METRICA
METRology Institutional CAtalog

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA
Repository Istituzionale

Un derivatore di corrente simulato come campione di viaggiatore di resistenza elettrica di basso valore

Original
Un derivatore di corrente simulato come campione di viaggiatore di resistenza elettrica di basso valore / Callegaro, Luca; Cassiago, Cristina; Gasparotto, Enrico. - In: TUTTO MISURE. - ISSN 2038-6974. - 02:(2016), pp. 17-19.

Availability:
This version is available at: 11696/53067 since: 2016-09-27T09:45:31Z

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

(Article begins on next page)

20 April 2024

Luca Callegaro, Cristina Cassiago, Enrico Gasparotto

Un derivatore di corrente simulato

come campione viaggiatore di resistenza elettrica di basso valore

A SIMULATED CURRENT SHUNT TO BE EMPLOYED AS A LOW-RESISTANCE TRAVELLING STANDARD

We present a device (SimShunt) that simulates the electrical behavior of a low-valued resistor, and is intended to be employed as a low-resistance travelling standard. It is composed of a direct-current current transformer (DCCT) and a mid-range resistance standard. A 10 mΩ SimShunt prototype has been constructed; it can be calibrated with commercial dc resistance bridges and exhibits a very small power coefficient. The expected long-term and transport stability is a few parts in 10^6 or better.

RIASSUNTO

Presentiamo un dispositivo (SimShunt) che simula il comportamento elettrico di un resistore di basso valore, da impiegarsi come campione viaggiatore. Il SimShunt è composto da un DCCT (trasformatore di corrente per correnti continue) e da un resistore di valore intermedio. È stato costruito un prototipo da 10 mΩ, che può essere tarato con ponti di resistenza commerciali e che mostra un coefficiente di potenza molto ridotto. La stabilità relativa, temporale e di trasporto, è stimata in poche parti in 10^6 o migliore.

IL PROBLEMA

I resistori di basso valore (derivatori, o *shunt*) sono largamente impiegati in ambito industriale come trasduttori per forti correnti, economici e affidabili. In ambito metrologico, i derivatori tipicamente utilizzati hanno valori di resistenza nominale nel campo 100 μΩ – 100 mΩ, e correnti nominali sino al kA. La corrispondente dissipazione di potenza, da 1 W a 100 W, è di gran lunga superiore alla potenza (dell'ordine di 10 mW) solitamente dissipata nella taratura e nell'utilizzo di resistori campione di valore intermedio (1 Ω – 10 kΩ). Il conseguente riscaldamento dei derivatori deve essere mitigato con tecniche di raffreddamento, tipicamente forzato, ad aria o liquido.

La riferibilità della misura per forti correnti viene trasferita dagli istituti metrologici primari (NMI) verso i Laboratori di taratura tramite derivatori tarati. Come per altre grandezze elettriche, al fine di ottemperare al Mutual Recognition Arrangement del Comité International des Poids et Mesures (CIPM MRA), gli NMI partecipano a confronti internazionali, che utilizzano derivatori come campioni viaggiatori.

In anni recenti, i confronti internazionali per bassi valori di resistenza hanno mostrato che la stabilità al trasporto dei derivatori d'interesse metrologico è – a dispetto della loro apparente robustezza costruttiva – molto modesta. Anche ponendo estrema cura nella movimentazione, l'incertezza del valore di riferimento del confronto viene dominata dal contributo dovuto alla stabilità e risulta dell'ordine anche di decine di parti in 10^6 [1] e quindi almeno un ordine di grandezza più elevata dell'incertezza di taratura dichiarata dagli NMI [1, 2]. Il confronto risulta così inutile al suo scopo primario, che è quello di una mutua validazione delle rispettive capacità di misura.

LA SOLUZIONE PROPOSTA

Descriviamo qui un derivatore simulato (SimShunt), composto da un trasformatore di corrente per correnti in regime continuo (*direct-current current transformer*, o DCCT) e un campione di resistenza di valore intermedio. Il comportamento elettrico del SimShunt è analogo a quello di un normale resistore di basso valore, e gli stessi sistemi e metodi ne permettono la misura. A parità di corrente applicata, la dissipazione di potenza del SimShunt è molto inferiore a quella di un derivatore dello stesso valore nominale, così come il corrispondente coefficiente di potenza. La provata stabilità dei DCCT e dei resistori di valore intermedio suggeriscono che un SimShunt possa essere impiegato come campione viaggiatore ad alta stabilità nei confronti di misura e come campione di trasferimento della riferibilità nel campo dei bassi valori di resistenza.

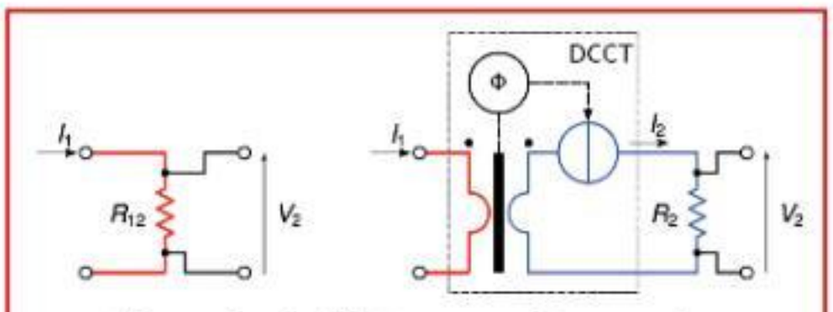


Figura 1 – A sinistra, un resistore reale, di resistenza a quattro terminali R_{12}. A destra, lo schema di principio del derivatore simulato SimShunt, di resistenza $R_{12} = t\,R_2$

La Fig. 1, a sinistra, mostra un resistore reale, di resistenza a quattro terminali R_{12}. La corrente I_1 applicata ai morsetti di corrente genera, ai morsetti di tensione, una tensione $V_2 = R_{12}\,I_1$. La corrispondente potenza dissipata è $P = R_{12}\,I_1^2$.

La stessa Fig. 1, a destra, mostra lo schema di principio del SimShunt. I morsetti di corrente sono connessi

INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica
l.callegaro@inrim.it

all'avvolgimento primario del DCCT, e a questi è applicata la corrente I_1. Il DCCT è un dispositivo attivo controreazionato: la corrente I_2 di un generatore controllato interno al dispositivo, che percorre l'avvolgimento secondario, è controllata attivamente in modo da mantenere sempre nullo il flusso nel nucleo. La stessa corrente I_2 fluisce anche attraverso un resistore R_2, e la corrispondente caduta di tensione V_2 costituisce il segnale di uscita del SimShunt.
Quando il DCCT opera correttamente si ha $I_2 = t\, I_1$, dove t è il rapporto di trasformazione di corrente (molto prossimo al rapporto spire). La resistenza equivalente del SimShunt è allora $R_{12} = V_2/I_1 = R_2\, I_2/I_1 = t\, R_2$ e la corrispondente potenza dissipata è $P = t\, R_{12}\, I_1^2$.
Un DCCT commerciale ha valori di t tipicamente compresi nell'intervallo 10^{-2} - 10^{-4}; pertanto, R_2 può essere scelto tra resistori di valore intermedio e specificati per una dissipazione di potenza molto inferiore a quella del corrispondente derivatore reale da simulare.

UN PROTOTIPO

Abbiamo realizzato presso l'INRIM un prototipo del SimShunt, di valore nominale R_{12} = 10 mΩ, combinando:
– un campione di resistenza di valore R_2 = 1Ω, termostatato in bagno d'olio a 23,000 °C;
– un DCCT commerciale (LEM mod. ITZ 2000-SPR ULTRASTAB).

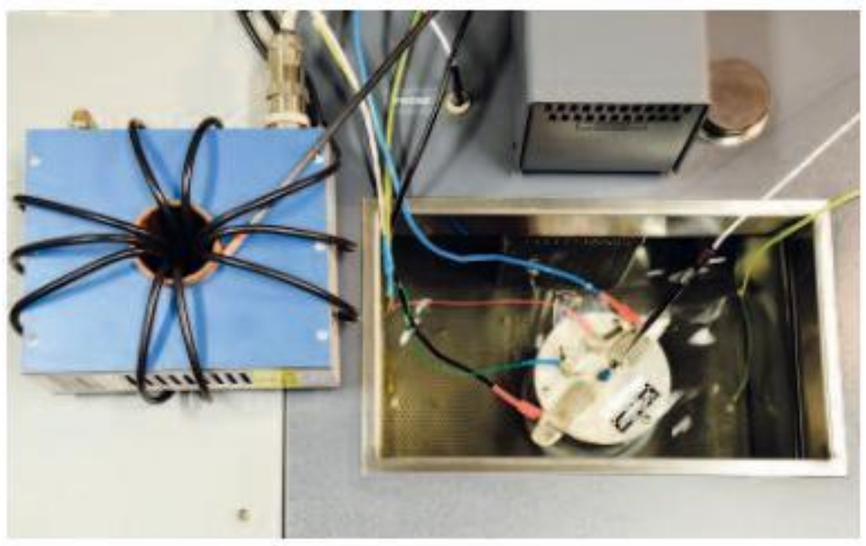


Figura 2 – Una foto del prototipo di derivatore simulato. A sinistra la testa del DCCT con l'avvolgimento primario esterno di 10 spire; a destra il resistore R_2 in bagno d'olio

Il rapporto di correnti del DCCT è programmabile e la corrente primaria di fondo scala può essere scelta per valori da 125 A a 2 kA. Il rapporto t = 0,01 scelto per le misure e non disponibile tra i rapporti predefiniti del DCCT, è ottenuto realizzando un avvolgimento primario di 10 spire.
Le proprietà del SimShunt sono state confrontate con un derivatore reale R_s (Tinsley, mod. 3504C), di valore nominale 10 mΩ, anch'esso termostatato in bagno d'olio.

MISURE

Le misure sono state eseguite utilizzando un ponte a comparatore di correnti commerciale (Measurement International mod. 6010B con *extender* 6011B), per confronto con un resistore campione di valore nominale pari a 1 Ω, anch'esso termostatato in bagno d'olio e tarato per confronto con il campione nazionale italiano di resistenza elettrica. Il rapporto di trasformazione t del DCCT è misurato come in [5].
Il comportamento del ponte di misura durante la caratterizzazione del SimShunt è risultato sostanzialmente analogo a quello corrispondente alla misura di un derivatore reale: il *firmware* interno e il programma di acquisizione del costruttore hanno impostato automaticamente il ponte per la misura di un resistore da 10 mΩ e ottenuto corrispondenti letture.
La Fig. 3 riporta i valori di resistenza misurata sul SimShunt e sul derivatore reale in funzione della corrente primaria, variabile nel campo da 1 a 10 A. Si nota chiaramente che il SimShunt ha un coefficiente di potenza molto inferiore rispetto al derivatore reale: questo è dovuto all'elevata linearità del DCCT e alla ridotta dissipazione di potenza, che risulta da 100 µW a 10 mW sul SimShunt, e da 10 mW a 1 W sul derivatore reale. Il SimShunt ha inoltre una deviazione dal valore nominale molto ridotta.
Nella Fig. 4 si confronta il valore misurato R_{12} del SimShunt con un valore calcolato, dato dal prodotto $t\, R_2$ tra il rapporto spire t e il valore misurato del resistore R_2. Come si può osservare i valori riportati, misurato e calcolato, risultano compatibili entro le rispettive incertezze.

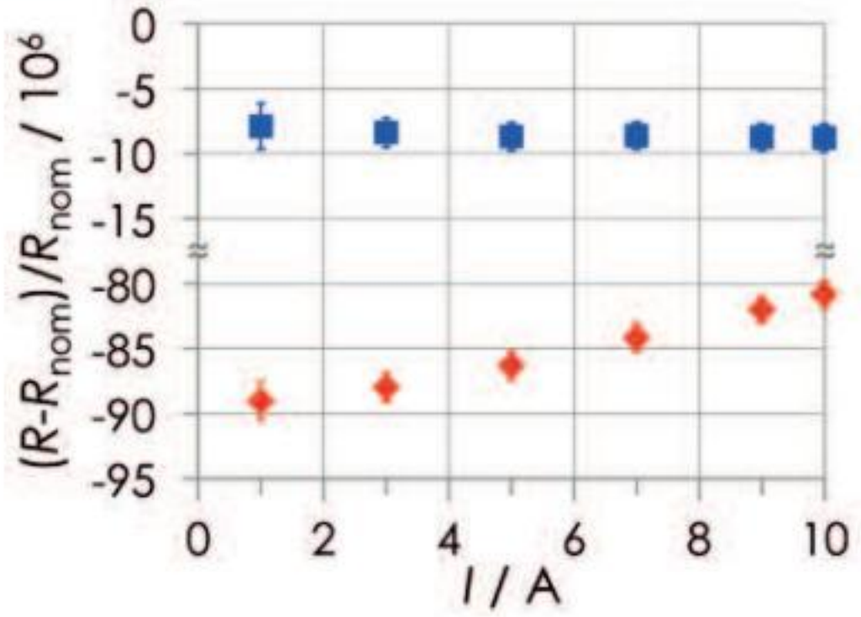


Figura 3 – Deviazioni relative della resistenza R_{12} dal valore nominale R_{nom} = 10 mΩ per il SimShunt e per il derivatore reale, in funzione della corrente di misura. Le barre d'incertezza corrispondono a un fattore di copertura k=2

PROSPETTIVE

I risultati evidenziano le superiori prestazioni del SimShunt rispetto al corrispondente derivatore reale dello stesso valore nominale, in particolare per quanto concerne il coefficiente di potenza, come si osserva in Fig. 3.
Il confronto riportato in Fig. 4 mostra che è possibile stimare il valore di R_{12} senza effettuare alcuna misura di resistenza di basso valore. Questo risultato apre l'interessante possibilità, per un Laboratorio di taratura, di ottenere una riferibilità per le misure di resistenze di basso valore e di forti correnti anche in assenza di sistemi di misura, come ponti o *extender*, specifici per le basse resistenze.
Il derivatore simulato è di recente

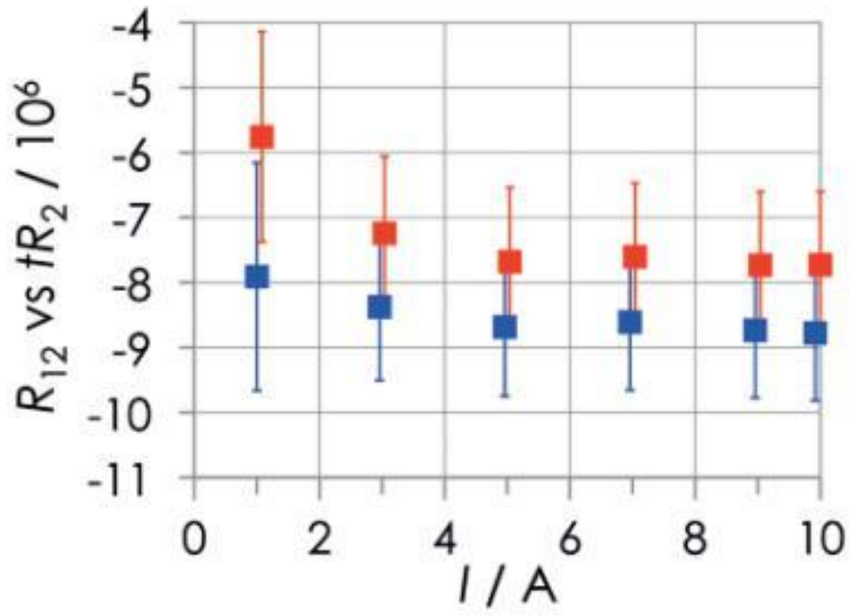


Figura 4 – Confronto tra il valore R_{12} del SimShunt, misurato con il ponte a comparatore di correnti, e il valore t R_2, dato dal prodotto del rapporto di trasformazione t del DCCT e il valore misurato del resistore R_2, entrambi relativi al valore nominale R_{nom} = 10 mΩ. Le barre d'incertezza corrispondono a un fattore di copertura k=2

costruzione, e sia la sua deriva temporale sia il comportamento come campione viaggiatore devono essere ancora verificati. Come semplice combinazione di due elementi, ci si aspetta che la stabilità temporale sia confrontabile con la stabilità combinata dei due elementi che lo compongono. Per quanto riguarda la stabilità di R_2, diversi confronti internazionali hanno dimostrato che campioni di resistenza commerciali del valore nominale di 1 Ω o superiore sono estremamente stabili nel tempo e al trasporto, con deviazioni tipiche dell'ordine di parti in 10^8 (si vedano ad esempio i *report* del confronto internazionale 4).

I DCCT per impiego metrologico sono dispositivi recenti, e non sono ancora disponibili in letteratura dati riguardo alla loro stabilità. Il principio di funzionamento dei DCCT è il comparatore di correnti, e pertanto per quanto riguarda la stabilità del rapporto *t* nel tempo e verso le condizioni ambientali ci si aspettano comportamenti simili a quelli di trasformatori e divisori induttivi in regime alternato, che hanno stabilità dell'ordine di parti in 10^7. Il rilassamento magnetico e le magnetizzazioni residue del nucleo possono causare variazioni nell'*offset* della corrente secondaria, ma la tecnica di misura dei resistori di basso valore prevede comunque una reiezione di questo *offset*, mediante periodiche inversioni della corrente primaria. Variazioni di *t* causate da derive temporali nell'elettronica del DCCT sono più difficili da prevedere, ma poiché l'elettronica del DCCT è di fatto un controllore in anello chiuso, variazioni limitate del guadagno causate da derive nei componenti dovrebbero avere effetti molto limitati. Si consideri in ogni caso la differenza con il comportamento di un derivatore reale, nel quale qualsiasi variazione nella resistività del materiale dovuto a *creep*, condizioni ambientali, vibrazioni meccaniche ecc. hanno un effetto diretto sulla resistenza.

Il confronto internazionale EURAMET.EM-S35 [3], oggi in corso, impiega come campione viaggiatore un DCCT di tecnologia simile a quello qui descritto. Risultati preliminari mostrano derive, se ce ne sono, a livello di parti in 10^6 o meno.

Su queste basi, ci si attende che il prototipo di SimShunt qui presentato possa avere una stabilità nel tempo e al trasporto dell'ordine di alcune parti in 10^6 o migliore. Come già detto, questa *performance* è migliore di quella osservata in confronti che impiegano derivatori reali come campioni viaggiatori. Gli autori sono disponibili a collaborazioni con istituti metrologici e centri di taratura per una verifica sul campo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. G. Rietveld, J. H. N. van der Beek, M. Kraft, R. E. Elmquist, A. Mortara, B. Jeckelmann, "Low-ohmic resistance comparison: measurement capabilities and resistor traveling behavior", IEEE Trans. Instr. Meas., vol. 6, no. 6, pp. 1723-1728, 2013.

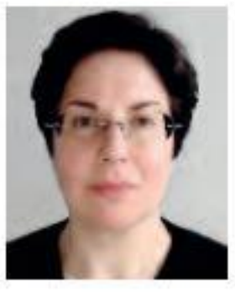
2. G. Rietveld, "Comparison of low-ohmic resistor (100 Ω, 1 mΩ, 10 mΩ and 100 mΩ)", Final Report 835, November 2007. Disponibile online: **www.euramet.org**.

3. C. Cassiago, A. Mortara, "Comparison of high-current ratio standard", EURAMET, Technical Protocol 1217, Feb 2012. Disponibile online: **www.euramet.org**.

4. BIPM Key Comparison DataBase, "BIPM.EM-K13.a, Key comparison in Electricity and Magnetism, Resistance: 1 ohm", 1996, ongoing. Disponibile online: **http://kcdb.bipm.org**.

5. L. Callegaro, C. Cassiago, E. Gasparotto, "On the Calibration of Direct-Current Current Transformers (DCCT)", IEEE Trans. Instr. Meas. vol. 64, n. 3, pp. 723-727 (2015).

Luca Callegaro è Primo Ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) di Torino. È responsabile del programma di ricerca "Metrologia dell'ampere" della Divisione Nanoscienze e Materiali. Dal 2015 è Chairman per il Technical Committee on Electricity and Magnetism (TC-EM) dell'European Association of National Metrology Institutes (EURAMET).



Cristina Cassiago è Tecnologo presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) di Torino.

Enrico Gasparotto è Collaboratore Tecnico presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) di Torino.