

MISURA DELLE CORRENTI NELLE PROVE DI SOVRATEMPERATURA DI COMPONENTI ELETTRICI

-

SISTEMI DI MISURA, MANTENIMENTO IN TARATURA E VALUTAZIONE DELLE INCERTEZZE

Ing. Angelo Sardi
Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
INRiM

MISURA DELLE CORRENTI NELLE PROVE DI SOVRATEMPERATURA

1. Le prove di sovratemperatura delle apparecchiature elettriche

Il passaggio della corrente nei conduttori delle apparecchiature elettriche provoca una dissipazione di energia sotto forma di calore (effetto Joule). Le leggi di Ohm ci forniscono la relazione tra la potenza dissipata P , la resistenza R e la corrente I :

$$P=RI^2 \quad [1]$$

La dissipazione di calore si traduce in un aumento di temperatura nei conduttori. I valori di temperatura raggiunti nei vari punti di un componente o un'apparecchiatura elettrica dipenderanno dall'entità della potenza dissipata, oltre che dalla forma e dalle caratteristiche di conducibilità termica dei conduttori e degli isolanti.

Nei conduttori, temperature troppo elevate provocano una perdita di caratteristiche meccaniche (con la diminuzione della tensione meccanica ammissibile) ed elettriche (con un aumento della resistività e, per effetto dell'ossidazione superficiale, delle resistenze di contatto).

Negli isolanti l'aumento della temperatura provoca una diminuzione della resistenza di isolamento, un invecchiamento accelerato e, per gli isolanti solidi, una perdita delle caratteristiche meccaniche. A temperature elevate si ha una fusione/carbonizzazione dei materiali, con una perdita delle caratteristiche di isolamento.

Oltre alle perdite nei conduttori il passaggio di corrente provoca, nei componenti ferromagnetici delle apparecchiature, perdite per isteresi magnetica che si sommano alle perdite per effetto Joule. Nelle applicazioni ad alta frequenza occorre poi considerare la diminuzione della sezione utile dei conduttori per effetto pelle, che si traduce in un aumento della resistenza.

Nella progettazione di un dispositivo elettrico occorre dimensionare i conduttori, le connessioni, gli isolanti e i sistemi di raffreddamento in modo da evitare che le temperature raggiunte dai conduttori siano tali da provocare una perdita delle caratteristiche meccaniche e/o elettriche dei materiali utilizzati o una diminuzione dell'affidabilità dell'apparecchiatura.

La validità delle scelte progettuali può essere verificata mediante le prove di sovratemperatura, nelle quali si verifica che i conduttori siano in grado di portare le loro correnti nominali nelle condizioni di funzionamento previste, senza superare i limiti di sovratemperatura specificati nelle norme o nelle schede tecniche.

Nel seguito si esaminano alcune procedure di prova per le verifiche di sovratemperatura di apparecchiature elettriche, si descrivono gli impianti di prova e i sistemi di misura della corrente. Si esamina, inoltre, il panorama normativo e si forniscono alcune linee guida per assicurare la riferibilità e valutare l'incertezza della misura delle correnti di prova.

2. Tecniche di prova e impianti

Le tecniche di prova dipendono strettamente dalle caratteristiche delle apparecchiature in esame. Una prima distinzione può essere fatta tra:

- Tecniche di prova per componenti di impianti (quadri, cavi, condotti prefabbricati, trasduttori di tensione/corrente, interruttori ecc.);
- Tecniche di prova per la verifica di sovratemperatura di macchine elettriche (motori, generatori e trasformatori).

Nel primo caso, il passaggio della corrente nei conduttori provoca prevalentemente dissipazione di potenza per effetto Joule.

Nel caso delle macchine elettriche il passaggio della corrente genera, oltre alle perdite per effetto Joule, una quota significativa di perdite per isteresi nei circuiti magnetici. A differenza delle perdite per effetto Joule, che dipendono dalla corrente, le perdite per isteresi dipendono dai valori di tensione e di frequenza.

Per questo motivo nel caso di prove su macchine elettriche, specie se di grande potenza, la valutazione delle sovratemperature è ottenuta combinando più prove. È il caso dei trasformatori in cui con la prova a vuoto (macchina alimentata alla tensione nominale su un avvolgimento con gli altri avvolgimenti aperti) si valutano le perdite per isteresi nel ferro, mentre con la prova in corto circuito (macchina alimentata su un avvolgimento, con l'altro avvolgimento chiuso in corto circuito a una tensione tale da far fluire negli avvolgimenti la corrente nominale) si valutano le perdite per effetto Joule nei conduttori. Nelle macchine elettriche, durante la verifica di sovratemperatura, si realizzano anche misure di potenza per la valutazione del rendimento. Nella presente monografia non si vuole esplorare l'ampissimo ambito delle prove sulle macchine elettriche. Ci si limiterà quindi alla trattazione delle prove su componenti.

Nelle prove di sovratemperatura di componenti di sistemi di trasporto e distribuzione dell'energia elettrica (cavi, giunti, terminazioni, morse di stazione o di linea, condotti sbarre, apparecchiature di manovra, trasformatori di misura, quadri elettrici...) si fa fluire nei conduttori dell'oggetto in prova una corrente pari alla corrente nominale per un tempo sufficiente al raggiungimento dell'equilibrio termico con l'ambiente circostante¹. Una volta raggiunto le condizioni di regime, si misurano le temperature dei conduttori, degli isolanti e degli involucri dell'apparecchiatura.

La prova può essere realizzata chiudendo in corto circuito i morsetti di uscita del dispositivo e applicando ai morsetti di ingresso una tensione sufficiente a far circolare nei conduttori la corrente nominale. La tensione applicata è, in questo caso, inferiore

¹ In alcuni casi (componenti per funzionamento intermittente) il tempo di applicazione della corrente di prova è definito dal ciclo di lavoro previsto.

alla tensione nominale e la potenza richiesta al circuito di alimentazione è la sola potenza dissipata all'interno del componente e nei conduttori del circuito di alimentazione.

La dotazione di un laboratorio per prove di sovratemperatura su componenti comprende solitamente:

- Un impianto per la generazione delle correnti di prova;
- Uno o più sistemi di misura della corrente;
- Un sistema di misura multicanale, in grado di rilevare i valori di temperatura in più punti dell'oggetto in prova.

Le possibili configurazioni di un impianto per la realizzazione di prove trifase su quadri elettrici sono mostrate in Figura 1. Il circuito di alimentazione comprende un regolatore di tensione (trasformatore a rapporto variabile o regolatore elettronico) che riceve in ingresso la potenza dalla rete di alimentazione e alimenta in uscita un trasformatore elevatore di corrente. Il trasformatore alimenta a sua volta l'oggetto in prova. Il collegamento tra il trasformatore e l'oggetto in prova è realizzato con conduttori di opportuna sezione² per non trasferire il calore dissipato nella linea di alimentazione all'apparecchiatura in prova e, allo stesso tempo, non sottrarre calore per conduzione dai morsetti dell'apparecchiatura.

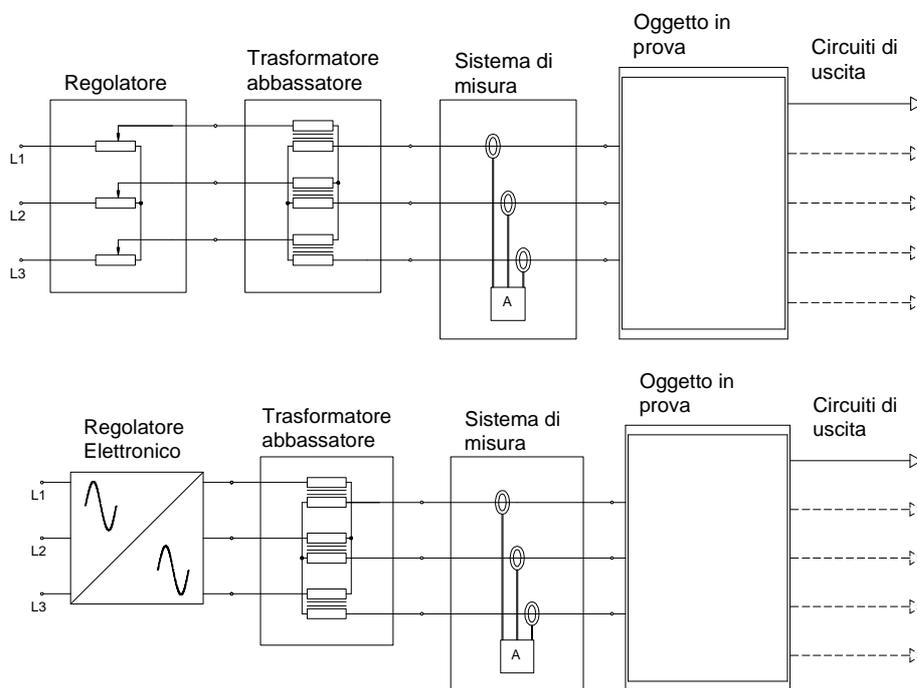


Figura 1:
Circuito per la realizzazione di prove di sovratemperatura a tensione ridotta su quadri trifase.

² Le sezioni delle connessioni sono solitamente indicate dalle norme di riferimento.

Per alcune applicazioni (es. morsetteria di linea o di stazione, cavi e relativi accessori, trasformatori di misura) si utilizzano circuiti di prova monofasi.

Per le prove su componenti per impianti in corrente continua, a valle del trasformatore elevatore di corrente è posto un circuito raddrizzatore (Figura 2). La corrente di prova può anche essere fornita direttamente da un alimentatore elettronico.

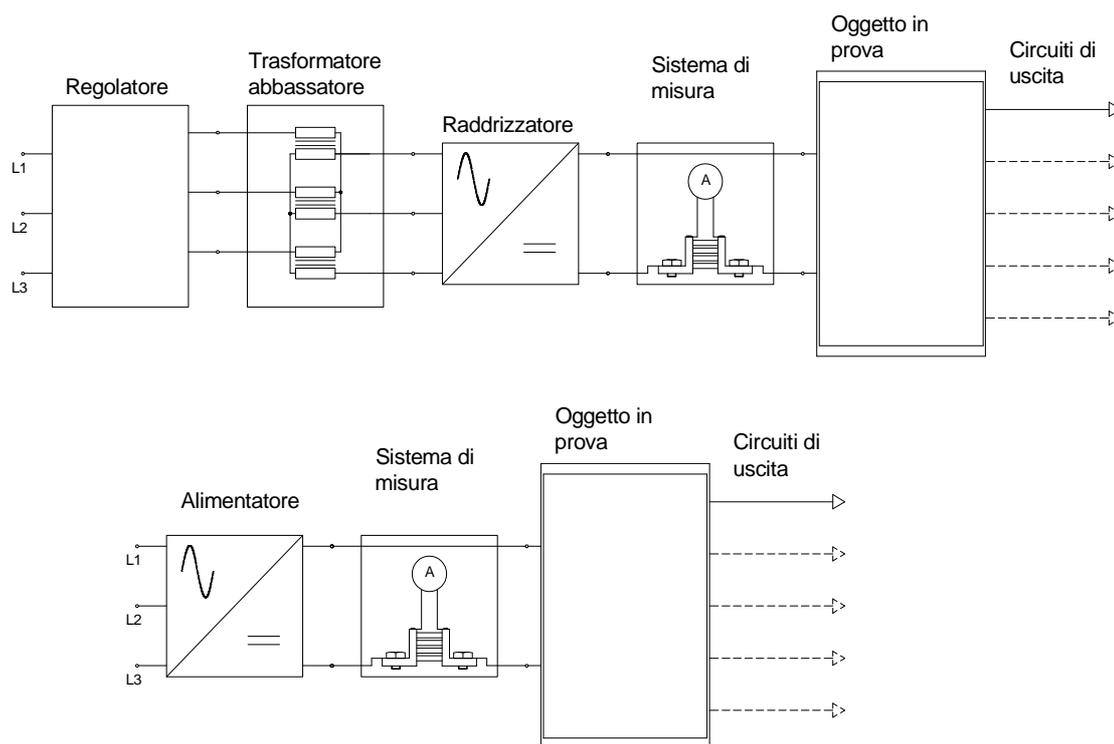


Figura 2:
Circuito per la realizzazione di prove di sovratemperatura a tensione ridotta su sistemi in corrente continua.

Nei casi in cui l'oggetto in prova è un singolo componente (tratto di linea prefabbricata, interruttore, contattore ...) è sufficiente chiudere in corto circuito i morsetti di uscita³ e regolare la corrente in ingresso nell'oggetto in prova. Se l'oggetto in prova è un quadro di distribuzione, dove la corrente in ingresso si divide in più linee in uscita, si deve regolare la corrente nelle varie derivazioni. La regolazione è ottenuta variando la lunghezza dei collegamenti di corto circuito, inserendo dei resistori in serie al circuito o, in corrente alternata, variandone l'induttanza. In alcuni casi sia l'ingresso sia le uscite dell'oggetto in prova sono alimentati con alimentatori elettronici.

³ Spesso le norme indicano una lunghezza prestabilita dei conduttori con cui realizzare il corto circuito.

La corrente in ingresso agli oggetti in prova e le eventuali correnti in uscita devono essere misurate utilizzando uno o più sistemi di misura.

La misura della temperatura può essere realizzata con termocoppie o con termoresistenze (TCR o PT). Le tensioni in uscita dalle termocoppie o le resistenze delle termoresistenze sono misurate con strumenti la cui indicazione è espressa direttamente in gradi centigradi. I punti di misura della temperatura sono indicati nelle norme, o vengono concordati con il costruttore e/o l'acquirente. Le problematiche legate alla misura della temperatura saranno trattate in un'altra monografia.

In alcuni casi oltre alle misure della corrente e delle temperature la normativa o la specifica di prova richiedono anche una misura della potenza assorbita. Dati i bassi valori della tensione di alimentazione, la misura della potenza può essere fatta abbinando al sistema di misura della corrente un wattmetro, misurando la/e caduta/e di tensione ai capi dell'oggetto senza l'interposizione di trasduttori di tensione. Nelle prove in corrente alternata la misura di potenza è resa difficile per la presenza di bassi valori di $\cos\varphi$ (il carico ha una forte componente reattiva). In questo caso occorre prestare particolare attenzione nella scelta dei trasduttori e del wattmetro.

3. Il panorama normativo

L'importanza delle norme tecniche per la progettazione, la produzione, la verifica, la commercializzazione, l'affidabilità e la sicurezza delle apparecchiature e dei sistemi elettrici è legata a più fattori:

- Le norme consentono di definire i requisiti necessari al componente/impianto per rispettare la regola dell'arte;
- Permettono di regolare i rapporti tra committente e fornitore, specialmente in caso di contestazioni;
- Se armonizzate, consentono la libera circolazione dei prodotti eliminando possibili barriere protezionistiche.

Come ben noto gli enti normatori in ambito elettrotecnico sono:

- La IEC (International Electrotechnical Commission) che si occupa dell'elaborazione della normativa nel settore elettrotecnico ed elettronico a livello mondiale;
- Il CENELEC (Comité Européen de Normalisation en Électronique et en Électrotechnique) che si occupa dell'elaborazione della normativa a livello europeo;
- Il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) responsabile in ambito nazionale della normazione tecnica in campo elettrotecnico, elettronico e delle telecomunicazioni.

Il CEI partecipa in modo diretto nelle corrispondenti organizzazioni di normazione europea e internazionale. Le Norme CEI sono, in larga maggioranza, recepimenti di documenti normativi internazionali.

All'interno degli enti normatori l'elaborazione delle norme è demandata ai Comitati Tecnici (CT in inglese TC). I comitati tecnici sono classificabili in:

- **Comitati di prodotto**, che si occupano delle attività normative inerenti la sicurezza elettrica e le prestazioni di prodotti, componenti, apparecchi o famiglie degli stessi. Esempi di comitati di prodotto sono il CT 14 "Trasformatori", il CT 17 "Grossa apparecchiatura", il CT 20 "Cavi per energia" il CT 38 "Trasformatori di misura";
- **Comitati trasversali**, che trattano problematiche di sicurezza / prestazioni e tecnologie che interessano prodotti e famiglie di prodotti, appartenenti a diversi Comitati Tecnici. I comitati trasversali trattano anche gli aspetti generali inerenti la standardizzazione e la preparazione di norme (terminologia, simbologia, incertezza di misura etc.). Esempi di comitati trasversali sono il CT 1/25 "Terminologia, grandezze e unità", il CT 3 "Strutture delle informazioni, documentazioni e segni grafici", il CT 7 "Materiali conduttori", il CT 42 "Tecniche delle prove ad alta tensione e a correnti elevate", il CT 210 "Compatibilità elettromagnetica";
- **Comitati di sistema o impiantistici**, che trattano norme sulla sicurezza elettrica e sulle prestazioni di sistemi e impianti elettrici. Esempi di tali comitati sono il CT 11 "Impianti elettrici ad alta tensione e di distribuzione pubblica di bassa tensione", il CT 64 "Impianti elettrici utilizzatori di bassa tensione".

Per quanto riguarda le prove di sovratemperatura le prescrizioni specifiche sono date dalle norme di prodotto (es. CEI EN 61439-2 "Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT) - Parte 2: Quadri di potenza").

Le definizioni, la descrizione dei metodi, le prescrizioni e le procedure per eseguire le misure necessarie durante le prove sono indicate nella Norma CEI EN 62475 "Tecniche di prova a correnti elevate - Definizioni e requisiti per correnti di prova e sistemi di misura", elaborata dal CT 42.

All'interno della Norma, che tratta più tipi di correnti, le prove in regime permanente in corrente continua e in corrente alternata sono oggetto rispettivamente dei paragrafi 6 e 7.

La CEI EN 62475:

- Definisce la terminologia da utilizzare;
- Definisce i parametri di prova e le relative tolleranze;
- Descrive i metodi per la stima delle incertezze nella misura di forti correnti;

- Definisce i requisiti che devono essere soddisfatti dai sistemi di misura della corrente;
- Descrive i metodi per la validazione di un sistema di misura e per il controllo dei suoi componenti;
- Descrive le procedure con cui l'utilizzatore può dare evidenza che un sistema di misura soddisfa i requisiti fissati dalla norma, considerando anche i limiti per l'incertezza di misura.

4. Il sistema di misura della corrente

Come visto nel paragrafo precedente le caratteristiche della strumentazione di misura per le prove a correnti elevate sono definite dalla CEI EN 62475.

La norma recepisce il testo originale inglese della Pubblicazione IEC 62475 ed è pubblicata dal CEI nella sola lingua inglese, in quanto particolarmente mirata a settori specialistici. La pratica di non tradurre in italiano la normativa ha, a giudizio di chi scrive, una serie di controindicazioni:

- La lingua utilizzata per la compilazione dei documenti dei sistemi per la gestione della qualità è l'italiano. La traduzione delle prescrizioni della norma nelle istruzioni operative e nelle schede di lavorazione e controllo non dovrebbe essere soggetta alla libera traduzione del compilatore;
- In caso di contestazioni che debbano essere risolte in tribunale, la necessità di tradurre le prescrizioni può dare origine ad ambiguità tali da permettere di rovesciarne il significato.

Per i motivi sopra elencati nel seguito si fornisce una traduzione in italiano delle definizioni date dalla IEC 62475. La traduzione riprende i termini utilizzati in passato, quando le edizioni precedenti delle norme del CT 42 erano tradotte, le terminologie utilizzate nella Norma CEI UNI 70099 "Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM)" e le definizioni della IEC 60050 "International Electrotechnical Vocabulary".

- **Sistema di misura:** insieme completo di dispositivi adatti alla realizzazione della misura di una grandezza (misurando). Il software utilizzato per ottenere o calcolare il risultato di una misura fa parte anch'esso del sistema di misura. Un sistema di misura per forti correnti normalmente comprende i seguenti componenti:
 - ✚ Un dispositivo convertitore, con i terminali per il collegamento/accoppiamento al circuito, e il collegamento a terra;
 - ✚ Un sistema di trasmissione che collega i terminali di uscita del dispositivo convertitore allo strumento di misura, con i suoi attenuatori, terminazioni e impedenze o reti di accoppiamento;

- ✚ Uno strumento di misura completo delle connessioni al circuito di alimentazione.
- **Dispositivo convertitore:** dispositivo che ha il compito di convertire la grandezza da misurare in una grandezza compatibile con lo strumento di misura. Per le applicazioni oggetto della presente monografia i dispositivi convertitori utilizzabili sono:
 - ✚ Derivatore di corrente o shunt: resistore la cui tensione ai capi è proporzionale alla corrente da misurare;
 - ✚ Trasformatore di corrente (TA): trasformatore di misura in cui la corrente secondaria, in condizioni normali di impiego, è praticamente proporzionale alla corrente primaria ed è sfasata rispetto a questa di un angolo prossimo a zero per un senso appropriato delle connessioni. I trasformatori di misura sono solitamente caratterizzati da un'unica frequenza della corrente, ma sono disponibili dispositivi con ampio campo di frequenza;
 - ✚ Bobina di Rogowsky: dispositivo di conversione per correnti, induttivo, privo di nucleo; un sistema di misura basato su una bobina di Rogowsky comprende un circuito integratore (passivo, attivo o digitale). I sistemi di misura che utilizzano le bobine di Rogowsky possono essere progettati per la misura di correnti in un ampio campo di frequenze.
- **Sistema di trasmissione:** insieme di dispositivi che trasferiscono il segnale di uscita del dispositivo convertitore allo/agli strumento/i di misura. Il sistema di trasmissione normalmente è costituito da un cavo coassiale chiuso sulla sua impedenza caratteristica, ma può includere attenuatori, amplificatori o altri componenti connessi tra il dispositivo convertitore e lo/gli strumento/i di misura. Per esempio un collegamento in fibra ottica che comprende un trasmettitore, un cavo in fibra e un ricevitore, con i relativi amplificatori. Un sistema di trasmissione può essere parzialmente o completamente incluso nello strumento di misura.
- **Strumento di misura:** dispositivo impiegato per eseguire misurazioni, solo o in associazione con altri dispositivi di supporto.
- **Fattori di scala:**
 - ✚ **Fattore di scala di un sistema di misura:** fattore per cui la lettura dello strumento deve essere moltiplicata per ottenere il valore della grandezza in ingresso al sistema di misura completo. Un sistema di misura può avere più di un fattore di scala per campi differenti di correnti e frequenze o per differenti forme d'onda. Alcuni sistemi di misura forniscono in uscita direttamente il valore della grandezza in ingresso, in questi casi il fattore di scala è unitario.

- ✚ **Fattore di scala di un dispositivo convertitore:** fattore per cui l'uscita del dispositivo convertitore deve essere moltiplicata per ottenere il valore della grandezza in ingresso. Il fattore di scala di un dispositivo convertitore può essere adimensionato (es. il rapporto di un trasformatore di corrente) o avere una dimensione (es. l'ammettenza di un derivatore di corrente).
- ✚ **Fattore di scala di un sistema di trasmissione:** fattore per cui l'uscita del sistema di trasmissione deve essere moltiplicata per ottenere il valore della grandezza in ingresso.
- ✚ **Fattore di scala di uno strumento di misura:** fattore per cui la lettura dello strumento deve essere moltiplicata per ottenere il valore della grandezza in ingresso.
- ✚ **Fattore di scala assegnato:** fattore di scala del Sistema di misura, determinato nella verifica di prestazione più recente.

La CEI EN 62475 prende in esame, per le correnti di prova, un gran numero di forme d'onda, dalle correnti continue alle correnti transitorie. Nello specifico delle prove in regime permanente oggetto della nostra trattazione, si possono fare alcune osservazioni:

- Nel caso di un sistema di misura che utilizza come dispositivo convertitore un trasformatore amperometrico, il sistema di trasmissione è solitamente realizzato con una coppia di cavi unipolari intrecciati. Questa soluzione assicura una minore schermatura dai disturbi esterni rispetto a un cavo coassiale, ma si rende necessaria per limitare il carico sul secondario del trasformatore, data la corrente nominale in uscita (1 o 5 A).
- In alcuni casi la misura della corrente è realizzata utilizzando un voltmetro che misura la tensione ai capi di un derivatore di corrente antinduttivo in cui viene fatta passare la corrente secondaria del TA. Il derivatore può essere montato direttamente sui morsetti del TA o sui morsetti dello strumento. Nel primo caso si potrebbe considerare come dispositivo convertitore il complesso TA+derivatore, che realizza una conversione corrente/tensione e il cui fattore di scala ha le dimensioni di una resistenza. Nel secondo caso il derivatore può essere considerato come facente parte dello strumento di misura. In alternativa, in entrambi i casi, il derivatore può essere inglobato nel sistema di trasmissione.
- Nei sistemi di misura che utilizzano una bobina di Rogowski, il complesso bobina+integratore costituisce il dispositivo convertitore. Talvolta la connessione tra la bobina e l'integratore è realizzata con un cavo schermato di lunghezza sufficiente permettendo il posizionamento di quest'ultimo presso lo strumento di misura. In questo caso il sistema di trasmissione si riduce al cavo che collega l'uscita dell'integratore all'ingresso dello strumento.

5. Scelta del sistema di misura

Come già visto nella monografia sulla gestione della strumentazione nell'attività di prova, i passi principali per la scelta comprendono:

- a) Definizione della/e grandezza/e da sottoporre a misurazione;
- b) Definizione dell'andamento nel tempo della/e grandezza/e;
- c) Definizione del campo di valori da misurare;
- d) Definizione del formato di uscita;
- e) Definizione dell'incertezza e della risoluzione dello strumento;
- f) Definizione delle condizioni ambientali di funzionamento;
- g) Definizione dei valori attesi per altre grandezze di influenza;
- h) Definizione di condizioni di lavoro critiche.

a) ÷ b) la Norma CEI EN 62475 definisce le correnti di prova e fissa le relative tolleranze sui valori.

Per le prove con corrente continua si definisce:

- **Valore della corrente continua di prova:** Media aritmetica della corrente di prova.
- **Ondulazione:** deviazione periodica della corrente dalla media aritmetica. L'ampiezza dell'ondulazione è definita come la metà della differenza tra i valori massimo e minimo della corrente.
- **Fattore di ondulazione:** rapporto tra l'ampiezza dell'ondulazione e il valore medio della corrente⁴.
- **Corrente di prova:**
 - ✚ **Prescrizione sulla forma d'onda:** la corrente di prova deve essere una corrente continua con non più del 7% del fattore di ondulazione, se non specificato diversamente dal Comitato Tecnico relativo. Ulteriori prescrizioni possono essere definite nella normativa specifica di prodotto.
 - ✚ **Tolleranza:** se non diversamente specificato dal Comitato Tecnico relativo, la tolleranza sulla corrente deve essere del ± 3 % durante la prova.

Per le prove con corrente alternata:

⁴ Il fattore di ondulazione è spesso espresso in percentuale.

- **Valore della corrente alternata di prova:** vero valore efficace della corrente di prova.
- **Vero valore efficace:** valore calcolato con la formula:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad [2]$$

Dove:

- 0 è l'istante di tempo ($t=0$) di un'onda periodica alternata⁵, in cui s'inizia l'integrazione del segnale;
 - T è un tempo pari a un numero intero di cicli della forma d'onda in esame;
 - $i(t)$ è il valore istantaneo della corrente.
- **Valore di picco \hat{i}_{SS} :** massimo valore istantaneo della corrente.
 - **Corrente di prova:**

- ✚ **Prescrizione sulla forma d'onda:** la corrente di prova deve essere una corrente alternata, generalmente con una frequenza nel campo 45 Hz ÷ 65 Hz. La corrente di prova deve approssimare una sinusoide con una differenza tra i valori di picco positivi e negativi inferiore al 2%. I risultati di una prova non sono alterati da piccole deviazioni dall'andamento sinusoidale se la distorsione armonica totale relativa (THD) non supera il 5% del valore della componente fondamentale;

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_1} \quad [3]$$

Dove:

- I_1 è il valore efficace della fondamentale;
 - I_n è il valore efficace della n-esima armonica, a partire dalla seconda;
- ✚ **Tolleranza:** se non diversamente specificato dal Comitato Tecnico relativo, la tolleranza sulla corrente deve essere del ± 3 % durante la prova.

- c)** Per quanto riguarda la definizione del campo di valori di corrente da misurare, questo dipende dalla natura del laboratorio di prova. Un laboratorio di prova indipendente è interessato ad avere un campo di correnti che sia il più ampio possibile (es. da 1 A a

⁵ Si ricorda che una forma d'onda è alternata se è periodica e con valore medio nullo.

20 kA). I limiti in questo caso possono essere dettati da una valutazione delle richieste del mercato. Per un costruttore che si voglia dotare di un laboratorio di prova la scelta dei campi di correnti da generare e misurare è definita dalle gamme di prodotto. Considerando un costruttore di condotti prefabbricati un campo di correnti possibili è quello che va da 160 A a 6300 A.

- d)** Per quanto riguarda il formato di uscita dei dati la scelta va fatta in base alle esigenze del laboratorio. Poiché le prove di sovratemperatura sono spesso previste come prove di tipo la lettura delle correnti è spesso fatta dall'operatore che si limita a verificare che la corrente di prova si mantenga entro i limiti di tolleranza. La strumentazione digitale presente sul mercato è dotata di interfacce di comunicazione che permettono, se necessario, l'esecuzione di prove in automatico.
- e)** Per quanto riguarda la risoluzione e l'incertezza del sistema di misura, la Norma CEI EN 62475 (§ 6.4.1 e 7.4.1) prescrive per i sistemi di misura per le correnti continue e alternate in regime permanente un'incertezza estesa non superiore al 3%. La stessa Norma CEI EN 62475 prevede la possibilità di prescrivere valori di incertezza differenti. È il caso del documento LOVAG General instruction G2 "Measurement Uncertainty", in cui per correnti superiori ai 5 A prescrive un'incertezza estesa del 2,5 %. La risoluzione dello strumento è spesso oggetto di specifica, anche se ai fini del risultato di una misura tale parametro è ininfluenza. Chiaramente, poiché l'incertezza non può essere inferiore alla risoluzione, se si deve utilizzare lo strumento di misura su un ampio campo di valori è fondamentale che questo abbia risoluzione sufficiente per i valori più bassi. La disponibilità di strumenti digitali con più scale ha, di fatto, risolto la maggior parte dei problemi legati alla risoluzione.
- f)** Le condizioni ambientali dipendono dal tipo di prova. Normalmente le prove di sovratemperatura sono realizzate in laboratori con un impianto di riscaldamento/condizionamento in grado di assicurare una temperatura ambiente compresa tra 15 e 30 °C. In questo intervallo di temperatura la maggior parte della strumentazione è in grado di funzionare senza problemi. L'influenza dell'umidità ambiente sulla strumentazione è, per i valori normalmente presenti in laboratorio, ininfluenza. Talvolta sono richieste prove con temperatura ambiente aumentata (es 40 °C) che richiedono l'utilizzo di camere climatiche. In questi casi è opportuno montare tutti i componenti del sistema di misura al di fuori della camera climatica.
- g)** Nella misura di corrente nelle prove di sovratemperatura l'unica grandezza di influenza in grado di alterare i risultati di misura, oltre ai parametri ambientali, è il campo magnetico: la presenza di correnti di prova di elevato valore genera campi magnetici piuttosto intensi che possono influire sulle caratteristiche metrologiche dei componenti del sistema di misura.
- h)** Nella misura di corrente nelle prove di sovratemperatura, nella maggior parte dei casi, non si verificano condizioni di lavoro critiche.

Una volta definiti i parametri sopra elencati si può procedere alla scelta vera e propria della strumentazione, con la consultazione dei cataloghi, o con l'esame dei manuali tecnici.

Spesso il sistema di misura della corrente viene fornito congiuntamente con l'impianto di generazione. In altri casi il sistema di misura della corrente è realizzato dall'utilizzatore, per esempio in sostituzione di un sistema di misura precedentemente installato. La scelta dei componenti o del sistema completo va fatta considerando i pregi e i difetti delle possibili soluzioni.

Per i sistemi di misura di correnti continue si possono fare le seguenti considerazioni:

- Nella misura di correnti continue il dispositivo convertitore è nella quasi totalità dei casi un derivatore resistivo. Negli shunt la tensione nominale (tensione ai capi corrispondente alla corrente nominale) è limitata a $50\div 300$ mV, per evitare un eccessivo riscaldamento del derivatore. Tenendo conto che la potenza dissipata nel derivatore varia con il quadrato della corrente, anche con l'utilizzo di materiali resistivi con basso coefficiente di temperatura, è molto difficile mantenere costante il valore della resistenza (che in uno shunt coincide con l'inverso del fattore di scala) in un ampio campo di correnti misurate. Se l'impianto di prova deve funzionare in un ampio campo di correnti, è opportuno utilizzare più derivatori di corrente con valori nominali secondo una sequenza 1-2-5 (es. 100 A, 200 A, 500 A, 1 kA, 2 kA, 5 kA, 10 kA).
- Il sistema di trasmissione può essere realizzato con un cavo coassiale o con una coppia di conduttori intrecciati. A favore della prima soluzione vi è la maggiore immunità dai disturbi. Talvolta sono utilizzati sistemi di trasmissione in fibra ottica per collegare lo strumento, che è posto in prossimità del dispositivo convertitore, a un computer su cui è installato il software di misura. In questo caso la linea in fibra ottica è parte dello strumento.
- Per la realizzazione dello strumento di misura sono disponibili multimetri digitali, in grado di misurare tensioni continue con incertezze trascurabili rispetto ai limiti fissati dalla CEI EN 62475. Oltre ai multimetri da banco sono disponibili sul mercato schede di acquisizione con prestazioni molto elevate, che possono essere utilizzate anche per la verifica dei valori del fattore di ondulazione.
- Dati i limiti nella risposta in frequenza dei derivatori per alte correnti la stessa CEI EN 62475 prevede, per la verifica del fattore di ondulazione della corrente generata, la possibilità di utilizzare un sistema di misura separato. Le prescrizioni per l'incertezza di misura dell'ondulazione sono meno stringenti di quelle per la misura di prova (il maggiore tra il 10 % dell'ampiezza dell'ondulazione e l'1% della corrente di prova). La verifica del

rispetto delle prescrizioni sul fattore di ondulazione non deve comunque essere fatta durante ogni prova. È sufficiente dimostrare che l'impianto di alimentazione è in grado di generare una corrente continua conforme alle prescrizioni della norma. La verifica può essere fatta all'installazione su due configurazioni di prova (es alle correnti minima e massima) e ripetuta periodicamente o in occasione di interventi sull'impianto.

Per i sistemi di misura di correnti alternate si possono fare le seguenti considerazioni:

- Nelle misure in alternata il dispositivo convertitore può essere un trasformatore amperometrico (TA) o una bobina di Rogowsky. La scelta tra le due tipologie di trasduttori va fatta considerando i pregi e i difetti delle due apparecchiature.

Per il TA i principali pregi sono:

- I trasformatori amperometrici sono disponibili con classi di precisione molto basse⁶. Le incertezze di taratura realizzabili sono molto basse (decine di parti per milione), consentendo misure molto accurate. Se si prevede di realizzare misure di potenza sull'impianto di prova, i bassi valori degli errori d'angolo possono contribuire a ridurre l'incertezza⁷.
- I valori di errore di corrente e di errore d'angolo di un TA presentano un'elevata stabilità nel tempo. L'intervallo di taratura di un TA può essere anche di 5 anni.
- I TA presentano un campo di correnti di misura piuttosto ampio: a una corrente pari al 5% del valore nominale l'errore di corrente percentuale è da 3 a 4 volte l'indice di classe, e può essere corretto.
- I TA presentano, in regime permanente, una sostanziale insensibilità ai campi elettromagnetici esterni.
- La disponibilità di un segnale in uscita relativamente elevato (da 50 mA a 1.2 A per corrente secondaria di 1 A) rende i TA intrinsecamente immuni dai disturbi indotti nel sistema di trasmissione.

⁶ È bene ricordare che la classe di precisione non coincide con l'incertezza sul valore del rapporto di corrente: La classe di precisione è un parametro assegnato a un trasformatore di corrente i cui errori rimangono entro limiti prescritti, secondo una tabella riportata nella norma. Un trasformatore con classe di precisione 0.5, il cui valore di corrente secondaria viene corretto per tenere conto dell'errore, può garantire un'incertezza nel valore di rapporto di corrente inferiore a quella ottenibile con un trasformatore in classe 0.2.

⁷ Le misure di potenza nelle prove di riscaldamento di componenti presentano spesso un basso $\cos\phi$. In questo tipo di misure l'incertezza è fortemente influenzata dall'incertezza sulla misura della fase della corrente.

I principali svantaggi dei TA sono:

- Pesi e ingombri più elevati di quelli delle bobine di Rogowsky.
- Magnetizzazione del nucleo in caso di saturazione.
- Rischio di folgorazione in caso di apertura accidentale del circuito secondario.



Per le bobine di Rogowsky i principali pregi sono:

- Dimensioni e pesi contenuti per l'assenza del nucleo.
- Facilità di montaggio, essendo spesso fornite in esecuzione apribile.
- Ampio campo di correnti misurabili: gli integratori utilizzati con le bobine hanno spesso più fattori e permettono di realizzare misure su un campo amplissimo di correnti.
- Ampio campo di frequenze: la banda passante è, di fatto, limitata dalla banda passante dell'integratore.

I principali svantaggi delle bobine di Rogowsky sono:

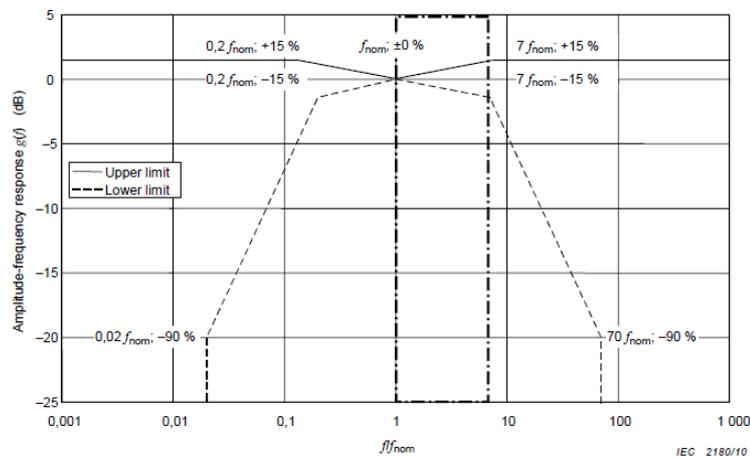
- Minore stabilità a lungo termine del fattore di scala, essenzialmente dovuta alla presenza dei circuiti elettronici dell'integratore. L'intervallo di taratura per il complesso bobina+integratore non dovrebbe essere superiore a 2 anni.
 - Maggiore sensibilità ai campi esterni: la presenza dei campi magnetici generati dalle altre fasi può influire sul rapporto corrente/tensione del trasduttore.
 - Sensibilità alla posizione del conduttore passante: per minimizzarne l'influenza, il conduttore deve essere montato perfettamente al centro della bobina o, in alternativa, la posizione della bobina deve essere fissa rispetto al conduttore.⁸
- I limiti imposti dalla CEI EN 62475 alla distorsione armonica impongono che il sistema di misura sia in grado di misurare la corrente in un campo di

⁸ La stessa Norma CEI EN 62475 al § 4.5 prescrive per le bobine di Rogowsky un posizionamento concentrico attorno ad un tratto rettilineo del conduttore, mantenendo l'asse del conduttore perpendicolare al piano della bobina.

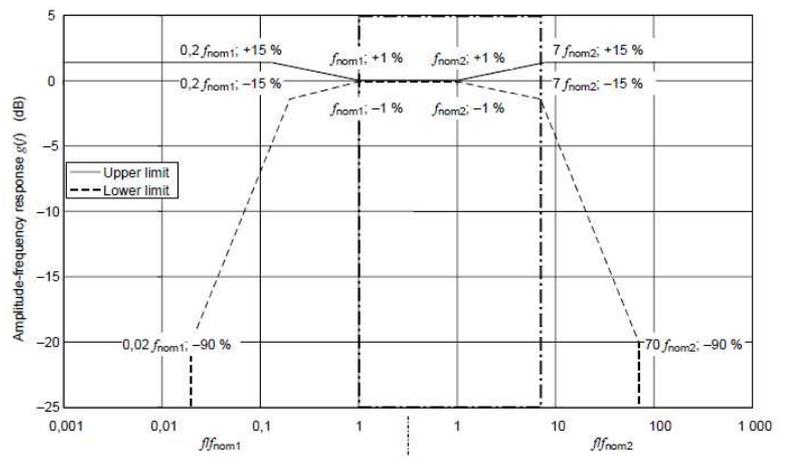
frequenze che va al di là della fondamentale. La norma fa una distinzione tra⁹:

- Sistemi di misura destinati a operare a una singola frequenza fondamentale;
- Sistemi di misura destinati a operare in un campo di frequenze fondamentali.

Per ognuno dei due casi la norma fornisce diagrammi della risposta in frequenza, riportati in Figura 3.



a)



b)

Figura 3:

Limiti per le risposte in frequenza dei sistemi di misura;

- a) Sistemi di misura destinati a operare a una singola frequenza fondamentale;
- b) Sistemi di misura destinati a operare in un campo di frequenze fondamentali.

⁹ Si veda § 7.4.3 Dynamic behaviour

Per i sistemi di misura destinati a operare a una singola frequenza, la risposta in frequenza (e, conseguentemente, il fattore di scala), nel campo che va dalla frequenza nominale alla 7° armonica, deve mantenersi nel campo indicato dalle linee continua e tratteggiata.

Per i sistemi di misura destinati a operare in un campo di frequenze, il fattore di scala del sistema di misura deve essere costante entro l'1% tra i limiti del campo di frequenze fondamentali e rimanere nel campo indicato dalle linee continua e tratteggiata per le frequenze fino alla 7° armonica della frequenza più elevata.

Le restrizioni imposte nella risposta in frequenza hanno l'obiettivo di assicurare che gli errori nella misura delle componenti armoniche non contribuiscano significativamente alla misura della corrente di prova.

Considerando le prescrizioni della Norma CEI EN 62475 sulle frequenze fondamentali delle correnti di prova (da 45 a 65 Hz), il campo di frequenze di interesse va da 45 a 455 Hz. Un tale campo di frequenze non rappresenta un problema sia utilizzando come dispositivo convertitore un TA sia utilizzando una bobina di Rogowsky. Per i TA¹⁰ la risposta in frequenza si mantiene entro i limiti ben oltre la frequenza di 455 Hz. Nel caso delle bobine di Rogowsky la banda passante è solitamente dell'ordine di qualche kHz. Per quanto riguarda il sistema di trasmissione anche nel caso di utilizzo di una coppia di cavi intrecciati è possibile rispettare la prescrizione della Norma CEI EN 62475.

- Come nel caso delle correnti continue, lo strumento di misura può essere un multimetro digitale che misura il vero valore efficace con incertezze trascurabili rispetto ai limiti fissati dalla Norma CEI EN 62475. Lo strumento può anche essere realizzato con schede di acquisizione.

¹⁰ Si veda, a tal proposito, la pubblicazione IEC /TR 61869 – 103 “Instrument transformers – The use of instrument transformers for power quality measurement”

6. Conferma metrologica e assicurazione della riferibilità

Come già illustrato nella precedente dispensa¹¹, la norma ISO 10012 definisce conferma metrologica:

“Insieme delle operazioni richieste per garantire che un dispositivo per misurazione sia conforme ai requisiti per l'utilizzazione prevista”.

Il concetto di conferma metrologica è tradotto dalla Norma CEI EN 62475 nel concetto di “approvazione”. Un sistema di misura è approvato se è dimostrata la conformità a uno o più degli insiemi di requisiti definiti dalla norma.

La Norma CEI EN 62475 descrive nel § 4 la procedura per la qualificazione e l'uso di un sistema di misura. Per ogni sistema di misura è richiesta una serie preliminare di prove, seguita da periodiche prove di prestazione e verifiche di prestazione durante la sua vita operativa.

La serie preliminare comprende le prove di tipo, realizzate su un esemplare a scopo di validazione del progetto, e le prove individuali o di serie, realizzate su ogni esemplare prodotto. Lo scopo delle prove e delle verifiche di prestazione è l'assicurazione dell'idoneità a realizzare le misure della corrente con le incertezze richieste dalla norma e l'assicurazione di riferibilità delle misure ai campioni nazionali e/o internazionali.

Il requisito principale per il sistema di misura e per i suoi componenti è la stabilità dei valori dei fattori di scala nel tempo, nelle condizioni di funzionamento previste. In particolare il Fattore di Scala Assegnato è determinato con la prova di prestazione attraverso la taratura del sistema.

Per quanto riguarda la periodicità delle prove di prestazione la Norma CEI EN 62475 prevede che si determini l'intervallo tra due prove successive considerando le evidenze sulla stabilità del fattore di scala. Come prescrizione generale si raccomanda una verifica annuale o, in ogni caso, con cadenza non superiore ai 5 anni. La prova di prestazione deve essere ripetuta in caso di manutenzione straordinaria (es. intervento manutentivo con sostituzione di componenti). Dato che la prova di prestazione comporta una taratura, la CEI EN 62475 prescrive la riferibilità ai campioni nazionali/internazionali.

Anche per i controlli di prestazione la periodicità deve essere definita considerando le evidenze sulla stabilità del fattore di scala. Anche in questo caso si raccomanda una periodicità al più annuale. Per i controlli non sono indicate procedure particolari, lasciando spazio alla libera interpretazione dei tecnici del laboratorio.

¹¹ Monografia N° 1 “La qualità delle misure nel processo di certificazione”

Tutti i risultati delle prove e dei controlli, incluse analisi sui risultati ottenuti devono essere raccolti in un registro delle prestazioni (in formato cartaceo o digitale). Le informazioni minime che devono essere contenute nel registro comprendono¹²:

- Descrizione generale del sistema di misura, con indicate le caratteristiche nominali di funzionamento;
- Risultati delle prove di tipo e individuali sui componenti e, se disponibili, sul sistema di misura completo;
- Risultati delle prove di prestazione;
- Risultati dei controlli di prestazione.

Il riepilogo delle prove previste per l'approvazione dei sistemi di misura di correnti continue è mostrato in Tabella 1. Le prove per l'approvazione dei sistemi di misura di correnti alternate sono elencate in Tabella 2.

Tabella 1: Prove previste per l'approvazione dei sistemi di misura di correnti continue				
Prova/verifica	Prove di tipo	Prove individuali	Prove di prestazione	Controlli di prestazione
Taratura con determinazione del fattore di scala del sistema di misura			X	
Controllo del fattore di scala				X
Prova di linearità		X ¹³	X ¹³	
Stabilità a breve termine		X		
Stabilità a lungo termine	X		X ¹³	
Influenza della temperatura ambiente	X			
Effetto dei percorsi di corrente sul dispositivo convertitore	X ¹³			
Effetto del software	X ¹³			
Prova di tenuta a secco sul dispositivo convertitore		X ¹³		
Fattore di scala del dispositivo convertitore		X		
Fattore di scala del sistema di trasmissione, se diverso dal semplice cavo		X		
Fattore di scala dello strumento di misura		X		
Cadenza		Una volta	Suggerita annuale, almeno ogni 5 anni	Almeno annualmente

¹² Per i sistemi di misura già in opera alla pubblicazione della norma, nel caso in cui non siano disponibili i risultati di alcune prove di tipo e/o individuali, ci si deve limitare a una verifica dei risultati delle tarature/verifiche disponibili, che devono essere incluse nel registro delle caratteristiche. Le evidenze sperimentali devono essere tali da dimostrare la costanza del fattore di scala nel tempo.

¹³ Se applicabile

Tabella 2: Prove previste per l'approvazione dei sistemi di misura di correnti alternate				
Prova/verifica	Prove di tipo	Prove individuali	Prove di prestazione	Controlli di prestazione
Taratura, con determinazione del fattore di scala del sistema di misura			X	
Controllo del fattore di scala				X
Prova di linearità		X ¹⁴	X ¹⁴	
Comportamento in frequenza del sistema di misura		X		
Stabilità a breve termine del dispositivo convertitore		X		
Stabilità a lungo termine	X		X	
Influenza della temperatura ambiente	X			
Effetto dei percorsi di corrente sul dispositivo convertitore	X ¹⁴			
Effetto del software	X ¹⁴			
Prova di interferenza			X ¹⁴	
Prova di tenuta a secco sul dispositivo convertitore		X ¹⁴		
Fattore di scala del dispositivo convertitore		X		
Fattore di scala del sistema di trasmissione, se diverso dal semplice cavo		X		
Fattore di scala dello strumento di misura		X		
Cadenza	Una volta		Suggerita annuale, almeno ogni 5 anni	Secondo evidenze, almeno annualmente

Per quanto riguarda le procedure di prova la CEI EN 62475 prescrive:

- Taratura con determinazione del fattore di scala del sistema di misura:** la taratura del sistema di misura, prevista nella prova di prestazione, può essere realizzata per confronto con un sistema di misura di riferimento (Figura 4). La corrente utilizzata per la taratura deve essere dello stesso tipo di quella che dovrà essere misurata. Il confronto è realizzato connettendo in serie il sistema di misura di riferimento e il sistema di misura in taratura. Si realizzano poi misure simultanee della corrente nel circuito e si ottiene il fattore di scala come rapporto tra la lettura del sistema di misura di riferimento e la lettura del sistema di misura in taratura. Per ogni livello di corrente si fanno più letture simultanee (normalmente almeno 10) e si ricava il fattore di scala come media dei valori ottenuti. A seconda delle caratteristiche del sistema di misura di riferimento, si possono utilizzare due procedure:

✚ **Confronto su tutto il campo di misura:** se la massima corrente misurabile dal sistema di misura di riferimento è maggiore o uguale a

¹⁴ Se applicabile

quella del sistema in taratura, è possibile confrontare i due sistemi ai valori minimo e massimo del campo di misura e in almeno tre livelli intermedi equispaziati. Il fattore di scala è ottenuto come media dei fattori di scala ottenuti ai vari livelli di tensione.

- + **Confronto su un campo limitato di correnti:** se non è disponibile un sistema di misura di riferimento con corrente nominale sufficiente a coprire il campo di misura del sistema in taratura, il fattore di scala può essere determinato a un livello di corrente non inferiore al 5% del limite superiore del campo di corrente da misurare. La costanza del valore del fattore di scala nel campo di correnti da misurare è poi completata da una verifica di linearità. Questo metodo, se da un lato permette l'utilizzo di sistemi di misura di riferimento più compatti, facilitando le operazioni nelle tarature in sito, dall'altro comporta un aumento dell'incertezza di taratura, che può influire sull'incertezza di misura durante le prove.

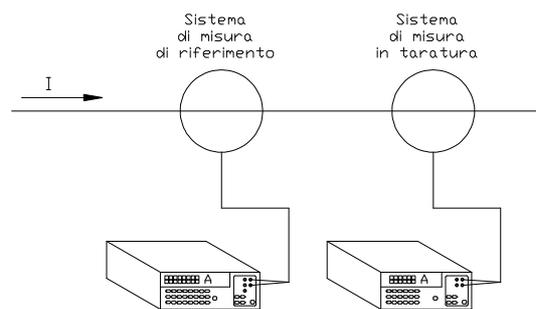


Figura 4:
Taratura per confronto con un sistema di misura di riferimento

In alternativa il fattore di scala del sistema di misura può essere ottenuta come prodotto dei fattori di scala dei componenti:

- + Per gli strumenti di misura, siano essi multimetri o schede di acquisizione, si può inviare lo strumento a un centro di taratura accreditato per il campo di correnti/tensioni previste per la misura¹⁵.
- + Per i sistemi di trasmissione, se composti di un semplice cavo, non è necessaria una taratura e il loro fattore di scala è unitario. Nel caso di sistemi di trasmissione che prevedano un'elaborazione del segnale, la

¹⁵ Il fattore di scala dello strumento è spesso unitario, a meno che non si utilizzi un software per l'elaborazione dei dati di misura, che permetta l'inserimento del fattore di scala del dispositivo convertitore.

taratura può anch'essa essere realizzata da un laboratorio accreditato per il campo di tensioni/correnti di interesse.

- ✚ Per i dispositivi convertitori la taratura può presentare alcuni problemi non essendo disponibili molti laboratori in grado di tarare un derivatore, un TA o una bobina di Rogowsky fino ai livelli di corrente utilizzati per le prove.¹⁶

La taratura separata dei componenti si rende obbligatoria nei sistemi di misura di correnti alternate quando sono previste oltre alle misure di corrente, misure di potenza. In questi casi entra in gioco l'errore d'angolo del dispositivo convertitore, che non può essere determinato nel confronto con il sistema di misura di riferimento.

Per i valori di corrente di prova più elevati, i sistemi di misura presentano dimensioni e pesi non trascurabili. In alcuni casi il sistema di misura è completamente integrato nell'impianto di prova. In questi casi conviene realizzare la taratura del sistema di misura presso lo stesso laboratorio di prova. La taratura in sito permette di compensare eventuali interazioni del sistema di misura con l'impianto di prova. In altri casi è più conveniente realizzare la taratura presso il laboratorio accreditato. È il caso della taratura separata dei componenti, in cui i vari componenti possono essere inviati a laboratori diversi.

- **Controllo del fattore di scala.** I metodi previsti dalla Norma CEI EN 62475 per la verifica del fattore di scala nei controlli di prestazione sono due:
 - ✚ **Verifica del fattore di scala dei componenti:** il metodo suggerito prevede l'utilizzo di un non ben definito "calibratore interno o esterno" con un'incertezza estesa non superiore all'1%. La prova è considerata superata se la variazione del fattore di scala del componente non varia per più dell'1% dal valore precedentemente rilevato. Questo metodo appare poco agevole da applicare sui dispositivi convertitori, siano essi TA, derivatori o bobine di Rogowsky, data la difficoltà di avere una sorgente di corrente riferibile per le correnti di prova più alte.
 - ✚ **Verifica del fattore di scala del sistema di misura, realizzata per confronto con un altro sistema di misura approvato.** La prova è considerata superata se la variazione del fattore di scala del componente non varia per più del 3% dal valore precedentemente rilevato. Questo metodo appare molto più facile da implementare: è sufficiente, nel caso di un impianto trifase confrontare le letture dei

¹⁶ L'unico laboratorio accreditato in Italia per la taratura dei TA ha capacità limitata a 5 kA.

sistemi di misura di due fasi chiudendole in corto circuito in modo da far fluire la stessa corrente nei due dispositivi convertitori.

- **Prova di linearità:** la prova di linearità permette di estendere il valore del fattore di scala, determinato a un valore inferiore alla corrente nominale del sistema di misura in taratura, all'intero campo di misura.

Per la verifica, la misura realizzata con il sistema in prova è confrontata con quella di un sistema di misura di cui è provata l'intrinseca linearità. Ad esempio per la misura di correnti alternate si può utilizzare una bobina di Rogowsky, fissata in una posizione, come campione di linearità. Per i derivatori resistivi la linearità può essere valutata considerando l'auto-riscaldamento del derivatore e il coefficiente di variazione della resistenza con la temperatura.

Il confronto deve partire da un livello di corrente minore o uguale a quello in cui è stato determinato il fattore di scala per confronto con il sistema di misura di riferimento.

- **Comportamento in frequenza del fattore di scala per i sistemi di misura di correnti alternate:** l'andamento del fattore di scala di un sistema di misura di correnti alternate (si vedano i grafici di Figura 3) può essere determinato tramite l'iniezione di correnti sinusoidali a frequenza variabile di ampiezza inferiore al valore nominale.
- **Stabilità a breve termine:** con questo parametro si tiene conto dell'auto-riscaldamento del dispositivo convertitore per effetto del passaggio di corrente. Il termine è particolarmente rilevante per i derivatori, mentre lo è molto meno per i TA e le bobine di Rogowsky. Per la valutazione di tale parametro, si confrontano i fattori di scala misurati all'inizio dell'applicazione della corrente e al raggiungimento dell'equilibrio termico.
- **Stabilità a lungo termine:** con questo parametro si tiene conto della variazione del fattore di scala tra due tarature successive. Dopo una prima valutazione fatta tenendo conto dei dati di specifica dei componenti del sistema di misura, la stabilità viene valutata confrontando i valori dei fattori di scala ottenuti in tarature successive.
- **Influenza della temperatura ambiente:** il parametro può essere valutato per via computazionale a partire dalla conoscenza delle caratteristiche dei componenti del sistema di misura. In alternativa si possono fare verifiche in camera climatica sui componenti e/o sul sistema completo.
- **Effetto dei percorsi di corrente:** l'effetto di interferenza su un sistema di misura dovuto a effetti di mutua induttanza dei percorsi di corrente vicini (es. in

un circuito trifase per l'effetto delle correnti nelle altre fasi) può essere valutato facendo circolare la corrente nominale in due fasi e misurando l'indicazione del sistema di misura della terza fase, in cui non circola corrente.

- **Effetto del software:** se si utilizza un software per l'elaborazione dei dati di misura, è necessario procedere a una sua validazione, per esempio fornendo in ingresso un set di dati noti e verificando il risultato dell'elaborazione.
- **Prova di tenuta a secco:** la prova di tenuta è richiesta nel caso in cui si possono verificare condizioni di rischio elettrico nel circuito. Nelle misure in esame le condizioni sono tali per cui la normale prova di tenuta in bassa tensione (es. per i TA prova di tenuta a 3 kV tra primario e secondario e tra secondario e terra) è sufficiente a garantire la sicurezza dell'operatore.
- **Determinazione del fattore di scala del dispositivo convertitore:** nel caso dei derivatori il fattore di scala è solitamente determinato con un circuito a ponte. Per i TA si utilizza un confronto diretto con l'uscita di un TA di riferimento, tramite un comparatore di corrente. Per le bobine di Rogowsky la tensione in uscita è confrontata con la tensione ai capi di un derivatore resistivo in cui è fatta fluire la corrente secondaria di un TA di riferimento.
- **Determinazione del fattore di scala del sistema di trasmissione:** il fattore di scala può essere ricavato iniettando un segnale, generato da un calibratore multifunzione, dello stesso tipo di quello in uscita dal dispositivo convertitore e confrontandolo con il segnale in uscita.
- **Determinazione del fattore di scala dello strumento di misura:** per lo strumento di misura il fattore di scala può essere ottenuto iniettando un segnale, generato da un calibratore multifunzione, dello stesso tipo di quello in uscita dal sistema di trasmissione e confrontandolo con la lettura dello strumento.

La responsabilità sulla realizzazione delle prove di tipo e delle prove individuali ricade sul costruttore del sistema di misura. Compito del laboratorio è richiedere la relativa documentazione ai fornitori e inserirla nel registro delle prestazioni.

Le prove e i controlli di prestazione ricadono invece sotto la responsabilità del laboratorio di prova. La Norma CEI EN 62475 non ricalca, purtroppo, l'impostazione delle normative sulla qualità della strumentazione. Le operazioni previste per l'approvazione riprendono comunque le azioni descritte nella monografia N° 1 "La qualità delle misure nel processo di certificazione". In Tabella 3 si fa una comparazione tra le azioni previste nell'ambito delle attività di conferma metrologica e le attività previste dalla CEI EN 62475.

Tabella 3 Comparazione tra le azioni previste nell'ambito delle attività di conferma metrologica e le attività previste dalla CEI EN 62475		
Attività prevista dalla 62475		Conferma metrologica
Prova di prestazione	Determinazione del fattore di scala	Taratura
	Stabilità a lungo termine	Esame dei risultati di taratura
Controllo di prestazione		Verifica intermedia

7. Valutazione dell'incertezza di misura della corrente

La valutazione dell'incertezza di misura prevista dalla CEI EN 62475 si rifà alla guida ISO/IEC 98-3 che coincide con il documento JCGM 100. L'incertezza di misura è quindi ottenuta combinando opportunamente i contributi di incertezza dovuti alle grandezze di influenza. Tali contributi possono essere stimati a partire dai risultati di misura, dai manuali delle apparecchiature, dai certificati di taratura o da qualunque fonte scientificamente attendibile (es. pubblicazioni scientifiche).

Nella Norma CEI EN 62475 gran parte della trattazione riguarda la determinazione dell'incertezza di taratura del sistema di misura, calcolo che deve essere fatto dal/i laboratorio/i di taratura e il cui risultato deve essere riportato nel certificato di taratura.

Per quanto riguarda la gestione in qualità di un laboratorio di prova, l'incertezza di taratura è solo il primo dato di ingresso, necessario, ma non sufficiente, per il calcolo dell'incertezza di misura. Nelle misure durante le prove è, infatti, necessario considerare ulteriori contributi di incertezza, dovuti alla presenza di grandezze di influenza, non presenti durante la taratura.

L'unico caso in cui il laboratorio di prova deve ricavare un'incertezza di taratura si ha quando il fattore di scala è ottenuto come il prodotto del fattore di scala dei componenti. In questo caso i componenti sono tarati separatamente e per ognuno dei fattori di scala è dichiarata un'incertezza di taratura. Il laboratorio può allora ottenere l'incertezza di taratura del sistema di misura completo come somma quadratica delle incertezze tipo relative¹⁷.

Per un sistema di misura approvato, la CEI EN 62475 fornisce¹⁸ un modello generale per il calcolo del fattore di scala $F_{X,mes}$ come:

$$F_{X,mes} = F_{X,cal} - \Delta F_{X,lin} - \Delta F_{X,st} - \Delta F_{X,lt} - \Delta F_{X,dyn} - \Delta F_{X,temp} \quad [4]$$

¹⁷ L'incertezza tipo è ottenuta dividendo l'incertezza estesa indicata sul certificato di taratura per il fattore di copertura K che deve essere dichiarato dal laboratorio di taratura.

¹⁸ Si veda ANNEX B.3

Dove:

$F_{X,cal}$ è il fattore di scala indicato nel certificato di taratura o il prodotto dei fattori di scala indicati nei vari certificati; a questo termine è associata una componente di incertezza $u(F_{X,cal})$, ottenuta dividendo l'incertezza estesa per il fattore di copertura.

$\Delta F_{X,lin}$ è il contributo che tiene conto della non linearità, la sua componente di incertezza $u(\Delta F_{X,lin})$ è ottenuta dividendo per radice di tre il campo di variazione dei fattori di scala ottenuti, per confronto con un sistema di misura di riferimento o nella verifica di linearità;

$\Delta F_{X,st}$ è il contributo che tiene conto dell'instabilità a breve termine del sistema. La sua componente di incertezza $u(\Delta F_{X,st})$ dovrebbe essere ricavata dai manuali del sistema o dei componenti;

$\Delta F_{X,lt}$ è il contributo che tiene conto dell'instabilità a lungo termine; la sua componente di incertezza $u(\Delta F_{X,lt})$ può essere ricavata dai manuali o confrontando i risultati di tarature successive, dividendo per la radice di tre la massima variazione del fattore di scala tra due tarature successive;

$\Delta F_{X,dyn}$ è il contributo che tiene conto del comportamento dinamico; la sua componente di incertezza $u(\Delta F_{X,dyn})$ è solitamente ininfluenza nel caso di corrente continua. Per la sua valutazione occorre considerare l'andamento della corrente nell'impianto: se la corrente ha andamento sinusoidale, con la stessa frequenza della corrente utilizzata in taratura, la componente di incertezza è ininfluenza anche in corrente alternata;

$\Delta F_{X,temp}$ è il contributo che tiene conto del campo di temperature in cui il sistema di misura viene utilizzato; la sua componente di incertezza $u(\Delta F_{X,temp})$ è ottenuta dividendo per radice di tre il campo di variazione dei fattori di scala nel campo di temperature previsto.

Per quanto riguarda i valori dei contributi ΔF_X , essi possono essere noti (es variazione di resistenza di un derivatore con la temperatura) e, quindi, applicati nel calcolo del fattore di scala. Spesso la correzione non è possibile e i vari contributi sono stimati di valore nullo, il che fa sì che il valore del fattore di scala coincida con il valore ottenuto dal/i certificato/i di taratura. Il fatto che tutti i contributi ΔF_X siano considerati nulli non annulla il loro effetto sull'incertezza.

Nel modello in esame, dove il fattore di scala è dato dalla somma di componenti con coefficienti unitari, l'incertezza tipo può essere calcolata come somma quadratica delle incertezze tipo assolute.

$$u(F_{X,mes}) = \sqrt{u(F_{X,cal})^2 + u(\Delta F_{X,lin})^2 + u(\Delta F_{X,st})^2 + u(\Delta F_{X,lt})^2 + u(\Delta F_{X,dyn})^2 + u(\Delta F_{X,temp})^2} \quad [5]$$

In ogni caso l'incertezza deve essere espressa come incertezza estesa con un livello di fiducia del 95%, corrispondente, per una distribuzione normale, a due volte

l'incertezza tipo composta. La condizione di distribuzione normale è quasi sicuramente rispettata, dato il gran numero di contributi all'incertezza. L'incertezza estesa nella misura della corrente di prova $U(F_{X,mes})$ è quindi data da:

$$U(F_{X,mes}) = 2u(F_{X,mes}) \quad [6]$$

L'incertezza estesa relativa è data da:

$$\frac{U(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} \quad [7]$$

Il modello indicato dalla CEI EN 62475 [4] non è l'unico possibile per il calcolo del fattore di scala. Si può anche realizzare un modello matematico in cui il fattore di scala è dato dal prodotto di più componenti:

$$F_{X,mes} = F_{X,cal} * F_{X,lin} * F_{X,st} * F_{X,it} * F_{X,dyn} * F_{X,temp} \quad [8]$$

Se il fattore di scala di taratura è ottenuto come prodotto dei fattori di scala l'equazione sopra diventa:

$$F_{X,mes} = F_{X,cal_conv} * F_{X,cal_tra} * F_{X,cal_strum} * F_{X,lin} * F_{X,st} * F_{X,it} * F_{X,dyn} * F_{X,temp} \quad [9]$$

Dove:

F_{X,cal_conv} è il fattore di scala del dispositivo convertitore;

F_{X,cal_tra} è il fattore di scala del sistema di trasmissione;

F_{X,cal_strum} è il fattore di scala dello strumento di misura.

I tre valori dei fattori di scala sono indicati sui relativi certificati di taratura. Nel modello matematico [4] in cui il fattore di scala era ottenuto come somma di più termini, i vari componenti ΔF , se non noti, erano stimati nulli. Nel modello [9] i termini F , se non noti, sono stimati unitari.

Se il valore di una grandezza da misurare è ottenuto come prodotto di più componenti, si può calcolare l'incertezza tipo composta come somma quadratica delle incertezze tipo relative:

$$\frac{u(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} = \sqrt{\left(\frac{u(F_{X,cal_conv})}{F_{X,cal_conv}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,cal_tra})}{F_{X,cal_tra}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,cal_strum})}{F_{X,cal_strum}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,lin})}{F_{X,lin}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,st})}{F_{X,st}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,it})}{F_{X,it}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,dyn})}{F_{X,dyn}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{X,temp})}{F_{X,temp}}\right)^2} \quad [10]$$

Anche in questo caso l'incertezza estesa relativa si ottiene moltiplicando per due l'incertezza tipo relativa composta:

$$\frac{U(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} = 2 \frac{u(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} \quad [11]$$

Esempio:

Sia dato un sistema di misura per correnti alternate costituito da:

- Un TA 10000 A/ 1 A, toroidale, con classe di precisione 0.5 e prestazione nominale di 20 VA;
- Un resistore da 10 Ω collegato sui morsetti del TA;
- Un cavo schermato RG 214, della lunghezza di 10 m;
- Un multimetro a 5,5 cifre, con misura del vero valore efficace.

Ai fini della classificazione della CEI EN 62475 si può identificare nel TA il dispositivo convertitore, nel complesso resistore + cavo coassiale il sistema di trasmissione e nel multimetro lo strumento di misura. In questo modo è possibile inviare a diversi laboratori accreditati i tre componenti.

Dal certificato di taratura del TA risulta che l'errore di rapporto medio è pari a +0.15 %. Il fattore di scala del TA è quindi:

$$F_{xconv} = K_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\eta_c}{100}} = 10000 \frac{1}{1 + 0.0015} = 9985 \quad [12]$$

L'incertezza relativa di taratura dichiarata nel certificato è pari a $2 \cdot 10^{-4}$. Il fattore di scala è adimensionale.

Dal certificato di taratura del resistore risulta un valore di resistenza di 9.984 Ω con un'incertezza relativa di taratura pari a $2 \cdot 10^{-4}$. Il fattore di scala del sistema di trasmissione ha le dimensioni di una conduttanza e vale:

$$F_{x,tras} = 1/9.984 = 0.10016 \text{ S} \quad [13]$$

Nel certificato di taratura del multimetro si dichiara un'incertezza di taratura pari a $3 \cdot 10^{-4}$. Il fattore di scala in questo caso è unitario e adimensionato.

Il fattore di scala può essere calcolato a partire dai fattori di scala dei tre componenti:

$$F_{x,cal} = 9985 \cdot 0.10016 \cdot 1 = 1000,01 \text{ S} \quad [14]$$

La corrente misurata sarà data dal prodotto del fattore di scala per la lettura del multimetro. Se la lettura del multimetro è 6,29 V, la corrente nel circuito risulta:

$$6.2954 \cdot 1000.01 = 629.60 \text{ A} \quad [15]$$

L'incertezza tipo relativa di taratura del sistema di misura è data dalla somma quadratica delle incertezze tipo relative. Le incertezze tipo relative sono ottenute dividendo per 2 le incertezze estese dichiarate nei certificati di taratura:

$$\frac{u(F_{x,cal})}{F_{x,cal}} = \sqrt{\left(\frac{u(F_{x,cal_conv})}{F_{x,cal_conv}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{x,cal_tra})}{F_{x,cal_tra}}\right)^2 + \left(\frac{u(F_{x,cal_strum})}{F_{x,cal_strum}}\right)^2} = \sqrt{(1 \cdot 10^{-4})^2 + (1 \cdot 10^{-4})^2 + (1.5 \cdot 10^{-4})^2} = 2.1 \cdot 10^{-4} \quad [16]$$

Per il calcolo dell'incertezza di misura durante le prove, si può scegliere di adottare il modello della misura [4] o il modello [8].

Utilizzando il modello [4] le componenti di incertezza risultano:

- $u(F_{X,cal}) = 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot 1000.01 = 0.21$;
- $u(\Delta F_{X,lin})$ è calcolata dividendo per radice di tre il campo di variazione dei fattori di scala dei tre componenti del sistema di misura. La variazione del fattore di scala del TA risulta, dal certificato nel campo 1000 A – 12000 A, pari allo 0.1 %, quella del resistore (dovuta essenzialmente all'autoriscaldamento) è pari allo 0.5 %, quella del multimetro è pari a $1 \cdot 10^{-4}$. Si ottengono tre incertezze tipo relative pari rispettivamente a $5.57 \cdot 10^{-4}$, $2.79 \cdot 10^{-3}$ e $5.57 \cdot 10^{-5}$ che, sommate quadraticamente, danno una componente pari a $2.8 \cdot 10^{-3} \Rightarrow 2.8$;
- $u(\Delta F_{X,st})$ per un sistema di misura quale quello in esame, può essere cautelativamente stimato pari a $2 \cdot 10^{-3} = 2$;
- $u(\Delta F_{X,it})$ deve essere calcolata considerando le possibili variazioni massime dei tre fattori di scala dei componenti. Per il TA si può prendere come parametro l'indice di classe, che dà un componente di incertezza tipo pari a $2.79 \cdot 10^{-3}$ ($0.5 \% / \sqrt{3}$). Per il sistema di trasmissione una variazione massima tra due tarature dello 0.2% \Rightarrow una componente pari a $1.2 \cdot 10^{-3}$. Per lo strumento la stabilità è ricavata dal manuale come incertezza di misura indicata divisa per 2, con un valore di incertezza tipo pari a $1.2 \cdot 10^{-3}$. La somma quadratica dei tre componenti risulta pari a $3.3 \cdot 10^{-3} \Rightarrow 3.3$;
- $u(\Delta F_{X,dyn})$, poiché la corrente generata dall'impianto ha andamento sinusoidale, con la stessa frequenza della corrente utilizzata in taratura è ininfluyente;
- $u(\Delta F_{X,temp})$ è ottenuta considerando il coefficiente di temperatura del resistore e quello dichiarato dal costruttore del multimetro: per un TA toroidale tale componente è ininfluyente. La componente di incertezza è pari a $1.5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow 1.5$.

Note le componenti di incertezza si può calcolare l'incertezza tipo composta del sistema di misura:

$$u(F_{X,mes}) = \sqrt{0.21^2 + 2.8^2 + 2^2 + 3.3^2 + 1.5^2} = 5.0 \quad [17]$$

L'incertezza estesa risulta:

$$U(F_{X,mes}) = 10 \quad [18]$$

L'incertezza estesa relativa:

$$\frac{U(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} = \frac{10}{1000.01} = 1.0\% \quad [19]$$

Se si utilizza il modello [8], l'incertezza tipo relativa può essere calcolata come somma quadratica delle incertezze tipo relative. Si ottiene:

$$\frac{u(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} = \sqrt{(2.1 \cdot 10^{-4})^2 + (2.8 \cdot 10^{-3})^2 + (2.0 \cdot 10^{-3})^2 + (3.3 \cdot 10^{-3})^2 + (1.5 \cdot 10^{-3})^2} = 0.5 \cdot 10^{-3} \quad [20]$$

L'incertezza estesa relativa risulta:

$$\frac{U(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} = 2 \cdot \frac{u(F_{X,mes})}{F_{X,mes}} = 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-2} = 1.0\% \quad [21]$$

Si verifica quindi che i due modelli descritti, [4] e [9] sono perfettamente equivalenti e, salvo errori di calcolo, danno lo stesso valore di incertezza.

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare gli ingegneri Virgino Scarioni e Saverio Manganaro per il sostegno all'iniziativa della pubblicazione di questa dispensa, il dottor Ezio Le Donne per l'opera di revisione delle bozze e la dottoressa Cristina Cassiago per i dati sulle tarature.