

**LE PROVE DIELETTRICHE CON
TENSIONI ALTERNATE SUI
COMPONENTI ELETTRICI DI
BASSA E ALTA TENSIONE**

-

**PRESCRIZIONI NORMATIVE
SUGLI IMPIANTI E
SULLA STRUMENTAZIONE DI
MISURA**

Ing. Angelo Sardi
Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
INRiM

1. Premessa: le prove con alte tensioni alternate

Le prove dielettriche con alte tensioni in regime sinusoidale sono di gran lunga le più diffuse tra le prove in alta tensione. Sono previste sia come prove di tipo¹ sia come prove di routine² per la quasi totalità delle apparecchiature elettriche. Le finalità delle prove sono molteplici:

- Verifica della tenuta degli isolamenti, applicando una tensione superiore a quella di normale funzionamento, per un tempo stabilito, e verificando l'assenza di scariche;
- Verifica della tensione di scarica, applicando una tensione crescente, fino a ottenere il cedimento dell'isolamento;
- Misura della cifra di perdita negli isolanti (misura di capacità e $\tan \delta$);
- Verifica, attraverso la misura del livello di scariche parziali, dell'assenza di difetti nella realizzazione di un isolamento solido;
- Verifica dell'assenza di scariche per effetto corona in un isolamento in aria/gas.

Per quanto riguarda le condizioni ambientali, le prove con alte tensioni alternate possono essere realizzate:

- A secco, con l'oggetto in prova posto all'interno del laboratorio e non soggetto ad alcun trattamento;
- Sotto pioggia, con l'oggetto di prova spruzzato con acqua della resistività e della temperatura prescritte, con intensità e direzione definite;
- In nebbia salina, con l'oggetto in prova posto in una camera in cui viene creata una nebbia salina nebulizzando con opportuni ugelli una soluzione di acqua e cloruro di sodio;
- Con inquinamento artificiale, depositando sulla superficie dell'oggetto in prova uno strato di soluzione che simula i depositi conduttivi dovuti all'inquinamento atmosferico.

Per quanto riguarda i circuiti, le prove con alte tensioni alternate possono essere realizzate con:

- Circuiti monofase (per quadri elettrici, interruttori, cavi ecc.);
- Circuiti trifase (per trasformatori e induttori).

¹ Le prove di tipo sono realizzate su prototipi per validare il progetto di un dispositivo.

² Le prove di routine sono realizzate su percentuali significative o sul 100 % della produzione e hanno lo scopo di verificare la corretta realizzazione dei dispositivi di serie.

2. Definizione dei livelli di tensione delle apparecchiature

È opportuno iniziare la trattazione delle prove sulle apparecchiature, definendo cosa si intende per bassa tensione e alta tensione.

Esaminando la normativa tecnica e di legge disponibile, si può rapidamente concludere che vi è una grande confusione sotto il cielo dell'elettrotecnica:

- Nell'ambito della normativa internazionale (IEC) il campo delle tensioni utilizzate nelle reti elettriche è diviso in due fasce:
 - o Le apparecchiature e i sistemi elettrici con tensione nominale fino a 1 000 V in corrente alternata e 1 500 V in corrente continua sono definiti di bassa tensione;
 - o Le apparecchiature e i sistemi elettrici con tensione nominale oltre i 1 000 V in corrente alternata e 1 500 V in corrente continua sono definiti di alta tensione.
- La normativa europea sulla sicurezza elettrica (EN 50110-1) aggiunge alle due categorie della IEC la "bassissima tensione". Abbiamo così tre definizioni:
 - o Bassissima tensione (ELV): tensione di norma³ non superiore a 50 V in corrente alternata (c.a.) o a 120 V in corrente continua non ondulata (c.c.) sia tra conduttori sia verso terra;
 - o Bassa tensione (BT): tensione di norma non superiore a 1 000 V in c.a. o a 1 500 V in c.c.;
 - o Alta tensione (AT): tensione di norma superiore a 1 000 V in c.a. o a 1 500 V in c.c.
- La normativa italiana sulla sicurezza elettrica (CEI 11-27) introduce il concetto di categoria per i sistemi elettrici:
 - o I sistemi di categoria 0 sono quelli con tensione nominale ≤ 50 V in corrente alternata e ≤ 120 V in corrente continua, usualmente detti a bassissima tensione;
 - o I sistemi di categoria I sono quelli con tensione nominale >50 V e $\leq 1 000$ V in corrente alternata, >75 V e $\leq 1 500$ V in corrente continua, usualmente detti a bassa tensione;

³ Non è chiaro cosa si intenda per "di norma", nella versione originale "normally". A parte la confusione con il termine "norma" che traduce in italiano il termine inglese "standard", definire livelli di tensione in maniera un po' generica, quando si parla di un argomento delicato come la sicurezza elettrica, non facilita chi deve applicare la norma. Sembra quasi che, nella stesura della 50110-1, all'interno del TC 78 del CENELEC, che ha redatto la norma, i rappresentanti dei paesi mediterranei, per loro natura più elastici, abbiano avuto la meglio sui rappresentanti dei rigorosi paesi del nord Europa.

- o I sistemi di categoria II sono quelli con tensione nominale $>1\,000\text{ V}$ e $\leq 30\,000\text{ V}$ in corrente alternata, $>1\,500\text{ V}$ e $\leq 30\,000\text{ V}$ in corrente continua, usualmente detti a media tensione;
- o I sistemi di categoria III sono quelli con tensione nominale $> 30\,000\text{ V}$, sia in corrente alternata, sia in corrente continua, usualmente detti ad alta tensione.
- Il vecchio DPR 547/1955 “Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro.”, abrogato dal D.lgs. 9 aprile 2008, N. 81, definiva:
 - o Sistemi a bassa tensione, con tensione minore o uguale a 400 V^4 in corrente alternata e a 600 V in corrente continua;
 - o Per tensioni superiori gli impianti erano ritenuti in alta tensione.
- La liberalizzazione del mercato elettrico ha introdotto una nuova classificazione:
 - o Bassa tensione fino a $1\,000\text{ V}$ in c.a. e $1\,500\text{ V}$ in c.c.;
 - o Media tensione oltre i $1\,000\text{ V}$ in corrente alternata e $1\,500\text{ V}$ in corrente continua, fino a 30 kV ;
 - o Alta tensione oltre i 30 kV , fino a 220 kV esclusi, di fatto i sistemi a 132 e 150 kV ;
 - o Altissima tensione a partire da 220 kV , di fatto i sistemi a 220 kV e 380 kV .

Da ultimo, collegandosi al sito del vocabolario internazionale di elettrotecnica⁵ dell'IEC (<http://www.electropedia.org/>) si possono trovare cinque definizioni per “Low Voltage”, una per “Medium Voltage” e tre per “High Voltage”, nessuna delle quali coincidente con una di quelle menzionate fino a questo punto.

La normativa sulle prove in alta tensione adotta l'attuale classificazione IEC. Per questo motivo nel seguito si farà riferimento a tale classificazione.

Bassa Tensione $\leq 1000\text{ Vac}$ <Alta Tensione

Se si sfogliano i cataloghi dei costruttori, si possono, da alcuni anni, trovare apparecchiature che, anche se indicate come prodotti di bassa tensione, hanno tensioni nominali superiori ai $1\,000\text{ V rms}$. Questi apparecchi, realizzati con le tecnologie tipiche della bassa tensione, si trovano in quella vera e propria “terra di mezzo” tra il limite superiore della bassa tensione e il primo valore normalizzato della media tensione ($3\,000\text{ V}$). Probabilmente nelle future norme IEC il limite di $1\,000\text{ V}$ in alternata sarà ritoccato verso l'alto.

⁴ Nel testo originale l'unità di misura della tensione è il “Volta”, anche se già dal 1946 la risoluzione 2 del CIPM aveva definito il volt come unità di misura del potenziale elettrico.

⁵ IEC 60050 “International Electrotechnical Vocabulary (IEV)”

3. Gli impianti di prova

Quali che siano i livelli di tensione o i circuiti di prova, lo schema generale di un impianto per prove con alte tensioni alternate prevede:

- Un impianto per la generazione di alta tensione, monofase o trifase;
- Un sistema di misura.

L'impianto per la generazione ha il compito di fornire la tensione, solitamente maggiore della tensione nominale del dispositivo in prova, che deve avere un andamento il più possibile prossimo alla sinusoide. Gli impianti sono descritti nel paragrafo 3.1.

Il sistema di misura è necessario per assicurare il rispetto dei limiti imposti dalle norme di prodotto. Non è, infatti, possibile costruire generatori che garantiscano una costanza della tensione generata indipendentemente dal valore del carico rappresentato dall'oggetto in prova. Per questo motivo le Norme che disciplinano l'esecuzione di prove dielettriche impongono la misura della tensione applicata, ne fissano le bande di tolleranza e indicano i limiti per l'incertezza dei sistemi di misura. I sistemi di misura sono descritti nel paragrafo 3.2.

Nel caso di prove su dispositivi di bassa tensione e, in applicazioni speciali, fino a tensioni di qualche decina di kV i componenti dell'impianto possono essere integrati in un unico complesso (Figura 1),.

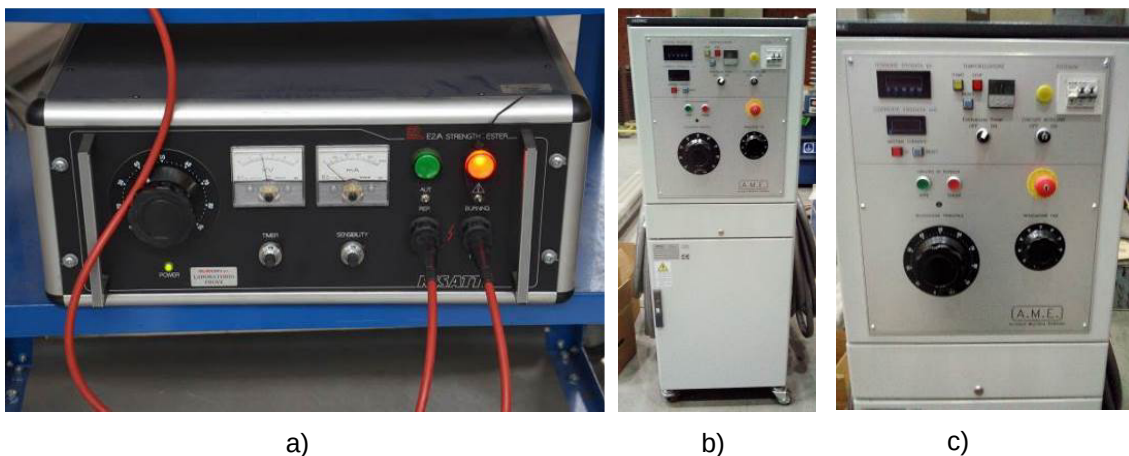


Figura 1: a) impianto di prova 5 kV con terminali a pistola; b) impianto 30 kV, con uscita in cavo, per prove su condensatori in gas compresso.

Negli impianti per prove con tensioni superiori, sia la struttura dell'impianto di generazione sia quella del sistema di misura sono più complesse, con i dispositivi di comando e gli strumenti di misura installati in un locale separato dall'area in cui si realizza la prova (Figura 2).



Figura 2: impianto monofase 1600 kV, area di alta tensione

Nella maggior parte dei casi, l'oggetto in prova costituisce un carico puramente capacitivo per l'impianto. Le correnti generate variano dalle decine di milliampere a qualche ampere, a seconda del valore di capacità e della tensione applicata.

Le potenze nominali degli impianti non sono particolarmente elevate, se confrontate con le potenze scambiate nei sistemi di trasmissione in alta tensione. Nelle prove dei cavi e dei trasformatori si può comunque arrivare a potenze dell'ordine dei MVA.

Un'altra caratteristica che differenzia i generatori di prova da quelli di potenza è la capacità di fare fronte alle brusche variazioni di tensione che si verificano in caso di scarica. A seguito di una scarica in un oggetto in prova, con conseguente corto circuito dell'uscita di alta tensione, non si hanno, come nei sistemi di potenza, sollecitazioni meccaniche dovute alle forti correnti in gioco. Più problematico è il controllo della distribuzione di potenziale nell'isolamento tra i conduttori: durante la scarica la distribuzione del potenziale tra i conduttori a diverso potenziale è determinata dalle capacità parassite. Se le capacità parassite non sono uniformemente distribuite, si può avere un cedimento dell'isolamento.

3.1. *Gli impianti per la generazione di alte tensioni alternate*

Un impianto di generazione di alte tensione comprende:

- Una sorgente di alimentazione regolabile (regolatore), alimentata dalla rete. La tensione in uscita dal regolatore va da qualche centinaio di volt a qualche chilovolt.
- Un circuito elevatore che riceve in ingresso la tensione in uscita dalla sorgente di alimentazione e la eleva al livello della tensione di prova.

Le possibili configurazioni di un impianto monofase sono mostrate in Figura 3. Come indicato in figura, la sorgente di alimentazione può essere:

- Un autotrasformatore a rapporto variabile, toroidale per potenze fino a qualche decina di kVA, a colonne per potenze maggiori, fino a 2-3 MVA.
- Un convertitore elettronico, con potenze da qualche centinaio di VA alle centinaia di kVA.
- Un gruppo motore-generatore, con potenze da qualche kVA a svariati MVA.

Utilizzando un autotrasformatore la frequenza della tensione di prova non può che coincidere con quella della rete di alimentazione. Con i convertitori elettronici è possibile variare la frequenza in un campo più o meno ampio (Es. 16.66 Hz/ 400 Hz). I gruppi motore/generatore sono anch'essi utilizzati per generare frequenze diverse da quelle di rete, tramite rapporti di cambio, combinando il numero di poli delle macchine o variando la velocità del motore con un inverter. I gruppi rotanti sono anche utilizzati per elevate potenze come rifasatori, limitando la potenza prelevata dalla rete alla sola potenza attiva assorbita dall'impianto⁶. La regolazione della tensione può essere in questo caso ottenuta pilotando l'eccitazione del generatore o inserendo in cascata un autotrasformatore a rapporto variabile.

La scelta tra le tre possibilità dipende dalle necessità di prova. I regolatori elettronici e gli autotrasformatori, nelle prove trifase (tensione di tenuta indotta e misura di scariche parziali nei trasformatori), permettono di regolare separatamente la tensione in modo da assicurarne l'uniformità nelle tre fasi, operazione impossibile da realizzare regolando l'eccitazione di un generatore rotante.

Negli ultimi anni sta prendendo sempre più piede la generazione elettronica, che, in passato, era limitata dai problemi di emissione di rumore elettromagnetico, che non permetteva la misura dei livelli di scariche parziali.

Le tensioni in uscita dai regolatori sono nel campo delle basse tensioni per potenze fino a qualche centinaio di kVA, per potenze superiori si arriva a tensioni di 3÷6 kV.

⁶ Es. impianto per prove di tensione indotta su trasformatori: motore da 200 kW @ 50 Hz 8 poli, generatore 1600 KVA 150 Hz 24 poli.

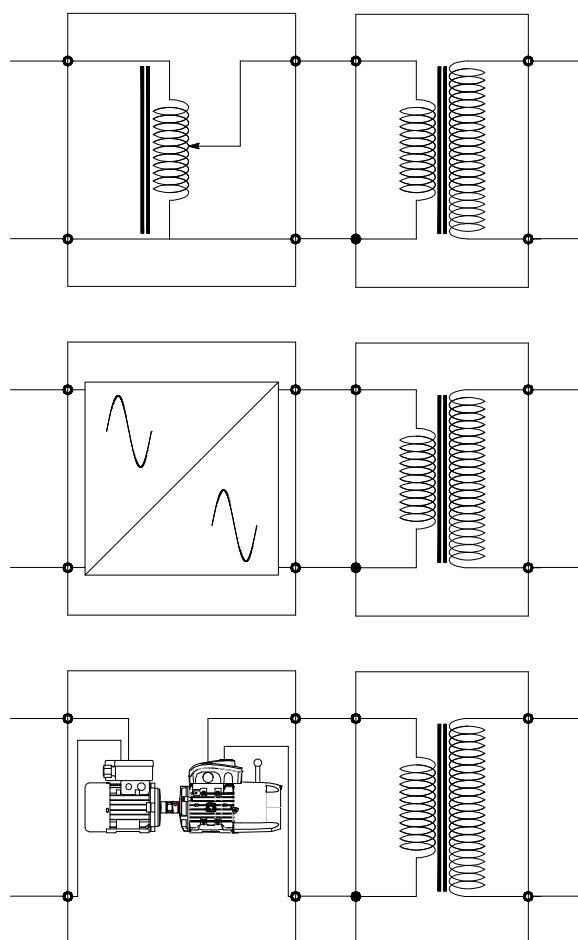


Figura 3: Schema generale di un impianto di generazione

Come mostrato in Figura 3, per elevare la tensione in uscita dal regolatore, si può utilizzare un trasformatore elevatore (monofase o trifase). Un trasformatore per prove dielettriche ha un avvolgimento primario, alimentato dal regolatore, e un avvolgimento secondario costruito in modo da uniformare la distribuzione di potenziale in caso di scarica. In alcuni casi il primario è diviso in due parti, collegabili in serie o in parallelo, per aumentare le possibilità di regolazione.

Le due possibili soluzioni costruttive per un trasformatore elevatore monofase isolato in olio sono illustrate in Figura 4. Nella prima configurazione (Figura 4 a)) gli avvolgimenti e il nucleo sono posti all'interno di un contenitore metallico. Per l'uscita del terminale di alta tensione si utilizza un isolatore passante. Nella seconda configurazione (Figura 4 b)) gli avvolgimenti e il nucleo sono posti all'interno di un contenitore isolante. In questo caso il terminale di alta tensione è un elettrodo posto alla sommità del contenitore.

I vantaggi della configurazione di Figura 4 a) sono:

- Una più facile dissipazione del calore;
- La possibilità, montando l'isolatore inclinato, di collocare il trasformatore addossato ad una parete del laboratorio.

Si può anche installare il trasformatore in un locale adiacente alla sala prove e trasferire la tensione all'interno dell'area di prova con un isolatore passante che attraversa la parete tra i due ambienti.

I vantaggi della configurazione con involucro di materiale isolante (Figura 4 b)) sono:

- Minore ingombro in altezza;
- La possibilità di impilare più unità nella configurazione a cascata, descritta più avanti.

In Figura 5 sono rappresentati due esempi di realizzazione di trasformatori elevatori monofase.

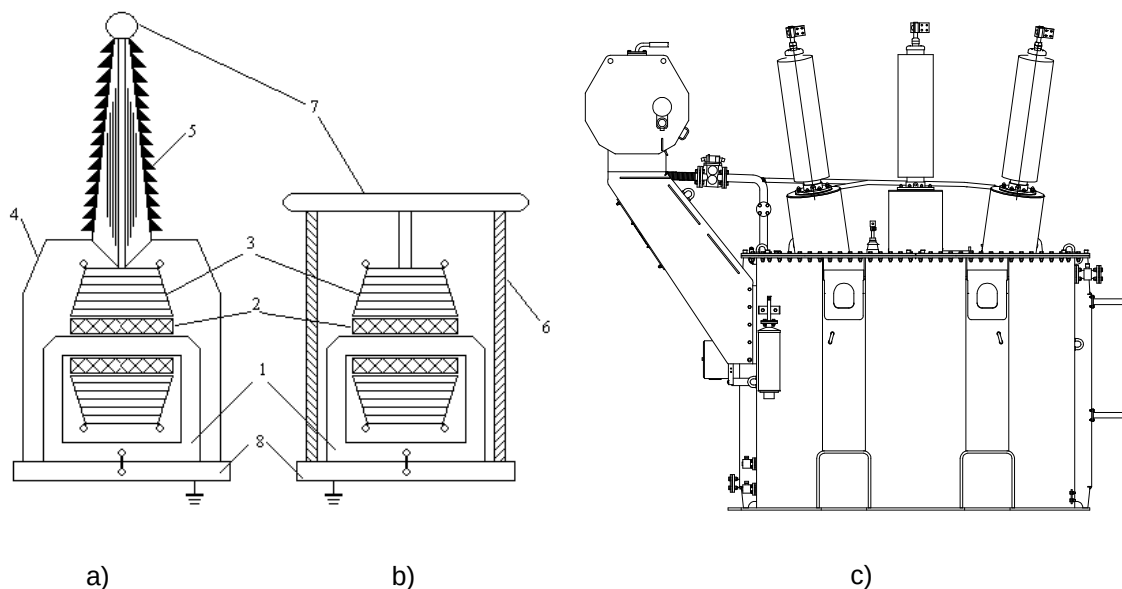


Figura 4: Trasformatori elevatori

a) trasformatore con involucro metallico b) trasformatore con involucro isolante. 1) nucleo 2) primario 3) secondario 4) involucro metallico 5) isolatore passante 6) involucro isolante 7) terminale di alta tensione 8) terminale di bassa tensione. c) trasformatore elevatore trifase 200 Hz.

I trasformatori di Figura 4 a) e b) hanno uno dei due poli connesso a terra. Negli impianti per prove su apparecchiature di bassa tensione le uscite sono entrambe isolate da terra per ridurre il rischio elettrico. Nei trasformatori elevatori per tensioni di prova inferiori ai 20 kV è spesso utilizzato l'isolamento in resina.

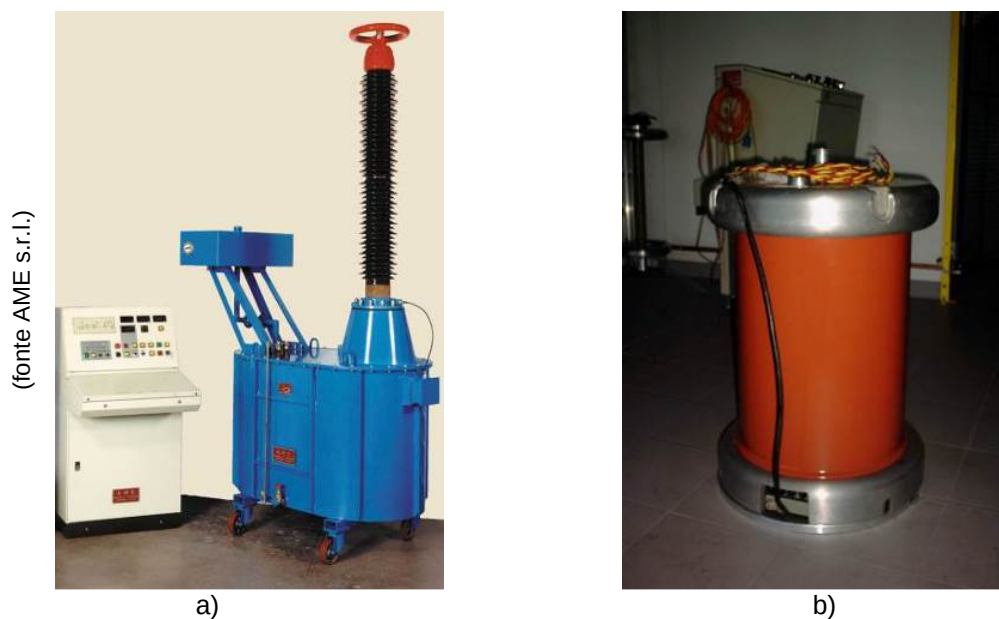


Figura 5: Trasformatori elevatori monofase.
a) Realizzazione con cassa metallica e isolatore passante - 150 kV.
b) Realizzazione con involucro isolante – 100 kV.

I trasformatori elevatori trifase sono realizzati nella configurazione in cassa metallica con isolatori passanti, come mostrato in Figura 4 c). Apparentemente questi trasformatori sono identici a quelli utilizzati in rete. Nella realtà essi si differenziano per due caratteristiche fondamentali:

- Il livello di scariche parziali deve essere almeno inferiore al 50 % livello massimo ammesso per i trasformatori in prova⁷;
- Il rapporto di trasformazione è molto maggiore di quello realizzato nei trasformatori utilizzati in rete (Es.1 kV/80 kV). L'elevato rapporto richiede una tecnologia costruttiva vicina a quella dei cosiddetti SSVT (Station Service Voltage Transformer).

Negli impianti monofase per tensioni superiori ai 500 kV si ricorre al collegamento in cascata di più trasformatori. Per realizzare un collegamento di trasformatori in cascata occorre dotare il trasformatore di un avvolgimento terziario, collegato in serie all'avvolgimento secondario, dimensionato per la corrente primaria e con numero di spire uguale al primario. Si realizza poi il collegamento mostrato in Figura 6.

⁷ Si vedano le prescrizioni sul livello di rumore di fondo della IEC 60270 "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements"

Il regolatore è collegato al primario 1) del primo trasformatore. L'avvolgimento terziario 3) alimenta l'avvolgimento primario 1') di un secondo trasformatore, isolato da terra per la tensione U . Gli avvolgimenti 3) e 1') sono al potenziale U rispetto a terra. I secondari dei due trasformatori sono collegati in serie. Si ha quindi una tensione rispetto a terra sul terminale di alta tensione del secondo trasformatore pari a $2U$. Come suggerito dalla figura, si può procedere al collegamento di un ulteriore trasformatore.

Per la prova monofase di oggetti con elevata capacità, che richiedono elevate potenze reattive (lunghe tratte di cavo o grandi trasformatori) si utilizzano gli impianti risonanti. Negli impianti risonanti si realizza la risonanza tra la capacità dell'oggetto in prova e un'induttanza collegata in serie. Si può così mantenere un'alta tensione ai capi dell'oggetto in prova e una corrente elevata nel circuito applicando una tensione molto minore. La tensione applicata ha il compito di fornire la potenza dissipata per perdite resistive del circuito.

Per ottenere la risonanza si utilizzano induttori variabili, dove la variazione di induttanza è ottenuta con nuclei magnetici mobili. Si sono costruiti induttori con tensione nominale di 300-400 kV che possono variare la propria induttanza di un fattore da 10 a 20.

La configurazione che si ottiene è mostrata in Figura 7. Le varie unità sono collegabili in serie e, solitamente, realizzate in contenitore isolato in modo da poter essere impilate. Il trasformatore di alimentazione deve avere un secondario dimensionato per la corrente nominale dell'impianto. La tensione di secondario (e, conseguentemente, la potenza prelevata dalla rete) è però da 20 a 50 volte inferiore a quella applicata sull'oggetto in prova.

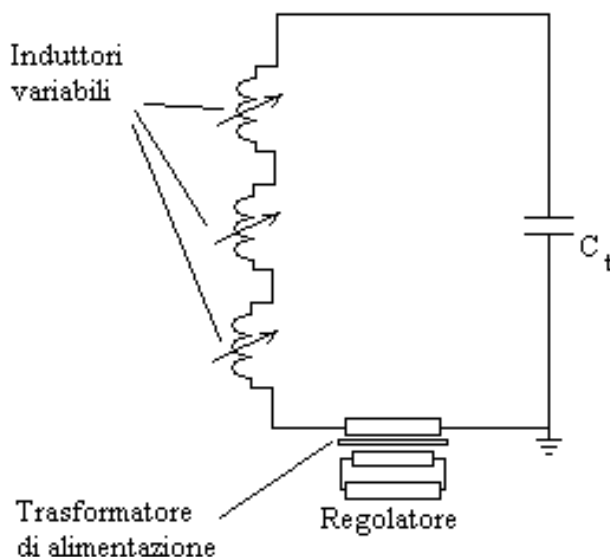


Figura 7: Circuito risonante serie.

I vantaggi principali degli impianti risonanti sono:

- La forma d'onda è sinusoidale anche in presenza di armoniche sull'alimentazione: per le componenti armoniche la risonanza non si verifica;
- La potenza richiesta dalla rete è molto minore, dell'ordine del 5% della potenza apparente sull'oggetto in prova;
- In caso di scarica l'arco non è sostenuto dalla rete come nei sistemi tradizionali: nel punto di scarica si dissipa solo l'energia elettrica del condensatore e l'energia magnetica dell'induttore (per 100 m di cavo di alta tensione a 500 kV circa 4 kJ). Alla scarica, il condensatore è cortocircuitato, non si ha più la condizione di risonanza e l'arco elettrico si interrompe rapidamente, senza provocare grossi danni;
- Il peso e l'ingombro dei generatori a parità di potenza apparente sono molto minori.

Gli impianti risonanti non sono utilizzabili nelle prove sotto pioggia o con inquinamento artificiale in cui si devono mantenere elevate correnti di dispersione resistive sull'oggetto in prova.

3.2. Sistemi di misura di alte tensioni alternate

Salvo poche eccezioni, un sistema di misura per alte tensioni continue o alternate è costituito da:

- Un dispositivo convertitore che riceve in ingresso la tensione da misurare e fornisce in uscita un segnale compatibile con le caratteristiche di ingresso del sistema di trasmissione;
- Un sistema di trasmissione che trasferisce il segnale in uscita dal dispositivo convertitore operando, se necessario, un'ulteriore conversione;
- Uno strumento di misura che fornisce in uscita il risultato della misura.

Nonostante la maggior parte degli strumenti attualmente sul mercato siano digitali, sono ancora utilizzati strumenti analogici (si veda Figura 1 a)).

La struttura del sistema di misura nasce dalla necessità di procedere a un'opportuna "riduzione" della tensione da misurare per renderla compatibile con le caratteristiche dello strumento, poiché, sia per gli strumenti analogici sia per quelli digitali, i valori massimi della tensione di ingresso sono nel campo della bassa tensione (<1000 V).

Parametro fondamentale di un sistema di misura di alte tensioni è il fattore di scala F_s , che è quel fattore che, moltiplicato per l'indicazione dello strumento, fornisce il valore della tensione in ingresso.

La presenza di più componenti impatta sulla valutazione dell'incertezza. In alta tensione occorre tenere conto, oltre che delle componenti di incertezza legate allo strumento, delle componenti dei fattori di scala del dispositivo convertitore e del sistema di trasmissione. I valori di incertezza ottenibili saranno, di conseguenza, maggiori di quelli ottenibili nelle misure realizzate con il singolo strumento in bassa tensione.

Due eccezioni alla struttura descritta sopra sono rappresentate dai voltmetri elettrostatici e dagli spinterometri a sfere. Entrambi i dispositivi sono sistemi di misura a "lettura diretta" della tensione generata. I voltmetri elettrostatici sfruttano la forza d'attrazione tra le armature di un condensatore ai capi del quale è applicata una tensione. In questi strumenti si realizza una trasduzione tensione/forza. Con i voltmetri elettrostatici si può misurare il valore efficace di una tensione alternata fino a frequenze fino al MHz, e a tensioni dell'ordine del MV, con incertezze dello 0,1%. Il loro utilizzo è però molto limitato dalla sensibilità agli urti e alle vibrazioni. Gli spinterometri permettono di misurare il valore di picco di una tensione a partire dalla misura di una distanza di isolamento in aria tra due sfere (Figura 8).

(fonte AME s.r.l.)



Figura 8: Spinterometri a sfere.

I dispositivi convertitori utilizzabili per la misura di alte tensioni alternate nelle prove dielettriche sono il trasformatore voltmetrico e il partitore di tensione.

3.2.1 Il trasformatore voltmetrico

Il trasformatore voltmetrico (TV) è un trasformatore abbassatore, al cui avvolgimento primario è applicata la tensione da misurare e al cui avvolgimento secondario è collegato un sistema di trasmissione, spesso costituito da un semplice cavo. Il sistema di trasmissione trasferisce il segnale di tensione allo strumento di misura. Data l'elevata impedenza di ingresso dello strumento, il trasformatore lavora sostanzialmente a vuoto.

In un trasformatore ideale il rapporto tra la tensione di ingresso U_1 e la tensione di uscita U_2 è dato dal rapporto tra le spire N_1/N_2 . Nella realtà il comportamento del TV non coincide con quello di un trasformatore ideale per la presenza dei parametri parassiti (resistenza degli avvolgimenti, induttanze parassite, perdite nel ferro e induttanza di magnetizzazione). Il rapporto U_1/U_2 non coincide esattamente con il rapporto spire e la sinusoide in uscita è sfasata rispetto a quella di ingresso di un

certo angolo. La differenza tra il rapporto di trasformazione nominale e il rapporto U_1/U_2 è detta errore di rapporto, solitamente espresso in punti percentuali. La differenza di fase tra la tensione in uscita e quella in ingresso è detta errore d'angolo, solitamente espresso in minuti d'arco o in centiradiani.

I TV sono isolati in resina fino a tensioni nominali primarie di 52 kV. Nell'intervallo 52 kV ÷ 72.5 kV si realizzano sia isolamenti in resina sia in olio o gas. Per tensioni ≥ 72.5 kV si utilizza l'isolamento in olio o gas compresso (Figura 9). Le migliori incertezze ottenibili con i trasformatori voltmetrici sono molto basse, dell'ordine di poche decine di parti per milione sulla misura del valore efficace. Di contro i costi di realizzazione sono elevati per la necessità di utilizzare grandi quantità di materiali pregiati (rame e leghe magnetiche). Ciò influisce sul peso e le dimensioni del TV.



20 kV



72.5 kV



170 kV

Figura 9: Trasformatori voltmetrici

L'utilizzo dei TV nella misura della tensione di prova è molto limitata. Negli impianti per prove su apparecchiature di alta tensione il TV è presente solo in alcune vecchie realizzazioni⁸.

Nelle apparecchiature per prove su dispositivi o componenti di bassa tensione, dove, per ridurre il rischio elettrico, le uscite del trasformatore elevatore sono entrambe isolate da terra, la separazione galvanica assicurata dai TV è fondamentale. In queste apparecchiature il dispositivo convertitore è spesso realizzato con un avvolgimento montato sul nucleo del trasformatore elevatore (Figura 10). Con questa soluzione l'avvolgimento di alta tensione svolge la funzione di secondario del trasformatore elevatore e quella di primario di un TV "virtuale" al cui secondario è collegato l'ingresso del voltmetro.

⁸ L'impianto per prove fino a 200 kV dell'INRiM è dotato di un TV Scarpa & Magnano, 500 kV/500 V.

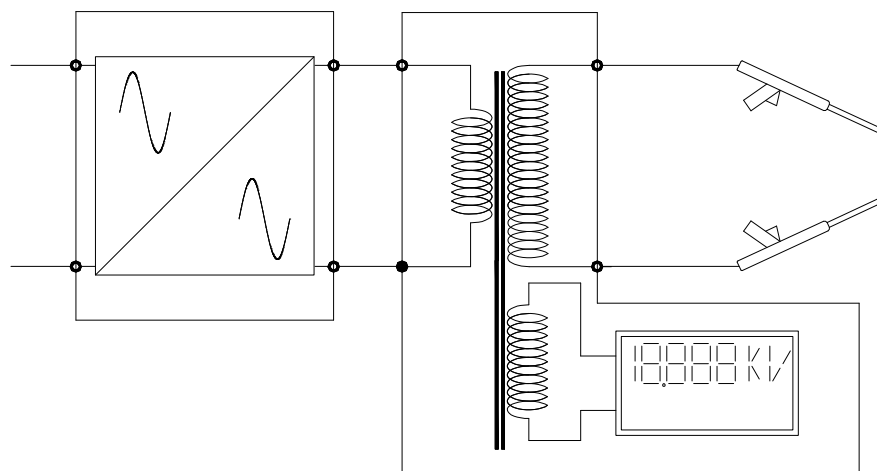


Figura 10: Avvolgimento di misura su un impianto per prove su apparecchiature di bassa tensione

L'incertezza della misura della tensione sull'oggetto in prova dipende anche dal carico del generatore: l'avvolgimento terziario misura di fatto la forza elettromotrice indotta nel secondario dell'elevatore, ma non può tenere conto delle cadute resistive e induttive dell'avvolgimento di alta tensione e dei collegamenti (cavi più pistole).

3.2.2 Il partitore di tensione

I partitori per tensioni alternate sono normalmente di tipo capacitivo. I partitori resistivi sono talvolta utilizzati per tensioni dell'ordine delle decine di kilovolt.

Collegando in serie due capacità C_1 e C_2 come indicato in Figura 11 e misurando la tensione V_2 ai capi di C_2 , si può ricavare la tensione in ingresso V_1 con la formula:

$$V_1 = V_2 \frac{C_1 + C_2}{C_1} = V_2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)$$

Dove:

- $F_s = 1 + \frac{C_2}{C_1}$ è il fattore di scala del partitore.

Per mantenere costante il fattore di scala occorre mantenere costante il rapporto tra le capacità. Nell'area di prova sono, però, presenti superfici a potenziali diversi che danno origine a capacità parassite che possono alterare il valore del fattore di scala. Le capacità parassite sono rappresentate con linee tratteggiate in Figura 11.

Il condensatore di alta tensione C_1 può essere costituito da un unico condensatore in gas compresso, in grado di sostenere la piena tensione da misurare, oppure realizzato collegando in serie più condensatori con tensione nominale inferiore.

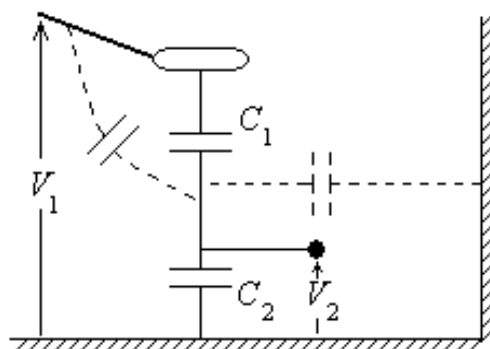


Figura 11: partitore capacitivo e capacità parassite

La struttura di un condensatore in gas compresso è mostrata in Figura 12. Le armature del condensatore sono poste all'interno di un cilindro isolante riempito di gas in pressione. L'alta tensione è applicata a un elettrodo esterno sulla sommità del cilindro isolante. L'elettrodo esterno è connesso all'elettrodo di alta tensione interno, di forma cilindrica, rastremato verso il basso.

L'elettrodo di bassa tensione è anch'esso cilindrico, posto all'interno dell'elettrodo di alta tensione, sostenuto da una colonna mantenuta al potenziale di terra. Un elettrodo di schermo, montato al di sotto dell'elettrodo di bassa tensione e mantenuto al potenziale di terra, impedisce che la presenza di elementi conduttori esterni perturbi la distribuzione radiale delle linee di campo. In questo modo il valore della capacità non è influenzato dalla presenza di capacità parassite tra elementi conduttori a potenziali diversi. La struttura coassiale evita che le forze di attrazione tra gli elettrodi, crescenti al crescere della tensione, provochino una deformazione che porterebbe a una variazione della capacità con la tensione.

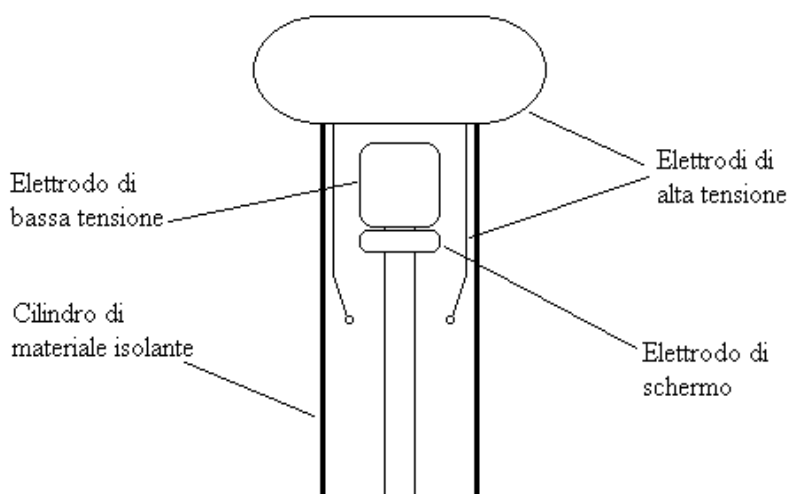


Figura 12: Struttura interna di un condensatore in gas compresso.

I condensatori in gas compresso vengono costruiti per tensioni fino a 1,5 MV. Valori tipici di capacità sono di 100 pF fino a circa 500 kV, 50, 33 o 25 pF per tensioni superiori. Le variazioni della capacità nel campo di tensioni d'utilizzo (10÷100% della tensione nominale) sono dell'ordine delle decine di parti per milione. Il valore della capacità è anche influenzato dalla temperatura (coefficiente di temperatura tipico 30 ppm/°C) e dalla pressione interna del gas, che devono essere, per quanto possibile, controllate.

Per le capacità di alta tensione ottenute collegando in serie più condensatori, si utilizzano condensatori in carta/polipropilene impregnati in olio, con tensione nominale dell'ordine della decina di kV per elemento⁹. In questo caso non è possibile eliminare l'effetto delle capacità parassite; per minimizzarne l'influenza occorre mantenere il valore della capacità di alta tensione sufficientemente elevato.

Al crescere della capacità di alta tensione cresce però la corrente assorbita dal partitore. L'effettiva corrente massima dell'impianto di prova è quindi ridotta della quota assorbita dal partitore. La scelta della capacità deriva quindi da un compromesso tra esigenze contrastanti. Le capacità di alta tensione dei partitori per tensioni alternate sono dell'ordine delle centinaia di pF.

Nei condensatori in carta/polipropilene il valore della capacità è influenzato dalla temperatura (coefficiente di temperatura tipico 100 ppm/°C) e dalla tensione applicata. La stabilità della capacità è inferiore rispetto al caso del condensatore in gas compresso. In Figura 13 è rappresentato un partitore capacitivo con condensatore di alta tensione realizzato in carta/polipropilene.

La capacità di bassa tensione C_2 è normalmente realizzata collegando in parallelo più condensatori con isolamento polimerico (polietilene, poliestere) o ceramico. La tensione nominale di uscita del partitore è dell'ordine delle centinaia di volt. Nei partitori capacitivi la capacità del cavo di misura è connessa in parallelo alla capacità di bassa tensione e contribuisce a definire il valore di C_2 . Il fattore di scala deve essere quindi determinato con il partitore completo del cavo di misura.

Gli strumenti di misura utilizzati per la lettura della tensione V_2 sono voltmetri con lettura del valore efficace o voltmetri di picco, che misurano il valore massimo della tensione. Per questi ultimi, la scala dello strumento è tarata in kV di cresta, divisi per $\sqrt{2}$.

⁹ In alcune realizzazioni il condensatore di alta tensione è realizzato collegando in serie condensatori ceramici tipo COG, che hanno coefficienti di temperatura dello stesso ordine dei condensatori in gas compresso (30 ppm/°C).

(fonte AME s.r.l.)



Figura 13: partitore capacitivo di tensione.

4. Il panorama normativo

In ambito CEI, La normativa generale riguardante le prove con alte tensioni alternate è elaborata dal Comitato Tecnico 42 “Tecniche delle prove ad alta tensione e a correnti elevate”. Il CT 42 è un comitato trasversale le cui norme interessano prodotti e famiglie di prodotti, appartenenti a diversi Comitati Tecnici. Attualmente, le norme in vigore, afferenti al CT 42, sono 12. Tra queste, quelle di interesse per le prove di tipo e di routine con alte tensioni alternate sono:

- CEI EN 60060-1, 03/2015 “Tecniche di prova in alta tensione Parte 1: Definizioni generali e prescrizioni di prova”
- CEI EN 60060-2, 03/2015 “Tecniche di prova ad alta tensione Parte 2: Sistemi di misura”
- CEI EN 61180, 07/2017 “Tecniche di prova ad alta tensione per apparecchiature di bassa tensione - Definizioni, prescrizioni relative alle prove e alle procedure, apparecchiatura di prova”

Come in molti altri casi, le tre norme recepiscono, senza traduzioni, i testi inglesi delle norme internazionali. Nel seguito si riportano le traduzioni in italiano dei termini e delle prescrizioni. La traduzione riprende i termini utilizzati in passato, quando le norme del CT 42 erano tradotte, le terminologie della Norma CEI UNI 70099 e le definizioni della IEC 60050 “International Electrotechnical Vocabulary”.

Esaminando i tre documenti, si può subito notare la differente definizione della tensione di prova:

- La CEI EN 60060-1, nel § 6.1.2, definisce la tensione di prova come il valore della tensione di picco divisa per la radice di 2, definendo una sorta di “Valore efficace convenzionale”. Questa scelta è legata al fatto che il fenomeno di scarica in un isolante è legato al valore massimo della tensione e non al suo valore efficace. Il valore di picco è, sua volta, definito come il valore medio dei valori di picco positivi e negativi.¹⁰
- La CEI EN 61180, nel § 6.1.1.1, definisce come tensione di prova il valore efficace, pur rimarcando che la scarica è legata al valore di picco della tensione.

Diverse sono anche le prescrizioni sulla forma d'onda e le tolleranze da rispettare durante la prova:

- La CEI EN 60060-1 prescrive che la tensione di prova sia una tensione alternata con:
 - o Una frequenza di 45÷65 Hz (frequenza di rete). Sono anche previste tensioni di prova con frequenze superiori o inferiori ai limiti sopra, includendo in tal modo sia le frequenze intorno a 16,66 Hz, tipiche del settore ferroviario, sia le frequenze utilizzate nelle prove con tensione indotta dei trasformatori, che vanno dai 100 ai 500 Hz;
 - o Una forma d'onda approssimativamente sinusoidale, con una differenza di ampiezza tra il picco positivo e quello negativo inferiore al 2%;
 - o È consentito uno scostamento dal valore di $\sqrt{2}$ entro $\pm 5\%$ del rapporto tra picco e r.m.s., dato che si ritiene che i risultati di un test ad alta tensione non siano influenzati da piccole deviazioni della sinusoide. Sono ammesse deviazioni maggiori in alcuni casi, per esempio quelli in cui l'oggetto in prova presenta caratteristiche fortemente non lineari;
 - o È suggerito l'uso del parametro THD¹¹ (Distorsione Armonica Totale) per caratterizzare la distorsione della forma d'onda, che potrebbe essere rilevante per le misure di scariche parziali. Si ha:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_n^2}}{V_1}$$

Dove:

V_1 è il valore efficace della fondamentale;

V_n è il valore efficace della n-esima armonica, a partire dalla seconda;

¹⁰ La misura del valore efficace può essere utilizzata per i casi in cui può essere determinante, ad esempio, quando sono coinvolti effetti termici.

¹¹ La Total harmonic distortion (THD) è definita come: “the ratio of the rms value of the harmonic content of an alternating quantity to the rms value of the fundamental component of the quantity [IEC 60050-551: 1998, 551-17-06]. La definizione del THD è presente nella CEI EN 61180, ma non nella CEI EN 60060-1.

- La CEI EN 61180 riporta le stesse prescrizioni per la tensione di prova (frequenza di 45÷65 Hz e possibilità di realizzare prove con frequenze superiori o inferiori), con qualche modifica:
 - o Per il rapporto tra valore di picco e valore efficace si ammette uno scostamento inferiore (± 3 %);
 - o Per la distorsione armonica si indica il limite del 5 % alla massima potenza generata;
- La tolleranza sulla tensione di prova, indicata dalla CEI EN 60060-1 è pari a ± 1 %, per le prove con durata fino a 60 s, e ± 3 %, per le prove con durata superiore;
- Nella CEI EN 61180 la tolleranza è del 3 %, indipendentemente dalla durata della prova.

La discrepanza tra le prescrizioni, in due ambiti così simili, merita di essere analizzata:

- Nelle apparecchiature con tensione nominale maggiore di 1 000 V, in condizioni nominali, i valori di campo elettrico negli isolanti sono molto maggiori di quelli presenti negli isolamenti delle apparecchiature di bassa tensione. Si potrebbe dire che la prova dielettrica nelle apparecchiature di bassa tensione ha lo scopo di verificare gli errori di montaggio, mentre nelle apparecchiature di alta tensione ha lo scopo di verificare la corretta realizzazione degli isolamenti. Per questo motivo nelle prove di apparecchiature di alta tensione la misura del picco => della massima sollecitazione è fondamentale;
- La misura del valore di picco di una tensione sinusoidale richiede l'utilizzo di un voltmetro digitale con frequenza di campionamento e risoluzione sufficientemente elevate, ben diverso da un comune voltmetro in corrente alternata per la misura del valore efficace. Questo tipo di strumenti non sono di facile reperimento sul mercato e sono, solitamente, molto costosi;
- La prescrizione, per le prove su apparecchiature di bassa tensione, di una tolleranza minore per il rapporto picco/valore efficace, contribuisce a ridurre la probabilità che il risultato di prova dipenda dalla distorsione della tensione.

La scelta del valore efficace come valore della tensione di prova per le apparecchiature di bassa tensione è quindi giustificata sia da ragioni tecniche, sia da ragioni economiche: il costo di un buon voltmetro a vero valore efficace è molto minore di quello di uno scadente voltmetro di picco.

Anche esaminando le prescrizioni sulla gestione della strumentazione delle due norme si possono trovare differenze significative.

5. Conferma metrologica e assicurazione della riferibilità

La normativa ISO che disciplina la gestione della strumentazione nelle attività di misura e prova¹² definisce, con il termine conferma metrologica:

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

Le operazioni costituenti la conferma metrologica coincidono, nella CEI EN 60060-2 e nella CEI EN 61180 con il processo di “approvazione del sistema di misura della tensione di prova”.

Curiosamente la definizione di “Sistema di misura approvato” è presente nella sola CEI EN 60060-2 (§ 3.1.3):

Sistema di misura approvato:

Sistema di misura che è dimostrato conforme a uno o più dei set di requisiti stabiliti in questo documento (la 60060-2)¹³

Nella CEI EN 61180 la definizione di sistema di misura approvato non è stata inserita nel paragrafo 3, ma il termine è comunque utilizzato.

Per entrambe le norme, un sistema di misura per alte tensioni alternate è approvato quando le sue caratteristiche sono verificate attraverso una serie di prove iniziali, seguite da prove periodiche. Le prove iniziali sono di competenza del costruttore, le prove periodiche sono a carico dell'utilizzatore, che le utilizza per verificare il mantenimento delle caratteristiche metrologiche nel tempo. Tutti i risultati delle prove devono essere registrate in un Registro delle Caratteristiche (Record of performance).

In entrambi i documenti, le prove iniziali sono, a loro volta, suddivise in:

- Prove di tipo (type tests): realizzate una sola volta su uno o più esemplari, hanno come scopo la verifica del progetto del sistema di misura;
- Prove di routine (routine tests): realizzate su ciascun sistema di misura prodotto.

È bene ricordare che, se l'utilizzatore interviene sul sistema di misura, per esempio sostituendo lo strumento, deve assumersi l'onere di realizzare le prove iniziali.

Per quanto riguarda le prove successive alla messa in servizio, mentre la CEI EN 61180 prescrive solo periodiche prove di prestazione (performance tests), la CEI EN 60060-2 introduce ulteriori controlli di prestazione (performance checks), da realizzare con frequenza maggiore.

¹² ISO 10012 "Measurement management systems -- Requirements for measurement processes and measuring equipment, " in italiano "Sistemi di gestione della misurazione - Requisiti per i processi e le apparecchiature di misurazione" 2003/04

¹³ Letteralmente: “measuring system that is shown to comply with one or more of the sets of requirements set out in this document”, definizione non proprio chiarissima.

5.1 Prescrizioni per i sistemi di misura utilizzati nelle prove

Le prove previste dalla CEI EN 61180 per l'approvazione di un sistema di misura sono elencate nella Tabella 1. Ognuna delle prove permette di stimare una componente di incertezza che contribuisce alla stima dell'incertezza tipo composta del sistema di misura.

Tabella 1			
Prove per un sistema di misura approvato per la misura di tensioni alternate durante le prove di alta tensione (CEI EN 61180)			
	Prove di tipo	Prove di routine	Prove di prestazione
Fattore di scala determinate in taratura		X	X
Influenza del carico	X		
Comportamento dinamico	X		
Stabilità a breve termine		X	
Stabilità a lungo termine	X		X
Effetto della temperatura ambiente	X		

Le procedure, le condizioni e i risultati di tutte le prove devono essere inclusi in un registro delle caratteristiche, mantenuto a cura dell'utilizzatore. Il registro deve contenere almeno le seguenti informazioni.

- Descrizione generale del Sistema di misura.
- Risultati delle prove di tipo, di routine e di prestazione.

In pratica, il registro comprende il fascicolo tecnico del sistema di misura, che, nella maggior parte dei casi, è incluso nel fascicolo tecnico dell'apparecchiatura di prova, i certificati di taratura e le verifiche post-taratura¹⁴.

Per quanto riguarda la frequenza di ripetizione delle prove di prestazione, la CEI EN 61180 prescrive una frequenza annuale, a meno che non si dimostri una sufficiente stabilità delle caratteristiche del sistema di misura nel tempo. In ogni caso si prescrive una prova di prestazione a seguito di modifiche o interventi sul sistema.

¹⁴ Per la descrizione delle attività di conferma metrologica di un sistema di misura si rimanda alla prima monografia di questa serie.

Le prove previste dalla CEI EN 60060-2 per l'approvazione di un sistema di misura sono elencate nella Tabella 2. Rispetto alle prescrizioni della CEI EN 61180, la CEI EN 60060-2 ha introdotto i controlli di prestazione intermedi tra le prove di prestazione. Per le prove di tipo, di routine e per le prove di prestazione, il significato dato dalla CEI EN 60060-2 non varia rispetto a quello definito nella CEI EN 61180, ma sono previste un numero maggiore di verifiche.

Tabella 2				
Prove per un sistema di misura approvato per tensioni alternate (CEI EN 61180)				
Prova	Prove di tipo	Prova di routine	Prove di prestazione	Controllo di prestazione
Misura fattore di scala in taratura			X	
Verifica del fattore di scala				X
linearità		X	X	
Comportamento dinamico	X		X	
Stabilità a breve termine		X		
Stabilità a lungo termine	X		X	
Effetto della temperatura ambiente	X			
Effetto di prossimità	X		X	
Effetto del software	X			
Fattore di scala del dispositivo convertitore	X	X		
Fattore di scala del sistema di trasmissione ⁽¹⁾	X	X		
Fattore di scala dello strumento di misura	X	X		
⁽¹⁾ Se non costituito da un semplice cavo				

Per quanto riguarda la periodicità delle prove di prestazione, la prescrizione di un intervallo di un anno della CEI EN 61180, diventa nella CEI EN 60060-2 una raccomandazione, con una premessa (sacrosanta) di scegliere l'intervallo tra due tarature successive in base alle caratteristiche di stabilità a lungo termine.

In ogni caso la CEI EN 60060-2 prescrive che l'intervallo tra due prove non esuberi i cinque anni. Si prescrive una prova di prestazione dopo interventi di modifica o riparazioni. Per i controlli di prestazione si prescrive un intervallo non superiore a 1 anno tra due controlli successivi.

Tutti i risultati di prova devono essere raccolti in un registro delle caratteristiche. Il registro deve contenere le seguenti informazioni:

- Descrizione generale del sistema di misura;
- Risultati delle prove di tipo e di routine sui componenti e/o sul sistema completo;
- Risultati delle prove e dei controlli di prestazione.

Si fa un'eccezione per i sistemi di misura realizzati prima del 1994, per i quali possono non essere disponibili i risultati delle prove di tipo e di routine. In questi casi il registro delle caratteristiche contiene solo i risultati delle verifiche e dei controlli.

Oltre alle prove elencate in Tabella 2, sono previste alcune prove (es tenuta a secco e sotto pioggia) che non sono trattate nel seguito, dato che non si riferiscono alle caratteristiche metrologiche del sistema di misura. Va notato come nei sistemi di misura degli impianti oggetto delle CEI EN 60060-2 il dispositivo convertitore è spesso separato dal resto dell'impianto.

Mettendo a confronto le due tabelle si può notare come:

- La CEI EN 61180 prevede la verifica dell'effetto del carico sul fattore di scala, non prevista dalla CEI EN 60060-2. Negli impianti per prove su apparecchiature di bassa tensione il dispositivo convertitore è spesso sistemato all'interno dell'apparecchiatura. Con questa soluzione la misura della tensione non è fatta direttamente ai capi dell'oggetto in prova, ma all'uscita dal generatore. Occorre quindi tenere conto dell'effetto delle cadute di tensione nei collegamenti tra il generatore e l'oggetto in prova. Negli impianti per prove sulle apparecchiature di alta tensione il dispositivo convertitore è quasi sempre collegato direttamente all'oggetto in prova, eliminando, così, l'effetto di carico.
- La CEI EN 60060-2, oltre a introdurre i controlli di prestazione prescrive:
 - o Una verifica di linearità, nelle prove di routine e nelle prove di prestazione;
 - o La verifica dell'effetto di prossimità, nelle prove di tipo e nelle prove di prestazione;

- o La verifica del software, nelle prove di tipo;
- o La determinazione dei fattori di scala dei componenti, nelle prove di tipo e di routine.

La verifica di linearità è stata introdotta per quei casi in cui la massima tensione è maggiore della tensione nominale del sistema di misura di riferimento¹⁵, come per l'impianto da 1,6 MV mostrato in Figura 2. In questo caso la misura del fattore di scala, realizzata per confronto con il sistema di riferimento, è integrata con una verifica di linearità.

La necessità di verificare l'effetto di prossimità deriva dall'utilizzo di dispositivi di conversione posti in prossimità dell'oggetto in prova; occorre in questo caso valutare l'influenza sul fattore di scala delle capacità parassite tra il dispositivo convertitore e le superfici a potenziali diversi, presenti nel laboratorio di prova.

La necessità di valutare l'influenza del software deriva dalla definizione della tensione di prova della 60060-1. Per determinare il valore di picco della tensione (che diviso per $\sqrt{2}$ dà la tensione di prova) si deve ricorrere a un campionamento della forma d'onda e a un software che determini i valori massimi e ne calcoli il valore medio. L'algoritmo di calcolo gioca un ruolo fondamentale sulle caratteristiche metrologiche del sistema di misura e va, di conseguenza, verificato.

La misurazione dei fattori di scala dei componenti tiene conto di come, nelle prove su apparecchiature di alta tensione, i componenti del sistema di misura siano ben individuabili e separabili. È quindi bene che il costruttore¹⁶ determini il fattore di scala per ciascuno di essi.

Al di là delle differenze analizzate nei due punti precedenti le procedure di prova previste dalla CEI EN 61180 e dalla CEI EN 60060-2 coincidono in molti punti. Nel seguito sono descritte le procedure di prova previste dalle due norme.

5.1.1 Prove di tipo

Le prove di tipo comprendono le seguenti verifiche:

- **Valutazione dell'influenza del carico (solo per CEI EN 61180):** questa verifica è fondamentale per i sistemi di misura che non sono connessi direttamente ai capi dell'oggetto in prova (si veda Figura 10).

Per verificare l'influenza del carico, si procede determinando il fattore di scala del sistema di misura, per confronto con un sistema di misura di riferimento, al minimo carico possibile, e al massimo carico nominale. Per minimo carico

¹⁵ I sistemi di misura di riferimento hanno tensioni nominali limitate a qualche centinaio di kV.

¹⁶ Le prove di tipo e di routine sono sotto la responsabilità del costruttore. I fattori di scala dei componenti possono essere utilizzati per il calcolo del fattore di scala del sistema completo.

possibile si intende il carico rappresentato da un sistema di misura di riferimento¹⁷, collegato ai terminali di uscita dell'impianto. Per realizzare il massimo carico si possono utilizzare resistori, induttori, condensatori o combinazioni di questi, in modo da assorbire la massima corrente del sistema (figura 14).

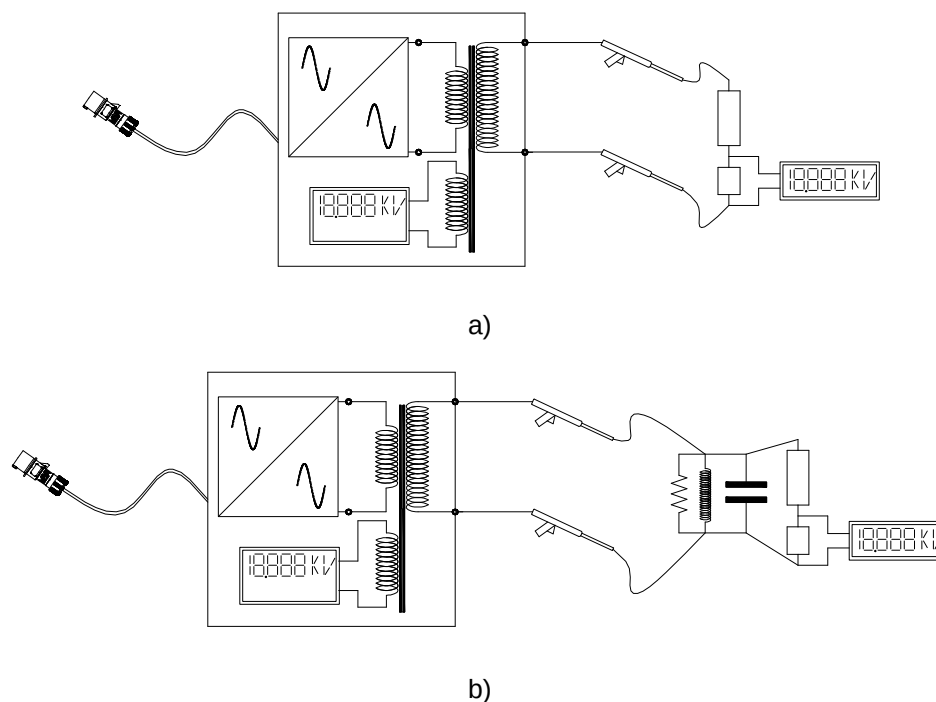


Figura 14: Valutazione dell'influenza del carico: a) carico minimo; b) carico massimo

Si può ricavare il relativo contributo di incertezza. L'incertezza tipo relativa u_{BI} è data da:

$$u_{BI} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{MaxLoad}}{F_{MinLoad}} - 1 \right|$$

In alcuni impianti di prova di apparecchiature di alta tensione il sistema di misura è inglobato nel generatore, con lo schema di Figura 14. In altri casi come ramo di alta tensione del dispositivo convertitore si utilizza l'isolatore passante capacitivo del trasformatore elevatore. In tutti questi casi l'effetto del carico andrebbe valutato non essendo più trascurabile. Nonostante ciò, la CEI EN 60060-2 non prescrive questa verifica.

¹⁷ Spesso il sistema di misura di riferimento è indicato come sistema campione. Il termine campione dovrebbe essere utilizzato unicamente per i campioni, nazionali o internazionali, delle unità di misura.

- **Comportamento dinamico (per CEI EN 61180 e CEI EN 60060-2):** la verifica ha lo scopo di assicurare il corretto funzionamento del sistema di misura anche in presenza di armoniche nella tensione generata. È necessario che, al variare della frequenza, il fattore di scala del sistema di misura non si discosti oltre certi limiti dal valore rilevato alla frequenza fondamentale della tensione di prova.

Per gli apparati di prova che lavorano a una singola frequenza f_{nom} (es. 50 Hz) il fattore di scala si deve mantenere nel campo tratteggiato di Figura 15 per frequenze fino alla 7° armonica della frequenza nominale.

Per gli apparati che possono funzionare in un campo più o meno ampio di frequenze (es. 50÷60 Hz), il fattore di scala non deve variare oltre l'1% nel campo di frequenza nominale ($f_{nom1} \div f_{nom2}$), e si deve mantenere nel campo tratteggiato di Figura 16 per frequenze fino alla 7° armonica della frequenza limite superiore f_{nom2} . I sistemi di misure che soddisfano queste prescrizioni sono idonei alla misura del THD della tensione di prova.

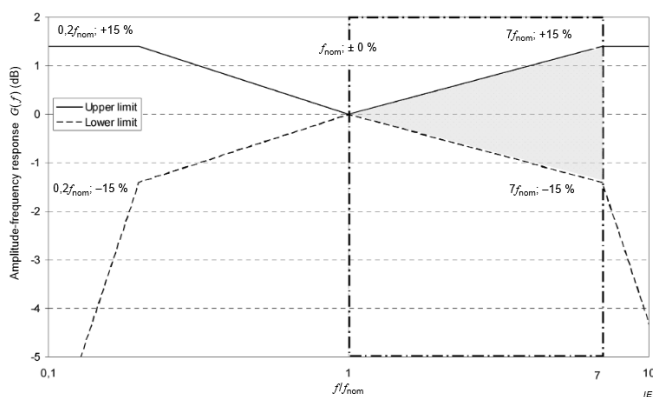


Figura 15: variazioni ammesse per il fattore di scala di un sistema con unica frequenza nominale f_{nom}

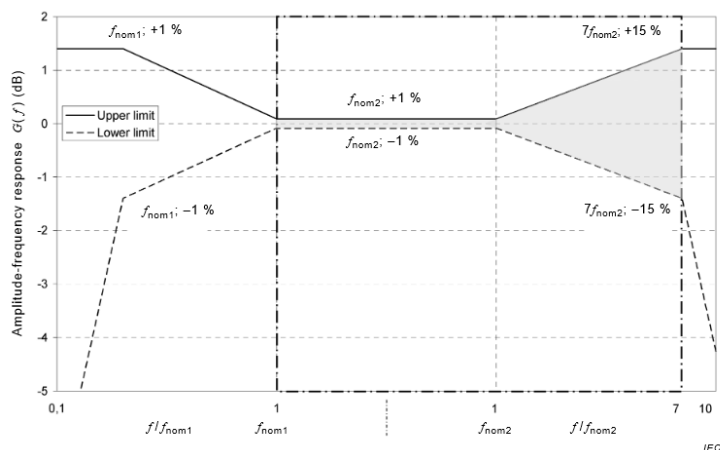


Figura 16: variazioni ammesse per il fattore di scala di un sistema di misura con campo di frequenze nominali $f_{nom1} \div f_{nom2}$

Per la verifica dell'andamento del fattore di scala si inietta ai terminali di ingresso del sistema di misura una tensione sinusoidale, normalmente di ampiezza minore della tensione nominale. La misura è ripetuta a più valori di frequenza, almeno fino alla 7° armonica. Per tenere conto dei parametri parassiti (induttanze e/o capacità) la verifica deve essere realizzata nelle condizioni reali di funzionamento, con il sistema di misura installato nell'impianto.

La norma prevede anche la possibilità di valutare il comportamento dinamico con un'analisi numerica del circuito.

Si può ricavare il relativo contributo di incertezza. L'incertezza tipo relativa u_{B2} è data da:

$$u_{B2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{i=1}^k \left| \frac{F_i}{F} - 1 \right|$$

Dove:

1. k è il numero dei fattori di scala determinati lungo il campo di frequenza.
2. F_i indica i valori dei singoli fattori di scala.
3. F è il valore medio dei fattori di scala.

L'unica differenza tra le prescrizioni delle due norme sta nella possibilità, prevista dalla CEI EN 60060-2, di evitare la verifica della risposta in frequenza per i sistemi di misura che devono essere utilizzati in impianti in cui il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace si mantiene nel campo $\sqrt{2} \pm 1\%$. È il caso degli impianti risonanti, che, essendo utilizzati unicamente nelle prove di apparecchiature di alta tensione, non sono previsti dalla CEI EN 61180.

- **Stabilità a lungo termine (per CEI EN 61180 e CEI EN 60060-2):** La stabilità a lungo termine è un parametro che tiene conto della possibile variazione del fattore di scala del sistema di misura nel corso della sua vita operativa. La sua valutazione, in sede di prove di tipo, deve necessariamente basarsi sui dati di progetto (es. stabilità nel tempo dei componenti utilizzati).

Si può ricavare il relativo contributo di incertezza. L'incertezza tipo relativa u_{B4} è data da:

$$u_{B4} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_2}{F_1} - 1 \right| \frac{T_{use}}{T_2 - T_1}$$

Dove:

1. T_{use} è l'intervallo di tempo previsto tra due tarature successive.
2. F_1 è il fattore di scala misurato all'istante T_1 ;

3. F_2 è il fattore di scala misurato all'istante T_2 ;

La componente di incertezza legata alla stabilità a lungo termine può essere anche ottenuta come contributo di categoria A, quando siano disponibili un certo numero di misure del fattore di scala ripetute nel tempo. Il contributo di incertezza relativa risulta:

$$u_{B4} = \frac{T_{use}}{T_{mean}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_i}{F_m} - 1 \right)^2}{n-1}}$$

dove:

4. F_i sono gli n valori del fattore di scala;
 5. F_m è il valore medio dei fattori di scala;
 6. T_{mean} è il valore medio degli intervalli tra due tarature successive.
- **Effetto della temperatura ambiente (per CEI EN 61180 e CEI EN 60060-2):** la verifica ha lo scopo di valutare l'effetto della temperatura ambiente sul fattore di scala, nel campo di temperature previsto per l'utilizzo. La valutazione può essere fatta determinando il fattore di scala a diverse temperature (es. ponendo il sistema di misura in una camera climatica) o con calcoli numerici a partire dalle caratteristiche dei componenti.

Si può ricavare il relativo contributo di incertezza. L'incertezza tipo relativa u_{B5} è data da:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_T}{F} - 1 \right|$$

Dove:

1. F_T è il fattore di scala misurato alla temperatura di lavoro T ;
2. F è il fattore di scala misurato alla temperatura di taratura.

La norma prescrive che, nel caso in cui la variazione superi l'1%, si debba applicare una correzione al fattore di scala.

- **Valutazione dell'effetto di prossimità (solo per CEI EN 60060-2):** per verificare l'effetto di prossimità sul sistema, si possono realizzare misure del fattore di scala variando la distanza tra il dispositivo convertitore e le superfici al potenziale di terra (es. le pareti del laboratorio di prova) o a potenziali diversi.

La componente di incertezza relativa u_{B6} è data dalla formula:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{\max}}{F_{\min}} - 1 \right|$$

dove $F_{\max}$ e $F_{\min}$ sono i valori massimo e minimo del fattore di scala misurato.

- **Valutazione dell'effetto del software (solo per CEI EN 60060-2):** Per la valutazione dell'effetto del software sulla misura della tensione di prova, la norma suggerisce di utilizzare un set di dati con valori di riferimento. Per fare ciò si può simulare numericamente l'andamento della forma d'onda della tensione da misurare, costruendo un vettore di valori che riproduce l'acquisizione di una forma d'onda di ampiezza nota.

La CEI EN 60060-2 non indica una procedura precisa per il calcolo della componente di incertezza associata all'effetto del software.

- **Determinazione del fattore di scala dei componenti (solo per CEI EN 60060-2):** La determinazione dei fattori di scala dei componenti del sistema di misura (dispositivo convertitore, sistema di trasmissione, strumento) può permettere il calcolo del fattore di scala del sistema di misura completo.

La 60060-2 non indica procedure dettagliate per la misura del fattore di scala, ma si limita a indicare possibili tecniche:

1. Confronto con un componente di riferimento (es. confronto di un partitore con un partitore di riferimento);
2. Utilizzo di un calibratore per generare una tensione di riferimento da inviare in ingresso al componente;
3. Misura simultanea dell'ingresso e dell'uscita del componente;
4. Utilizzo di circuiti a ponte;
5. Calcolo a partire dai valori delle impedenze.

La norma non fornisce formule per il calcolo delle incertezze associate.

5.1.2 Prove di routine

Le prove di routine comprendono le seguenti verifiche:

- **Determinazione del fattore di scala in taratura (solo per CEI EN 61180):** Il fattore di scala determinato in taratura è detto fattore di scala assegnato¹⁸. Si tratta di un valore singolo valido su un intero campo di misura. È prevista la possibilità di avere, per un singolo sistema di misura, più campi di misura, ognuno con il proprio fattore di scala.

Per la determinazione del fattore di scala assegnato, la CEI EN 61180 prevede un confronto diretto con un sistema di misura di riferimento, misurando contemporaneamente una forma d'onda con caratteristiche simili a quella utilizzate per le prove. Il valore della tensione in ingresso, misurata dal sistema di misura di riferimento è divisa per la corrispondente lettura dello strumento del sistema in taratura, per ottenere in valore del fattore di scala. La procedura è ripetuta n¹⁹ volte e si calcola il valore medio dei fattori F_g alla tensione U_g :

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{ig}$$

La determinazione del fattore di scala deve essere realizzata al valore minimo e al valore massimo del campo di misura, oltre che in almeno 3 livelli di tensione intermedi, equispaziati.

Il fattore di scala assegnato F_s è calcolato come media dei fattori di scala ottenuti alle varie tensioni:

$$F_s = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g$$

Per ognuno dei valori di F_g si può ricavare la deviazione standard relativa:

$$s_g = \frac{1}{F_s} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_i - F_s)^2}$$

E l'incertezza tipo relativa:

$$u_g = \frac{s_g}{\sqrt{n}}$$

¹⁸ Se il sistema di misura fornisce direttamente in uscita il valore della tensione in ingresso, il fattore di scala nominale vale 1. Il fattore di scala assegnato sarà un valore prossimo all'unità.

¹⁹ Un valore adeguato di n è 10

L'incertezza tipo sulla determinazione del fattore di scala assegnato è valutabile come massimo valore delle singole incertezze tipo:

$$u_A = \max_{g=1}^h u_g$$

Si ha poi un termine di incertezza relativa di categoria B che tiene conto della non linearità:

$$u_{b0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^h \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|$$

- **Verifica della linearità (solo per CEI EN 60060-2):** Quando il sistema di misura è tarato per confronto fino a una tensione minore di quella nominale, la verifica della linearità ha lo scopo di estendere la validità del fattore di scala assegnato per l'intero campo di tensioni del sistema di misura,.

La verifica deve essere realizzata per confronto con un sistema di misura di cui è provata la linearità. Il rapporto tra le letture del sistema di misura da verificare e quello di riscontro permette di ricavare le variazioni del fattore di scala al variare della tensione.

Il confronto deve essere realizzato in un numero b di punti, tra la massima tensione in cui è realizzata la taratura per confronto, e la massima tensione di funzionamento. La valutazione della linearità è data dalla massima variazione del rapporto tra le due letture R dal valor medio R_m . La massima variazione è presa come stima di categoria B della componente di incertezza dovuta alla non linearità. L'incertezza tipo relativa u_{B1} è data dalla formula:

$$u_{b1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^b \left| \frac{R_g}{R_m} - 1 \right|$$

Per quanto riguarda i possibili metodi di confronto, la CEI EN 60060-2 indica varie possibilità:

1. *Confronto con un sistema di misura approvato*, possibilmente verificato sull'intero campo di misura per confronto con un sistema di misura di riferimento;
2. *Confronto con un generatore di alta tensione lineare*, in cui l'uscita del sistema di misura è confrontata con la tensione in ingresso al generatore (nel caso della tensione alternata con la tensione in ingresso al trasformatore elevatore);
3. *Confronto con l'uscita di uno strumento per la misura del campo elettrico*. La lettura del sistema di misura è, in questo caso, confrontata con la lettura di un misuratore di campo elettrico, posizionato nel

laboratorio di prova, in modo da misurare un valore di campo elettrico proporzionale alla tensione generata;

4. *Confronto con uno spinterometro conforme alla IEC 60052*, che, per le alte tensioni alternate, è uno spinterometro a sfere. In questo caso è necessario realizzare il confronto in un tempo sufficientemente breve per evitare variazioni delle condizioni climatiche (temperatura, pressione, umidità). In caso contrario occorre applicare i fattori di correzione previsti dalla IEC 60052;
5. *Metodo per dispositivi convertitori in più sezioni*. Per i partitori di tensione, costituiti da più sezioni di alta tensione identiche, si può operare:
 - Realizzando una prova di tipo di un sistema equivalente completo;
 - Realizzando una misura delle capacità e delle resistenze di ogni sezione a 5 livelli di tensione equispaziati nel campo di tensioni di utilizzo, calcolando il fattore di scala per ogni sezione a partire dai valori di impedenza del ramo di bassa tensione;
 - Verificando l'assenza di scariche per effetto corona per tensioni vicine alla massima tensione operativa.

Tra i metodi previsti, dalla CEI EN 60060-2 quello di gran lunga più efficace è il confronto con la sonda di campo elettrico. È stato dimostrato che, in alta tensione alternata, è possibile determinare la linearità per confronto con una sonda di campo con un'incertezza di qualche unità in 10^{-4} , più che sufficiente per le necessità delle prove²⁰. Gli altri metodi presentano molteplici criticità:

- a) Il confronto con un sistema approvato, a sua volta confrontato con un sistema di riferimento, necessita di un sistema di riferimento con tensione nominale maggiore o uguale a quella del sistema in prova. La limitazione delle tensioni nominali dei sistemi di riferimento è, però, il motivo per cui si rende necessaria la verifica di linearità;
- b) Il confronto con un generatore "lineare", che in alternata significa il confronto con la tensione in ingresso al trasformatore elevatore non è attuabile, data l'intrinseca non linearità del comportamento magnetico del nucleo del trasformatore;
- c) Il confronto con uno spinterometro, che, secondo la IEC 60052 ha un'incertezza del 3% è poco significativo, anche perché, sia che si proceda incrementando la tensione, sia che si riduca la distanza tra le

²⁰ Si veda "Verification of AC measuring system linearity" di A. Bergman, A. Larsson – ERA Conference on Measurements and Calibration in High Voltage Testing, Londra 7-8 ottobre 1998

sfere fino alla scarica, è difficile associare la tensione di scarica dello spinterometro alla lettura del sistema di misura in prova;

- d) Il metodo basato sulle misure delle sezioni del divisore, oltre ad essere applicabile in pochi casi, non riesce a tenere conto dell'effetto delle capacità parassite, tra le varie sezioni del partitore e le superfici a potenziale diverso.

La stessa CEI EN 60060-2, nel secondo capoverso del paragrafo 5.3.1, dice che “un fallimento nella prova di linearità non significa necessariamente che il sistema non sia lineare”, invitando, in caso di risultato negativo, a provare con un altro metodo.

- **Verifica della stabilità a breve termine (per CEI EN 61180 e CEI EN 60060-2):** la stabilità a breve termine è un parametro che tiene conto degli effetti di autoriscaldamento dei componenti del sistema di misura.

Per la sua valutazione si deve applicare la massima tensione nominale al sistema di misura, per un tempo pari al massimo ciclo di funzionamento continuo previsto. Il fattore di scala deve essere misurato immediatamente dopo il raggiungimento della tensione di prova e al termine dell'applicazione, in modo da stimare la variazione.

Si può ricavare il relativo contributo di incertezza. L'incertezza tipo relativa u_{B3} è data da:

$$u_{B5} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \right|$$

Dove:

1. F_{after} è il fattore di scala misurato al termine della prova;
2. F_{before} è il fattore di scala misurato all'inizio della prova.

- **Determinazione del fattore di scala dei componenti (solo per 60060-2):** le prescrizioni e le verifiche per le prove di routine sono le stesse previste per la determinazione in sede di prove di tipo.

5.1.3 Prove di prestazione

Le prove di prestazione comprendono le seguenti verifiche:

- **Determinazione del Fattore di Scala in taratura (per CEI EN 61180 e CEI EN 60060-2):** La CEI EN 61180 prevede la determinazione del fattore di scala in taratura già nell'ambito delle prove di routine. Le prescrizioni per la taratura sono le stesse descritte nel paragrafo precedente.

La CEI EN 60060-2, per la determinazione del fattore di scala in taratura, prevede tre opzioni:

1. Confronto del sistema di misura in taratura con un sistema di misura di riferimento su tutto il campo di misura, con la stessa procedura prevista dalla CEI EN 61180. Questa opzione è praticabile quando si abbia a disposizione un sistema di misura di riferimento con tensione nominale maggiore o uguale a quella del sistema in taratura.
2. Confronto in un campo limitato di tensioni, integrato da una verifica di linearità. Questa opzione deve essere utilizzata quando la tensione nominale del sistema di misura di riferimento è inferiore alla tensione nominale del sistema in taratura. In una prima fase si realizza un confronto col sistema di riferimento fino a una tensione non inferiore al 20 % della tensione del sistema in taratura. Il confronto deve essere fatto in $a \geq 2$ valori di tensione, con il livello minore coincidente con la minima tensione misurabile dal sistema in prova e il livello maggiore corrispondente alla massima tensione misurabile con il sistema di riferimento.

La verifica di linearità è poi realizzata in $b \geq 2$ livelli di tensione, con il primo livello minore o uguale al massimo livello di confronto con il sistema di riferimento. La verifica di linearità deve poi arrivare alla massima tensione misurabile dal sistema in taratura.

Occorre poi rispettare la condizione:

$$a+b \geq 6$$

Le formule per il calcolo del fattore di scala assegnato F e dell'incertezza tipo relativa sono le seguenti:

$$F = \frac{1}{a} \sum_{g=1}^a F_g$$

$$u_A = \max_{g=1}^a u_g$$

$$u_{bo} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{g=1}^b \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|$$

3. Determinazione del fattore di scala a partire dai fattori di scala dei componenti. In questo caso il fattore di scala del sistema completo è ottenuto come prodotto dei fattori di scala dei componenti. Questo metodo è applicabile solo nel caso in cui non vi siano interazioni tra i vari componenti, condizione che si verifica raramente. Se consideriamo, ad esempio, un sistema di misura costituito da un partitore capacitivo, un cavo, come sistema di trasmissione, e uno

strumento, occorre considerare come la capacità del cavo e l'impedenza di ingresso dello strumento, connessi in parallelo al ramo di bassa tensione del partitore, contribuiscano a determinarne il fattore di scala. Se ci si limita alla misura dei fattori di scala, senza considerare tali effetti si può facilmente incorrere in errori sistematici inaccettabili.

- **Linearità (solo per CEI EN 60060-2):** la verifica di linearità è necessaria quando si realizza la taratura come descritto nell'opzione 2. del punto precedente.
Le prescrizioni e le verifiche sono le stesse previste per la prova di linearità prevista in sede di prove di routine.
- **Comportamento dinamico (solo per CEI EN 60060-2):** le prescrizioni e le verifiche per le prove di prestazione sono le stesse previste per la determinazione in sede di prove di tipo.
- **Stabilità a lungo termine (per CEI EN 61180 e CEI EN 60060-2):** nel caso delle prove di prestazione (che sono realizzate a cura dell'utilizzatore finale) l'unico metodo possibile per la verifica della stabilità a lungo termine è costituito dal confronto tra i fattori di scala assegnati ottenuti nell'ultima taratura e quelli riportati nei certificati precedenti. Si può ricavare la componente di incertezza dividendo per la radice di 3 lo scostamento del fattore di scala tra due tarature successive.
- **Effetto di prossimità (solo per CEI EN 60060-2):** le prescrizioni e le verifiche per le prove di prestazione sono le stesse previste per la determinazione in sede di prove di tipo.

5.1.4 Controlli di prestazione (solo per CEI EN 60060-2)

I controlli di prestazione sono assimilabili alle verifiche intermedie tra due tarature successive, indicate nelle norme sulla qualità della strumentazione. Per i sistemi di misura per alte tensioni alternate è previsto un controllo del fattore di scala. Sono previsti due metodi:

- Confronto con un sistema di misura approvato o con uno spinterometro a sfere conforme alla IEC 60052. Il controllo è considerato superato se la differenza tra le letture dei due sistemi di misura si mantiene entro ± 3 %. Se la differenza è maggiore è necessario procedere con una prova di prestazione (taratura).
- Verifica del fattore di scala dei componenti, per cui è previsto l'utilizzo di "calibratori interni o esterni" aventi incertezza estesa non superiore all'1%. Se la differenza tra ogni fattore di scala dal valore sull'ultimo certificato non eccede l'1 % la prova si considera superata. In caso contrario è necessario procedere con una prova di prestazione.

Il secondo metodo presenta alcune criticità. Non è ben chiaro di cosa si tratti quando si parla di “calibratori” e come questi dispositivi lavorino effettivamente. Anni fa erano disponibili sul mercato strumenti portatili, denominati “ratio meter”, in grado di misurare il rapporto di partizione di partitori di tensione resistivi o capacitivi alla frequenza di

1 kHz. Questi strumenti erano utilizzati nei controlli dei divisori per tensioni impulsive, e lavoravano a una tensione estremamente bassa (<100 V). Non è pensabile di riuscire a controllare efficacemente il fattore di scala a valori di tensione così bassi.

La verifica dei “componenti di bassa tensione” del sistema di misura (sistema di trasmissione e strumento) può essere facilmente realizzata ricorrendo a un calibratore per bassa tensione o a una sorgente stabile e misurando il rapporto tra tensioni di ingresso e di uscita.

In ogni caso, l'applicazione del secondo metodo è subordinata alla conoscenza dei fattori di scala assegnati dei singoli componenti, che sono disponibili solo nel caso in cui la determinazione del fattore di scala del sistema sia realizzata a partire dai fattori di scala dei componenti. In caso contrario, non essendo disponibili i valori di F_s dei componenti e non essendo noti gli effetti delle impedenze di ingresso del sistema di trasmissione e dello strumento sul fattore di scala del dispositivo convertitore, si possono facilmente ottenere falsi negativi.

5.2 Prescrizioni per i sistemi di misura di riferimento

Sia la CEI EN 61180, sia la CEI EN 60060-2 dedicano ai sistemi di misura di riferimento un paragrafo (§ 8 per la prima e § 10 per la seconda). In entrambi i documenti la definizione di sistema di misura di riferimento è legata alle sue caratteristiche di incertezza. Le norme prescrivono per i sistemi di misura di riferimento per alte tensioni alternate un'incertezza estesa $U_m \leq 1$ % nell'intero campo di misura dichiarato.

Le prescrizioni coincidono anche per quanto riguarda la procedura di taratura del sistema di misura di riferimento. È prevista una taratura periodica per confronto con un opportuno sistema di misura di riferimento che sia riferibile ai campioni nazionali delle grandezze elettriche.

Una differenza non trascurabile tra le due norme si ha per quanto riguarda la definizione dell'intervallo di tempo tra due tarature successive per i sistemi di misura di riferimento (sotto-paragrafi 8.3 e 10.3). In entrambe le norme si inizia con la frase:

“The interval between calibration shall be determined according to national regulation”

È poco probabile che uno stato spenda risorse per definire, per via legislativa o regolamentare, l'intervallo di taratura per una categoria di sistemi di misura non certo diffusissimi, come quella dei sistemi di riferimento per alte tensioni alternate²¹.

In assenza di prescrizioni nazionali, la CEI EN 61180 raccomanda di realizzare la taratura annualmente, mentre la CEI EN 60060-2 raccomanda un intervallo non superiore ai 5 anni, con regolari controlli di prestazione per dimostrare la stabilità del fattore di scala.

Entrambi gli approcci sono criticabili:

1. La richiesta di taratura annuale della CEI EN 61180 appare decisamente troppo stringente: l'azienda che ha in linea di collaudo uno o più apparecchiature di prova e si dota di un sistema di misura di riferimento, dovrebbe procedere annualmente alla taratura del sistema di riferimento con cui tarare annualmente i sistemi utilizzati in prova. L'aggravio "burocratico/economico" delle tarature e delle successive verifiche nell'ambito della conferma metrologica che ne consegue non sembra giustificabile.
2. Lo stato dell'arte per la misura del valore efficace della tensione di prova, come previsto dalla CEI EN 61180 consente agevolmente di assicurare una stabilità del fattore di scala di un sistema di misura di riferimento per almeno due anni. Il rischio che il fattore di scala del sistema di riferimento vari, a causa di "maltrattamenti" nel trasporto per e dal laboratorio di taratura, è maggiore del rischio di "deriva naturale".
3. Per quanto riguarda la CEI EN 60060-2 si pone un problema: i controlli di prestazione, come descritti nel paragrafo precedente di questa monografia, sono applicabili unicamente a sistemi di misura approvati, dove l'incertezza estesa limite è del 3%. Per controllare il fattore di scala di un sistema di riferimento occorrerebbero metodi più complessi, il cui costo non sarebbe compensato dalla riduzione del numero di tarature. Anche in questo caso un approccio basato sullo stato dell'arte della strumentazione (2-3 anni di intervallo senza controlli intermedi) sarebbe stato più opportuno.

²¹ Diverso è il caso delle tarature dei sistemi di misura (trasformatori di tensione e di corrente) nei punti di interconnessione delle reti di alta tensione. In questo caso gli alti interessi economici in gioco hanno posto con forza il problema della definizione "per legge" di un intervallo di taratura. I problemi tecnici e le necessità di continuità del servizio hanno fatto da contraltare alle necessità della metrologia legale, con risultati esilaranti: In Spagna si è discusso (e, forse, si è adottato) un intervallo di taratura per TA e TV di 25 anni, che, tradotto in volgare, recita "trasferiamo il problema a chi ci sostituirà sul posto di lavoro".

6. Valutazione dell'incertezza di misura

Una prima procedura per la valutazione dell'incertezza nella misura della tensione era già stata introdotta nell'edizione della CEI EN 60060-2 del 1994. Nella successiva edizione della norma (11/2010) la procedura è stata sviluppata, passando da un approccio in cui si fissavano limiti per le singole componenti di incertezza, rispettando i quali si poteva affermare che l'incertezza era sotto il limite richiesto (3 %), alla versione attuale, in cui per ogni grandezza di influenza si calcola il relativo contributo e si procede con il calcolo dell'incertezza composta. L'approccio e la procedura di calcolo della CEI EN 60060-2 sono stati trasferiti nell'ultima edizione della CEI EN 61180.

Nel paragrafo 2 delle due norme, tra i documenti di riferimento viene anche citata la ISO/IEC Guide 98-3: 2008 "Uncertainty of measurements- part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurements (GUM)"²². Nei paragrafi concernenti la valutazione dell'incertezza si prescrive esplicitamente una valutazione dell'incertezza di misura basata sulla guida ISO/IEC 98-3.

Ci si aspetterebbe, quindi, che la trattazione riportata nelle due norme ricalchi l'impostazione della GUM, che prevede i seguenti passi:

1. Espressione della relazione matematica che lega la grandezza da misurare y alle grandezze di ingresso x_i ²³:

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

2. Determinazione delle stime delle grandezze di ingresso x_i ;
3. Valutazione delle incertezze tipo $u(x_i)$ per ognuna delle grandezze di ingresso. La valutazione può essere fatta a partire da un'analisi statistica di una serie di osservazioni (incertezza di Categoria A) o basandosi sui dati disponibili/sull'esperienza (Incetezza di Categoria B);
4. In presenza di grandezze di ingresso correlate, valutazione delle covarianze tra grandezze di ingresso;
5. Calcolo del risultato della misurazione y a partire dai valori di x_i , attraverso la relazione definita al punto 1);
6. Determinazione dell'incertezza tipo composta $u(y)$ della misura di y , a partire dalle incertezze tipo $u(x_i)$;
7. Se richiesta un'incertezza estesa, moltiplicare l'incertezza tipo $u(y)$ per un fattore di copertura k , scelto a partire dal livello di confidenza richiesto;

²² Il documento, come tutti i documenti normativi è a pagamento, ma è identico al alla guida JCGM 100, scaricabile gratuitamente dal sito del BIPM

²³ Le grandezze di ingresso comprendono sia le grandezze effettivamente misurate, sia tutti i coefficienti di correzione utilizzati nella misura.

8. Riportare il risultato della misura e la corrispondente incertezza, tipo o estesa, secondo precise regole di scrittura.

Sorprendentemente, l'approccio alla valutazione dell'incertezza, adottato dalle due norme, non segue lo schema della GUM. Nei relativi paragrafi (4.4.7 della CEI EN 61180, 5.10 della CEI EN 60060-2) sono descritte due procedure semplificate, basate su alcuni presupposti:

- Che non vi sia correlazione tra le componenti, eliminando il punto 4 della procedura della GUM;
- Che le incertezze tipo valutate come categoria B siano calcolate considerando una distribuzione rettangolare;
- Che i tre maggiori contributi di incertezza siano di valore circa equivalente, in modo da poter considerare l'incertezza composta come avente distribuzione normale²⁴, e utilizzare il fattore di copertura 2 per ottenere il livello di fiducia del 95%.

Le due procedure (in realtà si tratta di due formule) permettono il calcolo delle incertezze estese relative, nella misura di due grandezze:

- Il fattore di scala del sistema di misura F_s , determinato in taratura, per cui si calcola l'incertezza estesa relativa U_{cal} ;
- La tensione di prova V , per cui si calcola l'incertezza estesa relativa U_M ;

In realtà le norme, nei paragrafi 4.3.4 e 4.6 rispettivamente, indicano come misurando per le tensioni alternate, il solo fattore di scala, in contraddizione con i paragrafi 4.4.7.3 e 5.10.3.

Il modello della misura, fondamentale per la definizione dei coefficienti di sensibilità che "pesano" il contributo delle singole componenti di incertezza non è definito, escludendo il punto 5 della procedura prevista dalla GUM.

Non sono poi stimati, come previsto nel punto 2 della procedura GUM, i termini x_i , ma ci si limita a fornire le formule per il calcolo delle componenti di incertezza, espresse come incertezze relative, mentre la GUM considera, per i calcoli, le incertezze assolute, ricavando l'incertezza relativa dopo il calcolo dell'incertezza composta.

La formula per il calcolo dell'incertezza composta relativa è, di fatto, la somma quadratica delle incertezze relative, moltiplicata per 2 per ottenere l'incertezza estesa.

²⁴ La condizione di almeno tre componenti equivalenti permette di applicare in prima approssimazione il teorema del limite centrale che dice che la distribuzione risultante da più contributi converge verso la distribuzione gaussiana, indipendentemente dalle distribuzioni dei singoli contributi.

Per la determinazione del fattore di scala in taratura, l'incertezza è data da:

$$U_{cal} = k \cdot u_{cal} = 2 \sqrt{u_{ref}^2 + u_A^2 + u_{B0}^2 + \sum_{i=0}^N u_{Bi}^2}$$

dove:

$k=2$ è il fattore di copertura;

u_{ref} è l'incertezza tipo di taratura del sistema di misura di riferimento;

u_A è la componente di incertezza di categoria A, valutata a partire dai risultati di taratura;

u_{B0} è la componente di incertezza per non linearità determinata in taratura;

u_{Bi} sono le componenti di incertezza relative alle grandezze di influenza che intervengono sul fattore di scala del sistema di misura di riferimento.

Per la determinazione della tensione di prova, l'incertezza è data da:

$$U_M = k \cdot u_M = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + \sum_{i=0}^N u_{Bi}^2}$$

dove:

$k=2$ è il fattore di copertura;

u_{cal} è l'incertezza tipo di taratura, ottenuta con la formula precedente;

u_{Bi} sono le componenti di incertezza relative alle grandezze di influenza che intervengono sul fattore di scala del sistema di misura (non linearità, stabilità a lungo/breve termine, effetto del carico ecc).

Dalle due formule si può dedurre che i modelli delle misure adottati siano:

- Per la taratura/determinazione del fattore di scala del sistema di misura:

$$F_s = \frac{L_{ref}}{L_x} F_{ref} \cdot \delta_A \cdot \prod_{i=1}^N \delta_{Bi}$$

- Per la misura della tensione di prova:

$$V = F_s L \cdot \delta_A \cdot \prod_{i=1}^N \delta_{Bi}$$

Dove tutti i termini δ_A e δ_i sono unitari. Si tratta di due modelli matematici del tipo:

$$y = \prod_{i=1}^N x_i^h$$

Con tutti gli esponenti h uguali a 1. Con questa condizione, e solo con questa, l'incertezza composta può essere ottenuta come somma quadratica delle incertezze tipo.

Questo approccio appare affine a quello di un manuale di matematica finanziaria e attuariale, in cui i dati in ingresso devono essere inseriti in una formula, senza sapere come e perché si utilizzi proprio quella formula. Purtroppo la scelta di quali componenti di incertezza inserire è lasciata al costruttore o all'utilizzatore, con il rischio di introdurre gravi errori per omissione di qualche componente o per l'inserimento di una componente non compresa tra quelle individuate nei § 5.1.1÷5.1.3 di questa monografia.

Per quanto riguarda poi la valutazione di incertezza nella misura, essa ricade sicuramente sull'utilizzatore dell'impianto²⁵: solo l'utilizzatore ha a disposizione i certificati di taratura a seguito delle periodiche prove di prestazione. Per poter calcolare l'incertezza con la formula indicata dalle norme è necessario conoscere le singole componenti di incertezza. Purtroppo in molti fascicoli tecnici non vengono indicate le singole componenti di incertezza, ma ci si limita a indicare una "incertezza d'uso" che comprende sia la stabilità a lungo termine sia le altre componenti (linearità, effetto del carico, effetto della temperatura ecc.). In questo caso le due incertezze, quella di taratura e quella d'uso, se entrambe espresse come incertezze relative e dichiarate come due volte lo scarto tipo (quindi con distribuzione normale), potrebbero essere sommate quadraticamente per ottenere direttamente l'incertezza relativa estesa.

Il limite maggiore della trattazione risiede nell'aver trascurato la valutazione dei gradi di libertà, parametro che ci fornisce un'indicazione sull'effettiva conoscenza delle componenti di incertezza. Con un numero basso di gradi di libertà, il fattore di copertura k , per cui va moltiplicata l'incertezza tipo composta per ottenere una probabilità del 95%, può essere molto grande.

Lo stesso secondo presupposto per l'utilizzo della formula è poco comprensibile: non ha alcun senso imporre che tutte le componenti di incertezza di categoria B abbiano distribuzione rettangolare. Un caso tipico di componente di categoria B è quello dell'incertezza di taratura di un sistema di riferimento, che è ottenuta dalla combinazione di più componenti e, di conseguenza, è ipotizzabile come associata a una distribuzione normale. In questo caso l'incertezza estesa è dichiarata sul certificato di taratura come due volte lo scarto tipo. L'incertezza tipo relativa è calcolata dividendo per 2 l'incertezza estesa dichiarata. Il fatto di avere una o più componenti di incertezza con distribuzione normale (una, due o tutte) non impedisce l'applicazione del teorema del limite centrale, in modo da poter considerare

²⁵ La valutazione dell'incertezza sulla determinazione del fattore di scala ricade anch'essa sull'utilizzatore dell'impianto, quando questo si doti di un sistema di misura di riferimento e realizzi le tarature internamente.

l'incertezza estesa, con livello di confidenza del 95%, come due volte l'incertezza tipo composta.

Forse consci della debolezza della trattazione, gli estensori delle norme hanno inserito due allegati, purtroppo solo informativi, per approfondire l'argomento dell'incertezza di misura:

- Nell'Allegato A viene sostanzialmente riassunta la procedura per la stima dell'incertezza prevista dalla guida 98-3. La trattazione della guida 98-3 nell'allegato è, per motivi di spazio, un po' rimaneggiata, risultando poco comprensibile. In particolare:
 - o Nella descrizione delle componenti di incertezza di categoria B si dà l'errata sensazione che vi sia una corrispondenza tra la natura della componente e la categoria. In realtà, le categorie delle componenti classificano solo il metodo di stima utilizzato: una stessa componente (es. quella associata alla non linearità) può essere stimata a partire da una serie di misure ripetute, ricadendo nella categoria A, o da dati di altro genere (es. dai dati dei componenti), ricadendo nella B.
 - o Il problema della correlazione tra le grandezze è solo accennato, come già nella parte normativa (§ 4), lasciando aperta la porta al dubbio se considerarlo o meno.
 - o Il concetto di incertezza estesa è introdotto senza aver prima definito il concetto di gradi di libertà. La formula per il calcolo dei gradi di libertà è definita successivamente, con una spiegazione non proprio chiarissima.
- Nell'Allegato B si dà un esempio di calcolo dell'incertezza di misura. Anche in questo caso il tentativo di rendere più comprensibile la trattazione rischia di ottenere effetti opposti:
 - o Il sistema di misura dell'esempio della CEI EN 60060-2 ha una tensione nominale di 500 kV. Per un evidente errore di copia/incolla/modifica nella CEI EN 61180 la tensione diventa 500 V, valore inconsueto per un'apparecchiatura di prova. Le tensioni di prova per le apparecchiature di bassa tensione sono, per la maggior parte dei casi, superiori a 1000 V e, di conseguenza, i valori tipici delle tensioni nominali sono compresi nel campo 3÷10 kV. Una tensione di 500 V non richiede, poi, un sistema di misura, ma può essere misurata con un comune multimetro RMS, anche palmare, tarato per confronto con una sorgente campione (calibratore). Strettamente parlando un impianto di prova con tensione nominale di 500 V non è nemmeno un'apparecchiatura di alta tensione, per cui la CEI EN 61180 non è applicabile.
 - o Il modello della misura utilizzato è del tipo:

$$y = \sum_{i=1}^N x_i$$

Si tratta di un modello che non permette il calcolo dell'incertezza a partire dalle incertezze relative, ma necessita delle incertezze assolute. L'aver scelto, nell'esempio, valori dei fattori di scala unitari, caso unico in cui le incertezze relative e assolute coincidono, non aiuta a chiarire questo concetto.

7. Conclusioni

La lunga disamina delle prescrizioni normative per i sistemi di misura di alte tensioni alternate ci permette di fare alcune considerazioni.

Negli ultimi 20 anni, con l'evoluzione delle norme del CT 42 sono state introdotte prescrizioni e procedure per la gestione dei sistemi di misura che avevano lo scopo di allineare le misure di alta tensione con la metrologia di bassa tensione. I risultati ottenuti presentano molte luci e qualche ombra.

Le luci sono rappresentate dall'aumentata attenzione alle necessità di equivalenza tra le misure e, di conseguenza, tra i risultati di prove realizzate da laboratori differenti. L'equivalenza tra le prove è fondamentale per il libero commercio dei prodotti elettromeccanici ed elettronici.

Le ombre derivano dal tentativo di semplificare la trattazione delle incertezze del documento JCGM 100 (GUM), per permetterne l'utilizzo anche per i tecnici che non operano giornalmente nel campo della metrologia.

Il tentativo è riuscito solo in parte. La trattazione nel corpo delle due norme è eccessivamente semplificata e non consente di comprendere l'approccio matematico/statistico all'incertezza di misura. Gli approfondimenti e gli esempi negli allegati, che dovevano completare la trattazione, presentano un approccio completamente differente (modello della misura come somma di componenti invece del modello con prodotti, incertezze assolute invece che relative), generando ulteriore confusione nel malcapitato tecnico/lettore.

Un ultimo, non trascurabile, problema, deriva dalla decisione del CT 42 di operare una classificazione basata non sulla tensione nominale dell'impianto di prova, ma sulla tensione nominale degli oggetti in prova. Si arriva così all'assurdo che un impianto di prova come quello rappresentato in Figura 1 b) e c), con una tensione massima di 30 kV, che può essere utilizzato per prove su apparecchiature sia di bassa tensione sia di alta tensione, dovrebbe, oltre che essere sottoposto a due distinte tarature, poiché in un caso deve misurare il valore efficace nell'altro il valore di picco, essere verificato con due distinti set di prove di tipo/routine.

Riferimenti:

- [1] CEI EN 60270 / 2017-01 “Tecniche di prova in alta tensione - Misure di scariche parziali”
- [2] CEI EN 61180 / 2017-07 “Tecniche di prova ad alta tensione per apparecchiature di bassa tensione – Definizioni, prescrizioni relative alle prove e alle procedure, Apparecchiatura di prova”.
- [3] CEI EN 60060-1 “Tecniche di prova in alta tensione. Parte 1: Definizioni generali e prescrizioni di prova”
- [4] CEI EN 60060-2 “Tecniche di prova in alta tensione. Parte 2: Sistemi di misura”.
- [5] UNI ISO 10012:2004 “Sistemi di gestione della misurazione - Requisiti per i processi e le apparecchiature di misurazione”.
- [6] JCGM 100 “JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections –Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement”.

Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare l'ing. Virgino Scarioni per il sostegno all'iniziativa della pubblicazione di questa dispensa.

Contatti

Ing. Angelo Sardi
Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica INRiM
Strada delle Cacce, 91
Torino
Tel. +39 339 4576358/393 2154323
E-mail a.sardi@inrim.it
www.inrim.it