$ per il valore di potenza attiva misurata. Per lo strumento considerato, si ha $\delta=0.2\%$. L'incertezza tipo quindi è funzione del valore misurato, secondo l'espressione:

$$u(P_{pf}) = \frac{(0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R + \tan(\phi) \cdot 0.002 \cdot p_m)}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

dove p_m rappresenta il valore misurato, e P_R il fondo scala impostato e ϕ l'angolo di fase misurato tra tensione e corrente. L'incertezza estesa è data dalla relazione seguente:

$$U(P_{pf}) = \frac{2 \cdot (0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R + \tan(\phi) \cdot 0.002 \cdot p_m)}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti della incertezza estesa in funzione della potenza misurata, al variare del fondo scala di corrente, con valore determinato del fondo scala di tensione per ogni curva, nelle ipotesi che ogni misurazione sia eseguita con il fondo scala minimo selezionabile sia per la tensione che per la corrente; sono riportati i grafici al decrescere del fattore di potenza, da 0.9 a 0.1.

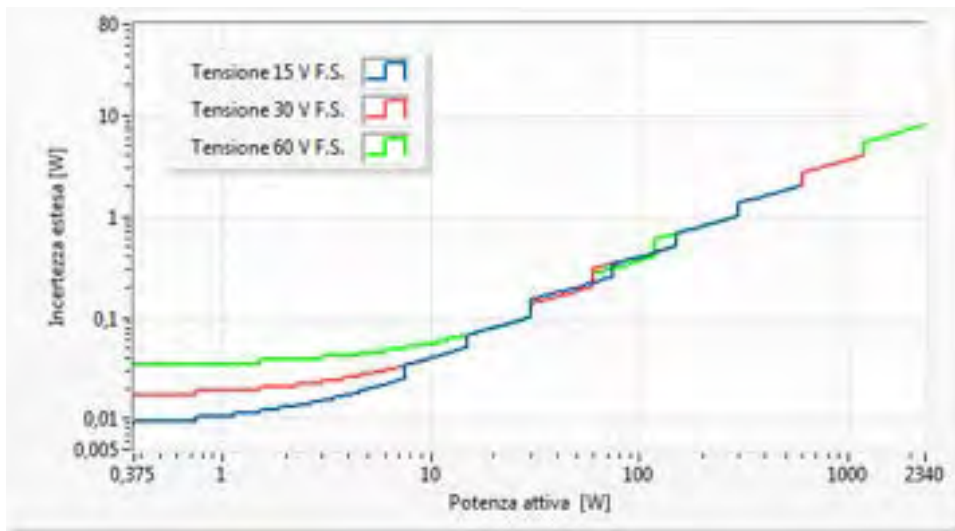


Fig.6a. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.9

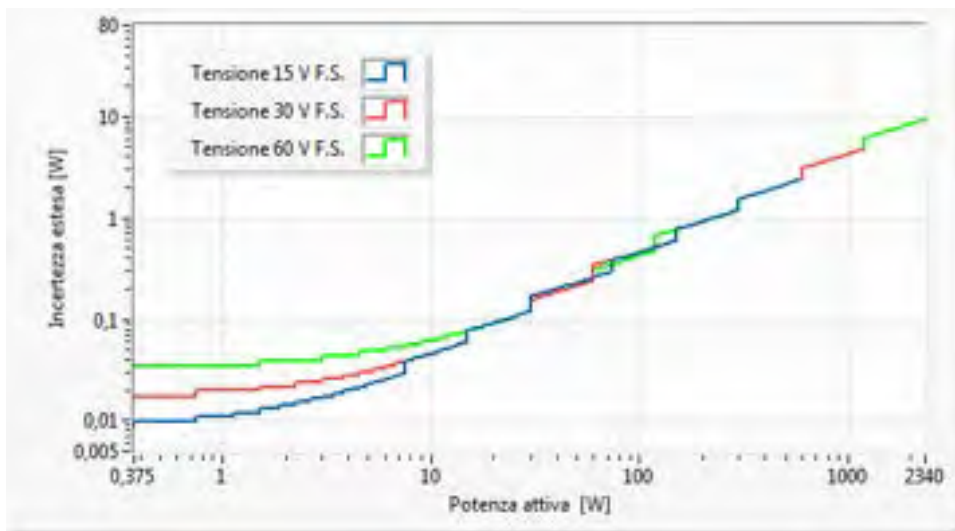


Fig.6b. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.8

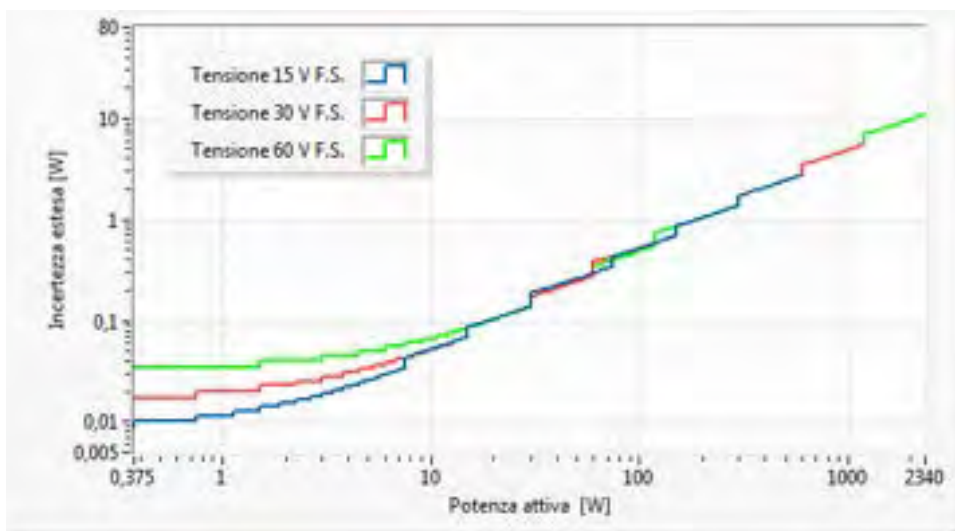


Fig.6c. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.7

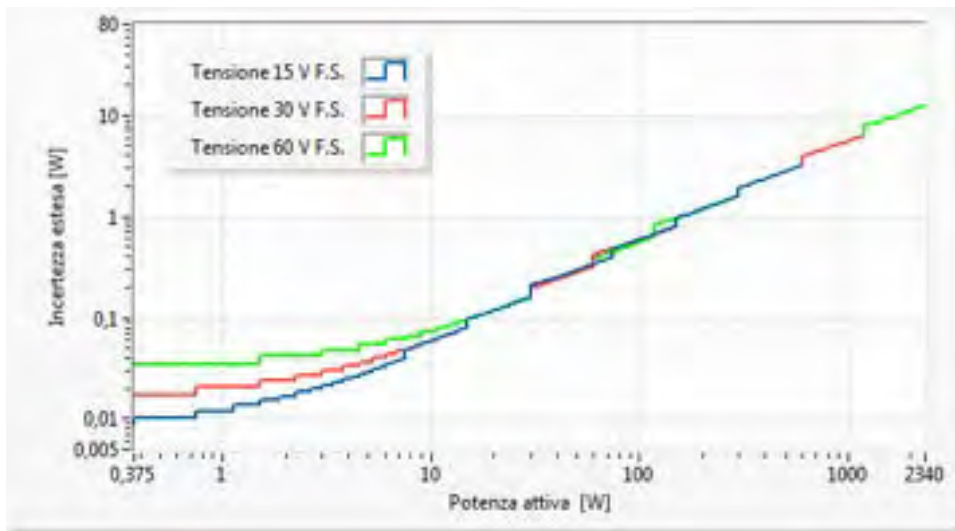


Fig.6d. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.6

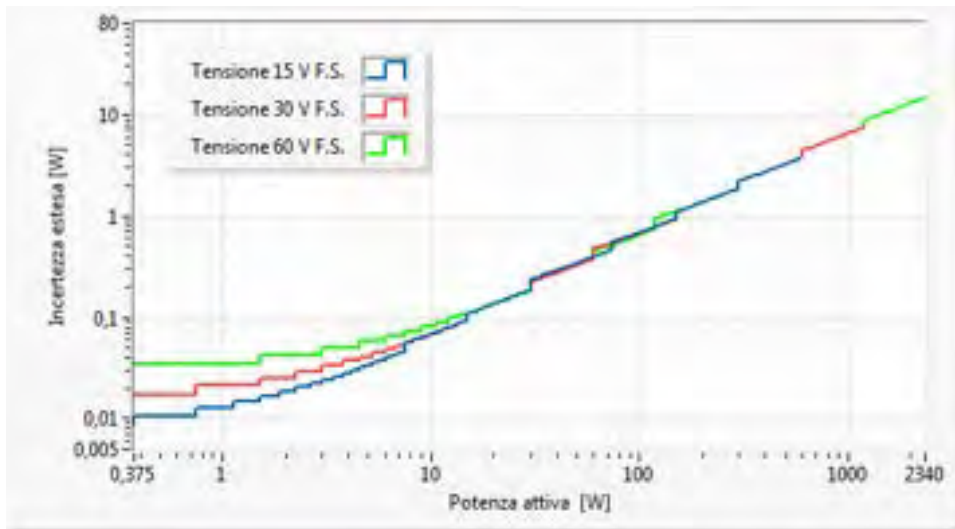


Fig.e. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.5

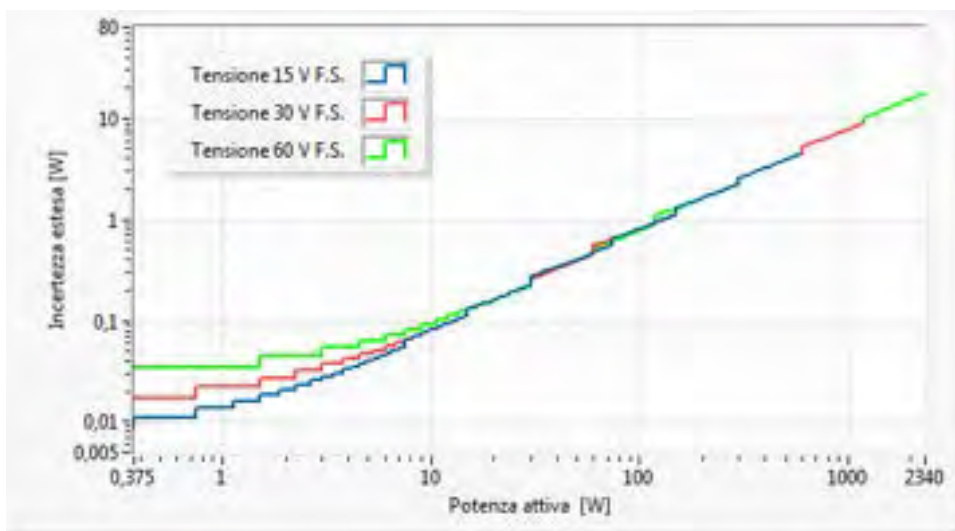


Fig.6f. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.4

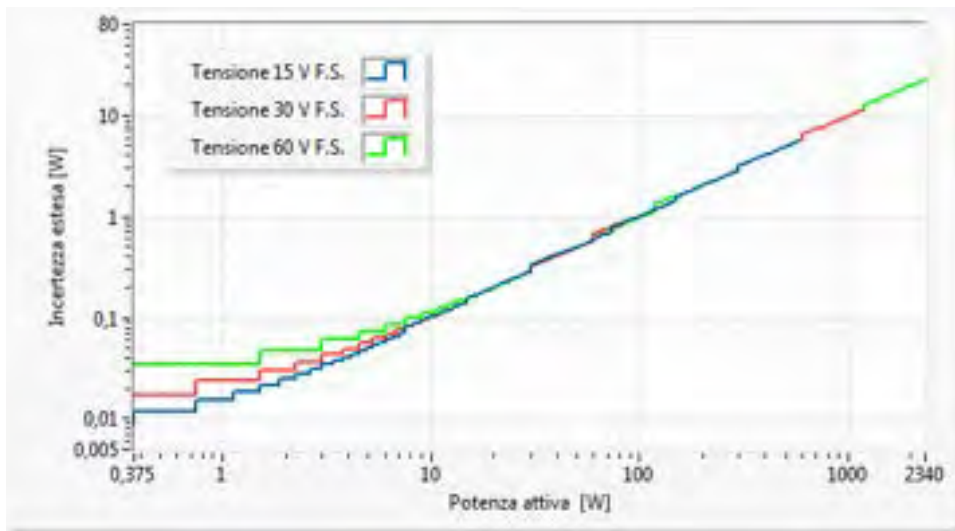


Fig.6g. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.3

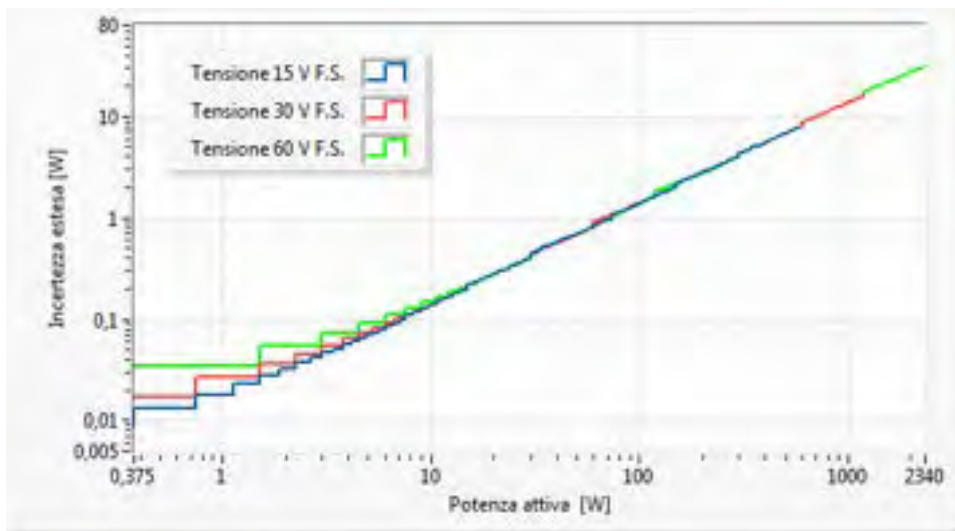


Fig.6h. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.2

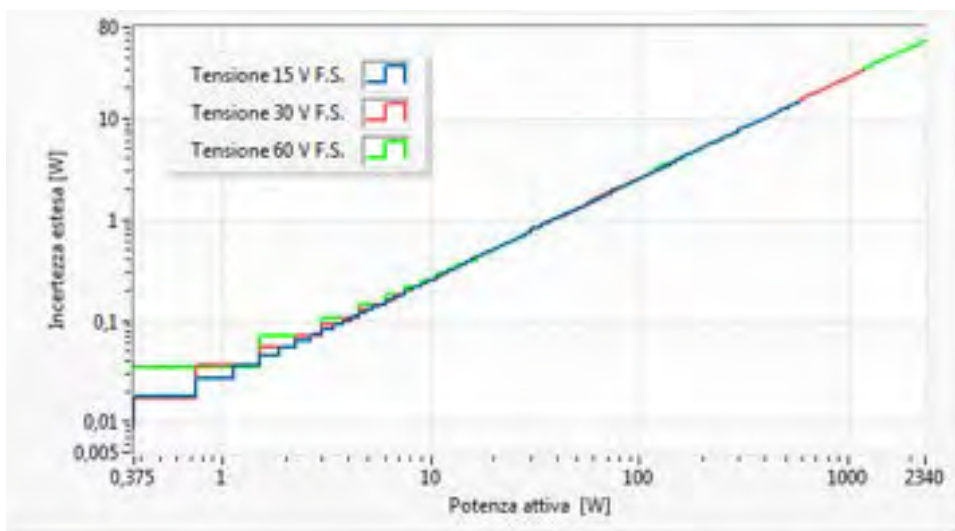


Fig.6i. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.1

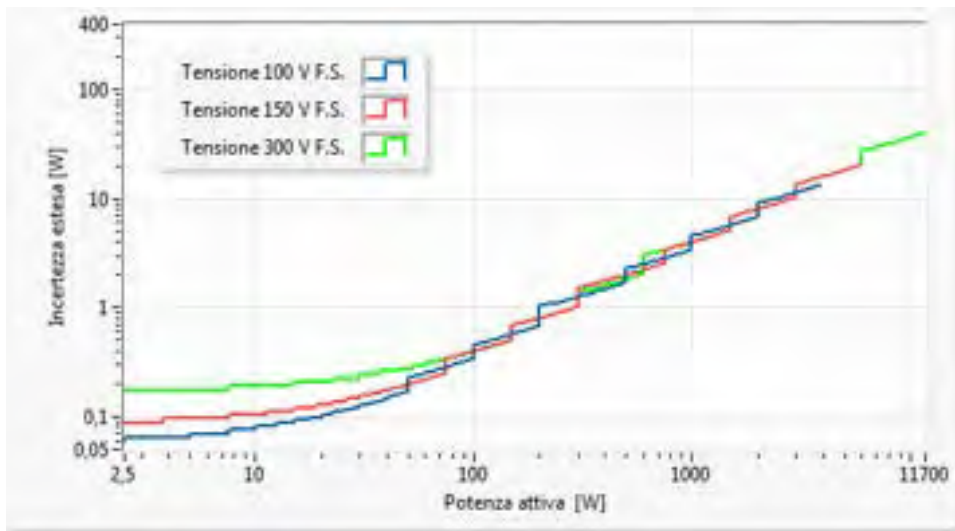


Fig.7a. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.9

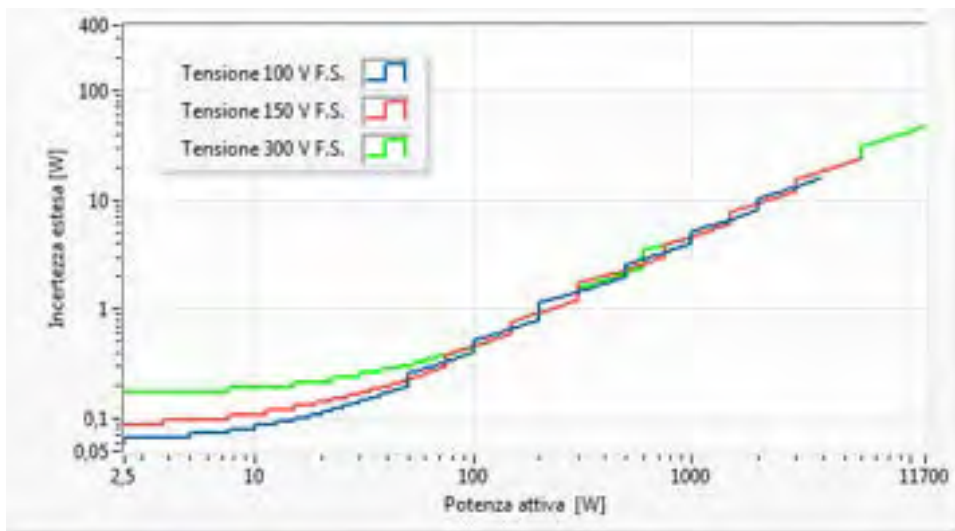


Fig.7b. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.8

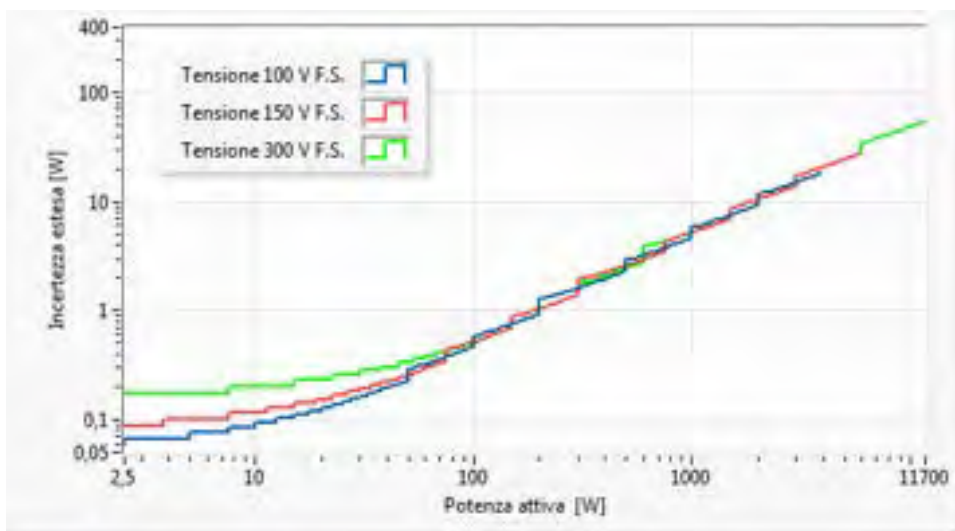


Fig.7c. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.7

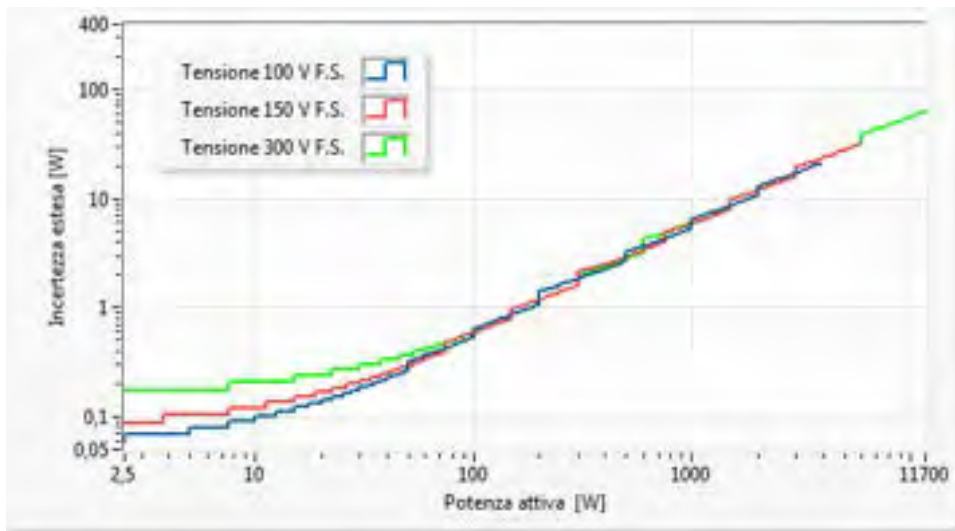


Fig.7d. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.6

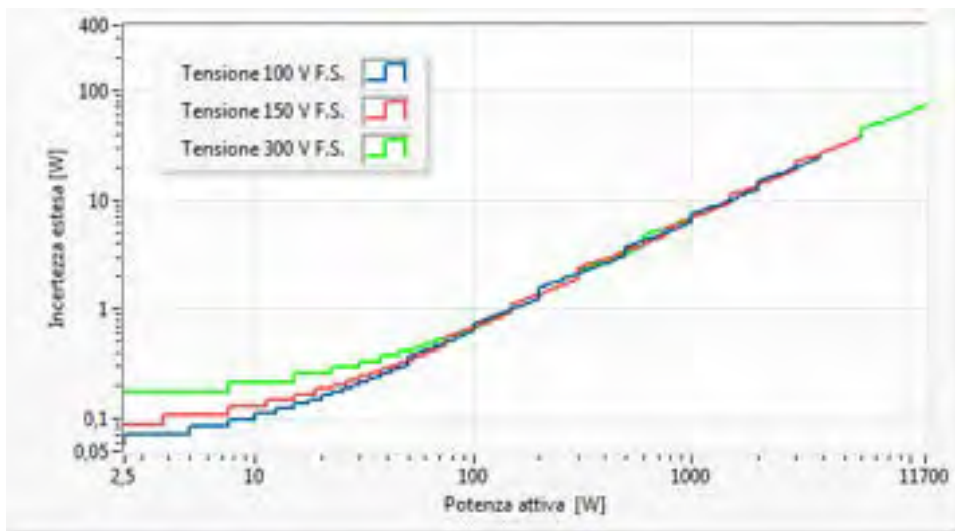


Fig.7e. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.5

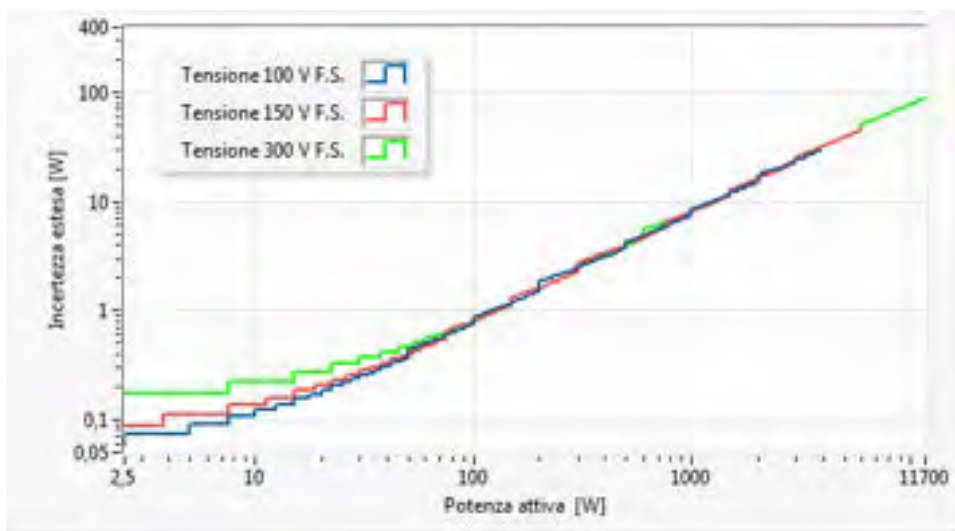


Fig.7f. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.4

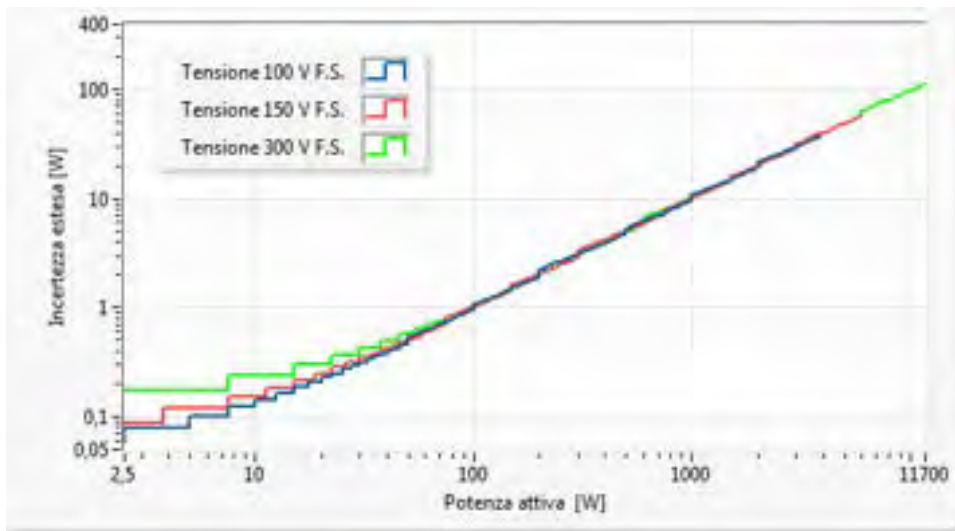


Fig.7g. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.3

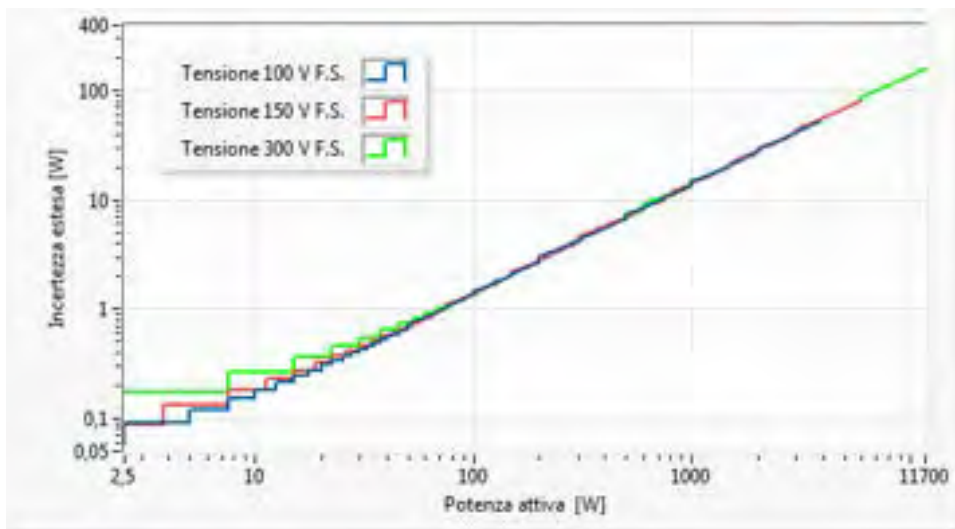


Fig.7h. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.2

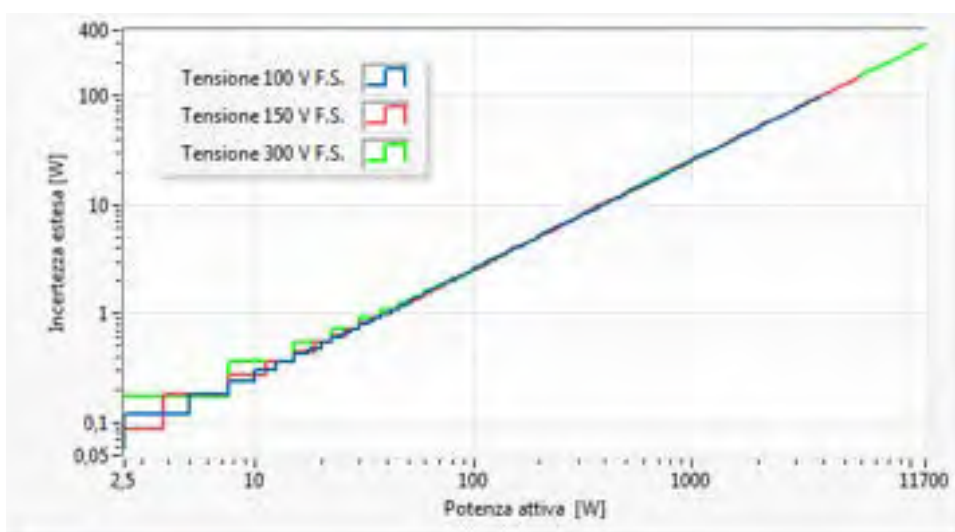


Fig.7i. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.1

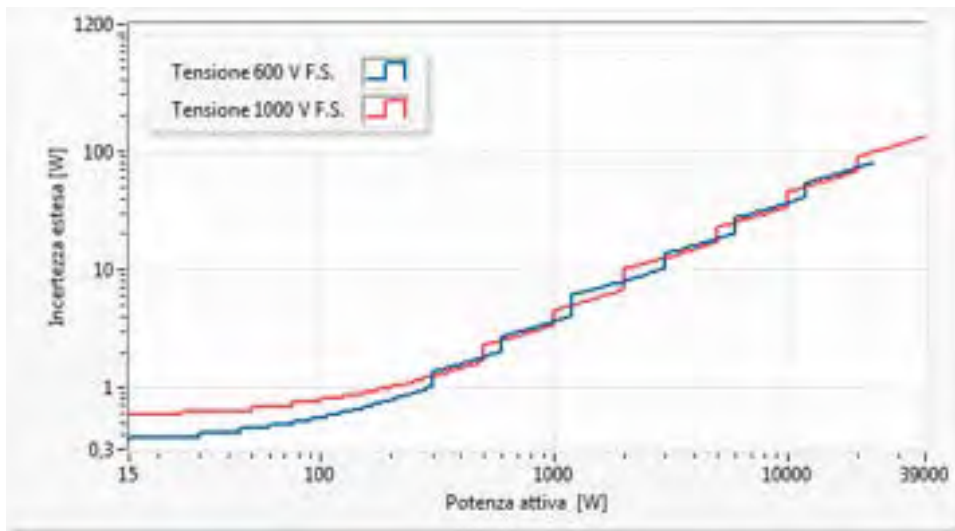


Fig.8a. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.9

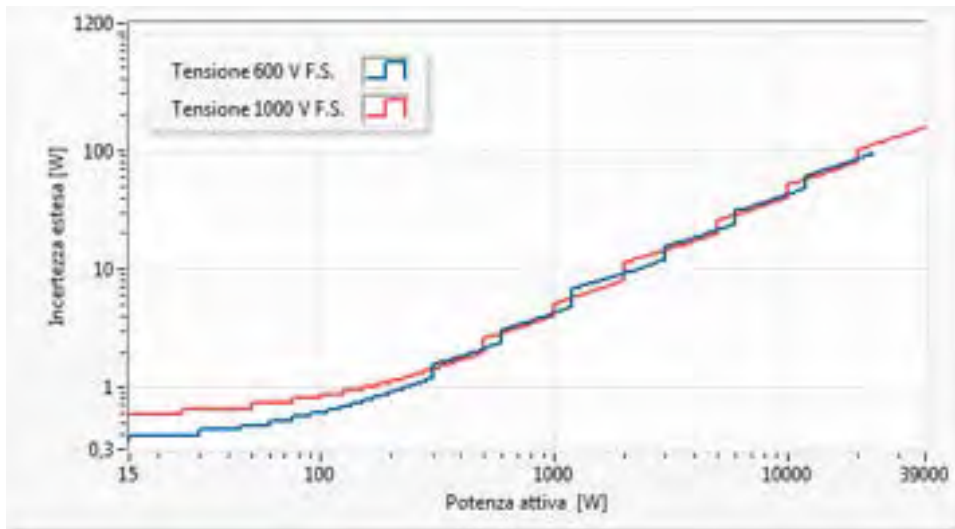


Fig.8b. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.8

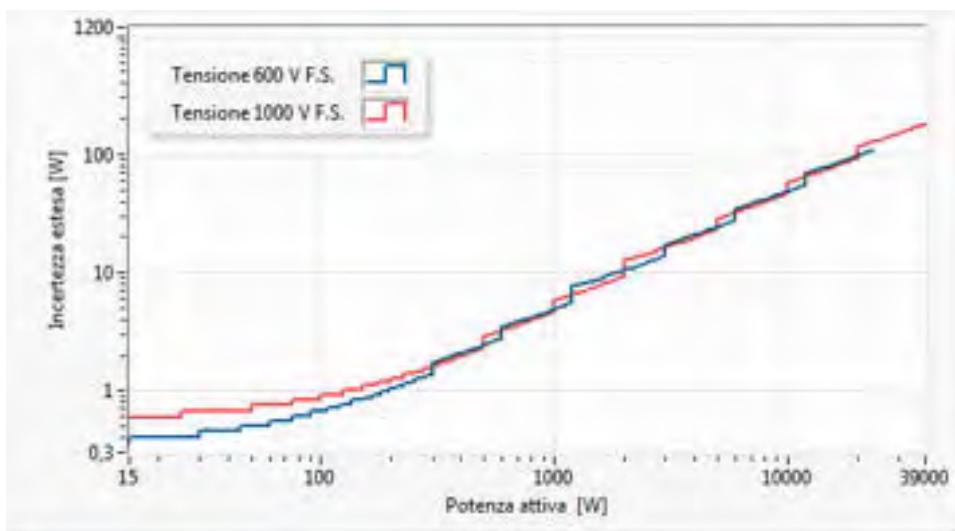


Fig.8c. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.7

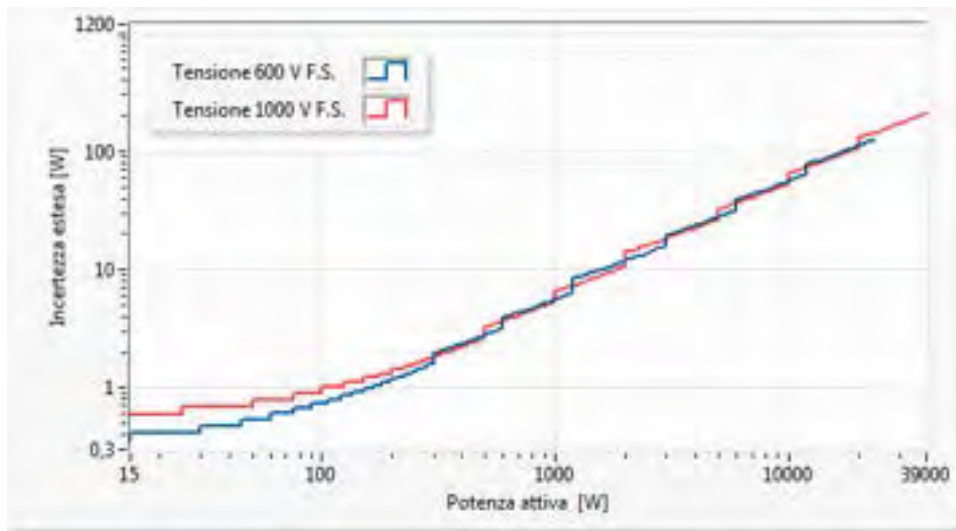


Fig.8d. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.6

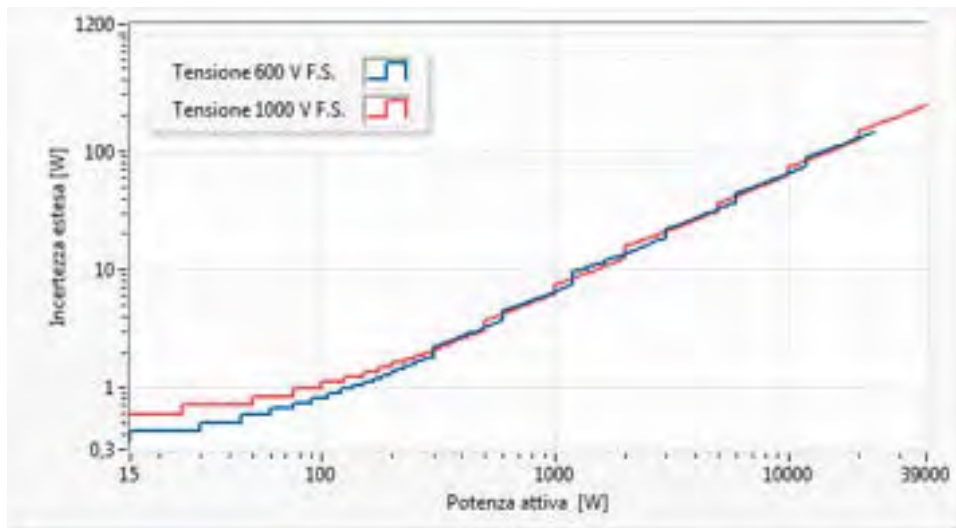


Fig.8e. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.5

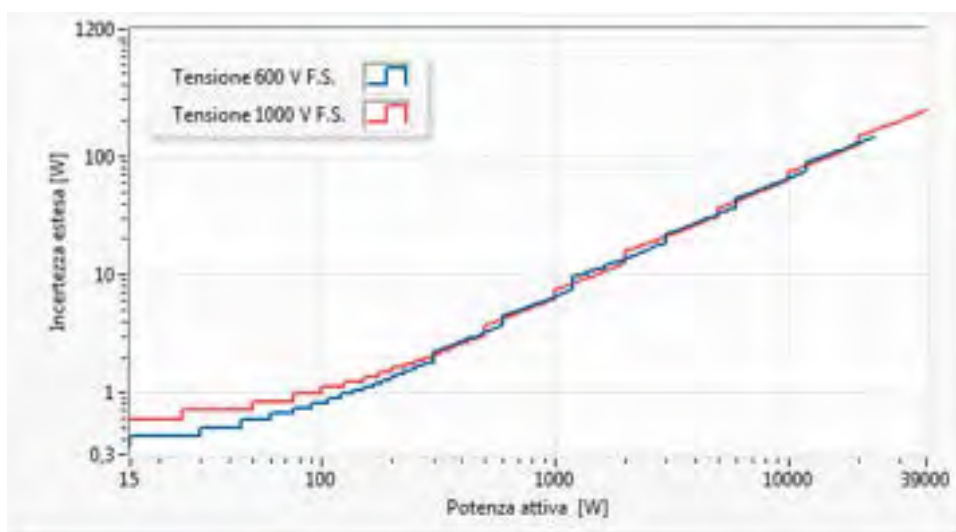


Fig.8f. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.4

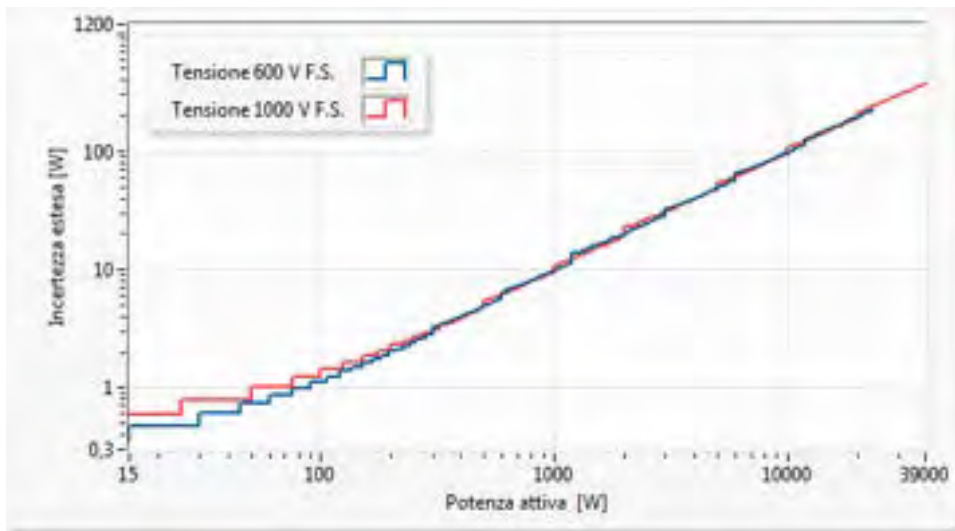


Fig.8f. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.3

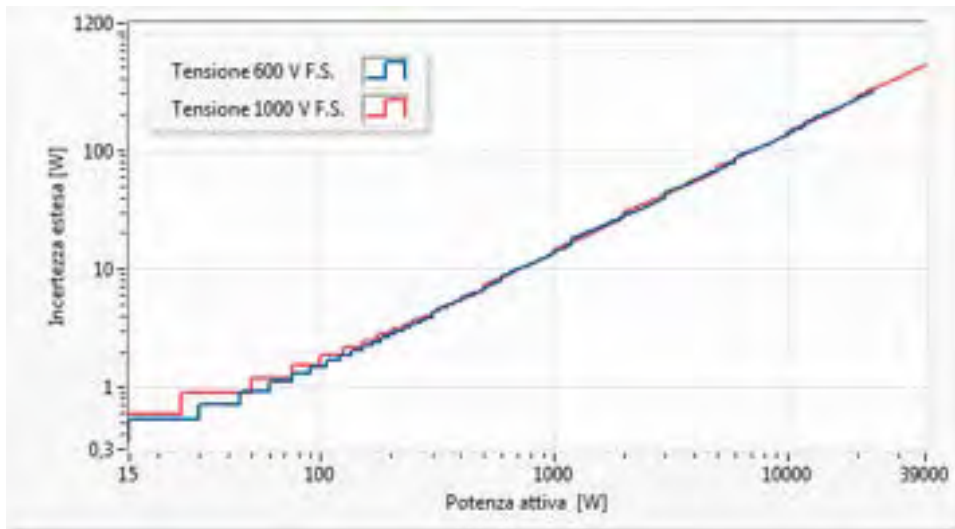


Fig.8g. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.2

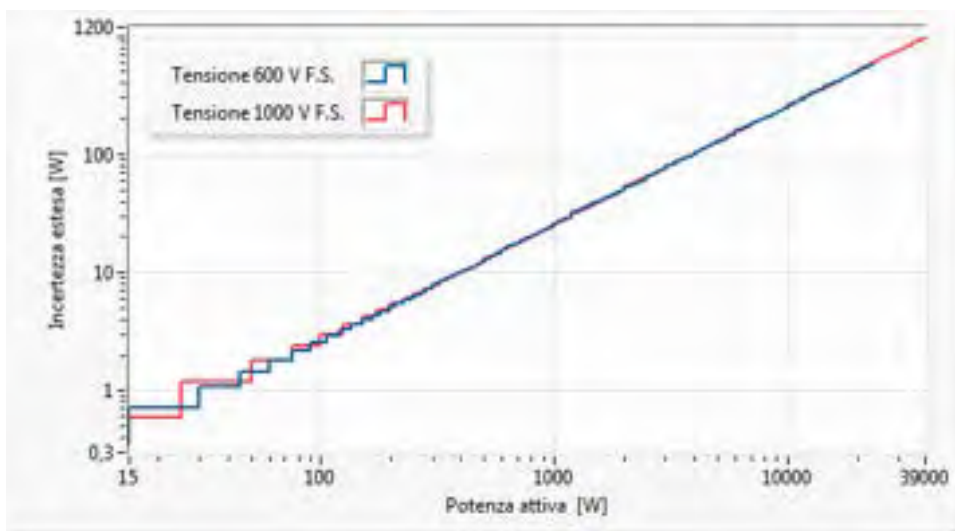


Fig.8i. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con fattore di potenza 0.1

Analogamente a quanto già evidenziato nelle misurazioni di corrente mediante inserzione di trasduttori, nel caso di correnti superiori a 40 A e fino a 500 A la misura di potenza viene eseguita con un solo fondo scala di corrente, 0.5 A e con tutti i fondo scala di tensione già descritti (15, 30, 60, 100, 150, 300, 600 e 1000 V). In questo caso, considerando quanto già dedotto per le misurazioni di corrente, si può trascurare l'incertezza tipo u_{α} del trasduttore, e quindi per il caso di fattore di potenza unitario, si hanno le seguenti espressioni per l'incertezza tipo e l'incertezza estesa:

$$u(P_{\alpha}) = 1750 \cdot \frac{(0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R)}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

dove p_m rappresenta il valore misurato, e P_R il fondo scala impostato. L'incertezza estesa è data dalla relazione seguente:

$$U(P_{\alpha}) = 3500 \cdot \frac{(0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R)}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

Si riporta il grafico dell'incertezza estesa $U(P_{\alpha})$ in funzione della potenza misurata, per fattore di potenza unitario.

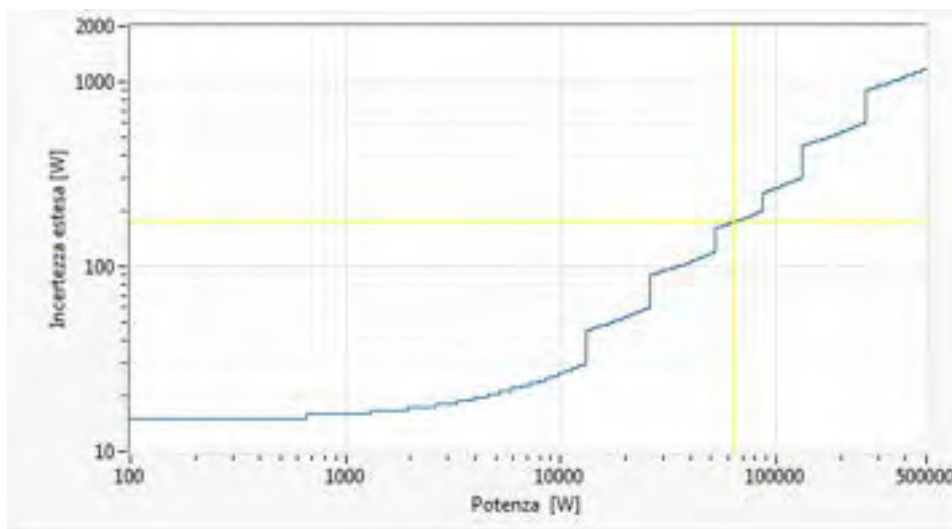


Fig.9. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con trasduttori di corrente e fattore di potenza unitario

Anche nel caso si utilizzino i trasduttori di corrente, si deve tener conto dell'effetto dello sfasamento, per cui si hanno le seguenti espressioni per l'incertezza tipo:

$$u(P_{\alpha pf}) = 1750 \cdot \frac{(0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R + \tan(\varphi) \cdot 0.002 \cdot p_m)}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

dove p_m rappresenta il valore misurato, e P_R il fondo scala impostato e φ l'angolo di fase misurato tra tensione e corrente. L'incertezza estesa è data dalla relazione seguente:

$$U(P_{\alpha pf}) = 3500 \cdot \frac{(0.001 \cdot p_m + 0.001 \cdot P_R + \tan(\varphi) \cdot 0.002 \cdot p_m)}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

Nel grafico di figura 10 sono riportate le incertezze estese al decrescere del fattore di potenza, da 1 a 0.1

Per le misurazioni di tensione su sistemi trifase, con riferimento all'inserzione del tipo a quattro fili, il WT500 calcola la il valore totale delle potenze attive di ogni fase P_1 , P_2 e P_3 :

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 \quad (27)$$

Nelle ipotesi realistiche di sistema di correnti assorbite pressoché equilibrato, l'incertezza tipo e l'incertezza estesa di P_T si possono ottenere con le stesse espressioni sopra riportate, tenendo conto che il fondo scala è dato dalla somma dei tre fondo scala di ciascuna fase.

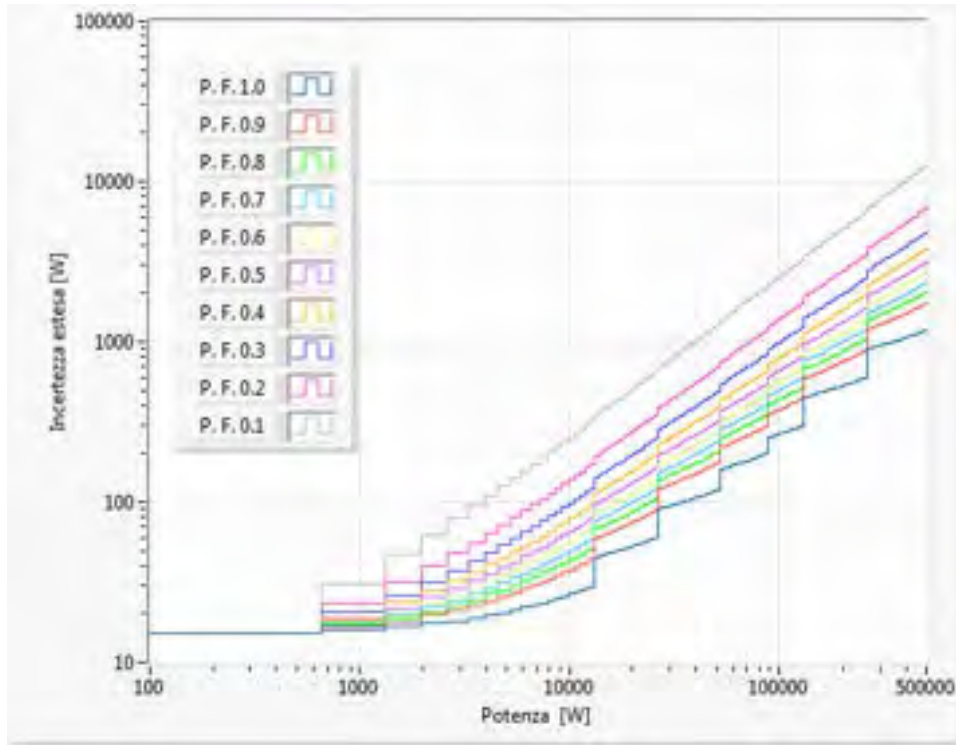


Fig.10. - Incertezza estesa nella misurazione di potenza attiva con trasduttori di corrente e fattore di potenza variabile

3.4.6 Incertezza nella misurazione di potenza apparente

Per la misurazione di potenza apparente S lo strumento consente di ottenere un'incertezza tipo a partire dalla somma delle incertezze ottenute nelle misurazioni di tensione e corrente. Nel caso di inserzione diretta del circuito amperometrico, l'incertezza tipo $u(S)$ è espressa come:

$$u(S) = \frac{(0.001 \cdot v_m + 0.001 \cdot V_R) + (0.001 \cdot i_m + 0.001 \cdot I_R)}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

dove v_m rappresenta il valore di tensione misurato, e V_R il fondo scala di tensione impostato, i_m rappresenta il valore di corrente misurato, e I_R il fondo scala di corrente impostato.

L'incertezza estesa $U(S)$ è data dalla relazione seguente:

$$U(S) = 2 \cdot \frac{(0.001 \cdot v_m + 0.001 \cdot V_R) + (0.001 \cdot i_m + 0.001 \cdot I_R)}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

Nel caso di misurazioni con l'inserzione dei trasduttori di corrente, l'incertezza tipo $u(S_\alpha)$ è data da:

$$u(S_\alpha) = \frac{(0.001 \cdot v_m + 0.001 \cdot V_R) + 1750 \cdot (0.001 \cdot i_m + 0.00005)}{\sqrt{3}} \quad (30)$$

E l'incertezza estesa $U(S_\alpha)$ è data da:

$$U(S_\alpha) = 2 \cdot \frac{(0.001 \cdot v_m + 0.001 \cdot V_R) + 1750 \cdot (0.001 \cdot i_m + 0.00005)}{\sqrt{3}} \quad (40)$$

3.4.7 Incertezza nella misurazione di fattore di potenza

Per la misurazione diretta del fattore di potenza, in regime sinusoidale indicato come $\cos\varphi$ con φ angolo di sfasamento tra tensione e corrente, si può ottenere l'incertezza tipo $u(\cos\phi)$ espressa come:

$$u(\cos\varphi) = \frac{[(\cos\varphi - \cos\varphi/1.0002) + |\cos\varphi - \cos(\varphi + \arcsin(0.002))|] + 0.001}{\sqrt{3}} \quad (50)$$

Mentre l'incertezza estesa $U(\cos\phi)$ espressa come:

$$U(\cos\varphi) = 2 \cdot \frac{[(\cos\varphi - \cos\varphi/1.0002) + |\cos\varphi - \cos(\varphi + \arcsin(0.002))|] + 0.001}{\sqrt{3}} \quad (51)$$

Nel grafico seguente è riportata l'incertezza estesa al variare del fattore di potenza misurato.

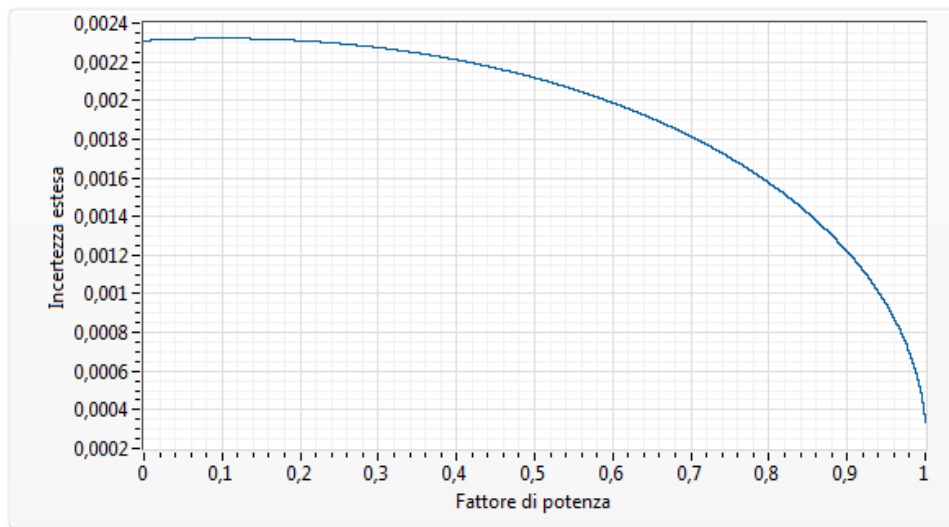


Fig.11. - Incertezza estesa nella misurazione del fattore di potenza

3.4.8 Incertezza nella misurazione di frequenza

Per la misurazione della frequenza, lo strumento consente di ottenere un'incertezza tipo $u(f)$ pari allo 0.035% del valore misurato, ed un'incertezza $U(f)$ estesa dello 0.07%. Il grafico seguente illustra l'andamento dell'incertezza estesa nella misurazione di frequenza.

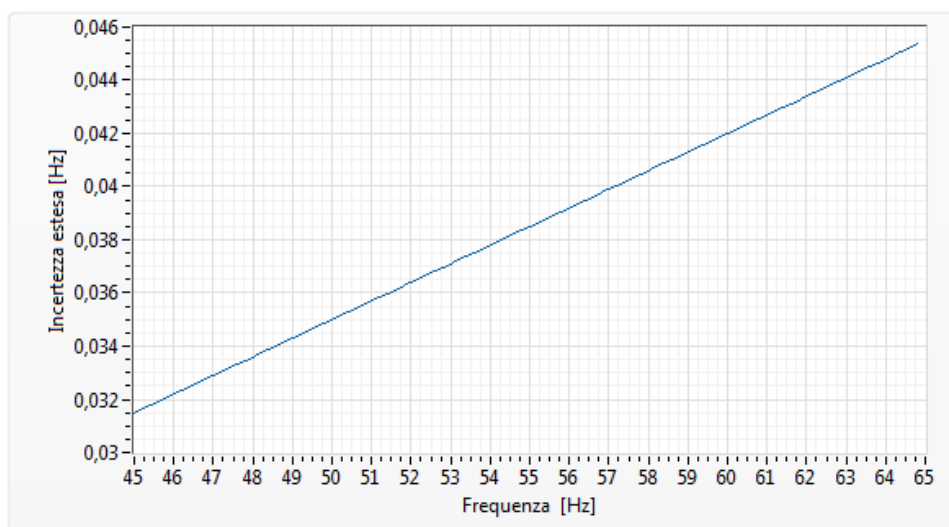


Fig.12. - Incertezza estesa nella misurazione del fattore di frequenza

3.4.9 Incertezza nella misurazione di resistenza degli avvolgimenti

Per la misurazione delle resistenze degli avvolgimenti, è utilizzato uno strumento che consente di ottenere precisioni dello 0.03% + 3 volte la risoluzione, con i seguenti fondo scala: 2 mΩ (risoluzione 0.0001 mΩ), 20 mΩ (risoluzione 0.001 mΩ), 200 mΩ (risoluzione 0.01 mΩ), 2 Ω (risoluzione 0.0001 Ω), 20 Ω (risoluzione 0.001 Ω), 200 Ω (risoluzione 0.01 Ω), 2 kΩ (risoluzione 0.1 Ω), 20 kΩ (risoluzione 1 Ω) e 200 kΩ (risoluzione 10 Ω). L'incertezza tipo $u(R)$ è espressa dalla seguente relazione:

$$u(R) = \frac{0.0003 \cdot R_m + 3 \cdot r}{\sqrt{3}} \quad (52)$$

Dove R_m è il valore misurato e r è la risoluzione del fondo scala impostato. L'incertezza estesa $U(R)$ è:

$$U(R) = 2 \cdot \frac{0.0003 \cdot R_m + 3 \cdot r}{\sqrt{3}} \quad (53)$$

Nel grafico seguente è riportato l'andamento dell'incertezza estesa, nelle ipotesi che venga scelto sempre il fondo scala minore in ogni misurazione.

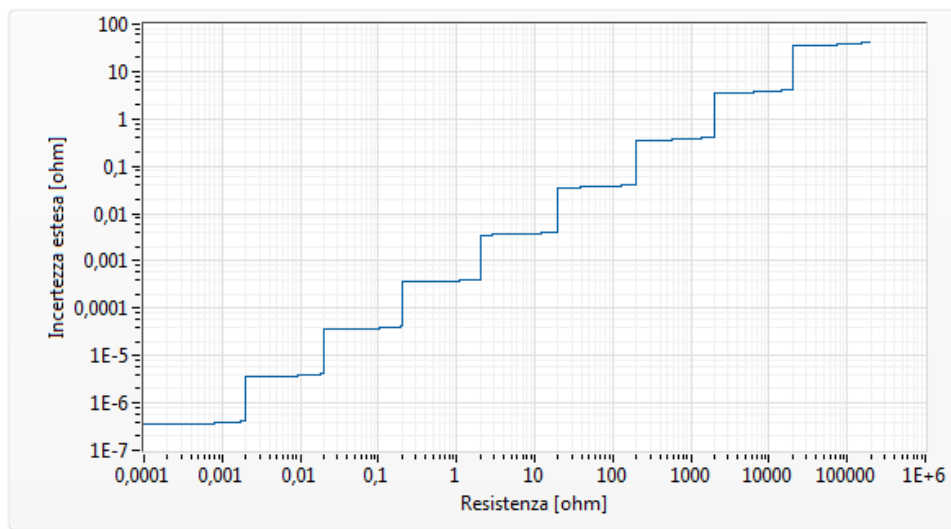


Fig.12. - Incertezza estesa nella misurazione del resistenza con motore non alimentato

Per quanto concerne la misurazione degli avvolgimenti con motore alimentato, il laboratorio è equipaggiato con il uno strumento che consente di misurare resistenze con fondo scala 2, 20, 200 e 2000 Ω con precisione dello 0.5% del fondo scala; pertanto l'incertezza tipo $u(R_{online})$ è pari al 0.29% del fondo scala impostato, mentre l'incertezza estesa $U(R_{online})$ è pari a 0.58% del fondo scala impostato. Si riporta di seguito in Figura 13 il diagramma dell'incertezza estesa al variare della resistenza degli avvolgimenti, nell'ipotesi che sia importato sempre il fondo scala minore in ogni misurazione.

3.4.10 Incertezza nella misurazione di temperatura

Per le misure di temperatura sulla superficie dei motori, considerando l'utilizzo di termocoppie di tipo T, che nell'intervallo 0-200 °C abbiano precisioni di +/- 0.5 K, ed un sistema di condizionamento ed acquisizione dei segnali che abbia precisione di +/- 0.7 K, si può esprimere l'incertezza combinata sommando quadraticamente i due contributi, per cui si ha un'incertezza tipo $u(T)$ pari a 0.5 K, cui corrisponde un'incertezza estesa $U(T)$ pari a 1 K.

Per la misurazione della temperatura del fluido di raffreddamento, nel caso dei motori che si andranno a provare aria ambiente, con la strumentazione adottata si può avere un'incertezza tipo $u(T_{air})$ di 0.18 K, cui corrisponde l'incertezza estesa $U(T_{air})$ pari a 0.35 K.

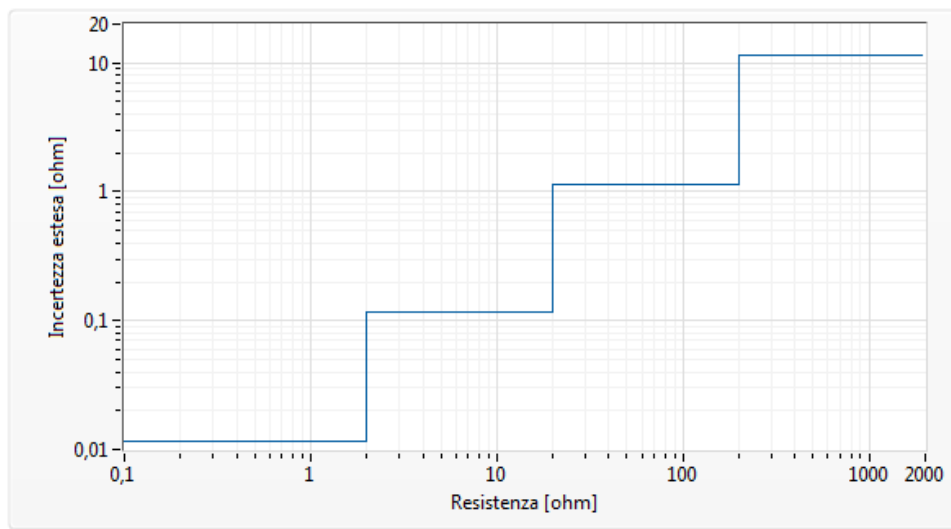


Fig.13. - Incertezza estesa nella misurazione della resistenza con motore alimentato

4 Norma IEC 60034-2-1:2014

4.1 Il contesto

Allo stato attuale la normativa di collaudo è applicata solo per i motori elettrici asincroni semplici, nei quali intendiamo il motore formato solo dai suoi elementi principali (rotore, statore, albero motore, carcassa esterna, ventola, ecc...), senza tener conto di tutti quegli elementi che lo possono circondare una volta completata la macchina di lavoro come ad esempio un convertitore elettronico statico.

Tutto ciò si è tradotto nelle norme:

- IEC 60034-2-1:2014 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles) 2014-06-27, la quale si occupa di armonizzare la vecchia norma IEC 60034-2 con la IEEE 112-B [5];
- IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code) la quale definisce le nuove classi di efficienza IE1, IE2 e IE3. ecc. [12]

Sono definite le classi di rendimento per motori asincroni trifase, a 50 Hz e 60 Hz, con rotore a gabbia, ad una sola velocità che:

- hanno una tensione nominale U_N fino a 1000 V; NOTA La norma si applica anche a motori per due o più tensioni e/o frequenze nominali.
- hanno una potenza nominale P_N compresa tra 0,75 kW e 375 kW;
- hanno 2, 4 o 6 poli;
- sono targati o in base al tipo di servizio S1 (servizio continuo) o S3 (servizio intermittente periodico) con un rapporto di intermittenza nominale uguale o superiore all'80 %;
- sono in grado di funzionare collegati direttamente alla linea di alimentazione;
- sono adatti per le condizioni di funzionamento secondo la IEC EN 60034-1, art. 6.
- Motori con flange, piedi e/o alberi di dimensioni meccaniche diverse da quelle stabilite nella IEC 60072-1 rientrano nella presente norma.
- I motoriduttori e i motori auto frenanti rientrano nella presente norma sebbene in tali motori possano essere utilizzati alberi e flange speciali.
- Ne sono esclusi:
- I motori realizzati solo per funzionamento con convertitore in accordo con la IEC TS 60034-25 [13].

I motori completamente integrati in una macchina (per es. pompe, ventilatori e compressori) che non possono essere provati separatamente dalla macchina.

Negli ultimi anni c'è stato un aggiornamento importante della norma che definisce il rendimento delle macchine elettriche rotanti e le perdite specifiche mediante prove.

Si tratta del passaggio dalla IEC 60034-2 alla IEC 60034-2-1. Queste norme stabiliscono i metodi per la determinazione mediante prove delle perdite e del rendimento di una macchina elettrica rotante, il quale è definito come il rapporto tra la potenza resa (necessaria per azionare una macchina) e la potenza assorbita (la potenza consumata).

Le suddette norme si applicano alle macchine in corrente continua e alternata sincrona e asincrona di tutte le taglie previste nella IEC 60034-1.

Con i metodi armonizzati a livello internazionale per determinare le classi di rendimento seguiti nella norma IEC 60034-2-1 è possibile applicare la scala di rendimento IE, mentre in precedenza attraverso la norma IEC 60034-2 era possibile identificare il rendimento solo nella scala EFF.

Secondo le norme, l'efficienza di un motore può essere misurata in modo sia diretto che indiretto dove:

- Il metodo diretto calcola la potenza in ingresso sulla base della tensione e della corrente assorbita e la potenza resa in funzione della velocità di rotazione e della coppia;
- Il metodo indiretto determina la potenza in ingresso e quella resa sulla base delle perdite che si generano all'interno del motore.

Per definizione le perdite sono la differenza tra la potenza assorbita e quella resa e si dividono in tre famiglie:

- Perdite per effetto joule di statore e di rotore. Sono una funzione lineare della resistenza e variano con il quadrato della corrente;
- Perdite meccaniche. Pari alla somma delle perdite di attrito e ventilazione.
- Perdite addizionali a carico. Perdite dovute alla corrente di carico nelle parti attive del ferro e nelle altre parti metalliche esclusi i conduttori, per correnti parassite dell'avvolgimento dovute alle pulsazioni del flusso causate dalla corrente di carico e perdite addizionali nelle spazzole dovute alla commutazione.

4.2 osservazioni sulle variazioni rispetto all'edizione precedente

Rispetto alla precedente edizione del 2011, nella versione attualmente vigente sono state introdotte delle modifiche significative in alcune procedure di prova, il calcolo di alcuni contributi delle perdite e per quanto concerne la strumentazione da adottare.

Un primo significativo cambiamento riguarda l'ordine di esecuzione delle prove, che prevede necessariamente lo svolgimento, come prima prova, di quella a carico nominale e poi, in rapida sequenza, di quelle a carico variabile ed a vuoto.

Nelle precedenti edizioni della norma, prove a carico e prove a vuoto erano proposte come procedure in qualche modo indipendenti; infatti, usualmente si svolgevano le prove a vuoto lasciando riscaldare la macchina in prova con il calore prodotto dalle sole perdite a vuoto. Ciò portava la macchina a lavorare ad una temperatura sensibilmente inferiore a quella nominale.

Nella versione attuale, si propone l'esecuzione della prova a vuoto per determinare le perdite per attrito e ventilazione nonché le perdite nel ferro in modo più realistico.

Inoltre, si consente una sensibile riduzione dei tempi di prova della macchina, poiché non è necessario svolgere due separate prove di riscaldamento, ma solo quella a carico a valle della quale si possono eseguire le prove a carico variabile ed a vuoto.

La necessità di svolgere rapidamente la prova a vuoto dopo quella a carico comporta il disaccoppiamento rapido tra macchina in prova e banco freno: la scelta dei giunti e del montaggio della macchina in prova deve essere effettuata tenendo conto di questa esigenza. Lo svolgimento della prova a vuoto con la

macchina ancora collegata al banco freno introdurrebbe una sovrastima delle perdite per attrito e ventilazione, e quindi non è da considerarsi corretto.

Una seconda modifica introdotta dalla nuova edizione riguarda il valore delle resistenze degli avvolgimenti statorici, da utilizzare nella determinazione delle perdite di statore nelle prove a carico variabile, e per le perdite costanti nella prova a vuoto: la norma prescrive di determinare il valore di resistenza per ogni punto di carico o tensione effettuando un'interpolazione tra i valori di resistenza misurati ad inizio e fine delle prove.

Tale approccio consente di tener conto del progressivo raffreddamento cui è soggetta la macchina durante le prove a carico, che sono a potenza erogata decrescente, e nelle prove a vuoto in cui la macchina, già calda per precedenti prove a carico, si raffredda velocemente perché pur essendo ventilata come se funzionasse a carico, ha dissipazioni legate alle sole perdite costanti.

Come conseguenza si ha la necessità di predisporre velocemente la misurazione delle resistenze, con procedure che consentano rapidamente la fermata ed il riavvio della macchina, nonché il sezionamento del circuito di alimentazione durante le misure di resistenza.

Nella determinazione del rendimento, si estende l'influenza della temperatura del fluido di raffreddamento anche alla misurazione della potenza elettrica in ingresso nella prova a carico, nominale.

Infine, le perdite per attrito e ventilazione vengono considerate come funzione dello scorrimento e quindi variabili in base alle effettive condizioni di funzionamento durante le prove a carico.

4.3 strumentazione

La norma IEC 60034-2-1:2014 [5] introduce alcune prescrizioni sulla strumentazione da utilizzare nelle varie prove.

Non viene tuttavia indicato un obiettivo in termini di incertezza minima accettabile nella presentazione dei risultati delle prove.

In dettaglio, la norma indica che:

- Si debba utilizzare strumentazione digitale, per quanto possibile
- Si debbano fare misure ripetute e determinarne la media, ma con periodi di osservazione non superiori ai 15 secondi.
- Per la misura di grandezze elettriche, si devono usare strumenti in classe almeno 0.2 per le misure dirette, e almeno 0.5 per misure indirette. L'incertezza di misura comprensiva dei contributi dei trasduttori di corrente e tensione deve essere minore o uguale a 0.2% a fattore di potenza unitario.
Le misure dei valori di tensione e corrente di linea in valore efficace si intendono con valori medi delle tre fasi.
- La misurazione di coppia deve essere effettuata con classe di precisione almeno 0.2, con carico almeno del 10% del fondo scala. Se si usa trasduttore in classe 0.1, si può scendere a 5% del fondo scala ecc.
- Se il dinamometro è inserito in un supporto fisso, si deve considerare anche una correzione dovuta all'attrito dei supporti.
- Può essere necessaria la compensazione in temperatura per i dinamometri, che possono scaldarsi durante le prove; il contributo dovuto alla variazione di temperatura dovuta al riscaldamento del trasduttore deve essere minore di 0.15% del fondo scala.
- La misurazione della frequenza della tensione delle essere effettuata con precisione almeno di +/- 0.1% del fondo scala.
- La velocità di rotazione deve essere misurata con incertezza di almeno 0.1 giri al minuto.
- La misura di temperatura deve essere effettuata con incertezza di almeno +/- 1 K.

4.4 considerazioni metodologiche generali

La norma definisce metodi di misura dell'efficienza differenti, a seconda del tipo di motore e della taglia. Si tratta di metodi PREFERIBILI, non obbligatori.

Il metodo diretto, basato sulla misurazione della potenza resa e della potenza assorbita, è preferibile per motori monofase, di qualsiasi taglia. Il metodo indiretto, basato sulla misura delle perdite totali e sulla determinazione sperimentale delle perdite residue, è preferibile per i motori trifase per potenze fino a 2 MW. Il metodo indiretto, basato sulla misura delle perdite totali e sulla stima teorica delle perdite residue, è preferibile per i motori trifase per potenze maggiori di 2 MW.

La norma introduce diagrammi di flusso, per descrivere ciascuna procedura da seguire per i tre diversi metodi indicati.

Per quanto concerne il metodo indiretto, basato sulla misura delle perdite totali e determinazione sperimentale delle perdite residue, il diagramma è riportato di seguito.

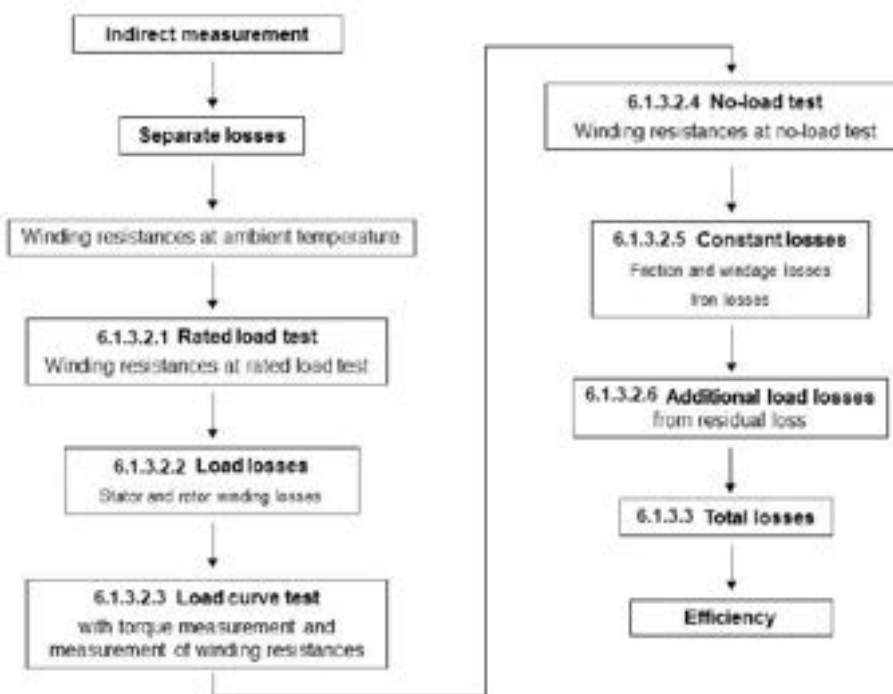


Fig.14. – Diagramma esplicativo del metodo indiretto con la determinazione delle perdite residue

Per quanto riguarda l'incertezza, si osserva che nella norma si riporta che l'incertezza intesa nel documento si riferisce all'incertezza nel determinare il valore vero del rendimento. Sebbene l'incertezza si debba esprimere in modo numerico, tuttavia la norma ammette che sarebbero necessarie prove sufficienti per definirne valori significativi e comparabili.

La norma, dal punto di vista delle scienza delle misurazioni, si limita a definire in modo qualitativo le incertezze di misura intese come incertezze di metodo; per quanto riguarda le incertezze legate alla strumentazione, si limita a definire le specifiche minime della strumentazione, secondo l'approccio semplificativo che misurazioni eseguite con strumentazione di buona qualità diano risultati a bassa incertezza. In generale questo approccio definisce solo una condizione necessaria, ma non sufficiente a garantire misurazioni di qualità. Infatti, l'unico vero test alla bontà delle misurazioni si ha alla fine del processo, quando si richiede la determinazione della correlazione nella determinazione delle perdite residue a carico. Ben più corretto sarebbe richiedere che vi sia un valore di incertezza obiettivo nelle singole prove, ed introdurre dei punti di verifica del metodo fissando limiti per ciascun contributo alla perdite totali. Inoltre, tenuto conto delle tolleranze concesse ai costruttori nel marcare i propri motori secondo

determinati livelli di efficienza, ci si può scontrare con direttive ancora vigenti, quali la Direttiva 640/2009 della Commissione Europea che recita:

“Il modello (del motore) è considerato conforme al presente regolamento se nell’efficienza nominale del motore (η) le perdite ($1-\eta$) non si discostano dai valori fissati nell’allegato I di oltre il 15 % dell’intervallo di potenza 0,75-150 kW e di oltre il 10 % nell’intervallo > 150-375 kW.”

Quindi, si può ben capire che vista l’ampiezza della tolleranza riconosciuta ai costruttori, le incertezze di misura assicurano ad un ruolo assai delicato; infatti applicando le tolleranze massime si ha la possibilità che motori IE2 siano anche IE3 o viceversa:

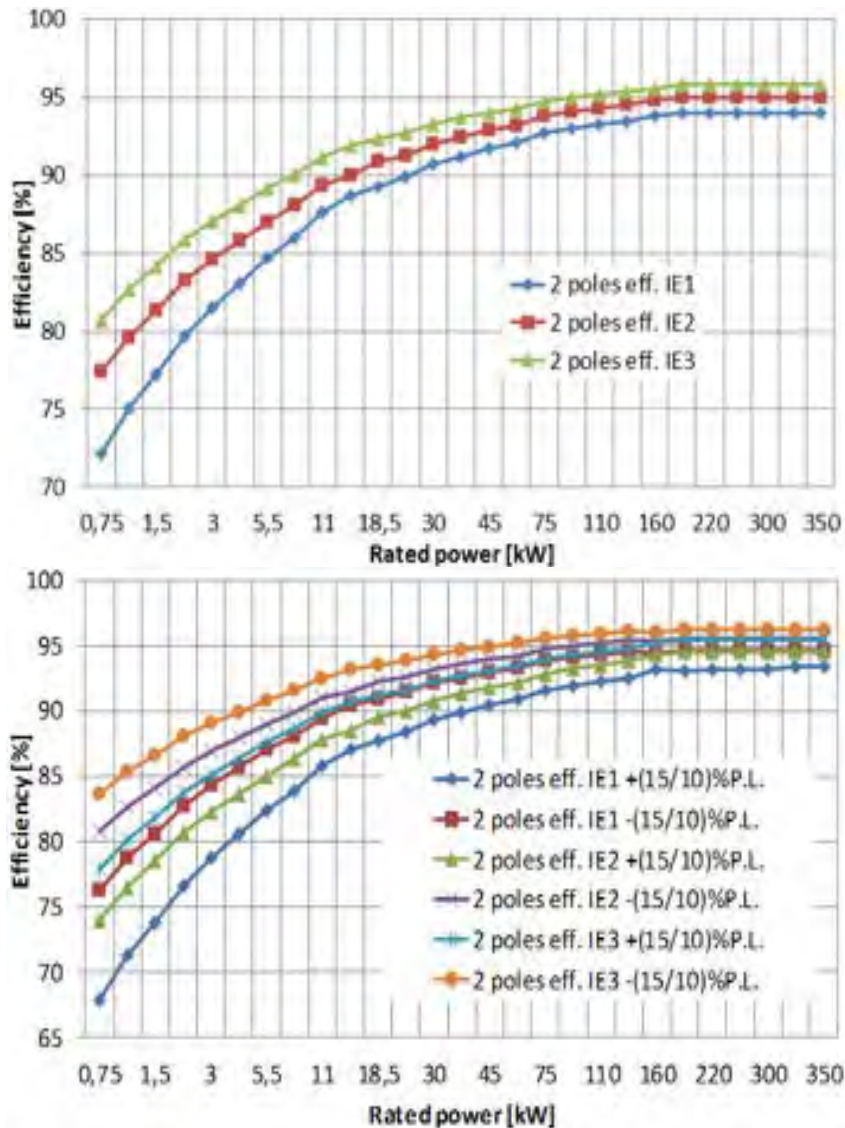


Fig.15. – Confronto tra rendimenti normalizzati per motori a 2 poli. Considerando le tolleranze, si manifestano sovrapposizioni che rendono non univoca la classificazione di uno stesso motore.

Questo valore di tolleranza del +/- 15% scaturisce non da limiti tecnologici nella progettazione e costruzione dei motori, ma proprio dalla norma IEC EN 60034-1 [14] che definisce le tolleranze ammissibili nei dati di targa:

Tabella 3 - Tolleranze per i dati di targa dei motori asincroni

Values for	Tolerance
Efficiency (η) (by indirect determination)	- 0.15 (1 - η) at $P_N \leq 50$ kW - 0.1 (1 - η) at $P_N > 50$ kW
Power factor ($\cos \varphi$)	$\frac{1 - \cos \varphi}{6}$, minimum 0.02, maximum 0.07
Slip (s) (at rated load and at working temperature)	± 20 % of the guaranteed slip at $P_N \geq 1$ kW ± 30 % of the guaranteed slip at $P_N < 1$ kW
Breakaway starting current (I_{Δ}) (in the starting circuit envisaged)	+ 20 % of the guaranteed starting current (no lower limit)
Breakaway torque (M_{Δ})	- 15 % and + 25 % of the guaranteed breakaway torque (+ 25 % may be exceeded by agreement)
Pull-up torque (M_s)	- 15 % of the guaranteed value
Pull-out torque (M_k)	- 10 % of the guaranteed value (after allowing for this tolerance, M_k/M_N not less than 1.6)
Moment of inertia (J)	± 10 % of the guaranteed value

Quindi, nel determinare il valore di efficienza di un motore, è auspicabile che l'incertezza sia sufficientemente contenuta, in modo da poter assegnare il motore univocamente ad una sola classe di rendimento.

Si fa presente che in tutte le misurazioni indicate in precedenza, si dovranno determinare le incertezze sia nelle grandezze misurabili direttamente, che la propagazione dell'incertezza nella misurazione delle grandezze indirette, come nel caso dei vari contributi alle perdite totali.

In particolare, vi saranno anche tipologie di misure in cui non vi sarà indipendenza tra le grandezze che concorrono a definire il misurando per cui sarà necessaria la determinazione della correlazione tra le stesse, come indicato nella "Guida all'espressione dell'incertezza" BIPM JCGM 100:2008 (GUM) [4].

5 Sviluppo di procedure operative per l'esecuzione delle misure per la determinazione del rendimento dei motori asincroni

La corretta esecuzione della misurazioni è fondamentale per l'elaborazione corretta del rendimento dei motori, in quanto solo a prova conclusa, durante la fase di calcolo delle varie tipologie di perdite, emergeranno le conseguenze di eventuali errori o sviste commessi dall'operatore.

Ne potrà conseguire la necessità di ripetere anche più volte le prove su una stessa macchina, con aggravio di costo per il laboratorio.

Pertanto, ne segue la necessità di elaborare una procedura generale che tenga conto delle indicazioni contenute nella norma.

La misura di resistenza degli avvolgimenti deve essere effettuata su quelli statorici considerando le resistenze fase-fase, e facendone la media; la resistenza di fase sarà la metà del valor medio delle resistenze misurate. Se il motore ha il rotore avvolto, si misurerà analogamente la resistenza fase-fase degli avvolgimenti di rotore, determinandone la media.

Nel caso di misure di resistenze al termine di prove termiche, si pone il problema dell'impossibilità di effettuare misure immediatamente al distacco dell'alimentazione. Si parla di tempo di arresto breve se si riesce ad effettuare la misura entro 30 s per macchine di potenza minore uguale a 50 kW, fino a 120 s per macchine fino a 5 MW.

Nel caso di arresti più lunghi, la resistenza di prova al termine della prova termica deve essere determinata come previsto dalla procedura di estrapolazione nel tempo descritta [5], utilizzando la lettura al tempo più breve possibile invece delle letture plurime agli intervalli di tempo specificati nella Tab. 5 della norma, e la successiva estrapolazione al tempo zero.

Le temperature degli avvolgimenti devono essere determinate come prescritto al paragrafo 5.7.2 [5], nel quale si riportano diverse modalità. La preferibile è l'extrapolazione a partire dalla misura della resistenza a fine prova termica.

I valori di resistenza dell'avvolgimento rilevati durante la prova devono essere riferiti alla temperatura di riferimento normalizzata di 25 °C. Il fattore di correzione per riportare la resistenza dell'avvolgimento (e lo scorrimento nel caso di macchine a induzione) alla temperatura di riferimento normalizzata del fluido di raffreddamento di 25 °C deve essere determinato in base a:

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (54)$$

dove: k_{θ} è il fattore di correzione della temperatura per gli avvolgimenti; θ_c è la temperatura all'ingresso del fluido di raffreddamento durante la prova; θ_w è la temperatura dell'avvolgimento.

La costante termica 235 è relativa al rame; deve essere sostituita da 225 nel caso di un avvolgimento in alluminio.

Per macchine che utilizzano acqua come fluido di raffreddamento primario o secondario, la temperatura di riferimento dell'acqua è 25 °C in accordo con la Tab. 4 della IEC EN 60034-1 [14]. Valori alternativi possono essere specificati in base ad accordo.

La macchina in prova deve essere configurata nel modo più simile possibile alle reali condizioni di esercizio, con tutti i componenti e gli accessori montati.

La temperatura ambiente non dovrebbe essere al di fuori dell'intervallo 15-30 °C almeno nell'ultima ora di delle prove termiche e durante tutte le misurazioni.

La prima misurazione da svolgere riguarda la resistenze degli avvolgimenti con la macchina a temperatura ambiente, secondo quanto già riportato precedentemente.

Successivamente si deve svolgere la prova a carico nominale, con banco dinamometrico e trasduttori di coppia e velocità di rotazione.

Il motore deve essere alimentato e caricato alla potenza nominale, e lasciato in funzione affinché si possa scaldare in virtù delle proprie perdite; si considera estinto il transitorio termico di riscaldamento quando la variazione di temperatura della carcassa è minore uguale ad 1 K in mezz'ora.

Si devono acquisire i valori di misura di P_1 , potenza elettrica attiva in ingresso, T coppia erogata, I corrente rms media di linea, U tensione rms media di linea, n numero di giri al minuto, f frequenza della tensione di rete, θ_c temperatura del fluido di raffreddamento, θ temperatura degli avvolgimenti, $R=R_n$ resistenza a carico nominale (θ_c , θ e R_n sono stati definiti in precedenza).

Al termine della prova si deve controllare la presenza di deriva del trasduttore di coppia; se presente al di fuori della tolleranza ammessa, si deve correggere e ripetere la prova.

Si osserva che la durata della prova di carico può essere dell'ordine di ore, a causa dell'inerzia termica del motore; ciò dovrà essere tenuto in conto per la gestione del banco dinamometrico.

Le perdite di statore nella prova a carico nominale si determinano come:

$$P_s = 1.5 \cdot I^2 \cdot R, \quad (55)$$

non corrette in temperatura.

Le perdite corrette nell'avvolgimento di statore sono determinate utilizzando la resistenza dell'avvolgimento di statore R_N ottenuta dalla prova a carico nominale, corretta alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento di 25 °C:

$$P_{s,\theta} = 1.5 \cdot I^2 \cdot R_N \cdot k_\theta \quad (56)$$

Lo scorrimento s è definito come

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad (57)$$

con p numero di coppie polari del motore

Le perdite di rotore, non corrette in temperatura, si ottengono per sottrazione:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s \quad (58)$$

dove P_1 , n , f e P_s sono già state definite, mentre le perdite nel ferro P_{fe} saranno descritte in seguito.

Le perdite corrette nell'avvolgimento di rotore sono determinate utilizzando la perdite corrette nell'avvolgimento di statore e la correzione dello scorrimento:

$$s_\theta = \left(1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f}\right) \cdot k_\theta \quad (59)$$

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \cdot s_\theta \quad (60)$$

dove $P_{s,\theta}$ ed s_θ rappresentano le perdite di statore e lo scorrimento corretti alla temperatura di riferimento del fluido refrigerante pari a 25°C.

La norma prevede la correzione in funzione della temperatura anche per la potenza in ingresso P_1 :

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}) \quad (61)$$

La norma prescrive l'esecuzione della prove a carico variabile per la determinazione delle perdite addizionali ed, indirettamente, anche per le perdite nel ferro

Le prove a carico variabile devono essere eseguite immediatamente dopo la prova a carico nominale, con macchina a regime termico.

La prova deve essere eseguita in 6 punti diversi di carico: 125%, 115%, 100%, 75%, 50% e 25% del carico nominale, circa.

La frequenza di alimentazione deve essere stabile entro +/- 0.1%.

La resistenza degli avvolgimenti di statore deve essere misurata prima del valore di carico maggiore e dopo il valore di carico minore:

Come valore di resistenza dal 100% del carico in su si considera il valore di misurato prima del valore massimo di carico. Per valori di carico minori, si considera la resistenza come variabile linearmente con il carico. Per ogni valore di carico di dovrà definire un diverso valore di resistenza, con interpolazione lineare, usando come estremi il valore misurato prima del carico massimo, come estremo superiore, e quello misurato dopo il valore minimo di carico, come estremo inferiore.

Per ciascun valore di carico, si devono calcolare le perdite di statore P_s che dovranno essere corrette in temperatura, divenendo $P_{s,\theta}$ rispetto alla temperatura del fluido di raffreddamento.

Analogamente, per ogni punto di carico si dovranno calcolare le perdite negli avvolgimenti di rotore, P_r dove P_1 , n , f e P_s sono già state definite per le prove a carico variabile e P_{fe} si definirà in seguito.

Le perdite negli avvolgimenti di rotore devono anch'esse venire corrette in temperatura divenendo $P_{r,\theta}$.

La prova a vuoto merita particolare attenzione. E' necessaria per la determinazione delle perdite costanti, che possono essere suddivise in perdite nel ferro e perdite per attrito e ventilazione.

La prova va eseguita a macchina calda, immediatamente dopo la prova a carico variabile. Deve essere eseguita in maniera molto rapida, per non raffreddare la macchina.

La prova si svolge applicando alla macchina, scollegata dal carico, 8 valori di tensione decrescenti pari a: 110 %, 100% 95 % e 90% che saranno utilizzati per la determinazione delle perdite nel ferro; 60 % 50% 40% e 30% che saranno utilizzati per determinare le perdite per attrito e ventilazione.

Per ogni valore di tensione applicata, è necessario misurare U_0 , I_0 e P_0 . Al termine della prova, si deve misurare la resistenza di statore R_0 .

Analogamente alla prova a carico variabile, per ogni valore di tensione si deve determinare un valore di resistenza R_0 mediante interpolazione lineare in funzione di P_0 e considerando come estremi le resistenze misurate prima e dopo la prova. Non è necessaria la correzione in temperatura delle resistenze, in questo caso. Le perdite P_0 contengono anche un termine legato a perdite di statore, poiché la corrente a vuoto di un motore asincrono può essere anche del 40% della corrente nominale, per cui si devono ottenere per le perdite costanti mediante sottrazione:

$$P_c = P_0 - P_{s0} = P_{fw} + P_{fe} \quad (62)$$

dove

$$P_{s0} = 1.5 \cdot I_0^2 \cdot R_0 \quad (63)$$

per ognuno degli 8 valori di tensione applicati; per ognuno di questi punti, vi sarà un diverso valore di R_0 da considerare in funzione di P_0 , da ottenerci con interpolazione lineare.

Le perdite per attrito e ventilazione P_{fw} si ottengono per estrapolazione a 0 dei valori di P_c sopra ottenuti solo in funzione dei 4 punti a tensione da 60% a 30%.

Si deve estrapolare a 0 la curva (una retta) graficando P_c in funzione di U_0^2 . Il valore estrapolato a tensione 0 è quello di P_{FW0} alla velocità di sincronismo.

Le perdite nel ferro P_{fe} si ottengono dalle misure ottenute con i valori di tensione tra 110% ed il 90%, graficando i valori della differenza tra P_c e P_{fw} in funzione di della tensione U_0 .

$$P_{fe} = P_c - P_{fw} \quad (64)$$

Si pone un problema in merito a quale valore di tensione si debba considerare per determinare le perdite nel ferro nella prova a carico. La tensione ai morsetti infatti è sempre maggiore della tensione che effettivamente si può considerare ai morsetti dell'ammittenza di magnetizzazione.

Si considera quindi la caduta di tensione dovuta alla resistenza di statore ed alla corrente di statore: durante la prova a carico variabile, per determinare le perdite nel ferro in ogni punto si dovranno interpolare le perdite nel ferro utilizzando non la tensione ai morsetti, ma quella ottenuta con l'espressione seguente, facendo riferimento a tensione concatenata:

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos\varphi\right)^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin\varphi\right]^2} \quad (65)$$

Dove U , P_1 , I ed R sono quelle ottenute nella prova a carico variabile e

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad (66)$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos\varphi^2} \quad (67)$$

Quindi, a carico nominale, il valore delle perdite nel ferro si ottiene per interpolazione sulla curva delle perdite nel ferro, passando dal valore U misurato ad un valore U_i minore ed utilizzando tale valore nell'interpolazione sulla curva. Si osserva che la caduta di tensione dovuta alla reattanza di dispersione è trascurata in quanto non facilmente determinabile. La determinazione delle perdite addizionali a carico si basa su misure per sottrazione ed estrapolazione. Si determinano prima le cosiddette perdite residue, in ogni punto della prova a carico, mediante sottrazione di diversi termini dalla potenza in ingresso:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad (68)$$

Dove P_1 è potenza in ingresso non corretta, P_2 è potenza meccanica in uscita, P_s sono le perdite di statore non corrette alla resistenza di prova, P_r sono le perdite di rotore non corrette riferite al valore effettivo di scorrimento, P_{fe} sono le perdite nel ferro, P_{fw} sono le perdite per attrito e ventilazione corrette all'effettivo scorrimento:

$$P_{fw} = P_{fw0} \cdot (1 - s)^{2.5} \quad (69)$$

I dati delle perdite residue devono essere filtrati, utilizzando l'analisi di regressione lineare che si basa sull'espressione delle perdite in funzione del quadrato della coppia di carico secondo la relazione:

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B \quad (70)$$

Con la pendenza A e l'intercetta B definite come:

$$A = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} \quad (71)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Lri}}{N} - A \cdot \frac{\sum_{i=1}^N T_i^2}{N} \quad (72)$$

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{\sqrt{[N \cdot \sum_{i=1}^N (T_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2] \cdot [N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}^2 - (\sum_{i=1}^N P_{Lri})^2]}} \quad (73)$$

Si consideri che B deve essere sensibilmente minore di P_{LL} a carico nominale (minore del 50%); altrimenti le misurazioni condotte sono da considerarsi errate.

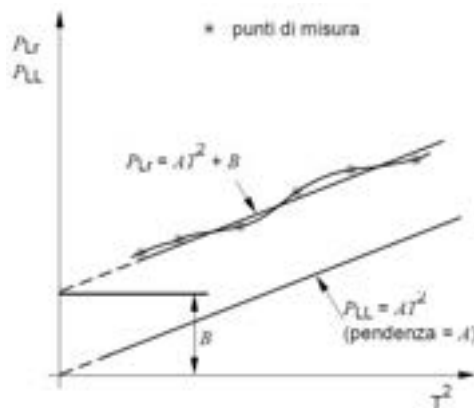


Fig.16. – Elaborazione delle perdite addizionali a partire dalle perdite residue mediante regressione lineare.

E' richiesto dalla norma di valutare la correlazione γ tra le perdite residue P_{Lr} ed il quadrato della coppia T; il coefficiente di correlazione è indice della correttezza delle misurazioni svolte.

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{\sqrt{[N \cdot \sum_{i=1}^N (T_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2] \cdot [N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}^2 - (\sum_{i=1}^N P_{Lri})^2]}} \quad (74)$$

Qualora il coefficiente di correlazione γ sia inferiore a 0,95 si può cancellare il punto peggiore e ripetere la regressione. Se γ aumenta fino a essere $\geq 0,95$ utilizzare questa seconda regressione; se γ resta inferiore a 0,95 la prova è insoddisfacente a causa di errori nella strumentazione o nelle letture di prova, o in entrambe. L'origine dell'errore dovrebbe essere indagata e corretta e la prova dovrebbe essere ripetuta. In caso di prove ben eseguite γ dovrebbe essere almeno pari a 0,98.

Verificata la correlazione, se A (pendenza) è stabilita, il valore delle perdite addizionali a carico si determinerà per ciascun punto di carico, utilizzando l'equazione:

$$P_{LL} = A \cdot T^2 \quad (75)$$

La determinazione finale del rendimento a carico nominale si effettua quindi mediante determinazione delle perdite totali, che sono pari a :

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL} \quad (76)$$

Il rendimento per un motore, con il metodo indicato sopra illustrato, è così esprimibile:

$$\eta = \frac{P_{1,\theta} - P_T}{P_{1,\theta}} = 1 - \frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_{1,\theta}} \quad (77)$$

La norma definisce anche il metodo diretto, nel quale la determinazione del rendimento si effettua mettendo a rapporto la potenza erogata, meccanica, con la potenza elettrica assorbita.

Al motore deve essere applicato il carico nominale, e deve essere portato all'equilibrio termico, con gradiente minore di 1 K ogni mezz'ora. Si dovrà misurare la potenza elettrica P_{el} , la tensione U, la corrente I, il numero di giri n, la coppia T e la temperatura del fluido di raffreddamento q_c .

Il rendimento diretto sarà semplicemente determinato come :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{P_1} \quad (78)$$

Al fine di consentire una proficua esecuzione delle prove, è stata redatta una scheda di collaudo per motori asincroni, che consenta di raccogliere in modo coerente i risultati delle misurazione ed i risultati dei calcoli delle varie grandezze.

La scheda è riportata nelle seguenti pagine, da Fig. 17a a 17l.

Scheda collaudo motore asincrono – pagina 1

Scheda di collaudo per motore asincrono in accordo con CEI 60034-2-1:2015 – metodo indiretto con separazione delle perdite e determinazione sperimentale delle perdite residue.

Luogo data.....

Dati di targa del motore:

Avvolgimenti di statore in: rame alluminio

NOTA: nel seguito le **incertezze composte** saranno indicate con *

1) Misura della resistenza degli avvolgimenti a temperatura ambiente

Temperatura ambiente $\theta_0 =$ (tra 15 e 30 °C) incertezza=.....

Resistenza degli avvolgimenti: $R_1=$; $R_2=$; $R_3=$; incertezza=.....

Resistenza media di statore: $R_0=$; incertezza* =.....

NOTA: Verificare la stabilità della frequenza di rete, entro +/- 0.1%. Registrare contenuto armonico e dissimmetrie nella terna di tensioni di alimentazione, durante tutte le prove. Monitorare la stabilità della temperatura del fluido di raffreddamento, che deve mantenersi costante durante le prove. LE MISURE DI POTENZA SI CONSIDERANO CON INSERZIONE DI 3 WATTMETRI CON CENTRO STELLA ARTIFICIALE; LE TENSIONI MISURATE SONO DI FASE.

2) Prova a carico nominale

Durata della fase di riscaldamento = (in minuti)


Temperatura della carcassa del motore all'equilibrio =

Misure dei parametri elettrici e meccanici:

Temperatura del fluido di raffreddamento $\theta_c =$ incertezza =.....

Tensione rms media delle fasi $U =$ incertezza =.....

Corrente rms media delle fasi $I =$ incertezza =.....

 Centro prof. Ing. S. Frazzetta - DED - Università del Calabria

Giugno 2018

Fig.17a. – Scheda collaudo, pagina 1

Scheda collaudo motore asincrono – pagina 2

Potenza elettrica attiva $P_1 = \dots\dots\dots$ Incertezza = $\dots\dots\dots$
 Numero di giri al minuto $n = \dots\dots\dots$ Incertezza = $\dots\dots\dots$
 Frequenza della tensione $f = \dots\dots\dots$ Incertezza = $\dots\dots\dots$
 Coppia erogata $T = \dots\dots\dots$ Incertezza = $\dots\dots\dots$
 Temperatura degli avvolgim. $\theta_w = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
 Resistenza a carico nominale $R = \dots\dots\dots$ Incertezza = $\dots\dots\dots$
 Coeff. di riporto alla temp. del fluido di raffreddamento: $k_0 = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$

dove $\theta_w = \frac{R}{R_0} (235 + \theta_0) - 235$ e $k_0 = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_0}{235 + \theta_w}$

per avvolgimenti in rame, (sostituire 235 con 225 per avvolgimenti in alluminio)

Scorimento: $s = 1 - \frac{P_2}{P_1}$ $s = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$

Potenza meccanica erogata $P_2 = \frac{2 \pi n T}{60}$ $P_2 = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$

3) Perdite di statore corrette in temperatura

$P_{s0} = P_1 \times k_0 = (1,5 \times I^2 \times R) \times k_0 = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$

4) Prove a carico variabile

Eeguire le misurazioni immediatamente al termine della prova a carico nominale.

Misurare la resistenza due volte, prima dell'applicazione del valore massimo di carico e dopo l'applicazione del valore minimo di carico.

Come valore di resistenza dal 100% del carico in su si considera il valore di misurato prima del valore massimo di carico. Per valori di carico minori, si considera la resistenza come variabile linearmente con il carico. Eeguire la prove con potenza meccanica applicata decrescente.

Coppia nominale = $\dots\dots\dots$

Valori di coppia da impostare sul freno:

$T_{125\%} = \dots\dots\dots$; $T_{115\%} = \dots\dots\dots$; $T_{100\%} = \dots\dots\dots$; $T_{75\%} = \dots\dots\dots$; $T_{50\%} = \dots\dots\dots$; $T_{25\%} = \dots\dots\dots$

Misure dei parametri elettrici e meccanici:

Resistenza degli avvolgimenti iniziale: $R = \dots\dots\dots$ Incertezza = $\dots\dots\dots$



Fig.17b. – Scheda collaudo, pagina 2

Scheda collaudo motore asincrono – pagina 3

a) 125% del carico U=..... Incertezza=

I=..... Incertezza=

P=..... Incertezza=

R=..... Incertezza* =

T=..... Incertezza=

n=..... Incertezza=

f=..... Incertezza=

s=..... Incertezza* =

b) 115% del carico U=..... Incertezza=

I=..... Incertezza=

P=..... Incertezza=

R=..... Incertezza* =

T=..... Incertezza=

n=..... Incertezza=

f=..... Incertezza=

s=..... Incertezza* =

c) 100% del carico U=..... Incertezza=

I=..... Incertezza=

P=..... Incertezza=

R=..... Incertezza* =

T=..... Incertezza=

n=..... Incertezza=

f=..... Incertezza=

s=..... Incertezza* =

d) 75 % del carico U=..... Incertezza=

I=..... Incertezza=

P=..... Incertezza=


R=..... Incertezza* =

T=..... Incertezza=

n=..... Incertezza=

f=..... Incertezza=

s=..... Incertezza* =



Ministero dell'Industria, Via J. F. Kennedy, 100 - 00147 Roma

Enea-MIR

Fig.17c. – Scheda collaudo, pagina 3

e) 50 % del carico U=..... Incertezza=.....
 I=..... Incertezza=.....
 P=..... Incertezza=.....
 R=..... Incertezza* =.....
 T=..... Incertezza=.....
 n=..... Incertezza=.....
 f=..... Incertezza=.....
 S=..... Incertezza* =.....

f) 25 % del carico U=..... Incertezza=.....
 I=..... Incertezza=.....
 P=..... Incertezza=.....
 R=..... Incertezza* =.....
 T=..... Incertezza=.....
 n=..... Incertezza=.....
 f=..... Incertezza=.....
 S=..... Incertezza* =.....

Resistenza degli avvolgimenti finale: R = Incertezza=.....

Per ogni punto di carico, determinare le perdite di statore con la resistenza ottenuta per interpolazione e corrette in temperatura, con la formula: $P_{s,0} = P_s \times k_0 = (1,5 \times I^2 \times R) \times k_0$

$P_{s,125\%} =$	incertezza=.....	$P_{s,0,125\%} =$	incertezza=.....
$P_{s,100\%} =$	incertezza=.....	$P_{s,0,100\%} =$	incertezza=.....
$P_{s,75\%} =$	incertezza=.....	$P_{s,0,75\%} =$	incertezza=.....
$P_{s,50\%} =$	incertezza=.....	$P_{s,0,50\%} =$	incertezza=.....
$P_{s,25\%} =$	incertezza=.....	$P_{s,0,25\%} =$	incertezza=.....

5) Prove a vuoto

Eeguire le misurazioni immediatamente al termine della prova a carico variabile. Misurare la resistenza due volte, prima dell'applicazione del valore massimo di tensione e dopo l'applicazione del valore minimo di tensione. Scollegare la macchina da torsionometro e freno. Eeguire le prove con tensione applicata decrescente, in modo rapido.



Fig.17d. – Scheda collaudo, pagina 4

Tensione nominale=.....

$U_{110\%} = \dots$; $U_{100\%} = \dots$; $U_{95\%} = \dots$; $U_{90\%} = \dots$;

$U_{60\%} = \dots$; $U_{50\%} = \dots$; $U_{40\%} = \dots$; $U_{30\%} = \dots$;

Resistenza degli avvolgimenti iniziale; R= Incertezza=.....

Misure dei parametri elettrici:

a) 110% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....

b) 100% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....

c) 95 % della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....

d) 90% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....

e) 60% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....

f) 50% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....

g) 40% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I =..... Incertezza=.....
 P =..... Incertezza=.....
 R =..... Incertezza=.....



Fig.17e. – Scheda collaudo, pagina 5

h) 30% della tensione U=..... Incertezza=.....
 I=..... Incertezza=.....
 P=..... Incertezza=.....
 R=..... Incertezza=.....

resistenza degli avvolgimenti finale: R = incertezza=.....

Determinare per ogni punto le perdite costanti, con l'espressione: $P_c = P_0 - P_s = P_{fw0} + P_w$ dove $P_s = 1,5 \times I_n^2 \times R_s$

P_c 110% = Incertezza* =
 P_c 100% = Incertezza* =
 P_c 95% = Incertezza* =
 P_c 90% = Incertezza* =
 P_c 80% = Incertezza* =
 P_c 50% = Incertezza* =
 P_c 30% = Incertezza* =

Utilizzare i punti di misura da 60% a 30% per determinare le perdite per attrito e ventilazione a velocità di sincronismo P_{fw0} con estrapolazione a 0 di P_c in funzione di U_n^2

$$P_s = C_1 \cdot U_n^2 + P_{fw0} \quad C_1 = \frac{6 \sum_{i=1}^n (P_{ci} \cdot U_{ni}^2) - \sum_{i=1}^n P_{ci} \sum_{i=1}^n U_{ni}^2}{6 \sum_{i=1}^n U_{ni}^2 - (\sum_{i=1}^n U_{ni})^2}$$

P_{fw0} = Incertezza* =

Utilizzare i punti di misura dal 110% al 90% per determinare la curva $P_w = P_c - P_{fw0}$ in funzione della tensione U (tensione di fase). Tale curva si deve utilizzare per determinare le perdite nel ferro della prova a carico nominale e nelle prove a carico variabile, considerando la caduta di tensione nella resistenza degli avvolgimenti di statore in funzione della resistenza di statore, dell'intensità e della fase della corrente assorbita, utilizzando la formula seguente:

$$U_f = \sqrt{\left(U - \frac{1}{2} \cdot I \cdot R \cdot \frac{P_1}{S \cdot D \cdot I} \right)^2 + \left[\frac{1}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{S \cdot D \cdot I} \right)^2} \right]^2} \quad \text{con } \cos \varphi = \frac{P_1}{S \cdot D \cdot I} \quad \text{e} \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{S \cdot D \cdot I} \right)^2}$$

considerando I, R e P_1 della prova a carico nominale e delle prove a carico variabile:

$U_{f90\%}$ = Incertezza* =
 $U_{f75\%}$ = Incertezza* =
 $U_{f60\%}$ = Incertezza* =
 $U_{f30\%}$ = Incertezza* =



Fig.17f. – Scheda collaudo, pagina 6

Scheda collaudo motore asincrono – pagina 7

$U_{75\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $U_{50\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $U_{25\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$

$$P_{Fe} = C_2 \cdot U_1^2 \quad C_2 = \frac{h \sum_{i=1}^n (P_{1i} \cdot U_{1i}^2) - \sum_{i=1}^n P_{1i} \sum_{i=1}^n U_{1i}^2}{n \sum_{i=1}^n U_{1i}^2 - (\sum_{i=1}^n U_{1i})^2}$$

Usando tali valori di tensione, a partire dalla curva P_{Fe} , determinare i valori delle perdite nel ferro per ogni valore di carico della prova a carico nominale e per le prove a carico variabile.

$P_{Fe\ 600\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{Fe\ 125\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{Fe\ 110\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{Fe\ 100\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{Fe\ 75\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{Fe\ 50\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{Fe\ 25\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$

6) Perdite di rotore corrette in temperatura

Determinare le perdite di rotore, poi anche corrette in temperatura, utilizzando le seguenti formule: $P_r = (P_1 - P_c - P_{fe}) \times s$ e $P_{r,0} = (P_1 - P_{c,0} - P_{fe}) \times s_0 = (P_1 - P_{c,0} - P_{fe}) \times s \times k_0$ con $s = 1 - (p \times n) / f$ a partire dai dati della prova a carico nominale, delle prove a carico variabile e delle prove a vuoto.

$P_{r\ 600\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 600\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{r\ 125\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 125\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{r\ 110\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 110\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{r\ 100\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 100\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{r\ 75\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 75\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{r\ 50\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 50\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$
 $P_{r\ 25\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$ $P_{r,0\ 25\%} = \dots\dots\dots$ incertezza* = $\dots\dots\dots$

7) Potenza elettrica in ingresso corretta in temperatura

Nel caso in cui la temperatura del fluido di raffreddamento sia diversa da 25°C, si deve correggere anche la potenza elettrica in ingresso a carico nominale, con la formula:

$P_{1,0} = P_1 \cdot (P_1 - P_{c,0} \neq P_1 - P_{r,0})$; si devono determinare quindi anche P_s e P_r non corrette, con le formule: $P_s = 1,5 \times I^2 \times R$ e $P_r = (P_1 - P_c - P_{fe}) \times s$ nel solo caso del carico nominale.



 settore prof. Ing. E. Fiorucci - DIME Università dell'Aquila Giugno 2018

Fig.17g. – Scheda collaudo, pagina 7

$P_s = \dots$ Incertezza* = \dots

$P_r = \dots$ Incertezza* = \dots

$P_{1,0} = \dots$ Incertezza* = \dots

B) Perdite addizionali a carico

Per la determinazione delle perdite addizionali a carico, per la prova a carico nominale, e per ogni valore di carico delle prove a carico variabile, si determini il valore delle perdite P_L con la formula:

$P_L = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{me}$ con $P_2 = 2 \times \pi \times T \times n$ potenza meccanica in uscita e $P_{me} = P_{me0} \times (1-s)^{2,5}$

$P_{L, 100\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 100\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 125\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 125\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 110\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 110\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 100\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 100\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 75\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 75\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 50\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 50\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 25\%} = \dots$ Incertezza* = \dots	$P_{me, 25\%} = \dots$ Incertezza* = \dots

$P_{L, 100\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 125\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 110\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 100\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 75\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 50\%} = \dots$ Incertezza* = \dots
$P_{L, 25\%} = \dots$ Incertezza* = \dots

Le perdite P_L sono esprimibili in funzione della coppia al quadrato con la formula: $P_L = AxT^2 + B$, con:

$$A = \frac{1 \cdot \sum (P_L \cdot T^2) - \sum P_L \cdot \sum T^2}{1 \cdot \sum T^4 - (\sum T^2)^2} \quad A = \dots \text{ incertezza*} = \dots$$

$$B = \frac{\sum P_L}{1} - A \cdot \frac{\sum T^2}{1} \quad B = \dots \text{ incertezza*} = \dots$$

Si determinino A e B ed il coefficiente γ di correlazione di P_L in funzione della coppia al quadrato:

$$\gamma = \frac{1 \cdot \sum (P_L \cdot T^2) - (\sum P_L) \cdot (\sum T^2)}{\sqrt{1 \cdot \sum T^4 - (\sum T^2)^2} \cdot \sqrt{1 \cdot \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2}} \quad \gamma = \dots$$

NOTA: Se γ è inferiore a 0,95 si elimina dal calcolo il punto peggiore, e si calcola nuovamente il coefficiente γ ; se è maggiore di 0,95 si considerano i rimanenti 5 punti per il calcolo e si calcolano



Fig.17h. – Scheda collaudo, pagina 8

nuovamente A e B. In caso negativo è necessario individuare la causa degli errori e ripetere le misurazioni. E' auspicabile un valore di γ almeno pari a 0,98.

Nota il valore di A, si ottengono i valori delle perdite addizionali a carico P_{Li} come $P_{Li}=AT^2$, per il valore di coppia a carico nominale e per ogni valore di coppia delle prove a carico variabile:

- $P_{Li, 90\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_{Li, 115\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_{Li, 130\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_{Li, 160\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_{Li, 75\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_{Li, 50\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_{Li, 25\%} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$

9) Perdite totali

Per il funzionamento a carico nominale, le perdite totali si determinano come:

$$P_T = P_{fw} + P_{wv} + P_{rot} + P_{Li} \quad \text{con } P_{fw} = P_{wv} \times (1-s)^{2.5}$$

- $P_T = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$
- $P_T = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$

10) Rendimento con metodo indiretto con separazione delle perdite e determinazione sperimentale delle perdite residue

Il rendimento (o efficienza) del motore a carico nominale si determina con la formula:

$$\eta = (P_{Li} - P_T) / P_{Li}$$

- $\eta_{nom} = \dots\dots\dots$ Incertezza* = $\dots\dots\dots$



Fig.17i. – Scheda collaudo, pagina 9

6 Determinazione delle incertezze composte in accordo con IEC 60034-2-1:2014 e JCGM 100:2008 (GUM).

Una volta eseguire le misurazioni ed effettuato il calcolo delle grandezze secondo quanto riportato al capitolo precedente, si dovrà procedere alla determinazione delle incertezze composte in accordo con la guida all'espressione dell'incertezza di misura JCGM 100:2008 (GUM) [4] già precedentemente citata.

Come già discusso nel capitolo 3.4, per le applicazioni di nostro interesse, si adotta la densità di probabilità uniforme, rettangolare di ampiezza $2a$, per ogni sorgente di incertezza di categoria B considerata relativamente alla strumentazione descritta.

I paragrafi seguenti illustrano in dettaglio come determinare i coefficienti di sensibilità, che descrivono come varia la stima della grandezza di uscita al variare delle misure delle grandezze in ingresso. Le incertezze composte sono da intendersi come incertezze tipo; l'incertezza estesa potrà essere definita al termine della misurazione considerando il fattore di copertura pari a 2 richiesta da [3].

6.1 L'incertezza nella misurazione delle temperature e della resistenza degli avvolgimenti

La temperatura raggiunta durante le prove da un avvolgimento può essere ottenuta con l'espressione seguente:

$$\theta_w = \frac{R_w}{R_0} (235 + \theta_0) - 235 \quad (79)$$

dove θ_0 è il valore iniziale di temperatura, misurato a macchina fredda ed in equilibrio termico con l'ambiente prima dell'esecuzione di ogni altra prova, con valore di incertezza pari ad $u(\theta_0)$; R_0 è la resistenza dell'avvolgimento misurata alla temperatura θ_0 , con incertezza pari a $u(R_0)$ ed R_w è il valore della resistenza degli avvolgimenti al termine di ogni prova, la cui incertezza è pari a $u(R_w)$.

L'incertezza $u_c(\theta_w)$ nella misurazione della temperatura degli avvolgimenti si può esprimere a partire dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial R_w} = \frac{\theta_0 + 235}{R_0} \quad (80)$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial R_0} = -\frac{R_w \cdot (\theta_0 + 235)}{R_0^2} \quad (81)$$

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial \theta_0} = \frac{R_w}{R_0} \quad (82)$$

$$u_c(\theta_w) = \sqrt{\left(\frac{\theta_0 + 235}{R_0}\right)^2 \cdot u^2(R_w) + \left(-\frac{R_w \cdot (\theta_0 + 235)}{R_0^2}\right)^2 \cdot u^2(R_0) + \left(\frac{R_w}{R_0}\right)^2 \cdot u^2(\theta_0)} \quad (83)$$

6.2 L'incertezza nella misurazione del fattore di correzione della temperatura.

I valori di misura delle resistenze degli avvolgimenti devono essere riportati ad una temperatura convenzionale di 25 °C del fluido di raffreddamento, secondo quanto prescritto in [5].

Il fattore di correzione della temperatura k_θ , impiegato per correggere sia i valori di resistenza che di scorrimento, è da determinarsi con la seguente relazione (ad esempio per avvolgimenti di statore in rame, coefficiente pari a 235) :

$$k_\theta = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (84)$$

dove θ_c è la temperatura del fluido di raffreddamento in ingresso al motore durante la prova, misurata con incertezza $u(\theta_c)$, θ_w è la temperatura degli avvolgimenti misurata come sopra in accordo con [5] al paragrafo 5.7.2, con incertezza $u_c(\theta_w)$.

La costante termica del materiale di cui sono costituiti gli avvolgimenti è assumibile pari a 235 per il rame, e 225 per l'alluminio.

Quando il fluido refrigerante primario o secondario sia l'acqua, la temperatura di riferimento è 25°C, come specificato in Tabella 4 della norma [15].

L'incertezza di misura di k_θ può essere espressa mediante le seguenti relazioni:

$$\frac{\partial k_\theta}{\partial \theta_w} = \frac{1}{235+\theta_w} - \frac{235+\theta_w+25-\theta_c}{(235+\theta_w)^2} \quad (85)$$

$$\frac{\partial k_\theta}{\partial \theta_c} = -\frac{1}{235+\theta_w} \quad (86)$$

$$u_c(k_\theta) = \sqrt{\left(\frac{1}{235+\theta_w} - \frac{235+\theta_w+25-\theta_c}{(235+\theta_w)^2}\right)^2 \cdot u_c^2(\theta_w) + \left(-\frac{1}{235+\theta_w}\right)^2 \cdot u^2(\theta_c)} \quad (87)$$

6.3 L'incertezza nella misurazione delle perdite negli avvolgimenti di statore

Le perdite negli avvolgimenti di statore in ogni punto di funzionamento a carico sono le seguenti, se non si applica nessuna correzione rispetto alla temperatura di prova:

$$P_s = 1.5 \cdot I^2 \cdot R \quad (88)$$

Le variazioni del carico meccanico erogato devono essere nell'intervallo dal 25% al 150% della potenza nominale del motore in prova, con almeno 6 punti di funzionamento. Quattro punti devono essere distribuiti in modo uniforme tra il 25% ed il 100% della potenza nominale; i rimanenti punti sono da distribuire in modo pressoché uniforme tra il 100% ed il 150% della potenza nominale.

Le prove devono partire dal valore di carico maggiore, procedendo per valori decrescenti fino al minimo, con l'accortezza di svolgere le prove in modo da evitare un sensibile raffreddamento della macchina.

Qualora le prove si svolgessero con temperatura del fluido di raffreddamento diverso dal valore normativo di 25 °C, è necessario introdurre una correzione, mediante il fattore di temperatura già sopra introdotto, per il valore della resistenza R_N :

$$P_{s,\theta} = 1.5 \cdot I^2 \cdot R_N \cdot k_\theta \quad (89)$$

Considerati i valori delle incertezze con cui sono note le grandezze I pari a $u(I)$, R_N pari a $u(R_N)$ e k_θ pari a $u_c(k_\theta)$ in (16), in accordo con l'espressione (1) l'incertezza $u_c(P_{s,\theta})$ nella misurazione di $P_{s,\theta}$ si può esprimere come:

$$u_c(P_{s,\theta}) = \sqrt{(3 \cdot I \cdot R_N \cdot k_\theta)^2 \cdot u^2(I) + (1.5 \cdot I^2 \cdot k_\theta)^2 \cdot u^2(R_N) + (1.5 \cdot I^2 \cdot R_N)^2 \cdot u^2(k_\theta)} \quad (90)$$

L'incertezza delle perdite di statore non corrette sono:

$$u_c(P_s) = \sqrt{(3 \cdot I \cdot R_N)^2 \cdot u^2(I) + (1.5 \cdot I^2)^2 \cdot u^2(R_N)} \quad (91)$$

6.4 Incertezza delle resistenze interpolate per la prova a carico variabile

Le resistenze si considerano variabili linearmente con il carico, inteso come carico meccanico percentuale. Quindi, si misurano prima dell'applicazione del carico massimo e dopo il minimo.

Per quanto riguarda le incertezze relative ai punti di carico 100%, 110% e 125% si considera l'incertezza di misura diretta della resistenza misurata prima dell'applicazione del carico massimo, per il carico a 25% si considera l'incertezza di misura diretta della resistenza misurata dopo l'applicazione del carico minimo.

Per i punti di carico a 50% e 75% si deve interpolare con la relazione:

$$R_x = \alpha \times P_x + \beta \quad (92)$$

$$\text{Con } \alpha = \frac{R_{max} - R_{min}}{P_{100\%} - P_{25\%}} \quad (93)$$

e

$$\beta = \frac{R_{min} \times P_{100\%} - R_{max} \times P_{25\%}}{P_{100\%} - P_{25\%}} \quad (94)$$

Le incertezze delle misure di R_{max} ed R_{min} sono dirette.

L'incertezza nella misurazione della potenza meccanica erogata P_2 è:

$$u_c(P_2) = \sqrt{(2\pi n)^2 \cdot u^2(T) + (2\pi T)^2 \cdot u^2(n)} \quad (95)$$

dove $u(T)$ ed $u(n)$ sono le incertezze nelle misurazioni della coppia e della velocità rotazionale.

Si ha:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_{max}} = \frac{1}{P_{100\%} - P_{25\%}}; \quad (96)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial R_{min}} = \frac{-1}{P_{100\%} - P_{25\%}}; \quad (97)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_{100\%}} = -\frac{R_{max} - R_{min}}{(P_{100\%} - P_{25\%})^2}; \quad (98)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P_{25\%}} = -\frac{R_{max} - R_{min}}{(P_{100\%} - P_{25\%})^2}; \quad (99)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial R_{max}} = -\frac{P_{25\%}}{P_{100\%} - P_{25\%}}; \quad (100)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial R_{min}} = \frac{P_{100\%}}{P_{100\%} - P_{25\%}} \quad (101)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial P_{100\%}} = -\frac{R_{min} \times P_{100\%} - R_{max} \times P_{25\%}}{(P_{100\%} - P_{25\%})^2} + \frac{R_{min}}{(P_{100\%} - P_{25\%})^2} \quad (102)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial P_{25\%}} = \frac{R_{min} \times P_{100\%} - R_{max} \times P_{25\%}}{(P_{100\%} - P_{25\%})^2} - \frac{R_{max}}{(P_{100\%} - P_{25\%})^2} \quad (103)$$

da cui:

$$u_c(\alpha) = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial R_{max}}\right)^2 \cdot u^2(R_{max}) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial R_{min}}\right)^2 \cdot u^2(R_{min}) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial P_{100\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{100\%}) + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial P_{25\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{25\%})}; \quad (104)$$

$$u_c(\beta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial R_{max}}\right)^2 \cdot u^2(R_{max}) + \left(\frac{\partial \beta}{\partial R_{min}}\right)^2 \cdot u^2(R_{min}) + \left(\frac{\partial \beta}{\partial P_{100\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{100\%}) + \left(\frac{\partial \beta}{\partial P_{25\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{25\%})}; \quad (105)$$

$$e \quad \frac{\partial R_x}{\partial P_x} = \alpha \quad (106)$$

$$\frac{\partial R_x}{\partial \alpha} = P_x \quad (107)$$

$$\frac{\partial R_x}{\partial \beta} = 1 \quad (108)$$

da cui:

$$u_c(R_x) = \sqrt{\alpha^2 \cdot u_c^2(P_x) + P_x^2 \cdot u_c^2(\alpha) + u_c^2(\beta)} \quad (109)$$

6.5 Incertezza delle resistenze interpolate per la prova a vuoto

Le resistenze si considerano variabili linearmente con la potenza elettrica a vuoto P_0 . Quindi, si misurano prima dell'applicazione del carico massimo e dopo il minimo.

L'incertezza delle resistenze a vuoto $R_{0110\%}$ e $R_{030\%}$ misurate ad inizio e fine della prova vuoto, per tensioni decrescenti, sono di tipo diretto, $u(R_{0110\%})$ e $u(R_{030\%})$; sono di tipo diretto le incertezze delle tensioni a vuoto U_{0x} , $u(U_{0x})$. Trattandosi di interpolazione lineare, le incertezze composte per i valori di tensione diversi dal 110% e dal 30% del valore nominale si ottengono con formule analoghe a quelle ottenute per l'interpolazione dei valori di resistenza in funzione del carico nelle prove a carico variabile.

$$R_{0x} = \sigma \times P_{0x} + \tau \quad (110)$$

$$\text{Con } \sigma = \frac{R_{0110\%} - R_{030\%}}{P_{0110\%} - P_{030\%}} \quad (111)$$

$$e \quad \tau = \frac{R_{030\%} \times P_{0110\%} - R_{0110\%} \times P_{030\%}}{P_{0110\%} - P_{030\%}} \quad (112)$$

Si ha:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial R_{0110\%}} = \frac{1}{P_{0110\%} - P_{030\%}} \quad (113)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial R_{030\%}} = \frac{-1}{P_{0110\%} - P_{030\%}} \quad (114)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_{100\%}} = -\frac{R_{0110\%} - R_{030\%}}{(P_{0110\%} - P_{030\%})^2} \quad (115)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_{030\%}} = -\frac{R_{0110\%} - R_{030\%}}{(P_{0110\%} - P_{030\%})^2} \quad (116)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial R_{0110\%}} = - \frac{P_{030\%}}{P_{0110\%} - P_{030\%}} \quad (117)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial R_{030\%}} = \frac{P_{0110\%}}{P_{0110\%} - P_{030\%}} \quad (118)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial P_{0110\%}} = - \frac{R_{030\%} \times P_{0110\%} - R_{0110\%} \times P_{030\%}}{(P_{0110\%} - P_{030\%})^2} + \frac{R_{030\%}}{(P_{0110\%} - P_{030\%})^2} \quad (119)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial P_{0110\%}} = \frac{R_{030\%} \times P_{0110\%} - R_{0110\%} \times P_{030\%}}{(P_{0110\%} - P_{030\%})^2} - \frac{R_{0110\%}}{(P_{0110\%} - P_{030\%})^2} \quad (120)$$

da cui:

$$u_c(\sigma) = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial R_{0110\%}}\right)^2 \cdot u^2(R_{0110\%}) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial R_{030\%}}\right)^2 \cdot u^2(R_{030\%}) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial P_{0110\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{0110\%}) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial P_{030\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{030\%})} \quad (121)$$

$$u_c(\tau) = \sqrt{\left(\frac{\partial \tau}{\partial R_{0110\%}}\right)^2 \cdot u^2(R_{0110\%}) + \left(\frac{\partial \tau}{\partial R_{030\%}}\right)^2 \cdot u^2(R_{030\%}) + \left(\frac{\partial \tau}{\partial P_{0110\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{0110\%}) + \left(\frac{\partial \tau}{\partial P_{030\%}}\right)^2 \cdot u^2(P_{030\%})} ; \quad (122)$$

$$e \quad \frac{\partial R_{0x}}{\partial P_{0x}} = \sigma \quad (123)$$

$$\frac{\partial R_{0x}}{\partial \sigma} = P_{0x} \quad (124)$$

$$\frac{\partial R_{0x}}{\partial \tau} = 1 \quad (125)$$

da cui:

$$u_c(R_x) = \sqrt{\sigma^2 \cdot u^2(P_{0x}) + P_{0x}^2 \cdot u_c^2(\sigma) + u_c^2(\tau)} \quad (126)$$

6.6 Incertezza nella misurazione delle perdite costanti durante le prove a vuoto

Le perdite costanti si ottengono dalle misure di potenza effettuate a vuoto P_0 , dalle quali si debbono sottrarre le perdite negli avvolgimenti di statore dovute alla corrente a vuoto I_0 , che non è trascurabile. Considerati i valori delle resistenze a vuoto R_0 con le relative incertezze definite al paragrafo precedente, si ha che le perdite costanti sono espresse da:

$$P_k = P_0 - 1.5 \cdot I_0^2 \cdot R_0 \quad (127)$$

Da cui:

$$u_c(P_k) = \sqrt{u(P_0)^2 + (3 \cdot I_0 \cdot R_0)^2 \cdot u(I_0)^2 + (1.5 \cdot I_0^2)^2 \cdot u_c(R_0)^2} \quad (128)$$

6.7 Incertezza nella misurazione delle perdite per attrito e ventilazione alla velocità sincronismo

Per effettuare la separazione delle perdite nelle prove a vuoto, le perdite per attrito e ventilazione alla velocità di sincronismo si ottengono con un metodo grafico, di regressione a zero.

Mediante estrapolazione di una retta al valore nullo di tensione, l'intercetta con l'asse a tensione nulla identifica le perdite per attrito e ventilazione P_{fwo} .

Per determinare l'incertezza di misura di P_{fwo} , si può utilizzare la seguente espressione, definendo le perdite costanti in funzione di U_0^2 , considerando una prima formula per l'elaborazione dei dati a bassi valori di tensione:

$$P_k = C_1 \cdot U_0^2 + P_{fwo} \quad (129)$$

Si utilizzeranno i valori ottenuti con tensione applicata dal 30% al 60% della tensione nominale. Il parametro C_1 può essere determinato per analogia con il coefficiente A, introdotto nel paragrafo relativo alle perdite addizionali della norma, mediante una regressione lineare basata sull'espressione delle perdite in funzione del quadrato dei valori di coppia misurati. Questo approccio verrà illustrato nei paragrafi seguenti del presente documento.

Quindi, C_1 può essere espresso come:

$$C_1 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{ki} \cdot U_{0i}^2) - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \quad (130)$$

E quindi le perdite P_{fwo} si possono esprimere come:

$$P_{fwo} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ki}}{N} - C_1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ki}}{N} - \left(\frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{ki} \cdot U_{0i}^2) - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} \right) \quad (131)$$

Se sono noti i valori delle incertezze nell'insieme dei dati di misura di U_{0i} e P_{ki} , pari a $u(U_{0i})$ e $u_c(P_{ki})$ rispettivamente, l'incertezza di P_{fwo} si può esprimere in accordo con le relazioni (2) e (3), poiché le grandezze considerate sono tra loro correlate:

$$\frac{\partial P_{fwo}}{\partial P_{ki}} = \frac{1}{N} + \frac{(\sum_{i=1}^N U_{0i}^2 - N \cdot U_{0i}^2) \cdot (\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} \quad (132)$$

$$\frac{\partial P_{fwo}}{\partial U_{0i}} = \frac{(2 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} - 2N \cdot U_{0i} \cdot P_{ki}) \cdot \frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N}}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} - \frac{2 \cdot U_{0i} (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{N \cdot (\sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2)} + \frac{(4 \cdot N \cdot U_{0i}^3 - 4 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2) \cdot \frac{\sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N} \cdot (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{(N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2)^2} \quad (133)$$

quindi, in accordo con (2) e (3), l'incertezza $u_c(P_{fwo})$ di P_{fwo} è pari a:

$$u_c(P_{fwo}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial P_{fwo}}{\partial P_{ki}}\right)^2 \cdot u^2(P_{ki}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial P_{fwo}}{\partial U_{0i}}\right)^2 \cdot u^2(U_{0i}) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial P_{fwo}}{\partial P_{ki}}\right) \cdot \left(\frac{\partial P_{fwo}}{\partial U_{0j}}\right) \cdot u(P_{ki}) \cdot u(U_{0j}) \cdot r(P_{ki}, U_{0j})}$$

(134)

Dove $r(P_{ki}, U_{0j})$ è il coefficiente di correlazione di U_0 e P_k variabile nell'intervallo +/-1:

$$r(P_{ki}, U_{0j}) = \frac{u(P_{ki}, U_{0j})}{u(P_{ki}) \cdot u(U_{0j})}$$

(135)

con $u(P_{ki}, U_{0j})$ pari alla covarianza di U_0 e P_k .

L'incertezza di C_1 non è richiesta in questa prima elaborazione dei dati.

6.8 Incertezza nella misurazione delle perdite nel ferro

Per determinare la curva delle perdite nel ferro, è necessario utilizzare lo stesso approccio sopra indicato, introducendo la formula:

$$P_k = C_2 \cdot U_0^2 + P_{fw}$$

(136)

Nella quale si utilizzano i valori ottenuti con tensione applicata dal 110% al 90% della tensione nominale.

In questo caso, si pone attenzione al calcolo di C_2 che sarà utilizzato per la determinazione delle perdite nel ferro, per esprimere le stesse nelle prove a carico come:

$$P_{fe} = C_2 \cdot U_i^2$$

(137)

come si vedrà in seguito.

Il parametro C_2 può essere determinato come

$$C_2 = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{ki} \cdot U_{0i}^2) - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2}$$

(138)

L'incertezza del parametro C_2 è esprimibile come:

$$\frac{\partial C_2}{\partial P_{ki}} = \frac{N \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N U_{0i}^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2}$$

(139)

$$\frac{\partial C_2}{\partial U_{0i}} = \frac{2N \cdot P_{ki} \cdot U_{0i} - 2 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki}}{N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2} - \frac{(4N \cdot U_{0i}^3 - 4 \cdot U_{0i} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2) \cdot (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot U_{0i}^2 - \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^2)}{[N \cdot \sum_{i=1}^N U_{0i}^4 - (\sum_{i=1}^N U_{0i}^2)^2]^2}$$

(140)

E l'incertezza $u_c(C_2)$ di C_2 è pari a:

$$u_c(C_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial C_2}{\partial P_{ki}}\right)^2 \cdot u^2(P_{ki}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial C_2}{\partial U_{0i}}\right)^2 \cdot u^2(U_{0i}) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial C_2}{\partial P_{ki}}\right) \cdot \left(\frac{\partial C_2}{\partial U_{0j}}\right) \cdot u(P_{ki}) \cdot u(U_{0j}) \cdot r(P_{ki}, U_{0j})}$$

(141)

L'incertezza delle perdite nel ferro è determinata come:

$$u_c(P_{fe}) = \sqrt{U_r^4 \cdot u_c^2(C_2) + (2 \cdot C_2 \cdot U_r)^2 \cdot u_c^2(U_r)}$$

(142)

Con U_r e $u_c^2(U_r)$ descritti nel seguito:

6.9 Incertezza nella determinazione della tensione interna da utilizzare nel calcolo delle perdite nel ferro in corrispondenza dei punti della prova a carico variabile

Le perdite nel ferro durante le prove a carico, nominale o variabile, si devono determinare correggendo il valore della tensione applicata, tenendo conto della caduta di tensione resistiva negli avvolgimenti di statore e di intensità e fase della corrente, nelle condizioni di carico. Tali valori di tensione U_i si inseriranno nella formula (133).

Considerando i valori di misura ottenuti nella prova a carico nominale ed a carico variabile IN RIFERIMENTO A TENSIONI STELLATE, si ha:

Date la fase φ della corrente I :

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{3 \cdot U \cdot I}$$

(143)

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{3 \cdot U \cdot I}\right)^2}$$

(144)

Dalle quali si ottiene il valore della tensione stellata U_i :

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{1}{2} \cdot I \cdot R \cdot \frac{P_1}{3 \cdot U \cdot I}\right)^2 + \left[\frac{1}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{3 \cdot U \cdot I}\right)^2}\right]^2}$$

(145)

Dati i valori di incertezza nelle misurazioni di P_1 pari a $u(P_1)$, I pari a $u(I)$, R pari a $u_c(R)$ e U pari a $u(U)$, l'incertezza $u_c(U)$ nella misurazione di U_r può essere ottenuta per mezzo delle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial U_r}{\partial U} = \frac{2 \cdot \left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right) \cdot \left(\frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U^2} + 1\right) + \frac{R^2 \cdot P_1^2}{2 \cdot U^2}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{9 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}$$

(146)

$$\frac{\partial U_r}{\partial I} = - \frac{I \cdot R^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{3 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right) - \frac{R^2 \cdot P_1^2}{2 \cdot U^2 \cdot I}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{9 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}$$

(147)

$$\frac{\partial U_r}{\partial R} = - \frac{\frac{I \cdot R^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{9 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{2} + \frac{P_1 \cdot \left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)}{U}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{9 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}} \quad (148)$$

$$\frac{\partial U_r}{\partial P_1} = - \frac{\frac{R \cdot \left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)}{U} + \frac{R^2 \cdot P_1}{2 \cdot U^2}}{2 \cdot \sqrt{\left(U - \frac{R \cdot P_1}{2 \cdot U}\right)^2 - \frac{R^2 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{P_1^2}{9 \cdot I^2 \cdot U^2} - 1\right)}{4}}} \quad (149)$$

$$u_c(U_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial U_r}{\partial U}\right)^2 \cdot u^2(U) + \left(\frac{\partial U_r}{\partial I}\right)^2 \cdot u^2(I) + \left(\frac{\partial U_r}{\partial R}\right)^2 \cdot u_c^2(R) + \left(\frac{\partial U_r}{\partial P_1}\right)^2 \cdot u^2(P_1)} \quad (150)$$

Quindi,

$$P_{fe} = C \cdot U_r^2 \quad (151)$$

La cui incertezza:

$$u_c(P_{fe}) = \sqrt{U_r^4 \cdot u_c^2(C) + (2 \cdot C \cdot U_r)^2 \cdot u^2(U_r)} \quad (152)$$

6.10 Incertezza nella determinazione dello scorrimento e perdite di rotore corrette in temperatura

Noti i valori della potenza in ingresso P_1 , delle perdite di statore P_s , delle perdite nel ferro P_{fe} , della velocità di rotazione n e della frequenza di alimentazione f , con le relative incertezze, si hanno come perdite di rotore non corrette in temperatura

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s \quad (153)$$

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad (154)$$

Dove p è il numero di coppie polari del motore. La (153) non contiene correzioni in temperatura, che debbono essere introdotte se le prove sono effettuate a temperatura del fluido di raffreddamento diversa da 25°C.

La correzione delle perdite negli avvolgimenti di rotore, in ogni punto di funzionamento durante le prove a carico, si ottengono correggendo il valore dello scorrimento, facendo riferimento al fattore di temperatura k_θ già descritto.

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe}) \cdot s_\theta \quad (155)$$

dove $P_{s,\theta}$ ed $s_\theta = sk_\theta$ rappresentano le perdite di statore e lo scorrimento corretti alla temperatura di riferimento del fluido refrigerante pari a 25°C.

Se si considera lo scorrimento espresso in rotazioni al minuto (rpm), si ha:

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f} \quad (156)$$

$$\text{da cui } s_{\theta} = \left(1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f}\right) \cdot k_{\theta} \quad (157)$$

Dati i valori delle incertezze di n pari a $u(n)$, di f pari a $u(f)$ e di k_{θ} pari a $u_c(k_{\theta})$, l'incertezza $u_c(s_{\theta})$ nella misurazione dello scorrimento s_{θ} è espressa da:

$$u_c(s_{\theta}) = \sqrt{\left(-\frac{p \cdot k_{\theta}}{60 \cdot f}\right)^2 u^2(n) + \left(\frac{p \cdot n \cdot k_{\theta}}{60 \cdot f^2}\right)^2 u^2(f) + \left(1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f}\right)^2 u^2(k_{\theta})} \quad (158)$$

L'incertezza $u_c(P_{r,\theta})$ nella misurazione di $P_{r,\theta}$ si può esprimere a partire dall'incertezza con cui sono noti P_1 , pari a $u(P_1)$, $P_{s,\theta}$ pari a $u_c(P_{s,\theta})$, P_{fe} pari a $u_c(P_{fe})$ e s_{θ} pari a $u_c(s_{\theta})$:

$$u_c(P_{r,\theta}) = \sqrt{(s_{\theta})^2 \cdot \left(u^2(P_1) + u_c^2(P_{s,\theta}) + u_c^2(P_{fe})\right) + (P_1 - P_{s,\theta} - P_{fe})^2 \cdot u_c^2(s_{\theta})} \quad (159)$$

L'incertezza delle perdite di rotore non corrette è:

$$u_c(P_r) = \sqrt{(s)^2 \cdot \left(u^2(P_1) + u_c^2(P_s) + u_c^2(P_{fe})\right) + (P_1 - P_s - P_{fe})^2 \cdot u_c^2(s)} \quad (160)$$

6.11 Incertezza nella determinazione della potenza elettrica in ingresso, corretta in temperatura

Nel caso in cui la temperatura del fluido di raffreddamento sia diversa da 25°C, si deve correggere anche la potenza elettrica in ingresso, secondo l'espressione:

$$P_{1,\theta} = P_1 - (P_s - P_{s,\theta} + P_r - P_{r,\theta}); \quad (161)$$

Da cui si ha, note le incertezze di P_1 pari a $u(P_1)$, di P_s pari a $u_c(P_s)$, di P_r pari a $u_c(P_r)$ e di $P_{r,\theta}$ pari a $u_c(P_{r,\theta})$:

$$u_c(P_{1,\theta}) = \sqrt{u^2(P_1) + u_c^2(P_s) + u_c^2(P_{s,\theta}) + u_c^2(P_r) + u_c^2(P_{r,\theta})} \quad (162)$$

6.12 Incertezza nella determinazione della potenza meccanica

La potenza meccanica erogata dal motore può essere indicata come prodotto della coppia T per la velocità di rotazione in rpm:

$$P_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot n}{60} \quad (163)$$

Dalla quale, se si considerano le incertezze nella misurazione di coppia $u(T)$ e della velocità di rotazione $u(n)$, si ha:

$$u_c(P_2) = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}\right)^2 \cdot u^2(T) + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot T}{60}\right)^2 \cdot u^2(n)} \quad (164)$$

6.13 Incertezza nella determinazione delle perdite per attrito e ventilazione in funzione dello scorrimento della prova nominale e delle prove a carico variabile.

Le perdite per attrito e ventilazione sono funzione dello scorrimento, per cui il valore delle perdite per attrito e ventilazione a vuoto P_{fwo} devono essere corrette, con la relazione:

$$P_{fw} = P_{fwo} \times (1-s)^{2.5} \quad (165)$$

Dalla quale, note le incertezze delle perdite P_{fwo} , pari a $u_c(P_{fwo})$ e dello scorrimento s pari a $u(s)$, si ha:

$$u_c(P_{fwo}) = \sqrt{(1-s)^5 \cdot u^2(P_{fwo}) + [2.5 \cdot P \cdot (1-s)^{1.5}]^2 \cdot u^2(s)} \quad (166)$$

6.14 L'incertezza nella misurazione delle perdite addizionali a carico.

Le perdite addizionali a carico P_{Lr} devono essere valutate per ciascun punto di lavoro durante le prove a carico, mediante sottrazione dal valore della potenza attiva in ingresso dei seguenti contributi:

- potenza meccanica in uscita
- perdite negli avvolgimenti di statore valutate con il valore effettivo della resistenza degli avvolgimenti durante le prove;
- perdite nel ferro;
- perdite per attrito e ventilazione;
- perdite negli avvolgimenti di rotore, valutate con il valore effettivo dello scorrimento.

Si ha la formula:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_{s,\theta} - P_{r,\theta} - P_{fw} - P_{fe} \quad (167)$$

Con incertezza pari a:

$$u_c(P_{Lr}) = \sqrt{u^2(P_1) + u^2(P_2) + u^2(P_{s,\theta}) + u^2(P_{r,\theta}) + u^2(P_{fw}) + u^2(P_{fe})} \quad (168)$$

Considerate le perdite addizionali a carico e valutate in ogni punto di carico, la norma [5] al paragrafo prescrive che mediante una regressione lineare, nella quale le perdite siano espresse in funzione del quadrato della coppia erogata, si valuti la presenza di un termine costante da sottrarre alle perdite:

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B \quad (169)$$

dove T è la coppia misurata, mentre A e B sono ottenuti considerando al meno 6 punti di carico, e mediante la seguente relazioni:

$$A = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} \quad (170)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Lri}}{N} - A \cdot \frac{\sum_{i=1}^N T_i^2}{N} \quad (171)$$

Le relazioni (170) e (171) hanno significato solo se P_{Lri} e T_i sono correlate tra loro; pertanto, la verifica di questa condizione richiede la determinazione del fattore di correlazione γ :

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{\sqrt{[N \cdot \sum_{i=1}^N (T_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2] \cdot [N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}^2 - (\sum_{i=1}^N P_{Lri})^2]}} \quad (172)$$

Se γ è minore di 0,95 l'operatore è autorizzato a rimuovere dall'elenco delle misurazioni adottare quella che risulta la peggiore, come scostamento dalle altre, e può ripetere le procedure di calcolo.

Se, dopo questa correzione, γ cresce e diviene ≥ 0.95 , questa seconda regressione è adottabile per determinare A e B . Se γ rimane al di sotto di 0,95, le misurazioni ottenute complessivamente non si considerano soddisfacenti. Le cause alla base di questa situazione di scarsa qualità delle misurazioni devono essere investigate e tutte le prove devono essere ripetute.

Il valore auspicabile di γ è almeno 0.98.

Dati i valori di A , se $\gamma \geq 0.95$, le perdite addizionali P_{LL} in funzione della coppia T in ogni punto di carico sono:

$$P_{LL}(T) = A \cdot T^2 \quad (173)$$

La valutazione del fattore A non è priva di incertezza, in accordo con la (2); si può ottenere tale incertezza tenendo in conto le osservazioni on [5] riguardanti la propagazione dell'incertezza per grandezze correlate, come P_{Lri} e T_i sembrano essere in accordo con [8].

A partire dalle incertezze definite in (6) e (54), dato A a partire dalla (55), le derivate parziali per P_{Lri} e T_i sono:

$$\frac{\partial A}{\partial P_{Lri}} = \frac{N \cdot T_i^2 - \sum_{i=1}^N T_i^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} \quad (174)$$

$$\frac{\partial A}{\partial T_i} = \frac{2N \cdot P_{Lri} \cdot T_{Lri} - 2 \cdot T_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} - \frac{(4N \cdot T_i^3 - 4 \cdot T_i \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2) \cdot (N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot T_i^2 - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2)}{[N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2]^2} \quad (175)$$

L'incertezza di A è quindi:

$$u_c(A) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial A}{\partial P_{Lri}} \right)^2 \cdot u^2(P_{Lri}) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial A}{\partial T_i} \right)^2 \cdot u^2(T_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial A}{\partial P_{Lri}} \right) \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial T_j} \right) \cdot u(P_{Lri}) \cdot u(T_j) \cdot r(P_{Lri}, T_j)} \quad (176)$$

Dove il fattore di correlazione $r(P_{Lri}, T_j)$ per P_{Lri} e T_i è:

$$r(P_{Lri}, T_j) = \frac{u(P_{Lri}, T_j)}{u(P_{Lri}) \cdot u(T_j)} \quad (177)$$

ed $u(P_{Lri}, T_j)$ è la covarianza di P_{Lr} e T .

L'incertezza nella misurazione delle perdite addizionali P_{LL} secondo la (58) è:

$$u_c(P_{LL}) = \sqrt{T^4 \cdot u_c^2(A) + (2 \cdot A \cdot T)^2 \cdot u^2(T)} \quad (178)$$

6.15 L'incertezza nella determinazione dell'efficienza con il metodo indiretto

L'incertezza nella determinazione indiretta dell'efficienza η , come descritta [5], richiede la valutazione dell'ammontare delle perdite per ogni punto di funzionamento, ed è espressa da:

$$\eta = 1 - \frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_1} \quad (179)$$

L'incertezza di η si può ottenere con il medesimo approccio sopra illustrato per le precedenti grandezze, quindi:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_1} = \frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_1^2} \quad (180)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_{s,\theta}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{r,\theta}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{fw}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{fe}} = \frac{\partial \eta}{\partial P_{LL}} = -\frac{1}{P_1} \quad (181)$$

E l'incertezza $u_c(\eta)$ è:

$$u_c(\eta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial P_1}\right)^2 \cdot u(P_1)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{s,\theta}}\right)^2 \cdot u(P_{s,\theta})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{r,\theta}}\right)^2 \cdot u(P_{r,\theta})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{fw}}\right)^2 \cdot u(P_{fw})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{fe}}\right)^2 \cdot u(P_{fe})^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{LL}}\right)^2 \cdot u(P_{LL})^2} \quad (182)$$

Da cui:

$$u_c(\eta) = \sqrt{\left(\frac{P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{fw} + P_{fe} + P_{LL}}{P_1^2}\right)^2 \cdot u(P_1)^2 + \left(-\frac{1}{P_1}\right)^2 \cdot (u(P_{s,\theta})^2 + u(P_{r,\theta})^2 + u(P_{fw})^2 + u(P_{fe})^2 + u(P_{LL})^2)} \quad (183)$$

7 L'incertezza nella determinazione dell'efficienza con il metodo diretto

A differenza di quanto sopra riportato per il metodo indiretto, per la determinazione dell'incertezza dell'efficienza con il metodo diretto sono necessarie solo due grandezze, quali la potenza meccanica erogata, P_2 , pari al prodotto della velocità rotazionale n e della coppia T , e della potenza attiva assorbita P_1 . Non vi sono correlazioni tra le misurazione delle grandezze considerate, per cui si può scrivere:

$$\eta_d = \frac{P_2}{P_1} \quad (184)$$

La cui incertezza è

$$u_c(\eta_d) = \sqrt{\left(\frac{1}{P_1}\right)^2 \cdot u(P_2)^2 + \left(-\frac{P_2}{P_1^2}\right)^2 \cdot u(P_1)^2} \quad (185)$$

dove l'incertezza di P_2 è espressa in (52).

8 Sviluppo di algoritmi di calcolo delle varie tipologie di grandezze e relative incertezze per la determinazione del rendimento.

8.1 Elenco delle grandezze in ingresso

A valle delle osservazioni svolte in precedenza in questo documenti, come prima fase propedeutica allo sviluppo degli algoritmi di calcolo, è necessario definire ed elencare la grandezze con le relative incertezze che, in seguito alle misurazioni eseguite, dovranno essere utilizzate come ingressi per lo svolgimento dei calcoli. Di seguito ne è riportato l'elenco completo, in diverse tabelle.

Tabella 4 - Misure di temperatura e resistenza

Grandezza misurata	incertezza
Materiale degli avvolgimenti di statore: rame (costante 235) alluminio (costante 225)	-
θ_o Temperatura avvolgimenti motore freddo [°C]	$u(\theta_o)$ [°C]
R_o Resistenza avvolgimenti motore freddo [Ω]	$u(R_o)$ [Ω]
R_{wcn} Resistenza avvolgimenti motore fine prova a carico nominale [Ω]	$u(R_{wcn})$ [Ω]
θ_c Temperatura fluido raffreddamento [°C]	$u(\theta_c)$ [°C]
R_{wicv} Resistenza avvolgimenti motore inizio prova a carico nominale [Ω]	$u(R_{wicv})$ [Ω]
R_{wfcv} Resistenza avvolgimenti motore inizio prova a carico nominale [Ω]	$u(R_{wfcv})$ [Ω]
R_{wio} Resistenza avvolgimenti motore inizio prova a vuoto [Ω]	$u(R_{wio})$ [Ω]
R_{wfo} Resistenza avvolgimenti motore fine prova a vuoto [Ω]	$u(R_{wfo})$ [Ω]

Tabella 4 - Misure nella prova a carico nominale

Grandezza misurata	incertezza
U_{cn} Tensione rms media prova a carico nominale [V]	$u(U_{cn})$ [V]
I_{cn} Corrente rms media prova a carico nominale [A]	$u(I_{cn})$ [A]
P_{cn} Potenza attiva prova a carico nominale [W]	$u(P_{cn})$ [W]
f_{cn} Frequenza della tensione prova a carico nominale [Hz]	$u(f_{cn})$ [Hz]
n_{cn} Velocità rotazione prova a carico nominale [rpm]	$u(n_{cn})$ [rpm]
T_{cn} Coppia prova a carico nominale [Nm]	$u(T_{cn})$ [Nm]

Tabella 6 - Misure nella prova a carico variabile

Grandezza misurata	incertezza
$U_{125\%}$ Tensione rms media prova a carico 125% [V]	$u(U_{125\%})$ [V]
$I_{125\%}$ Corrente rms media prova a carico 125% [A]	$u(I_{125\%})$ [A]
$P_{125\%}$ Potenza attiva prova a carico 125% [W]	$u(P_{125\%})$ [W]
$f_{125\%}$ frequenza della tensione prova a carico 125% [Hz]	$u(f_{125\%})$ [Hz]
$n_{125\%}$ velocità rotazione prova a carico 125% [rpm]	$u(n_{125\%})$ [rpm]
$T_{125\%}$ coppia prova a carico 125% [Nm]	$u(T_{125\%})$ [Nm]
$U_{115\%}$ Tensione rms media prova a carico 115% [V]	$u(U_{115\%})$ [V]
$I_{115\%}$ Corrente rms media prova a carico 115% [A]	$u(I_{115\%})$ [A]

P _{115%} Potenza attiva prova a carico 115% [W]	u(P _{115%}) [W]
f _{115%} frequenza della tensione prova a carico 115% [Hz]	u(f _{115%}) [Hz]
n _{115%} velocità rotazione prova a carico 115% [rpm]	u(n _{115%}) [rpm]
T _{115%} coppia prova a carico 115% [Nm]	u(T _{115%}) [Nm]
U _{100%} Tensione rms media prova a carico 100% [V]	u(U _{100%}) [V]
I _{100%} Corrente rms media prova a carico 100% [A]	u(I _{100%}) [A]
P _{100%} Potenza attiva prova a carico 100% [W]	u(P _{100%}) [W]
f _{100%} frequenza della tensione prova a carico 100% [Hz]	u(f _{100%}) [Hz]
n _{100%} velocità rotazione prova a carico 100% [rpm]	u(n _{100%}) [rpm]
T _{100%} coppia prova a carico 100% [Nm]	u(T _{100%}) [Nm]
U _{75%} Tensione rms media prova a carico 75% [V]	u(U _{75%}) [V]
I _{75%} Corrente rms media prova a carico 75% [A]	u(I _{75%}) [A]
P _{75%} Potenza attiva prova a carico 75% [W]	u(P _{75%}) [W]
f _{75%} frequenza della tensione prova a carico 75% [Hz]	u(f _{75%}) [Hz]
n _{75%} velocità rotazione prova a carico 75% [rpm]	u(n _{75%}) [rpm]
T _{75%} coppia prova a carico 75% [Nm]	u(T _{75%}) [Nm]
U _{50%} Tensione rms media prova a carico 50% [V]	u(U _{50%}) [V]
I _{50%} Corrente rms media prova a carico 50% [A]	u(I _{50%}) [A]
P _{50%} Potenza attiva prova a carico 50% [W]	u(P _{50%}) [W]
f _{50%} frequenza della tensione prova a carico 50% [Hz]	u(f _{50%}) [Hz]
n _{50%} velocità rotazione prova a carico 50% [rpm]	u(n _{50%}) [rpm]
T _{50%} coppia prova a carico 50% [Nm]	u(T _{50%}) [Nm]
U _{25%} Tensione rms media prova a carico 25% [V]	u(U _{25%}) [V]
I _{25%} Corrente rms media prova a carico 25% [A]	u(I _{25%}) [A]
P _{25%} Potenza attiva prova a carico 25% [W]	u(P _{25%}) [W]
f _{25%} frequenza della tensione prova a carico 25% [Hz]	u(f _{25%}) [Hz]
n _{25%} velocità rotazione prova a carico 25% [rpm]	u(n _{25%}) [rpm]
T _{25%} coppia prova a carico 25% [Nm]	u(T _{25%}) [Nm]

Tabella 7 - Misure nella prova a vuoto

Grandezza misurata	incertezza
U _{o110%} Tensione rms media prova a vuoto 110% [V]	u(U _{o110%}) [V]
I _{o110%} Corrente rms media prova a vuoto 110% [A]	u(I _{o110%}) [A]
P _{o110%} Potenza attiva prova a vuoto 110% [W]	u(P _{o110%}) [W]

$U_{o100\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 100% [V]	$u(U_{o100\%})$ [V]
$I_{o100\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 100% [A]	$u(I_{o100\%})$ [A]
$P_{o100\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 100% [W]	$u(P_{o100\%})$ [W]
$U_{o95\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 95% [V]	$u(U_{o95\%})$ [V]
$I_{o95\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 95% [A]	$u(I_{o95\%})$ [A]
$P_{o95\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 95% [W]	$u(P_{o95\%})$ [W]
$U_{o90\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 90% [V]	$u(U_{o90\%})$ [V]
$I_{o90\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 90% [A]	$u(I_{o90\%})$ [A]
$P_{o90\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 90% [W]	$u(P_{o90\%})$ [W]
$U_{o60\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 60% [V]	$u(U_{o60\%})$ [V]
$I_{o60\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 60% [A]	$u(I_{o60\%})$ [A]
$P_{o60\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 60% [W]	$u(P_{o60\%})$ [W]
$U_{o50\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 50% [V]	$u(U_{o50\%})$ [V]
$I_{o50\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 50% [A]	$u(I_{o50\%})$ [A]
$P_{o50\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 50% [W]	$u(P_{o50\%})$ [W]
$U_{o40\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 40% [V]	$u(U_{o40\%})$ [V]
$I_{o40\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 40% [A]	$u(I_{o40\%})$ [A]
$P_{o40\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 40% [W]	$u(P_{o40\%})$ [W]
$U_{o30\%}$ Tensione rms media prova a vuoto 30% [V]	$u(U_{o30\%})$ [V]
$I_{o30\%}$ Corrente rms media prova a vuoto 30% [A]	$u(I_{o30\%})$ [A]
$P_{o30\%}$ Potenza attiva prova a vuoto 30% [W]	$u(P_{o30\%})$ [W]

Riassumendo, sono richieste dalla normativa i valori sperimentali di un numero minimo di 8 valori di temperatura e resistenza, qualora durante la prova vi sia stabilità della temperatura del fluido di raffreddamento, cui si aggiungono 42 valori di grandezze di funzionamento del motore per le prove a carico nominale ed a carico variabile e 24 valori per la prove a vuoto per un totale di 74. Considerando anche i relativi valori di incertezza, per la determinazione del rendimento con metodo della separazione delle perdite, è necessario disporre di 148 dati, almeno.

8.2 Elenco delle grandezze calcolate

Successivamente, è necessario definire il numero di grandezze che dovranno essere calcolate per poter definire le diverse perdite, che saranno necessarie per la determinazione del rendimento; ciascuna grandezza calcolata dovrà essere corredata della corrispondente incertezza composta.

Tabella 8 - Grandezze calcolate, resistenze e temperature

Grandezza calcolata	Incertezza composta
θ_w temperatura degli avvolgimenti del motore a fine prova a carico nominale [°C]	$u(\theta_w)$ [°C]
K_θ fattore di correzione della temperatura	$u(K_\theta)$
$R_{125\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova a carico 125% [Ω]	$u(R_{125\%})$ [Ω]
$R_{115\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova a carico 115% [Ω]	$u(R_{115\%})$ [Ω]
$R_{100\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova a carico 100% [Ω]	$u(R_{100\%})$ [Ω]
$R_{75\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova a carico 75% [Ω]	$u(R_{75\%})$ [Ω]
$R_{50\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova a carico 50% [Ω]	$u(R_{50\%})$ [Ω]
$R_{25\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova a carico 25% [Ω]	$u(R_{25\%})$ [Ω]
$R_{o110\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 110% [Ω]	$u(R_{o110\%})$ [Ω]
$R_{o100\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 100% [Ω]	$u(R_{o100\%})$ [Ω]
$R_{o95\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 95% [Ω]	$u(R_{o95\%})$ [Ω]
$R_{o90\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 90% [Ω]	$u(R_{o90\%})$ [Ω]
$R_{o60\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 60% [Ω]	$u(R_{o60\%})$ [Ω]
$R_{o50\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 50% [Ω]	$u(R_{o50\%})$ [Ω]
$R_{o40\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 40% [Ω]	$u(R_{o40\%})$ [Ω]
$R_{o30\%}$ Resistenza avvolgimenti motore prova vuoto 30% [Ω]	$u(R_{o30\%})$ [Ω]

Tabella 9 - Grandezze calcolate, potenze

Grandezza calcolata	Incertezza composta
$P_{in\theta}$ Potenza in ingresso a carico nominale corretta in temperatura [W]	$u(P_{in\theta})$ [W]
P_m Potenza meccanica a carico nominale [W]	$u(P_m)$ [W]
$P_{m125\%}$ Potenza meccanica prova a carico variabile 125% [W]	$u(P_{m125\%})$ [W]
$P_{m115\%}$ Potenza meccanica prova a carico variabile 115% [W]	$u(P_{m115\%})$ [W]
$P_{m100\%}$ Potenza meccanica prova a carico variabile 100% [W]	$u(P_{m100\%})$ [W]
$P_{m75\%}$ Potenza meccanica prova a carico variabile 75% [W]	$u(P_{m75\%})$ [W]
$P_{m50\%}$ Potenza meccanica prova a carico variabile 50% [W]	$u(P_{m50\%})$ [W]
$P_{m25\%}$ Potenza meccanica prova a carico variabile 25% [W]	$u(P_{m25\%})$ [W]

Tabella 10 - Grandezze calcolate, tensioni interne per determinazione delle perdite nel ferro

Grandezza calcolata	Incertezza composta
$U_{int125\%}$ tensione interne prova a carico variabile 125% [V]	$u(U_{int125\%})$ [V]
$U_{int115\%}$ tensione interne prova a carico variabile 115% [V]	$u(U_{int115\%})$ [V]
$U_{int100\%}$ tensione interne prova a carico variabile 100% [V]	$u(U_{int100\%})$ [V]

$U_{int75\%}$ tensione interne prova a carico variabile 75% [V]	$u(U_{int75\%})$ [V]
$U_{int50\%}$ tensione interne prova a carico variabile 50% [V]	$u(U_{int50\%})$ [V]
$U_{int25\%}$ tensione interne prova a carico variabile 25% [V]	$u(U_{int25\%})$ [V]

Tabella 11- Grandezze calcolate, perdite negli avvolgimenti di statore

Grandezza calcolata	Incertezza composta
P_s Perdite avvolgimento di statore a carico nominale [W]	$u(P_s)$ [W]
$P_{s\theta}$ Perdite avvolgimento di statore a carico nominale corrette in temperatura [W]	$u(P_{s\theta})$ [W]
$P_{s\theta125\%}$ Perdite avvolgimento di statore prova a carico variabile corrette in temperatura 125% [W]	$u(P_{s\theta125\%})$ [W]
$P_{s\theta115\%}$ Perdite avvolgimento di statore prova a carico variabile corrette in temperatura 115% [W]	$u(P_{s\theta115\%})$ [W]
$P_{s\theta100\%}$ Perdite avvolgimento di statore prova a carico variabile corrette in temperatura 100% [W]	$u(P_{s\theta100\%})$ [W]
$P_{s\theta75\%}$ Perdite avvolgimento di statore prova a carico variabile corrette in temperatura 75% [W]	$u(P_{s\theta75\%})$ [W]
$P_{s\theta50\%}$ Perdite avvolgimento di statore prova a carico variabile corrette in temperatura 50% [W]	$u(P_{s\theta50\%})$ [W]
$P_{s\theta25\%}$ Perdite avvolgimento di statore prova a carico variabile corrette in temperatura 25% [W]	$u(P_{s\theta25\%})$ [W]

Tabella 12- Grandezze calcolate, perdite costanti prova a vuoto

Grandezza calcolata	Incertezza composta
$P_{c110\%}$ perdite costanti prova a vuoto 110% [W]	$u(P_{c110\%})$ [W]
$P_{c100\%}$ perdite costanti prova a vuoto 100% [W]	$u(P_{c100\%})$ [W]
$P_{c95\%}$ perdite costanti prova a vuoto 95% [W]	$u(P_{c95\%})$ [W]
$P_{c90\%}$ perdite costanti prova a vuoto 90% [W]	$u(P_{c90\%})$ [W]
$P_{c60\%}$ perdite costanti prova a vuoto 60% [W]	$u(P_{c60\%})$ [W]
$P_{c50\%}$ perdite costanti prova a vuoto 50% [W]	$u(P_{c50\%})$ [W]
$P_{c40\%}$ perdite costanti prova a vuoto 40% [W]	$u(P_{c40\%})$ [W]
$P_{c30\%}$ perdite costanti prova a vuoto 30% [W]	$u(P_{c30\%})$ [W]

Tabella 13- Grandezze calcolate, perdite nel ferro

Grandezza calcolata	Incertezza composta
$P_{fe125\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 125% [W]	$u(P_{fe125\%})$ [W]
$P_{fe115\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 115% [W]	$u(P_{fe115\%})$ [W]
$P_{fe100\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 100% [W]	$u(P_{fe100\%})$ [W]
$P_{fe75\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 75% [W]	$u(P_{fe75\%})$ [W]
$P_{fe50\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 50% [W]	$u(P_{fe50\%})$ [W]
$P_{fe25\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 25% [W]	$u(P_{fe25\%})$ [W]

Tabella 14- Grandezze calcolate, scorrimento

Grandezza calcolata	Incertezza composta
s_n scorrimento prova a carico nominale [W]	$u(S_n\%)$
$s_{n\theta}$ scorrimento prova a carico nominale corretto in temperatura[W]	$u(S_{n\theta}\%)$
$s_{125\%}$ scorrimento prova a carico variabile 125% [W]	$u(S_{125\%})$
$s_{115\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 115% [W]	$u(S_{115\%})$
$s_{100\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 100% [W]	$u(S_{100\%})$
$s_{75\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 75% [W]	$u(S_{75\%})$
$s_{50\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 50% [W]	$u(S_{50\%})$
$s_{25\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 25% [W]	$u(S_{25\%})$
$s_{\theta 125\%}$ scorrimento prova a carico variabile 125% [W]	$u(S_{\theta 125\%})$
$s_{\theta 115\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 115% [W]	$u(S_{\theta 115\%})$
$s_{\theta 100\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 100% [W]	$u(S_{\theta 100\%})$
$s_{\theta 75\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 75% [W]	$u(S_{\theta 75\%})$
$s_{\theta 50\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 50% [W]	$u(S_{\theta 50\%})$
$s_{\theta 25\%}$ perdite nel ferro prova a carico variabile 25% [W]	$u(S_{\theta 25\%})$

Tabella 15- Grandezze calcolate, perdite negli avvolgimenti di rotore

Grandezza calcolata	Incertezza composta
P_r Perdite avvolgimento di rotore a carico nominale [W]	$u(P_r)$ [W]
$P_{r\theta 125\%}$ Perdite avvolgimento di rotore prova a carico variabile corrette in temperatura 125% [W]	$u(P_{r\theta 125\%})$ [W]
$P_{r\theta 115\%}$ Perdite avvolgimento di rotore prova a carico variabile corrette in temperatura 115% [W]	$u(P_{r\theta 115\%})$ [W]
$P_{r\theta 100\%}$ Perdite avvolgimento di rotore prova a carico variabile corrette in temperatura 100% [W]	$u(P_{r\theta 100\%})$ [W]
$P_{r\theta 75\%}$ Perdite avvolgimento di rotore prova a carico variabile corrette in temperatura 75% [W]	$u(P_{r\theta 75\%})$ [W]
$P_{r\theta 50\%}$ Perdite avvolgimento di rotore prova a carico variabile corrette in temperatura 50% [W]	$u(P_{r\theta 50\%})$ [W]
$P_{r\theta 25\%}$ Perdite avvolgimento di rotore prova a carico variabile corrette in temperatura 25% [W]	$u(P_{r\theta 25\%})$ [W]

Tabella 16- Grandezze calcolate, perdite per attrito e ventilazione

Grandezza calcolata	Incertezza composta
P_{fwo} Perdite attrito e ventilazione a velocità di sincronismo [W]	$u(P_{fwo})$ [W]
$P_{fw125\%}$ Perdite attrito e ventilazione prova a carico variabile 125%[W]	$u(P_{fw125\%})$ [W]
$P_{fw115\%}$ Perdite attrito e ventilazione prova a carico variabile 115%[W]	$u(P_{fw115\%})$ [W]
$P_{fw100\%}$ Perdite attrito e ventilazione prova a carico variabile 100%[W]	$u(P_{fw100\%})$ [W]
$P_{fw75\%}$ Perdite attrito e ventilazione prova a carico variabile 75%[W]	$u(P_{fw75\%})$ [W]
$P_{fw50\%}$ Perdite attrito e ventilazione prova a carico variabile 50%[W]	$u(P_{fw50\%})$ [W]
$P_{fw25\%}$ Perdite attrito e ventilazione prova a carico variabile 25%[W]	$u(P_{fw25\%})$ [W]

Tabella 17- Grandezze calcolate, perdite residue

Grandezza calcolata	Incertezza composta
$P_{Lr125\%}$ Perdite residue prova a carico variabile 125% [W]	$u(P_{Lr125\%})$ [W]
$P_{Lr115\%}$ Perdite residue prova a carico variabile 115% [W]	$u(P_{Lr115\%})$ [W]
$P_{Lr100\%}$ Perdite residue prova a carico variabile 100% [W]	$u(P_{Lr100\%})$ [W]
$P_{Lr75\%}$ Perdite residue prova a carico variabile 75% [W]	$u(P_{Lr75\%})$ [W]
$P_{Lr50\%}$ Perdite residue prova a carico variabile 50% [W]	$u(P_{Lr50\%})$ [W]
$P_{Lr25\%}$ Perdite residue prova a carico variabile 25% [W]	$u(P_{Lr25\%})$ [W]

Tabella 18- Grandezze calcolate, perdite addizionali

Grandezza calcolata	Incertezza composta
A coefficiente [W/(Nm) ²]	$u(A)$ [W/(Nm) ²]
B coefficiente [W]	-
$P_{LL125\%}$ Perdite addizionali prova a carico variabile 125% [W]	$u(P_{LL125\%})$ [W]
$P_{LL115\%}$ Perdite addizionali prova a carico variabile 115% [W]	$u(P_{LL115\%})$ [W]
$P_{LL100\%}$ Perdite addizionali prova a carico variabile 100% [W]	$u(P_{LL100\%})$ [W]
$P_{LL75\%}$ Perdite addizionali prova a carico variabile 75% [W]	$u(P_{LL75\%})$ [W]
$P_{LL50\%}$ Perdite addizionali prova a carico variabile 50% [W]	$u(P_{LL50\%})$ [W]
$P_{LL25\%}$ Perdite addizionali prova a carico variabile 25% [W]	$u(P_{LL25\%})$ [W]

Tabella 19- Grandezze calcolate, perdite totali e rendimento

Grandezza calcolata	Incertezza composta
P_{tot} perdite totali a carico nominale [W]	$u(P_{tot})$ [W]
η_{ind} rendimento indiretto a carico nominale corretto in temperatura	$u(\eta_{ind})$
η_{dir} rendimento diretto a carico nominale	$u(\eta_{dir})$

Riassumendo, la normativa richiede il calcolo di: una temperatura degli avvolgimenti, il fattore di correzione in temperatura, 14 valori di resistenza, 8 valori di potenza, 8 valori di tensioni interne, 14 valori di scorrimento, 49 valori di perdite, un valore di correlazione ed il rendimento nominale; si tratta in totale di almeno 97 valori, e considerando le corrispondenti incertezze composte, si ha un totale di 194 valori da calcolare.

In totale, tra grandezze misurate in ingresso con le relative incertezze, e le grandezze calcolate con le relative incertezze, è necessario gestire un totale di 342 dati, come minimo.

8.3 Implementazione della libreria di funzioni per il calcolo delle grandezze e delle relative incertezze composte

Il calcolo delle grandezze sopra elencate necessita dello sviluppo di una libreria di funzioni, ciascuna delle quali verrà proposta in codice simile al C, con le rispettive grandezze in ingresso ed uscita. Con l'espressione "variabili in ingresso" si intenderanno le grandezze misurate direttamente o grandezze calcolate con altre funzioni già implementate; le "variabili in uscita" saranno le grandezze calcolate, che potranno essere a loro

volta utilizzate come ingressi per successive funzioni. Con questo approccio è possibile implementare la modularità, la scalabilità e la manutenibilità del codice che in seguito potrà essere implementato. Si osserva che non verranno utilizzate nel codice lettere in alfabeto greco, né caratteri in apice o pedice.

8.3.1 Calcolo della temperatura degli avvolgimenti di statore.

Variabili in ingresso

coeff: Materiale degli avvolgimenti di statore: rame (costante 235) alluminio (costante 225)	
qo Temperatura avvolgimenti motore freddo [°C]	uqo [°C]
Ro Resistenza avvolgimenti motore freddo [Ω]	uRo [Ω]
Rw Resistenza avvolgimenti motore fine prova a carico nominale [Ω]	uRw [Ω]

Variabili in uscita:

qw temperatura degli avvolgimenti del motore a fine prova a carico nominale [°C]	uqw [°C]
--	----------

Codice:

```

qw=(Rw/Ro)*(K+qo)-coeff;
float64 a;
a=(qo-coeff)/Ro;
float64 b;
b=-(Rw/Ro**2)*(qo+coeff);
float64 c;
c=Rw/Ro;
uqw=sqrt(a**2*uRw**2+b**2*uRo**2+c**2*uqo**2);
    
```

8.3.2 Calcolo della potenza meccanica erogata

Variabili in ingresso

nx velocità di rotazione [rpm]	unx [rpm]
Tx coppia erogata [Nm]	uTx [Nm]

Variabili in uscita:

P2x potenza meccanica erogata [W]	uP2 [W]
-----------------------------------	---------

Codice:

```

P2x=2*pi*Tx*nx/60;
float64 a;
a=2*pi*nx/60;
float64 b;
b=2*pi*Tx;
uP2x=sqrt((a/60)**2*uTx**2+b**2*(unx/60)**2);
    
```

8.3.3 Calcolo del fattore di riporto alla temperatura del fluido di raffreddamento

Variabili in ingresso

coeff: Materiale degli avvolgimenti di statore: rame (costante 235) alluminio (costante 225)	
qc temperatura degli fluido di raffreddamento [°C]	uqc [°C]
qw temperatura degli avvolgimenti del motore a fine prova a carico nominale [°C]	uqw [°C]

Variabili in uscita:

Kq fattore di correzione della temperatura	u(Kq)
--	-------

Codice:

```

Kq=(coeff+qw+25-qc)/(coeff+qw);
float64 a;
a=(1/(coeff+qw))-((coeff+qw+25+qc)/((coeff+qw)**2));
float64 b;
b=-1/(coeff+qw);
uKq=sqrt(a**2*uqw**2+b**2*uqc**2);

```

8.3.4 Calcolo delle perdite negli avvolgimenti di statore

Variabili in ingresso

I corrente di statore [A]	uI [A]
R resistenza degli avvolgimenti di statore [Ω]	uR [Ω]
Kq fattore di correzione della temperatura	uKq

Variabili in uscita:

Ps perdite negli avvolgimenti di statore [W]	uPs [W]
Psq perdite negli avvolgimenti di statore corrette in temperatura [W]	uPsq [W]

Codice:

```

Ps=1.5*I**2*R;
Psq=Ps*Kq;
float64 a;
a=3*I*R;
float64 b;
b=1.5*I**2;
uPs=sqrt(a**2*uI**2+b**2*uR**2);
float64 c;
c=1.5*I**2*R;
uPsq=sqrt((a*Kq)**2*uI**2+(b*Kq)**2*uR**2+c**2*uKq**2);

```

8.3.5 Calcolo delle resistenze interpolate nella prova a carico variabile

Variabili in ingresso

Rmax resistenza degli avvolgimenti di statore inizio prova a carico variabile [Ω]	uRmax [Ω]
Rmin resistenza degli avvolgimenti di statore fine prova a carico variabile [Ω]	uRmin [Ω]
P100 potenza meccanica erogata a carico 100% durante prova a carico variabile [W]	uP100 [W]
P25 potenza meccanica erogata a carico 25% durante prova a carico variabile [W]	uP25 [W]
P50 potenza meccanica erogata a carico 50% durante prova a carico variabile [W]	uP50 [W]
P75 potenza meccanica erogata a carico 100% durante prova a carico variabile [W]	uP75 [W]

Variabili in uscita:

R50 resistenza degli avvolgimenti di statore al 50% durante prova a carico variabile [Ω]	uR50 [Ω]
R75 resistenza degli avvolgimenti di statore al 75% durante prova a carico variabile [Ω]	uR75 [Ω]

Codice:

```

float64 alfa;
float64 beta;
alfa=(Rmax-Rmin)/(P100-P25);
beta=(Rmin*P100-Rmax*P25)/(P100-P25);
float64 a;
a=1/(P100-P25);
float64 b;
b=-1/(P100-P25);
float64 c;
c=-(Rmax-Rmin)/(P100-P25)**2;
float64 d;
d=(Rmax-Rmin)/(P100-P25)**2;
float64 e;
e=-P25/(P100-P25);
float64 f;
f=P100/(P100-P25);
float64 g;
g=-(Rmin*P100-Rmax*P25)/(P100-P25)**2+Rmin/(P100-P25)**2;
float64 h;
h=(Rmin*P100-Rmax*P25)/(P100-P25)**2-Rmax/(P100-P25)**2;
float64 ualfa;
ualfa=sqrt(a**2*uRmax**2+b**2*uRmin**2+c**2*uP100**2+d**2*uP25**2);
float64 ubeta;
ubeta=sqrt(e**2*uRmax**2+f**2*uRmin**2+g**2*uP100**2+h**2*uP25**2);
R50=alfa*P50+beta;
R75=alfa*P75+beta;
uR75=sqrt(alfa**2*uP75**2+P75**2*ualfa**2+ubeta**2);
uR50=sqrt(alfa**2*uP50**2+P50**2*ualfa**2+ubeta**2);
    
```

8.3.6 Calcolo delle resistenze interpolate nella prova a vuoto

Variabili in ingresso

Ro110 resistenza degli avvolgimenti di statore al 110% della tensione prova a vuoto [Ω]	uRo110 [Ω]
Ro30 resistenza degli avvolgimenti di statore al 30% della tensione prova a vuoto [Ω]	uRo30 [Ω]
Po110 potenza assorbita al 110% della tensione durante prova a vuoto [W]	uPo110 [W]
Po30 potenza assorbita al 30% della tensione durante prova a vuoto [W]	uPo30 [W]

Variabili in uscita:

Rox resistenza degli avvolgimenti di statore al valore x% della tensione prova a vuoto [Ω]	uRox [Ω]
---	-------------------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Rox per tensioni tra 100% e 40%, estremi inclusi.

Codice:

```
float64 sigma;
float64 tau;
sigma=(Ro110-Ro30)/(Po110-Po30);
tau=(Ro30*Po110-Ro110*Po30)/(Po110-Po30);
Rox=sigma*Pox+tau;
float64 a;
a=1/(Po110-Po30);
float64 b;
b=-1/(Po110-Po30);
float64 c;
c=-(Ro110-Ro30)/(Po110-Po30)**2;
float64 d;
d=(Ro110-Ro30)/(Po110-Po30)**2;
float64 e;
e=-Po30/(Po110-Po30);
float64 f;
f=Po30/(Po110-Po30);
float64 g;
g=(-(Ro30*Po110-Ro110*Po30)/(Po110-Po30)**2)+Ro30/(Po110-Po30)**2;
float64 h;
h=((Ro30*Po110-Ro110*Po30)/(Po110-Po30)**2)-Ro110/(Po110-Po30)**2;
float64 usigma;
usigma=sqrt(a**2*uRo110**2+b**2*uRo30**2+c**2*uPo110**2+d**2*uPo30**2);
float64 utau;
utau=sqrt(e**2*uRo110**2+f**2*uRo30**2+g**2*uPo110**2+h**2*uPo30**2);
uRox=sqrt(sigma**2*uPox**2+Pox**2*usigma**2+utau**2);
```

8.3.7 Calcolo delle perdite costanti

Variabili in ingresso

Rox resistenza degli avvolgimenti di statore al valore x% della tensione prova a vuoto [Ω]	uRox [Ω]
lox corrente di statore al valore x% della tensione prova a vuoto [Ω]	ulox [Ω]
Pox potenza assorbita al valore x% della tensione prova a vuoto [W]	uPo110 [W]

Variabili in uscita:

Pkx perdite costanti al valore x% della tensione prova a vuoto [W]	uPkx [W]
--	----------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Pkx per tensioni tra 110% e 30%, estremi inclusi.

Codice:

$$P_{kx} = P_{ox} - 1.5 \cdot I_{ox}^2 \cdot R_{ox};$$

$$uP_{kx} = \sqrt{uP_{ox}^2 + (-3 \cdot R_{ox} \cdot I_{ox})^2 + uI_{ox}^2 + (-1.5 \cdot I_{ox}^2)^2 \cdot uR_{ox}^2};$$

8.3.8 Calcolo delle perdite per attrito e ventilazione alla velocità di sincronismo

Variabili in ingresso

Uo30 tensione media 30% durante la prova a vuoto [V]	uUo30 [V]
Uo40 tensione media 40% durante la prova a vuoto [V]	uUo40 [V]
Uo50 tensione media 50% durante la prova a vuoto [V]	uUo50 [V]
Uo60 tensione media 60% durante la prova a vuoto [V]	uUo60 [V]
Pk30 perdite costanti al valore 30% della tensione prova a vuoto [W]	uPk30 [W]
Pk40 perdite costanti al valore 40% della tensione prova a vuoto [W]	uPk40 [W]
Pk50 perdite costanti al valore 50% della tensione prova a vuoto [W]	uPk50 [W]
Pk60 perdite costanti al valore 60% della tensione prova a vuoto [W]	uPk60 [W]

Variabili in uscita:

Pfwo perdite per attrito e ventilazione alla velocità di sincronismo [W]	uPfwo [W]
--	-----------

Codice:

```
float64 a;
a=(4*(Pk30*Uo30**2+Pk40*Uo40**2+Pk50*Uo50**2+Pk60*Uo60**2))-
(Pk30+Pk40+Pk50+Pk60)*(Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2);
float64 b;
b=4*(Uo30**4+Uo40**4+Uo50**4+Uo60**4)-(Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2)**2;
float64 C1;
C1=a/b;

Pfwo=((Pk30+Pk40+Pk50+Pk60)/4)-C1*(Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2)/4;

float64 c30;
c30=1/4+(((Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2)-
4*Uo30**2)*(Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2)/4)/b;

float64 c40;
c40=1/4+(((Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2)-
4*Uo40**2)*(Uo30**2+Uo40**2+Uo50**2+Uo60**2)/4)/b;
```

float64 c50;

$$c50 = 1/4 + (((Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) - 4 * Uo50^{**2}) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) / b;$$

float64 c60;

$$c60 = 1/4 + (((Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) - 4 * Uo60^{**2}) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) / b;$$

float64 d30;

$$d30 = (((2 * Uo30 * (Pk30 + Pk40 + Pk50 + Pk60) - 2 * 4 * Uo30 * Pk30) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) / b) - (2 * Uo30 * a) / (4 * b) + ((4 * 4 * Uo30^{**3} - 4 * Uo30 * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2})) * ((Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) * a) / b^{**2};$$

float64 d40;

$$d40 = (((2 * Uo40 * (Pk30 + Pk40 + Pk50 + Pk60) - 2 * 4 * Uo40 * Pk30) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) / b) - (2 * Uo40 * a) / (4 * b) + ((4 * 4 * Uo40^{**3} - 4 * Uo40 * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2})) * ((Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) * a) / b^{**2};$$

float64 d50;

$$d50 = (((2 * Uo50 * (Pk30 + Pk40 + Pk50 + Pk60) - 2 * 4 * Uo50 * Pk30) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) / b) - (2 * Uo50 * a) / (4 * b) + ((4 * 4 * Uo50^{**3} - 4 * Uo50 * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2})) * ((Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) * a) / b^{**2};$$

float64 d60;

$$d60 = (((2 * Uo60 * (Pk30 + Pk40 + Pk50 + Pk60) - 2 * 4 * Uo60 * Pk30) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) / b) - (2 * Uo60 * a) / (4 * b) + ((4 * 4 * Uo60^{**3} - 4 * Uo60 * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2})) * ((Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2}) / 4) * a) / b^{**2};$$

corr = (4 * (Pk30 * Uo30^{**2} + Pk40 * Uo40^{**2} + Pk50 * Uo50^{**2} + Pk60 * Uo60^{**2}) -

$$(Pk30 + Pk40 + Pk50 + Pk60) * (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2})) / \text{sqrt}((4 * (Uo30^{**4} + Uo40^{**4} + Uo50^{**4} + Uo60^{**4}) - (Uo30^{**2} + Uo40^{**2} + Uo50^{**2} + Uo60^{**2})^{**2}) * (4 * (Pk30^{**2} + Pk40^{**2} + Pk50^{**2} + Pk60^{**2}) - (Pk30 + Pk40 + Pk50 + Pk60)^{**2}));$$

$$uPfw = \text{sqrt}((c30^{**2} * uPk30^{**2} + c40^{**2} * uPk40^{**2} + c50^{**2} * uPk50^{**2} + c60^{**2} * uPk60^{**2}) + (d30^{**2} * uUo30^{**2} + d40^{**2} * uUo40^{**2} + d50^{**2} * uUo50^{**2} + d60^{**2} * uUo60^{**2}) + 2 * \text{corr} * ((c30 * uPk30 + c40 * uPk40 + c50 * uPk50 + c60 * uPk60) * (d30 * uUo30 + d40 * uUo40 + d50 * uUo50 + d60 * uUo60)));$$

8.3.9 Calcolo delle tensioni interne per la determinazione delle perdite nel ferro

Variabili in ingresso

Pinx potenza assorbita al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPinx [W]
Uinx tensione media al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [V]	uUinx [V]
linx corrente media al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [A]	ulinx [A]
Rinx resistenza degli avvolgimenti di statore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [Ω]	uRinx [Ω]

Variabili in uscita:

Uintx tensione interna media al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [V]	uUinx [V]
--	-----------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Uintx corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice:

```
float64 cosf;
cosf=Pinx/(3*Uinx*linx);

float64 sinf;
sinf=sqrt(1-(Pinx/(3*Uinx*linx))**2);

Uinx=sqrt((Uinx-(0.5)*linx*Rinx*cosf)**2+((0.5)*linx*Rinx*sinf)**2);

float64 d;

d=2*sqrt((Uinx-(Rinx*Pinx)/(6*Uinx))**2-(Rinx**2*linx**2*(cosf**2-1))/4);

float64 a;
a=((2*(Uinx-
((Rinx*Pinx)/(6*Uinx))*((Rinx*Pinx)/(6*Uinx**2))+1))+((Rinx**2+Pinx**2)/(18*Uinx**2)))/d;

float64 b;
b=-(((linx*Rinx**2)*(cosf**2-1)/2)-((Rinx**2*Pinx**2)/(18*Uinx**2*linx)))/d;

float64 c;
c=-(((linx**2*Rinx)*((Pinx**2)/(9*linx**2*Uinx**2))-1))/2+((Pinx*(Uinx-
Rinx*Pinx)/(6*Uinx)))/(3*Uinx))/d;

float64 e;
e=-(((Rinx*(Uinx-(Rinx*Pinx))/(6*Uinx))*(1/(3*Uinx)))+(Rinx**2*Pinx)/(18*Uinx**2))/d;

uUinx=sqrt(a**2*uUinx**2+b**2*ulinx**2+c**2*uRinx**2+e**2*uPinx**2);
```

8.3.10 Calcolo delle perdite nel ferro

Variabili in ingresso

Uo90 tensione media 90% durante la prova a vuoto [V]	uUo90 [V]
Uo95 tensione media 95% durante la prova a vuoto [V]	uUo95 [V]
Uo100 tensione media 100% durante la prova a vuoto [V]	uUo100 [V]
Uo110 tensione media 110% durante la prova a vuoto [V]	uUo110 [V]
Pk90 perdite costanti al valore 90% della tensione prova a vuoto [W]	uPk90 [W]
Pk95 perdite costanti al valore 95% della tensione prova a vuoto [W]	uPk95 [W]
Pk100 perdite costanti al valore 100% della tensione prova a vuoto [W]	uPk100 [W]
Pk110 perdite costanti al valore 110% della tensione prova a vuoto [W]	uPk110 [W]
Uinx tensione interna media al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [V]	uUinx [V]

Variabili in uscita:

Pfex perdite nel ferro al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [V]	uPfex [V]
--	-----------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Pfex corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice:

```
float64 a;
a=(4*(Pk90*Uo90**2+Pk95*Uo95**2+Pk100*Uo100**2+Pk110*Uo110**2))-
(Pk90+Pk95+Pk100+Pk110)*(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2);
float64 b;
b=4*(Uo90**4+Uo95**4+Uo100**4+Uo110**4)-(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2)**2;
float64 C2;
C2=a/b;

float64 c90;
c90=((4*Uo90**2)-
(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2))/(4*(Uo90**4+Uo95**4+Uo100**4+Uo110**4)-
(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2)**2);

float64 c95;
c90=((4*Uo95**2)-
(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2))/(4*(Uo90**4+Uo95**4+Uo100**4+Uo110**4)-
(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2)**2);

float64 c100;
c90=((4*Uo100**2)-
(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2))/(4*(Uo90**4+Uo95**4+Uo100**4+Uo110**4)-
(Uo90**2+Uo95**2+Uo100**2+Uo110**2)**2);

float64 c110;
```

$$c90 = \frac{(4 \cdot U_{o110}^2) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)}{(4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2)}$$

float64 d90;

$$d90 = \frac{(2 \cdot 4 \cdot Pk90 \cdot U_{o90} - 2 \cdot U_{o90} \cdot (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110)) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2) - ((4 \cdot 4 \cdot U_{o90}^3 - 4 \cdot U_{o90} \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)) \cdot (4 \cdot (Pk90 \cdot U_{o90}^2 + Pk95 \cdot U_{o95}^2 + Pk100 \cdot U_{o100}^2 + Pk110 \cdot U_{o110}^2) - (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110) \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2))) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2)}$$

float64 d95;

$$d95 = \frac{(2 \cdot 4 \cdot Pk95 \cdot U_{o95} - 2 \cdot U_{o95} \cdot (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110)) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2) - ((4 \cdot 4 \cdot U_{o95}^3 - 4 \cdot U_{o95} \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)) \cdot (4 \cdot (Pk90 \cdot U_{o90}^2 + Pk95 \cdot U_{o95}^2 + Pk100 \cdot U_{o100}^2 + Pk110 \cdot U_{o110}^2) - (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110) \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2))) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2)}$$

float64 d100;

$$d100 = \frac{(2 \cdot 4 \cdot Pk100 \cdot U_{o100} - 2 \cdot U_{o100} \cdot (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110)) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2) - ((4 \cdot 4 \cdot U_{o100}^3 - 4 \cdot U_{o100} \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)) \cdot (4 \cdot (Pk90 \cdot U_{o90}^2 + Pk95 \cdot U_{o95}^2 + Pk100 \cdot U_{o100}^2 + Pk110 \cdot U_{o110}^2) - (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110) \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2))) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2)}$$

float64 d110;

$$d110 = \frac{(2 \cdot 4 \cdot Pk110 \cdot U_{o110} - 2 \cdot U_{o110} \cdot (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110)) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2) - ((4 \cdot 4 \cdot U_{o110}^3 - 4 \cdot U_{o110} \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)) \cdot (4 \cdot (Pk90 \cdot U_{o90}^2 + Pk95 \cdot U_{o95}^2 + Pk100 \cdot U_{o100}^2 + Pk110 \cdot U_{o110}^2) - (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110) \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2))) / (4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2)}$$

$$corr = \frac{(4 \cdot (Pk90 \cdot U_{o90}^2 + Pk95 \cdot U_{o95}^2 + Pk100 \cdot U_{o100}^2 + Pk110 \cdot U_{o110}^2) - (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110) \cdot (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)) / \sqrt{(4 \cdot (U_{o90}^4 + U_{o95}^4 + U_{o100}^4 + U_{o110}^4) - (U_{o90}^2 + U_{o95}^2 + U_{o100}^2 + U_{o110}^2)^2)} \cdot (4 \cdot (Pk90^2 + Pk95^2 + Pk100^2 + Pk110^2) - (Pk90 + Pk95 + Pk100 + Pk110)^2)}$$

float64 uC2;

$$uC2 = \sqrt{(c90^2 \cdot uPk90^2 + c95^2 \cdot uPk95^2 + c100^2 \cdot uPk100^2 + c110^2 \cdot uPk110^2) + (d90^2 \cdot uUo90^2 + d95^2 \cdot uUo95^2 + d100^2 \cdot uUo100^2 + d110^2 \cdot uUo110^2) + 2 \cdot corr \cdot ((c90 \cdot uP$$

$$k_{90}+c_{95} \cdot u_{Pk95}+c_{100} \cdot u_{Pk100}+c_{110} \cdot u_{Pk110}) \cdot (d_{90} \cdot u_{Uo90}+d_{95} \cdot u_{Uo95}+d_{100} \cdot u_{Uo100}+d_{110} \cdot u_{Uo110}));$$

$$P_{fex}=C_2 \cdot U_{intx}^{**2};$$

$$u_{Pfex}=\sqrt{((U_{intx}^{**4} \cdot u_{C2}^{**2})+((2 \cdot C_2 \cdot U_{intx}^{**2}) \cdot u_{U_{intx}^{**2}}))};$$

8.3.11 Calcolo delle scorrimento

Variabili in ingresso

p numero di coppie polari	-
n_x velocità rotazione al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [rpm]	u_{n_x} [V]
f_x frequenza della tensione al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [Hz]	f_x [Hz]
K_q fattore di correzione della temperatura	u_{K_q}

Variabili in uscita:

s_x scorrimento al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile	u_{s_x}
s_{q_x} scorrimento al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corretto in temperatura	$u_{s_{q_x}}$

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di s_x e s_{q_x} corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice:

$$s_x=1-(p \cdot n_x)/(60 \cdot f_x);$$

$$s_{q_x}=s_x \cdot K_q;$$

$$u_{s_x}=\sqrt{((-p)/(60 \cdot f_x))^{**2} \cdot u_{n_x}^{**2}+((p \cdot n_x)/(60 \cdot f_x+2))^{**2} \cdot u_{f_x}^{**2}};$$

$$u_{s_{q_x}}=\sqrt{((-p \cdot K_q)/(60 \cdot f_x))^{**2} \cdot u_{n_x}^{**2}+((p \cdot n_x \cdot K_q)/(60 \cdot f_x+2))^{**2} \cdot u_{f_x}^{**2}+(1-(p \cdot n_x)/(60 \cdot f_x))^{**2} \cdot u_{K_q}^{**2}};$$

8.3.12 Calcolo delle perdite negli avvolgimenti di rotore

Variabili in ingresso

s_x scorrimento al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile	u_{s_x}
s_{q_x} scorrimento al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corretto in temperatura	$u_{s_{q_x}}$
P_{inx} potenza assorbita al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	$u_{P_{inx}}$ [W]
P_{sx} perdite negli avvolgimenti di statore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	$u_{P_{sx}}$ [W]
P_{sqx} perdite negli avvolgimenti di statore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corrette in temperatura [W]	$u_{P_{sqx}}$ [W]
P_{fex} perdite nel ferro al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [V]	$u_{P_{fex}}$ [V]

Variabili in uscita:

Prx perdite negli avvolgimenti di rotore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPrx [W]
Prqx perdite negli avvolgimenti di rotore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corrette in temperatura [W]	uPrqx [W]

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Prx e Prqx corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice:

$$\begin{aligned} Prqx &= (Pinx - Psqx - Pfex) * sqx; \\ Prx &= (Pinx - Psx - Pfex) * sx; \\ uPrqx &= \sqrt{(sqx^{**2}) * (uPinx^{**2} + uPsqx^{**2} + uPfex^{**2}) + (Pinx - Psqx - Pfex)^{**2} * (usqx^{**2})}; \\ uPrx &= \sqrt{(sx^{**2}) * (uPinx^{**2} + uPsx^{**2} + uPfex^{**2}) + (Pinx - Psx - Pfex)^{**2} * (usx^{**2})}; \end{aligned}$$

8.3.13 Calcolo delle perdite per attrito e ventilazione

Variabili in ingresso

Pfwo perdite per attrito e ventilazione alla velocità di sincronismo [W]	uPfwo [W]
sx scorrimento al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile	usx

Variabili in uscita:

Pfwx perdite per attrito e ventilazione al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPfwx [W]
---	-----------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Pfwx e corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice:

$$\begin{aligned} Pfwx &= Pfwo * (1 - sx)^{**2.5}; \\ uPfwx &= \sqrt{((1 - sx)^{**5}) * (uPfwo^{**2}) + (2.5 * Pfwo * ((1 - sx)^{**1.5}))^{**2} * usx^{**2}}; \end{aligned}$$

8.3.14 Calcolo delle perdite residue

Variabili in ingresso

Pinx potenza assorbita al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPinx [W]
P2x potenza meccanica al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uP2x [W]
Psqx perdite negli avvolgimenti di statore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corrette in temperatura [W]	uPsqx [W]
Prqx perdite negli avvolgimenti di rotore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corrette in temperatura [W]	uPrqx [W]
Pfex perdite nel ferro al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [V]	uPfex [W]
Pfwx perdite per attrito e ventilazione al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPfwx [W]

Variabili in uscita:

PLrx perdite residue al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLrx [W]
--	-----------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di PLrx e corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice:

$$PLrx = Pinx - P2x - Psqx - Prqx - Pfex - Pfwx;$$

$$uPLrx = \sqrt{uPinx^2 + uP2x^2 + uPsqx^2 + uPrqx^2 + uPfex^2 + uPfwx^2};$$

8.3.15 Calcolo dei coefficienti di regressione e di correlazione per le perdite addizionali

Variabili in ingresso

PLr25 perdite residue al valore 25% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLr25 [W]
PLr50 perdite residue al valore 50% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLr50 [W]
PLr75 perdite residue al valore 75% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLr75 [W]
PLr100 perdite residue al valore 100% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLr100 [W]
PLr115 perdite residue al valore 115% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLr115 [W]
PLr125 perdite residue al valore 125% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLr125 [W]
PLr25 coppia erogata al valore 25% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT25 [Nm]
T25 coppia erogata al valore 25% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT25 [Nm]
T50 coppia erogata al valore 50% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT50 [Nm]
T75 coppia erogata al valore 75% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT75 [Nm]
T100 coppia erogata al valore 100% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT100 [Nm]
T115 coppia erogata al valore 115% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT115 [Nm]
T125 coppia erogata al valore 125% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uT125 [Nm]

Variabili in uscita:

A pendenza della retta di regressione in funzione di T ² [W/Nm ²]	uA [W/Nm ²]
B intercetta della retta di regressione in funzione di T ² [W]	-
Gamma coefficiente di correlazione	-

Codice:

float64 a;

$$a = PLr25 * T25^2 + PLr50 * T50^2 + PLr75 * T75^2 + PLr100 * T100^2 + PLr115 * T115^2 + PLr125 * T125^2;$$

float64 b;

$$b = (PLr25 + PLr50 + PLr75 + PLr100 + PLr115 + PLr125) * (T25^2 + T50^2 + T75^2 + T100^2 + T115^2 + T125^2);$$

float64 c;

$$c=T25^{**4}+T50^{**4}+T75^{**4}+T100^{**4}+T115^{**4}+T125^{**4};$$

float64 d;

$$d=(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2})^{**2};$$

$$A=(6*a-b)/(6*c-d);$$

$$B=((PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125)/6)-$$

$$A*(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2})/6;$$

$$\text{gamma}=(6*a-b)/(\text{sqrt}((6*c-$$

$$d)*(6*(PLr25^{**2}+PLr50^{**2}+PLr75^{**2}+PLr100^{**2}+PLr115^{**2}+PLr125^{**2})-(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125)^{**2}));$$

float64 h25;

$$h25=(6*T25^{**2}-(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))/6*c-d);$$

float64 h50;

$$h50=(6*T50^{**2}-(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))/6*c-d);$$

float64 h75;

$$h75=(6*T75^{**2}-(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))/6*c-d);$$

float64 h100;

$$h100=(6*T100^{**2}-(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))/6*c-d);$$

float64 h115;

$$h115=(6*T115^{**2}-(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))/6*c-d);$$

float64 h125;

$$h125=(6*T125^{**2}-(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))/6*c-d);$$

float64 s25;

$$s25=((2*6*PLr25*T25)-2*T25*(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125))/6*c-d)-((4*6*T25^{**3}-4*T25*(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))*6*a-b))/6*c-d)^{**2};$$

float64 s50;

$$s50=((2*6*PLr50*T50)-2*T50*(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125))/6*c-d)-((4*6*T50^{**3}-4*T50*(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))*6*a-b))/6*c-d)^{**2};$$

float64 s75;

$$s75=((2*6*PLr75*T75)-2*T75*(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125))/6*c-d)-((4*6*T75^{**3}-4*T75*(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))*6*a-b))/6*c-d)^{**2};$$

float64 s100;

$$s100=((2*6*PLr100*T100)-2*T100*(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125))/6*c-d)-((4*6*T100^{**3}-4*T100*(T25^{**2}+T50^{**2}+T75^{**2}+T100^{**2}+T115^{**2}+T125^{**2}))*6*a-b))/6*c-d)^{**2};$$

```
float64 s115;
s115=(((2*6*PLr115*T115)-2*T115*(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125))/(6*c-d))-
((4*6*T115**3-4*T115*(T25**2+T50**2+T75**2+T100**2+T115**2+T125**2))*(6*a-b))/(6*c-
d)**2;
```

```
float64 s125;
s125=(((2*6*PLr125*T125)-2*T125*(PLr25+PLr50+PLr75+PLr100+PLr115+PLr125))/(6*c-d))-
((4*6*T125**3-4*T125*(T25**2+T50**2+T75**2+T100**2+T115**2+T125**2))*(6*a-b))/(6*c-
d)**2;
```

```
uA=sqrt((((h25**2*uPLr25**2+h50**2*uPLr50**2+h75**2*uPLr75**2+h100**2*uPLr100**2+h11
5**2*uPLr115**2+h125**2*uPLr125**2)+(s25**2*uT25**2+s50**2*uT50**2+s75**2*uT75**2+s
100**2*uT100**2+s115**2*uT115**2+s125**2*uT125**2))+2*gamma*((h25*uPLr25+h50*uPLr5
0+h75*uPLr75+h100*uPLr100+h115*uPLr115+h125*uPLr125)*(s25*uT25+s50*uT50+s75*uT75+s1
00*uT100+s115*uT115+s125*uT125)));
```

8.3.16 Calcolo delle perdite addizionali a carico

Variabili in ingresso

Tx coppia erogata al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [Nm]	uTx [Nm]
A pendenza della retta di regressione in funzione di T ² [W/Nm ²]	uA [W/Nm ²]

Variabili in uscita:

PLLx perdite addizionali al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLLx [W]
--	-----------

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di PLLx corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice

```
PLLx=A*Tx**2;
uPLLx=sqrt(Tx**4*uA**2+(2*A*Tx)**2*uTx**2);
```

8.3.17 Calcolo delle perdite totali e del rendimento indiretto

Variabili in ingresso

P1qx potenza assorbita al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corretta in temperatura [W]	uPinx [W]
Psqx perdite negli avvolgimenti di statore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corrette in temperatura [W]	uPsqx [W]
Prqx perdite negli avvolgimenti di rotore al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corrette in temperatura [W]	uPrqx [W]
Pfex perdite nel ferro al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPfex [W]
Pfwx perdite per attrito e ventilazione al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPfwx [W]
PLLx perdite addizionali al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPLLx [W]

Variabili in uscita:

Ptotx perdite totali al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uPtotx [W]
hx rendimento indiretto al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile	uhx

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di Ptotx e hx corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice

$$P_{totx} = P_{sqx} + P_{r qx} + P_{f ex} + P_{f wx} + P_{LLx};$$

$$h_x = 1 - (P_{totx} / P_{1qx});$$

$$u_{hx} = \sqrt{((P_{totx} / P_{1qx})^{**2} * u_{P_{1qx}}^{**2} + (-1 / P_{1qx})^{**2} * (u_{P_{sqx}}^{**2} + u_{P_{r qx}}^{**2} + u_{P_{f ex}}^{**2} + u_{P_{f wx}}^{**2} + u_{P_{LLx}}^{**2}))};$$

$$u_{P_{totx}} = \sqrt{(u_{P_{sqx}}^{**2} + u_{P_{r qx}}^{**2} + u_{P_{f ex}}^{**2} + u_{P_{f wx}}^{**2} + u_{P_{LLx}}^{**2});$$

8.3.18 Calcolo del rendimento diretto

Variabili in ingresso

P1x potenza assorbita al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile corretta in temperatura [W]	uPinx [W]
P2x potenza meccanica al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile [W]	uP2x [W]

Variabili in uscita:

hdirx rendimento indiretto al valore x% di potenza erogata durante la prova a carico variabile	uhx
--	-----

Nota: è possibile utilizzare il seguente codice in maniera iterativa, per determinare tutti i valori di hdirx corrispondenti ai valori di carico dal 125% al 25%, estremi inclusi.

Codice

$$h_{dirx} = P_{outx} / P_{inx};$$

$$u_{h_{dirx}} = \sqrt{((1 / P_{inx})^{**2} * u_{P_{outx}}^{**2} + (P_{outx} / (P_{inx}^{**2}))^{**2} * u_{P_{inx}}^{**2});$$

8.4 Diagramma di flusso dell' algoritmo complessivo di calcolo del rendimento indiretto con incertezza composta

Le funzioni sopra descritte devono essere inserite in un algoritmo complessivo, che può essere strutturato come indicato dal diagramma di flusso in Figura 18. Essenziale è il rispetto della sequenzialità corretta delle operazioni di calcolo, in quanto le grandezze in uscita di alcune funzioni sono utilizzate da altre come ingresso insieme alle grandezze misurate.

L'algoritmo funziona eseguendo le seguenti operazioni: i) inserimento iniziale dei risultati delle misurazioni effettuate secondo la norma IEC 60034-2-1:2014 all'interno di un record "grandezze misurate"; ii) creazione ed inizializzazione di un record "grandezze calcolate" che conterrà i risultati delle operazioni di calcolo eseguite dalle diverse funzioni; iii) lettura da parte delle singole funzioni di alcuni dati presenti nei record

“grandezze misurate” e “grandezze calcolate”; iv) elaborazione dei calcoli da parte delle funzioni; v) aggiornamento progressivo del record “grandezze calcolate” a valle dell’esecuzione di ciascuna funzione.

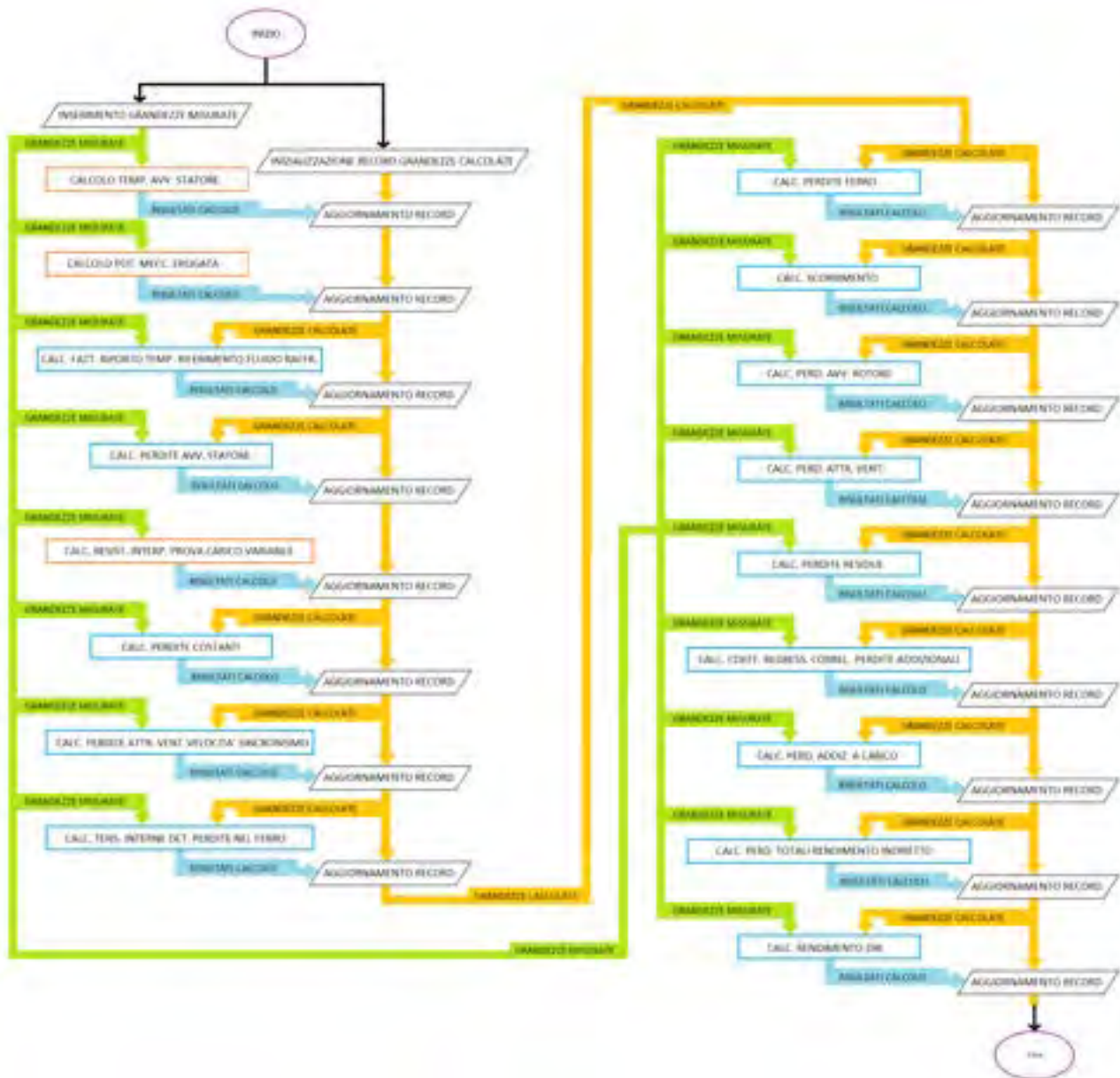


Fig. 18 - Diagramma di flusso dell’algoritmo complessivo.

9 Conclusioni

L’esecuzione delle prove necessarie alla determinazione delle prestazioni dei motori asincroni deve essere eseguita con strumentazione di alta qualità, in accordo con quanto specificato dalla normativa vigente, e devono essere implementate procedure che permettano di conseguire risultati ripetibili e riproducibili, allo stato dell’arte nel campo delle misure elettriche ed elettroniche. Per questo la definizione di procedure e sviluppo di algoritmi per la stima delle incertezze di misura delle grandezze di interesse è requisito imprescindibile, ai sensi delle norme ISO/IEC 17025 e la JCGM 100:2008 (GUM).

In questo documento sono state presentati risultati di un’intensa attività di ricerca dedicata alla sintesi delle procedure di misura delle grandezze dirette ed derivate coinvolte nell’elaborazione del rendimento

dei motori, ed, in termini operativi, per la redazione di procedure per l'esecuzione delle prove corredate di schede per la registrazione dei dati.

Un'accurata valutazione delle incertezze tipo ed estese, ottenibili con la strumentazione in dotazione al laboratorio, è stata effettuata per consentire di svolgere, in futuro, misurazioni in qualità certificata delle grandezze direttamente misurabili, quali tensioni, correnti, potenze attiva ed apparente, fattore di potenza, coppia, velocità di rotazione, resistenze degli avvolgimenti e temperatura dei motori e dell'aria di raffreddamento.

Sono state inoltre valutate analiticamente le relazioni che definiscono le incertezze per le grandezze derivate, quali ad esempio perdite negli avvolgimenti, nel ferro, per attrito e ventilazione ed addizionali, necessarie alla valutazione del rendimento con metodo indiretto, nonché le incertezze coinvolte nel procedimento di calcolo del metodo diretto.

Nel documento è presentata una libreria di funzioni per il calcolo di dette grandezze, corredata di un diagramma di flusso che potrà essere utilizzato per successive attività volte all'implementazione di un software di calcolo automatico di perdite, rendimento ed incertezze.

Il presente documento potrà essere proficuamente impiegato nella stesura del manuale della qualità necessario per l'accreditamento metrologico del laboratorio stesso.

10 Riferimenti bibliografici

- [1] COMMISSION REGULATION (EC) No 640/2009 of 22 July 2009 Implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors.
- [2] E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto, F. Parasiliti Collazzo, M. Tursini, M. Villani "Sviluppo di un protocollo contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009" - 2015 Report RdS / MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
- [3] ISO/IEC 17025 Publ. 2017 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [4] BIPM JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement GUM.
- [5] IEC 60034-2-1:2014 Rotating electrical machines - Part 2-1:Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)
- [6] E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto, F. Parasiliti Collazzo, M. Villani "Determinazione dell'incertezza nella misura del rendimento di motori asincroni polifase secondo i metodi prescritti dalla norma IEC 60034-2-1." - 2016 Report RdS / MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
- [7] Bucci, G., Ciancetta F., Fiorucci, E., Ometto A. "Uncertainty issues in direct and indirect efficiency determination for three-phase induction motors: remarks about the IEC 60034-2-1 standard" (2016) IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 12, pp. 2701-2716, Dec. 2016.
- [8] Ferrero, A.; Salicone, S., "Measurement uncertainty," Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE , vol.9, no.3, pp.44,51, June 2006.
- [9] de Almeida, A.I.; Ferreira, F. J T E; Busch, J.F.; Angers, P., "Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors," Industry Applications, IEEE Transactions on , vol.38, no.2, pp.608,614, Mar/Apr 2002.
- [10] Bucci, G., Ciancetta, F., Fiorucci, E., Ometto, A. "Survey about classical and innovative definitions of the power quantities under nonsinusoidal conditions" (2017) International Journal of Emerging Electric Power Systems, 18 (3), art. no. 20170002, .
- [11] Accredia MD-09-34-DL rev.00 – Self Assessment – schema UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2018

- [12] IEC 60034-30-1:2014 Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)
- [13] IEC TS 60034-25:2014 Rotating electrical machines - Part 25: AC electrical machines used in power drive systems - Application guide
- [14] IEC 60034-1:2017 Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance
- [15] EC 60051-1:2016 Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories - Part 1: Definitions and general requirements common to all parts

11 Curricula

Curriculum Scientifico di EDOARDO FIORUCCI

Edoardo Fiorucci è nato nel 1974 a Popoli, in provincia di Pescara. Nel 2000 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrica, discutendo una tesi sperimentale dal titolo: "Stazione di misura numerica per la valutazione della qualità dell'alimentazione elettrica", presso l'Università degli Studi dell'Aquila, con la votazione di 110/110 e lode. Dal 2006 al 2016 ha prestato servizio come ricercatore nel settore scientifico disciplinare ING-INF/07, Misure Elettriche ed Eletttroniche, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila, afferendo al Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione fino al giugno 2012, e presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila.

Nel 2016 ha preso servizio come Professore Associato, settore scientifico disciplinare ING-INF/07, ed afferisce al Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila. Nel 2017 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale ASN per le funzioni di Professore Ordinario nel settore scientifico disciplinare ING-INF/07, Misure Elettriche ed Eletttroniche.

Dal 2006, in qualità di Professore Aggregato prima e Professore Associato poi, è docente del corso di Collaudi di Macchine ed Impianti Elettrici nei corsi di laurea specialistica e di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica ed Ingegneria Elettronica.

Edoardo Fiorucci:

- dal 2003 è Member della Instrumentation and Measurement Society, IMS, dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE;
- nel gennaio 2012 è stato nominato Associate Editor nel comitato editoriale della rivista IEEE IMS Transactions on Instrumentation and Measurement;
- nel 2013 e 2015 e 2016 è stato menzionato dalla IEEE Instrumentation and Measurement Society tra gli "Outstanding Associate Editors".

Curriculum Scientifico di ANTONIO OMETTO

Ometto Antonio si è laureato in Ingegneria Elettrotecnica nell'a.a. 1985/86 presso l'Università degli Studi dell'Aquila. Nel 1986 è risultato vincitore della Borsa di Studio per il perfezionamento di ingegneri all'estero della Fondazione F. Filauro con conseguente permanenza a Sheffield (UK) nell'anno 1987, dove ha collaborato con il prof. M. McCormick dell'Università di Sheffield. Dal 1990 al 2002 è stato ricercatore del settore scientifico disciplinare ING-IND/32 presso l'Università dell'Aquila.

Nel 1993 è stato a Madison, Wisconsin (USA), dove ha collaborato con il Prof. T. Lipo dell'Università del Wisconsin. Dal 2002 è Professore Associato, prima presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, attualmente presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila, S.S.D. ING-IND/32 ed ha tenuto corsi di macchine elettriche, elettronica di potenza, attuatori elettrici, modellistica dei sistemi elettromeccanici e sistemi elettrici per la mobilità.

Curriculum Scientifico di MARCO VILLANI

Nel 1985 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di L'Aquila.

Nel 1987 ha conseguito la borsa di studio di perfezionamento all'estero "Ferdinando Filauri" che gli ha consentito di effettuare uno stage presso la Technische Universität - Sektion Elektrotechnik di Dresda. È docente del corso di Costruzioni Elettromeccaniche, nell'ambito del Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica, presso l'Università degli Studi dell'Aquila. Coordinatore di numerosi progetti di ricerca, in collaborazione con Enti ed Industrie sia nazionali che europee. Referente, nell'ambito dei programmi Erasmus, degli accordi bilaterali con le Università di Amiens e di Kaunas.

Marco Villani ha una comprovata esperienza nel settore della progettazione delle macchine elettriche grazie anche alle collaborazioni con importanti aziende elettromeccaniche nazionali e internazionali ed alla partecipazione a numerosi progetti di ricerca finanziati dalla Comunità Europea (progetti SAVE II), dal Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica (progetti PRIN) e dal CNR. Ha sviluppato delle procedure di dimensionamento basate su programmi agli elementi finiti e algoritmi di ottimizzazione, che sono state ampiamente utilizzate per la progettazione di motori asincroni, motori sincroni a magneti permanenti e motori sincroni a riluttanza, per impieghi nel settore industriale, aeronautico e nel settore "automotive".