



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Verifica della linearità dello shunt per forti correnti di corto circuito fino a 230 kA

Original

Verifica della linearità dello shunt per forti correnti di corto circuito fino a 230 kA / Bellavia, Luciano; Galliana, Flavio; Caria, Stefano Emilio; Roccatò, Paolo Emilio. - (2025), pp. 1-13.
[10.13140/rg.2.2.27257.99681]

Availability:

This version is available at: 11696/86819 since: 2025-07-07T16:36:04Z

Publisher:

Published

DOI:10.13140/rg.2.2.27257.99681

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

L. Bellavia, F. Galliana, S.E. Caria, P.E. Roccato

**Verifica della linearità dello shunt
per forti correnti di corto circuito fino a 230 kA**

R.T. n. 25/2025

Luglio 2025

RAPPORTO TECNICO I.N.R.I.M.

Sommario

Questo rapporto tecnico descrive lo studio della linearità del sistema di misura in uso presso l'INRiM per la taratura di correnti di corto circuito. La verifica è stata fatta per confronto con un sistema di misura intrinsecamente lineare basato su una bobina di Rogowski. Vengono riportate le caratteristiche del sistema di misura INRiM ed in particolare dello shunt nonché la descrizione del sistema di misura per la verifica della linearità del sistema INRiM. Vengono analizzate le misure di confronto fra i sistemi valutando la linearità del sistema INRiM sia per la corrente di picco che per l'integrale di Joule e le relative incertezze di tali valutazioni. Sono state infine riviste le incertezze complessive del sistema INRiM fino 170 kA e fino a 230 kA risultando rispettivamente $4,2 \times 10^{-3}$ e $5,6 \times 10^{-3}$ mentre l'incertezza dell'integrale di Joule passa a $3,4 \times 10^{-2}$. A valle del lavoro svolto si ritiene di poter rivedere ed estendere la CMC dell'INRiM per la taratura di correnti di corto circuito fino a 230 kA con le incertezze ottenute.

Abstract

This technical report describes the study of the linearity of the measurement system used at INRiM for the calibration of short-circuit currents. The verification was carried out by comparison with an intrinsically linear measurement system based on a Rogowski coil. The characteristics of the INRiM measurement system are reported, particularly those of the shunt, as well as a description of the measurement system used to verify the linearity of the INRiM system. The comparative measurements between the systems are analyzed, assessing the linearity of the INRiM system both for the peak current and for the Joule integral, along with the uncertainties of these assessments. Finally, the overall uncertainties of the INRiM system were reviewed up to 170 kA and up to 230 kA, resulting respectively 4.2×10^{-3} and 5.6×10^{-3} while the uncertainty of the Joule integral increases to 3.4×10^{-2} . As a result of the work carried out, it is considered feasible to extend the INRiM CMC for the calibration of short-circuit currents up to 230 kA with the obtained uncertainties.

Indice

	Pag
Sommario	1.
Abstract	1
1 Introduzione	3
2 Il sistema di misura dell'INRiM	3
<i>2.1 Lo shunt utilizzato</i>	5
3. Il sistema di misura per la verifica della linearità	6
<i>3.1 Software utilizzato</i>	7
4 Analisi delle misure e calcolo delle incertezze	8
5 Conclusioni e sviluppi futuri	11
Bibliografia	12
<i>Allegato: misure effettuate</i>	13

1 Introduzione

Le prove di corto circuito e di forti correnti in generale sono importanti per verificare la sicurezza e l'affidabilità delle apparecchiature elettriche. Le misure di correnti transitorie e di cortocircuito sono fondamentali per la progettazione e la manutenzione di impianti elettrici. Le correnti transitorie, che si verificano durante eventi transitori (ad esempio, commutazione o fulmini), possono danneggiare componenti e dispositivi. Le correnti di cortocircuito, che si verificano in caso di guasto, possono causare incendi e danneggiare l'impianto. Le prove di cortocircuito sono quindi fondamentali per la progettazione e la sicurezza degli impianti elettrici. Queste misure consentono di determinare la massima corrente che può fluire in caso di cortocircuito, un elemento cruciale per il dimensionamento corretto degli apparecchi di protezione (interruttori, fusibili) e dei cavi. Sono stati sviluppati sistemi di misura e comparatori per queste misure sia per correnti continue che alternate anche per tarature on-site e senza l'uso di shunts [1-4]. Per correnti transitorie e di corto circuito la letteratura offre meno spunti fra i quali prevalgono i sistemi di misura che usano le bobine di Rogowski [5, 6]. È fondamentale che i laboratori di prova siano in grado di garantire la riferibilità delle misure che effettuano durante le prove di corto circuito fino ad un campione nazionale presso un Istituto Nazionale di metrologia (NMI). I sistemi di misura devono rispettare i requisiti della norma di riferimento [7], in particolare per quanto riguarda il loro funzionamento in condizioni dinamiche. In dettaglio, è necessario determinare il fattore di scala assegnato (SF) per l'intero intervallo, direttamente oppure mediante una misura di linearità, e valutare l'errore nelle misurazioni e nel calcolo dell'integrale di Joule. In questo lavoro si è verificata la linearità del sistema di misura in uso presso l'INRiM per le tarature di correnti transitorie e di corto circuito nel suo campo di applicazione e si è stimato il relativo contributo di incertezza, eventualmente da inserire nella procedura tecnica per l'attività di taratura.

2 Il sistema di misura dell'INRiM

Nell'ambito del Laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC) dell'INRiM si effettuano tarature di sistemi di misura per forti correnti transitorie di corto circuito [8]. Tali correnti vengono generate grazie ad un generatore sincrono, visibile in Figura 1, messo in rotazione da un motore di lancio che viene scollegato dalla rete elettrica un istante prima di effettuare il corto circuito in uscita.



Figura 1 - Generatore di correnti di corto circuito

Il sistema di riferimento che viene utilizzato per le tarature è costituito dal derivatore resistivo (shunt) mostrato in Figura 2, con il quale si effettuano misure con correnti transitorie fino a 230 kA. L'INRiM è l'unico NMI con questa CMC riconosciuta dal BIPM. In Figura 3 è riportato lo schema del circuito di misura.



Figura 2 – Shunt collegato all'impianto di generazione di corto circuito

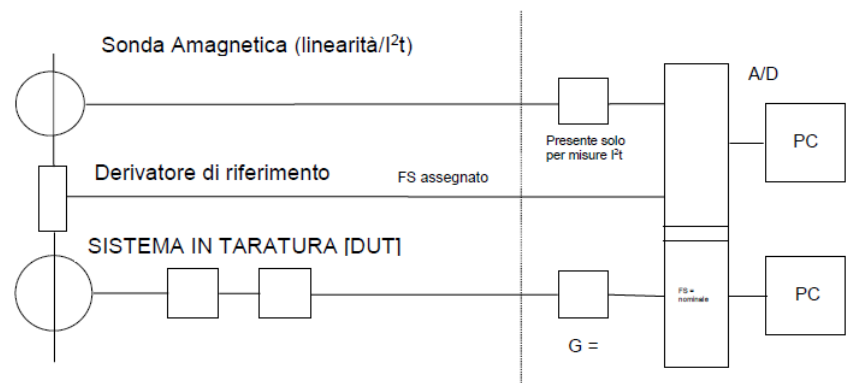


Figura 3 – Schema del circuito di misura per la taratura di forti correnti transitorie.

2.1 Lo shunt utilizzato

Lo shunt utilizzato nel sistema di misura è del tipo coassiale compensato con corrente nominale 100 kA, valore nominale 75 $\mu\Omega$. È a costruzione tubolare con ritorno coassiale. I due tubi interno ed esterno rispettivamente di materiale resistivo e di rame sono connessi ad una estremità. La corrente da misurare passa nel tubo interno ed esce da quello esterno al fine di minimizzare l'induttanza. Viene compensato altresì il flusso magnetico concatenato consentendo di avere un tempo di risposta inferiore ai 500 ns. È quindi adatto ad analizzare e riprodurre fenomeni transitori di corrente quali le correnti di cortocircuito. Lo shunt è stato inizialmente caratterizzato dal costruttore CESI mediante determinazione del tempo di risposta rispetto ad un gradino di corrente mediante trasduttore di riferimento (figura 4). In tabelle 1 e 2 si riportano invece rispettivamente le caratteristiche i tempi di risposta dello shunt in funzione della corrente applicata.

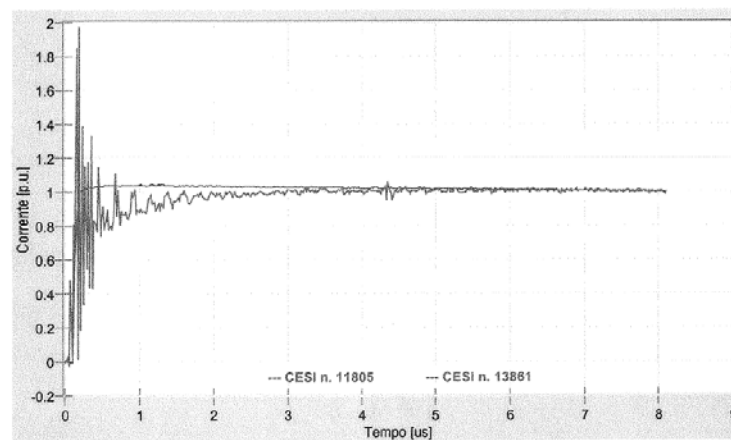


Figura 4 – Tempo di risposta al gradino di corrente

Tabella 1 – Caratteristiche dello shunt utilizzato

Resistenza in DC 500 A, 23,0 °C)	75,38 $\mu\Omega$
Resistenza in AC 10 kA, 23,0 °C)	75,38 $\mu\Omega$
Coefficiente temperatura	< $1,1 \times 10^{-3}/C^\circ$
Max temperatura di riscaldamento	20 K

Tabella 2 – Tempi di assestamento e di risposta dello shunt in funzione della corrente applicata

Test	I (A)	T _S (μ s)	T _R (ns)
1	755,90	3,00	302,6
2	753,59	3,14	281,6
3	754,03	2,90	334,0
4	750,51	2,64	243,3
5	751,82	2,80	263,3
6	755,18	2,48	255,0
7	754,49	2,86	282,6
8	755,63	3,18	263,4
9	756,20	2,48	262,5
10	754,97	3,12	332,6

Corrente media applicata $I_m = 754,23$ A

Tempo di assestamento medio $T_{Sm} = 2,86 \mu s$

Tempo di risposta medio $T_{Rm} = 282 ns$

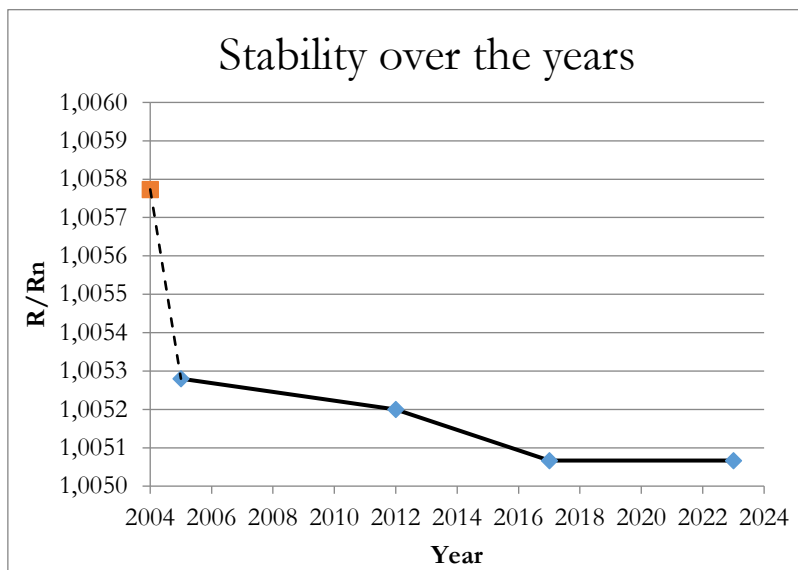


Figura 5 – Rapporto tra il valore di misura e quello nominale dello shunt in corrente continua

In figura 5 è visibile il rapporto tra il valore di misura e quello nominale dello shunt in corrente continua. Il primo valore è stato determinato dal costruttore con il proprio sistema di misura. Successivamente la taratura è stata effettuata all'INRiM, laboratorio di basse resistenze in corrente continua. Tutte le misure sono state effettuate con incertezza estesa pari a 2×10^{-4} .

3 Il sistema di misura per la verifica della linearità

La verifica della linearità dello shunt è stata effettuata usando un sistema di misura lineare per sua costruzione fisica, come richiesto dalla [7]. Si è scelto di utilizzare una bobina di Rogowski, visibile in fig. 6.

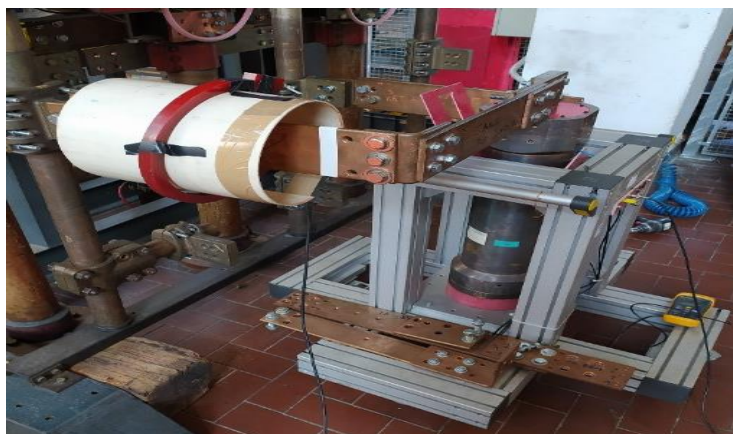


Figura 6 - Bobina di Rogowski

Le bobine, costituite da un avvolgimento avvolto in aria, non soffrono di saturazione del nucleo magnetico; quindi, hanno una linearità intrinseca nella loro costruzione. La componente che può soffrire di

non linearità è l'integratore associato alla bobina. Nella verifica in oggetto si è scelto di acquisire direttamente la tensione d'uscita della bobina usata come riferimento impiegando il multimetro digitale Keysight 3458A (Fig. 7). Questa misura viene poi integrata numericamente, a mezzo software, per ottenere l'andamento temporale della corrente nel sistema sbarre, ovviando alle non linearità dell'elettronica dell'integratore usualmente associato alla bobina.



Figura 7 - Multimetro Keysight 3458A collegato alla bobina di Rogowski



Figura 8 - Multimetro Keysight 3458A collegato allo Shunt

In Fig. 8 è possibile vedere il multimetro Keysight 3458A utilizzato per l'acquisizione della tensione in uscita dallo shunt, anche in questo caso i dati vengono poi trattati da un software dedicato.

3.1 Software utilizzato

Il software di misura in Labview è stato sviluppato dal LATFC, inserendolo all'interno del software di taratura per le forti correnti transitorie, ottimizzandolo al fine dell'utilizzo delle bobine di Rogowski private dell'integratore. In considerazione della necessità di garantire l'assenza di non linearità sull'integrazione si è optato per implementare l'integrazione per via numerica, escludendo pertanto i fenomeni introdotti dall'elettronica. Il metodo numerico utilizzato per l'integrazione è basato sulla regola dei trapezi, poiché risulta la scelta più accurata per funzioni periodiche quale è la corrente alternata oggetto di misura. Per limitare gli effetti numerici della divergenza dell'integrazione si è implementato un metodo di correzione che annulla eventuali bias dovuti al calcolo numerico, correggendo l'eventuale offset al termine dell'integrazione, dopo la fine del passaggio di corrente nel conduttore (fig. 9).

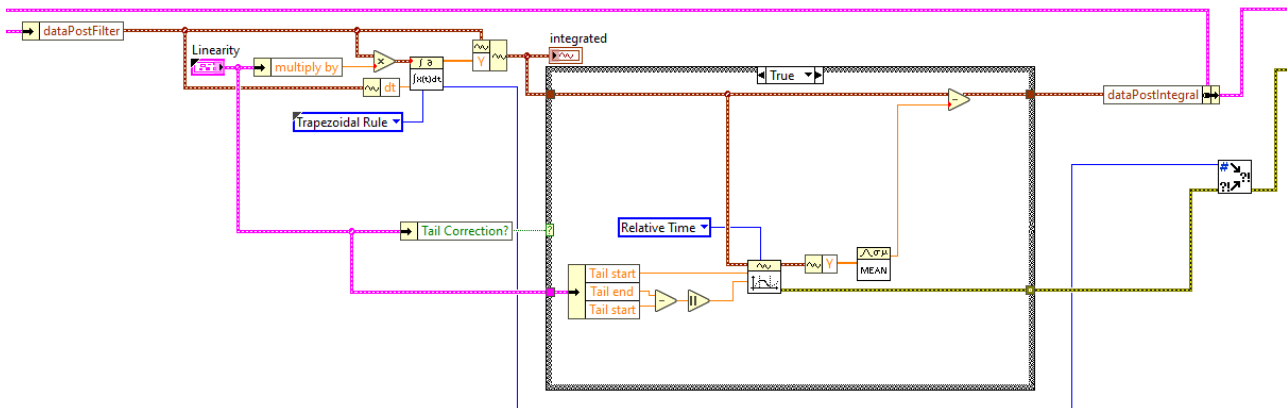


Figura 9 – Schema del metodo d'integrazione

Per migliorare il segnale integrato è stato usato il filtro della mediana (Fig. 10) che è una tecnica di filtraggio digitale non lineare, spesso utilizzata per rimuovere il rumore da un segnale trovando applicazione nell'elaborazione dei segnali. Il filtro mediano scorre il segnale voce per voce, sostituendo ciascun valore con la mediana di quel valore e dei suoi vicini. È molto simile al filtro a media mobile, che sostituisce ogni valore con la media aritmetica del valore stesso e dei suoi vicini. Il gruppo di valori vicini è chiamato "finestra", la quale scorre, elemento per elemento, lungo tutto il segnale.

Figura 10 – Schema del filtro utilizzato

4 Analisi delle misure e calcolo delle incertezze

Per l'analisi delle misure viene fatto riferimento a quanto riportato nella norma IEC 62475 [7] dove viene descritto il calcolo da effettuare per la verifica della linearità. La norma descrive la verifica della linearità come una prova aggiuntiva. Utilizzata per verificare un sistema di misura oggetto di taratura nel caso in cui il sistema campione non abbia un campo di misura sufficiente a coprire il campo del sistema di misura oggetto

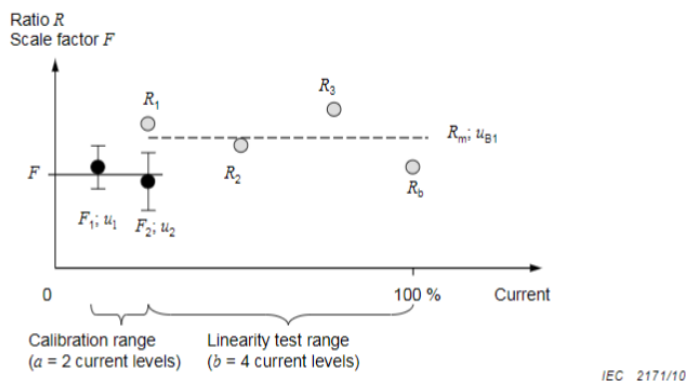


Figura 11 - Verifica della linearità come descritto dalla norma IEC 62475 [7]

della taratura. In Fig. 11 si può vedere come la linearità si misuri attraverso un rapporto tra la misura del sistema oggetto della taratura e il sistema intrinsecamente lineare. Il sistema di misura dell'INRiM è una CMC unica, pertanto non sono presenti Confronti Internazionali. Lo shunt, caratterizzato al momento della costruzione, viene periodicamente verificato per mezzo di una taratura in corrente continua. In questo modo il fattore di scala viene verificato od aggiornato. Tuttavia, in funzione della resistenza del derivatore, la misura può essere eseguita fino ad un valore massimo di corrente pari a circa 500 A. Per questo motivo la linearità dello shunt è stata verificata nel suo campo di applicazione, le forti correnti transitorie, oltre il valore massimo della CMC INRiM/201 (170 kA), vale a dire fino a 230 kA. Per il calcolo del contributo di incertezza relativo alla verifica della linearità, la [7] ci fornisce l'equazione:

$$u_{lin} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \max_{1 \leq g \leq b} \left| \frac{R_{i,g}}{\bar{R}_g} - 1 \right| \quad (1)$$

Dove:

- $R_{i,g}$ è il rapporto tra il sistema di misura oggetto della linearità e il sistema di misura intrinsecamente lineare anche se questa affermazione è dibattuta [9];
- \bar{R}_g è il rapporto medio ricavato come media dei rapporti ottenuti alle diverse correnti, R_m in [7].

In Tabella 3 si possono vedere i livelli di corrente a cui è stata fatta la verifica della linearità, il rapporto tra le misure del sistema di misura oggetto della verifica della linearità (Shunt) e del sistema di misura lineare (Rogowski), la deviazione standard calcolata per ogni livello di corrente ed infine il rapporto medio con il contributo di incertezza finale calcolato mediante la (1). L'andamento della linearità è visibile anche in Fig. 12.

Tabella 3 - Risultati della verifica di linearità

Corrente	Rapporto misure Shunt/Rogowski	Deviazione standard (%)
1 kA	211,3	0,1
40 kA	210,8	0,0
80 kA	210,4	0,0
120 kA	211,4	0,3
170 kA	211,5	0,4
230 kA	209,5	0,5

u_{lin} fino a 170 kA **0,10%**
 u_{lin} fino a 230 kA **0,17%**

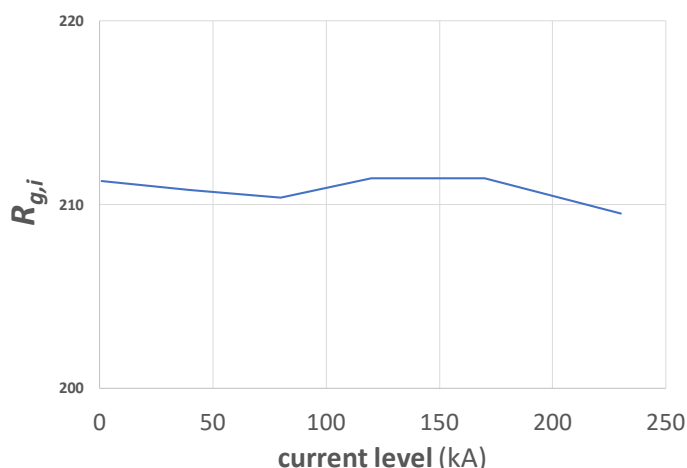


Figura 12 - Verifica della linearità in forma grafica.

Tabella 4 - Risultati della verifica di linearità per l'integrale di Joule

Corrente	I^2t Rapporto misure Shunt/Rogowski
80 kA	44,31 k
120 kA	45,09 k
170 kA	44,51 k
230 kA	44,65 k
u_{lin} fino a 230 kA	0.6 %

In [8] è riportato un budget dell'incertezza di misura del sistema di misura INRiM valevole fino a 170 kA, attuale limite della CMC dell'INRiM per queste misure. In questo budget si è considerato un contributo d'incertezza relativo alla non linearità del divisore pari a 0.23 % definito dal costruttore in sede di caratterizzazione fino a 80 kA, per cui i valori determinati fino a 230 kA rientrano ampiamente in questo contributo. Si riassumono in Tabella 5 i budget d'incertezza in forma semplificata per correnti di picco fino a 170 kA e fino a 230 kA.

Tabella 5 – Budget d’incertezza per le misure di corto circuito fino a 230 kA (correnti di picco).

Componente	tipo	Contributo di incertezza
Fino a 170 kA		
Corrente di picco sistema in taratura	Rett. B	$8,1 \times 10^{-6}$
Corrente di picco sistema campione	Normale	$1,5 \times 10^{-3}$
Auto-riscaldamento shunt riferimento	Rett. B	$1,3 \times 10^{-3}$
Linearità divisore riferimento	Rett. B	$1,0 \times 10^{-3}$
Stabilità divisore riferimento	Rett. B	$1,9 \times 10^{-4}$
Fattore di scala	Rett. B	$1,3 \times 10^{-4}$
$u_c = 2,1 \times 10^{-3}$	per k= 2	$U = 4,2 \times 10^{-3}$
Fino a 230 kA		
Corrente di picco sistema in taratura	Rett. B	$8,1 \times 10^{-6}$
Corrente di picco sistema campione	Normale	$1,5 \times 10^{-3}$
Auto-riscaldamento shunt riferimento	Rett. B	$1,3 \times 10^{-3}$
Linearità divisore riferimento	Rett. B	$1,7 \times 10^{-3}$
Stabilità divisore riferimento	Rett. B	$1,9 \times 10^{-4}$
Fattore di scala	Rett. B	$1,3 \times 10^{-4}$
$u_c = 2,8 \times 10^{-3}$	per k= 2	$U = 5,6 \times 10^{-3}$

Sempre in [8] è riportato il budget dell’incertezza per l’integrale di Joule che non prevedeva un contributo per la non linearità del sistema. In tabella 6 è riproposto il medesimo budget tenendo conto della componente d’incertezza dovuta alla non linearità riscontrata fino a 230 kA.

Tabella 6 – Budget d’incertezza per l’integrale di Joule fino a 230 kA.

Componente	tipo	Contributo di incertezza
Integrale di Joule sistema in taratura	Rett. B	$9,8 \times 10^{-7}$
Integrale di Joule sistema campione	Rett. B	$1,2 \times 10^{-8}$
Auto-riscaldamento shunt riferimento	Rett. B	$1,3 \times 10^{-3}$
campionamento	Normale	$1,2 \times 10^{-2}$
Linearità divisore riferimento	Rett. B	$6,0 \times 10^{-3}$
Integrazione numerica	Rett. B	$1,0 \times 10^{-2}$
$u_c = 1,7 \times 10^{-2}$	per k= 2	$U = 3,4 \times 10^{-2}$

5 Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio della linearità del sistema di misura in uso presso l’INRiM per la taratura di correnti di corto circuito per confronto con un sistema lineare basato su bobina di Rogowski ha permesso di valutarne l’andamento in funzione della corrente di picco e dell’integrale di Joule. Sono stati valutati i contributi d’incertezza dovuti alla non linearità andando ad aggiornare i bilanci di incertezza relativi all’attuale CMC fino a 170 kA, risultando pari a $4,2 \times 10^{-3}$ fino a 170 kA e pari a $5,6 \times 10^{-3}$ fino a 230 kA. Pertanto, l’attuale CMC pari a 0,6 % per le correnti fino a 170 kA si può estendere fino a 230 kA dividendola in due ranges: il primo fino a 170 kA con incertezza pari a $4,2 \times 10^{-3}$ ed il secondo con incertezza pari a $5,6 \times 10^{-3}$ fino a 230 kA. Per l’integrale di Joule la CMC

passerebbe a $3,4 \times 10^{-2}$ fino a 230 kA. In considerazione delle richieste di riferibilità anche per correnti superiori si potrà valutare l'estensione della linearità fino a 250 kA di picco, valore massimo per lo shunt principale. In considerazione dell'attuale limite di impianto in INRiM, legato ai trasformatori di potenza, sarà valutata la possibilità di esecuzione on-site, nell'occasione di una taratura con verifica della linearità per i sistemi del committente, misurando contemporaneamente la linearità del sistema di riferimento tra 230 kA e 250 kA.

Bibliografia

- [1] S. Ren A 100 000-A High Precision On-Site Measurement Calibration Device for Heavy Direct Current, IEEE Instrum Meas. 39 (1) pp. 19-22, 1990.
- [2] S. Ren and H. Ding A 300 000-A High Precision On-line Calibration and Measurement, IEEE Instrum Meas. 40 (2) pp. 281-283, 1991.
- [3] M. Zhu and K. Xu A Calibrating Device for Large Direct Current Instruments up to 320 Kiloampere-Turns, IEEE Instrum Meas. 47 (3) pp. 711-714, 1998.
- [4] J.A.J. Petting and J. Siersema A polyphaser 500 kA current measuring system with Rogowski coils IEE Proceedings B (Electric Power Applications) 130 (5) <https://doi.org/10.1049/ip-b.1983.0054>
- [5] D. A. Ward, J. La, and T. Exon, "Using Rogowski coils for transient current measurements," Eng. Sci. Educ. J., vol. 2, no. 3, pp. 105–113, Jun. 1993.
- [6] I. Metwally, "Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement," IEEE Trans. Instrum. Meas., 59, no. (2), pp. 353–360, Feb. 2010.
- [7] IEC 62475:2011, Tecniche di prova a correnti elevate Definizioni e requisiti per correnti di prova e sistemi di misura
- [8] P. E. Roccato and P. P. Capra High-Precision Multimeter Digitizer for High Short-Circuit Current Calibration, IEEE Instrum Meas. 68 (6) pp. 2100-2105, 2019.
- [9] D. Ramboz, D. E. Destefan and R. S. Stant: "The Verification of Rogowski Coil Linearity from 200 A to greater than 100 kA using Ratio Methods", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Anchorage, USA, 21-23 May 2002

