



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Estensione della capacità di misura dell'integrale di Joule dell'INRiM a $10 \text{ G A}^2\text{s}$

Original

Estensione della capacità di misura dell'integrale di Joule dell'INRiM a $10 \text{ G A}^2\text{s}$ / Galliana, F., Caria, S.E., Scialpi, G.P., Corona, D., Roccato, P.. - (2026), pp. 349-350. (X Forum Nazionale delle Misure REGGIO CALABRIA 7-9 Settembre 2026).

Availability:

This version is available at: 11696/90339 since: 2026-10-06T10:22:29Z

Publisher:

Published

DOI:

Terms of use:

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

Publisher copyright

GMEE

Copyright degli Autori

(Article begins on next page)

associazione italiana
gme
gruppo misure
elettriche ed elettroniche

MMT
Gruppo Nazionale



FORUM
NAZIONALE
DELLE MISURE

10 EDIZIONE

ATTI DEL **X** FORUM NAZIONALE DELLE MISURE

REGGIO CALABRIA, 7-9 SETTEMBRE 2026

43° Congresso Nazionale di **Misure Elettriche ed Elettroniche**

34° Congresso Nazionale di **Misure Meccaniche e Termiche**

Estensione della capacità di misura dell'integrale di Joule dell'INRiM a 10 GA²s

F. Galliana⁽¹⁾, S. Caria⁽¹⁾, G.P. Scialpi⁽¹⁾, D. Corona⁽¹⁾, P. Roccato⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dip. di Metrologia Applicata e Ingegneria, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91 - 10135 Torino
f.galliana@inrim.it

1. INTRODUZIONE

La valutazione dell'integrale di Joule, così come delle correnti di cortocircuito, è importante per verificare la sicurezza e l'affidabilità dei dispositivi elettrici secondo le relative norme di prodotto, richiamando la [1] per la definizione dei metodi di misura. L'unico Istituto Metrologico Nazionale (NMI) con una Calibration and Measurement Capability (CMC) in ambito CIPM-MRA per la taratura delle correnti di cortocircuito e dell'integrale di Joule è l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), tramite il LATFC – Laboratorio Alte Tensioni Forti Correnti [2, 3]. La CMC per l'integrale di Joule ($I^2 \times t$) è attualmente limitata a 2 GA²s in misura diretta, a causa delle caratteristiche termiche del derivatore del sistema di misura quando viene sottoposto a correnti dell'ordine di 100 kA per più di 0,2 s. Per superare questa limitazione per un integrale di Joule superiore, al sistema di misura è stato aggiunta una bobina di Rogowski, estendendo a 1 s l'applicazione di una corrente di 100 kA, fino a un integrale di Joule di 10 GA²s. Le bobine di Rogowski, costituite da avvolgimenti attorno a un nucleo in plastica o in aria, non sono soggette a saturazione del nucleo magnetico. La permeabilità magnetica rimane costante e non varia con la corrente, garantendo una relazione lineare tra la corrente misurata e la tensione di uscita [4, 5].

2. IL SISTEMA DI MISURA

Il sistema di misura è costituito (Fig. 1) da un derivatore compensato e da una bobina di Rogowski, utilizzati come campioni di riferimento rispettivamente fino a 2 GA²s e oltre 2 GA²s. La Fig. 2 mostra lo schema del sistema di misura: la tensione di uscita del derivatore e quella della bobina di Rogowski vengono acquisite con un multimetro Keysight 3458A. Il software per la gestione delle misure è stato realizzato dal LATFC e ottimizzato per l'utilizzo della bobina di Rogowski senza integratore. Il derivatore per l'integrale di Joule fino a 2 GA²s è di tipo coassiale compensato da 75 $\mu\Omega$, caratteristiche descritte in [3] con corrente nominale di 100 kA per 0,2 s, con tempo di raffreddamento fino a 30 minuti dopo ogni applicazione di corrente. La bobina di Rogowski è una SOMELEC mod. ATOR2V senza integratore elettronico per evitare non linearità dovuti all'elettronica.

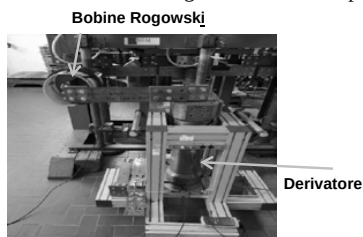


Fig. 1 Installazione del sistema di misura.

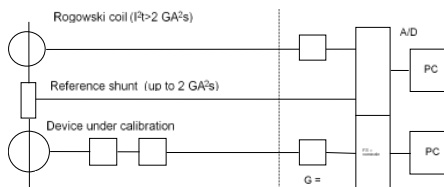


Fig. 2. Schema del circuito di misura. G è un amplificatore del dispositivo in taratura.



Fig. 3 Vista delle tre bobine di Rogowski.

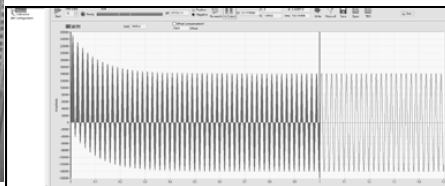


Fig. 4. Schermata del software. Le due aree rappresentano rispettivamente il calcolo della corrente e dell'integrale di Joule.

Il software di misura è descritto in [2]. L'integrazione numerica consente di eliminare effetti indesiderati dovuti all'elettronica, mentre l'uso del filtro della mediana permette di affinare ulteriormente l'integrazione numerica. Fig. 4 mostra una schermata del programma di misura.

3. INCERTEZZE DI MISURA

Il modello della misura è:

$$I^2 t_x = I^2 t_{ref} \beta_I \beta_H \lambda_c k \quad (1)$$

Dove $I^2 t_x$ e $I^2 t_{ref}$ sono rispettivamente gli integrali di Joule del sistema in taratura e del sistema di riferimento. β_I e β_H sono termini correttivi ($\cong 1$) che tengono conto degli effetti della stabilità-linearità e dell'auto-riscaldamento del sistema shunt/bobina di Rogowski. λ_c e k ($\cong 1$) tengono conto dell'errore di integrazione numerica e della ripetibilità delle misure rispettivamente. Assumendo indipendenti tutte le grandezze di ingresso in (1), l'incertezza tipo composta di $I^2 t_x$ è data da:

$$u_c(I^2 t_x) = u^2(I^2 t_{ref}) + u^2(\beta_I) + u^2(\beta_H) + u^2(\lambda_c) + u^2(k) \quad (2)$$

Un bilancio preliminare di incertezza secondo [6] è riportato in Tabella 1. Non è stata aggiunta una componente dovuta al multimetro poiché l'analisi in [2] ne dimostra la trascurabilità.

Tabella 1. Incertezza per misure dell'integrale di Joule $I^2 t_x$

$I^2 t_x < 2 \text{ G A}^2\text{s}$	Inc. tipo $k=1$ (%)	Tipo
Integrale Joule sistema riferimento	$u(I^2 t_{ref}) \cong$ trascurabile	Rett. B
Stabilità meccanica bobina Rogowski	$u(\beta_I) \cong 0,6$	Rett. B
Riscaldamento	$u(\beta_H) \cong 0,13$	Rett. B
Integrazione	$u(\lambda_c) \cong 1,0$	Rett. B
Ripetibilità	$u(k) \cong 1,0$	Normale A
Incertezza composta 1,6 %		Incertezza estesa 3,2 %
$I^2 t_x \cong 10 \text{ G A}^2\text{s}$	Inc. tipo $k=1$ (%)	Tipo
Integrale Joule sistema riferimento	$u(I^2 t_{ref}) \cong 0,1$	Rett. B
Stabilità meccanica bobina Rogowski	$u(\beta_I) \cong 0,01$	Rett. B
Riscaldamento	$u(\beta_H) \cong$ trascurabile	Rett. B
Integrazione	$u(\lambda_c) \cong 1,0$	Rett. B
Ripetibilità	$u(k) \cong 1,4$	Normale A
Incertezza composta 1,7 %		Incertezza estesa 3,5 %

CONCLUSIONI

Questo contributo ha presentato una proposta di aggiornamento del sistema di misura dell'integrale di Joule a livello di 10 GA²s al fine di ottenere un'estensione della CMC. Tuttavia, il sistema e le relative incertezze dovranno essere validati mediante un confronto energetico con un trasformatore di corrente in regime stazionario, a basso valore e di lunga durata.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] IEC 62475:2011, High-current test techniques - Definitions and requirements for test currents and measuring systems.
- [2] P. E. Roccato and P.P. Capra, "High-Precision Multimeter Digitizer for High Short-Circuit Current Calibration," IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol. 68 (6) 2100-2105 June 2019,
- [3] F. Galliana, S. E. Caria, P. E. Roccato, "Extension to 230 kA with uncertainty reduction for calibration of shortcircuit currents at INRiM," Eng. Res. Express Vol. 8 (036001) 2026 <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ae3a3c>
- [4] M. Chiampì, G. Crotti, and A. Morando, "Evaluation of flexible Rogowski coil performances in power frequency applications," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 60, (3) 854–862, Mar. 2011. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2060223>.
- [5] D. A. Ward and J. L. T. Exon, "Using Rogowski coils for transient current measurements," Eng. Sci. Educ. J., vol. 2, (3) 105–113, Jun. 1993, doi: <https://doi.org/10.1049/esej:19930034>
- [6] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, First ed.