

CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE IMPEDANCIA EN TODO EL PLANO COMPLEJO

Y. A. Sanmamed⁽¹⁾, Javier Díaz de Aguilar⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Español de Metrología, c/Alfar, 2 Tres Cantos (Madrid).
(+34) 918074768; yalvarezs@cem.es.

RESUMEN: La impedancia eléctrica es una magnitud que juega un papel fundamental en la metrología eléctrica, ya que se emplea en la caracterización de circuitos y componentes electrónicos y gran parte de estas medidas de impedancia se realizan empleando medidores de impedancia LCR, calibrados mediante el método clásico de artefactos, que no garantiza la trazabilidad en todo el rango de medida ni en todo el plano complejo. En este artículo se presenta un simulador de impedancia, desarrollado dentro del proyecto europeo AIM QuTE, cuyo objetivo es mejorar y automatizar el procedimiento de calibración de medidores LCR, cubriendo todo el rango de impedancias y todo el plano complejo.

1. INTRODUCCIÓN

La impedancia eléctrica es una magnitud que juega un papel relevante en la metrología eléctrica, ya que se emplea en la caracterización de circuitos y componentes electrónicos y además, existen muchos sensores basados en la variación de su impedancia con una magnitud física como, por ejemplo, la temperatura, la humedad o la presión [1].

La impedancia se define como la oposición que ofrece un circuito al paso de la corriente alterna (CA) a una frecuencia dada y al ser una magnitud compleja se puede representar por una parte real que es una resistencia R y una parte imaginaria que es una reactancia X , $Z = R \pm jX$ o en coordenadas polares por el módulo de la impedancia y su ángulo de fase.

En corriente alterna se consideran tres tipos de elementos en un circuito: resistencias, inductancias y condensadores, y cada uno de ellos presenta una impedancia distinta. La resistencia eléctrica, al igual que en corriente continua, sigue teniendo un comportamiento lineal, y su impedancia coincide en módulo con su resistencia y la tensión entre sus bornes está en fase con la intensidad que la atraviesa. En el caso de los condensadores la reactancia X es una reactancia capacitiva X_C ,

$$X_C = \frac{1}{j2\pi f \cdot C} = \frac{-j}{\omega C} \quad (1)$$

donde f es la frecuencia y C la capacidad. La corriente en un condensador adelanta en $\pi / 2$ a la tensión.

Finalmente, para una inductancia la reactancia X es una reactancia inductiva X_L ,

$$X_L = j2\pi f \cdot L = j\omega L \quad (2)$$

donde f es la frecuencia y L es la inductancia. La corriente en una inductancia está retrasada $\pi / 2$ con respecto a la tensión.

En el caso más general, un circuito RLC, aparece una parte resistiva, una inductiva y una capacitiva:

$$Z = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C). \quad (3)$$

Gran parte de las medidas de impedancia se realizan empleando medidores de impedancia (medidores LCR) y su caracterización precisa es fundamental.

La cadena de trazabilidad de la medida de impedancia hasta el momento se describe en la Fig.1. La realización de los patrones de tensión y corriente en corriente alterna se basan en los efectos Josephson para tensión y Hall cuántico para resistencia. A partir de ellos se calibran los patrones de impedancia (condensadores, inductancias y resistencia en CA). Finalmente, la calibración clásica de medidores de impedancia LCR se realiza mediante un método basado en artefactos que requiere el uso de los patrones de impedancia previamente calibrados con baja incertidumbre. Este tipo de calibración tiene una serie de inconvenientes y el más importante de ellos es que sólo se realiza una calibración parcial de los medidores LCR, por lo tanto no se garantiza la trazabilidad en todo el rango de medida, al calibrarse únicamente con patrones de valores nominales fijos. Además, la calibración se realiza sólo en puntos de los ejes real e imaginario fijos (-90° , 0° y $+90^\circ$) y no en todo el plano complejo, donde el comportamiento del medidor LCR no está asegurado. Existen además otras limitaciones, como son la necesidad de disponer de un gran número de patrones de impedancia calibrados y el tiempo consumido, al no tratarse de procedimientos automatizados debido a que requieren la manipulación física de los patrones.

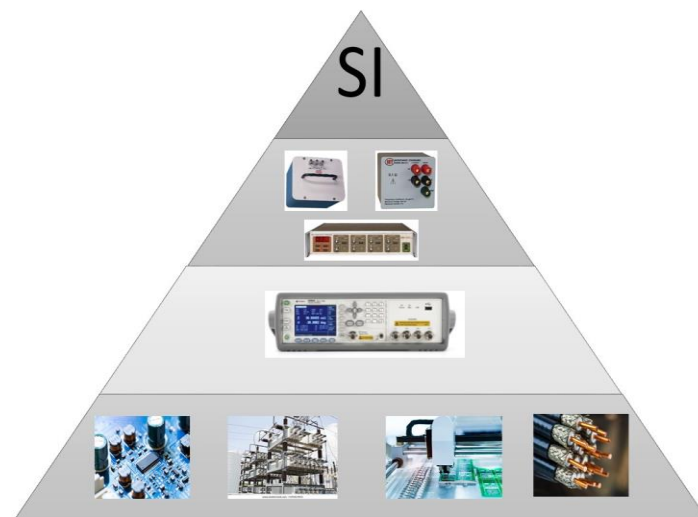


Figura 1. Calibración clásica de medidores de impedancia LCR

En la medida de impedancia a baja frecuencia la conexión más precisa es la de cuatro pares de terminales [2], siendo esta la que se emplea en la calibración de los medidores LCR.

Como se observa en la Fig. 2, la impedancia Z se define como el potencial medido entre el interior y el exterior del conector 2, dividido por la corriente que sale del conector 3, siendo cero el potencial entre el interior y el exterior del conector 4. Para que se cumpla esta definición no debe pasar corriente por los conectores 2 y 4.

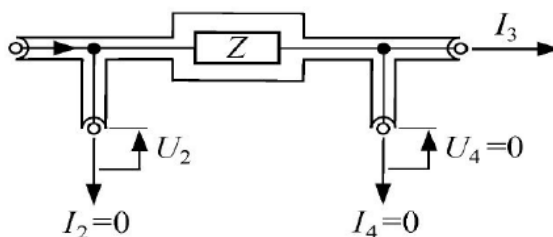


Figura 2. Conexión de una impedancia a cuatro pares de terminales.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Dentro del programa europeo EMPIR se financió en el campo de la impedancia el proyecto AIMQuTE [3], coordinado por el Instituto Nacional de Metrología alemán (PTB) y en el que participó el Área de Electricidad y Energía del Centro Español de Metrología. El objetivo de este proyecto era extender las escalas de impedancia a valores intermedios dentro del rango de 10Ω a $1 \text{ M}\Omega$, para todos los valores de ángulo de fase y hacia valores demandados por la nanotecnología (capacidades inferiores a fF), junto con el desarrollo de los patrones correspondientes.

Con el objetivo de mejorar y automatizar el procedimiento de calibración de medidores de impedancia (LCR) se desarrolló en el proyecto un simulador de impedancia. Este simulador permite la calibración en el rango de frecuencia de 100 Hz a 20 kHz, cubriendo todo el rango de impedancias de 1Ω a $10 \text{ M}\Omega$, sin restringirse a valores fijos, y posibilita las medidas en cualquier punto del plano complejo.

La calibración clásica de estos medidores usando el método de los artefactos consistía en la sucesiva conexión de las distintas impedancias a medir en los cuatros pares de terminales del medidor. La corriente suministrada por un generador interno en el terminal de alta corriente (H_C), fluye a través de la impedancia y se mide de forma precisa en el terminal de baja corriente (L_C). La caída de tensión V generada por esta corriente I se mide en el terminal de alta tensión (H_P). Cuando el LCR está en equilibrio, la tensión medida en el terminal de baja tensión (L_P) es cero, de acuerdo con la definición de cuatro pares de terminales, y se determina la impedancia Z :

$$Z = \frac{V}{I} \quad (4)$$

El principio básico de funcionamiento del simulador de impedancias [4] (Fig. 3) se basa en el cálculo de la impedancia por el LCR a partir de la corriente y la tensión medidas en sus terminales L_C y H_P , respectivamente. La corriente y la tensión medidas se generan independientemente mediante dos fuentes de tensión externas (S_1 y S_2), variando las amplitudes y el desfase para cubrir todo el plano complejo. La fuente S_1 suministra la tensión V directamente al terminal de alta tensión H_P y la segunda fuente S_2 proporcional la corriente I al terminal de baja corriente L_C . En estas condiciones, el medidor LCR calcula la impedancia:

$$Z_{LCR} = \frac{V}{I} \quad (5)$$

Por otra parte, se usa un digitalizador V_{MUX} para la medida precisa de la tensión V_V en el terminal H_P y la caída de tensión V_i generada por el paso de la corriente I a través de la

impedancia Z_{CB} antes de entrar en el terminal L_C . El valor de la impedancia de referencia en lo terminales de entrada del LCR es:

$$Z_{REF} = \frac{V_V}{V_i} \cdot Z_{CB} \quad (6)$$

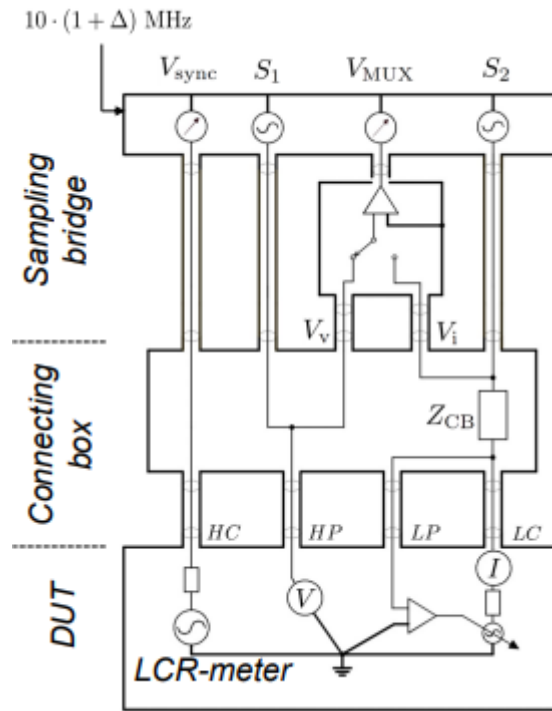


Figura 3. Principio de funcionamiento del simulador de impedancias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la ecuación (6), la trazabilidad en la medida de la impedancia de referencia Z_{REF} se asegura con la calibración de la impedancia de la Z_{CB} y con la medida precisa de la relación de tensión V_V / V_i .

Comparando la lectura del medidor LCR, Z_{LCR} , y la impedancia de referencia, Z_{REF} , se obtiene el error de ganancia del medidor LCR en $\mu\Omega/\Omega$:

$$\Delta G = \left| \frac{Z_{LCR}}{Z_{REF}} \right| - 1 \quad (7)$$

y el error de fase en grados:

$$\Delta\varphi = \varphi_{LCR} - \varphi_{REF} \quad (8)$$

La incertidumbre en la calibración de medidores de impedancia LCR empleando un simulador está limitada por las características (resolución, ruido, estabilidad, etc) del propio LCR a calibrar. Las especificaciones de los mejores LCR están en el orden de partes en 10^{-4} . La componente de incertidumbre debida al simulador depende de la impedancia de referencia Z_{CB} del orden de 10^{-6} y de la incertidumbre debida a la frecuencia que es despreciable.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un simulador de impedancia, desarrollado dentro del proyecto europeo AIM QuTE, que mejora y automatiza el procedimiento de calibración de medidores de impedancia LCR, que hasta el momento se realizaba mediante un método basado en artefactos que requería el uso de los patrones de impedancia previamente calibrados con baja incertidumbre. Este tipo de calibración clásica tenía una serie de inconvenientes y el más importante de ellos era la realización de una calibración parcial del medidor, al calibrarse únicamente con patrones de valores nominales fijos y sólo en puntos de los ejes real e imaginario en lugar de cubrir todo el plano complejo, donde el comportamiento del medidor LCR no estaba garantizado.

Este simulador permite la calibración en el rango de frecuencia de 100 Hz a 20 kHz, cubriendo todo el rango de impedancias de 1Ω a $10 M\Omega$, sin restringirse a valores fijos, y posibilita las medidas en cualquier punto del plano complejo. Otra ventaja adicional de este tipo de calibración es la automatización del proceso de la calibración al no ser necesario el uso de un gran número de patrones de impedancia calibrados.

5. REFERENCIAS

- [1] L. Callegaro, "Traceable Measurements of Electrical Impedance", IEEE Instr. and Meas. Magazine, 18, pp. 42-46, 2015.
- [2] S. Awan, B. Kibble, J. Schurr, "Coaxial Electrical Circuits for Interference-Free Measurements", IET Electrical Measurement Series 13, 2011.
- [3] SIB53 AIM QuTE Final Publishable JRP Report. <https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/automated-impedance-metrology-extending-the-quantum-toolbox-for-electricity/>
- [4] F. Overney y B. Jeanneret, "Calibration of a LCR-Meter at Arbitrary Phase Angles using a Fully Automated Impedance Simulator", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 66 (6), 2017.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado por el proyecto de investigación SIB53 AIM QuTE dentro del programa EMRP. El programa EMRP está cofinanciado por los países participantes de EURAMET y la Unión Europea.