

Puente para la medición de resistores patrones en corriente alterna

Iuzzolino, R⁽¹⁾; Laíz, H⁽¹⁾; García, R⁽¹⁾

⁽¹⁾INTI-Física y Metrología

Introducción

En el marco de este trabajo se desarrolló un puente para la comparación de resistores en corriente alterna, en el rango de valores comprendido entre 10 Ω y 10 kΩ, y en un rango de frecuencias comprendido entre 40 Hz y 2000 Hz, con tensiones máximas de 5 V a una frecuencia de 50 Hz y de 200 V a una frecuencia de 2000 Hz.

Descripción del puente

Este puente tiene un brazo divisor de tensión compuesto por un divisor de tensión binario programable de 24 bits de resolución. Para el desarrollo de este divisor de tensión se eligió una solución que propone un divisor de tensión mixto, compuesto por un divisor de tensión inductivo de doble núcleo que conforma los 12 bits más significativos (MSB) y un divisor de tensión resistivo que conforma los 12 bits menos significativos (LSB), utilizándose para este último propósito un convertor Digital/Analógico (DAC) de 12 bits de resolución^[1]. El divisor de tensión posee una interfaz GPIB/IEEE-488 para su control y programación por una computadora. También, se desarrolló el sistema de detección, el cual consiste en un Lock-In que permite descomponer la señal error presente entre los brazos del puente, en una componente en fase y otra componente en cuadratura respecto a la tensión aplicada al puente. Este sistema Lock-In está compuesto por un amplificador y un software de procesamiento de señales. La señal de salida del amplificador es digitalizada y procesada por un sistema de adquisición instalado en una computadora personal. A partir del conocimiento de estas componentes se obtiene la resistencia efectiva y la constante de tiempo del resistor bajo calibración.

Definición de la magnitud de medición

Un modelo circuital completo de parámetros concentrados para un resistor real en c.a. (corriente alterna) se muestra en la Figura 2, compuesto por una resistencia (R), una inductancia (L) en serie y una capacidad (C) en paralelo, también se incluyen las capacidades parásitas C₁ y C₂. De éste se puede desprender la expresión para la impedancia Z, ver ec. (1).

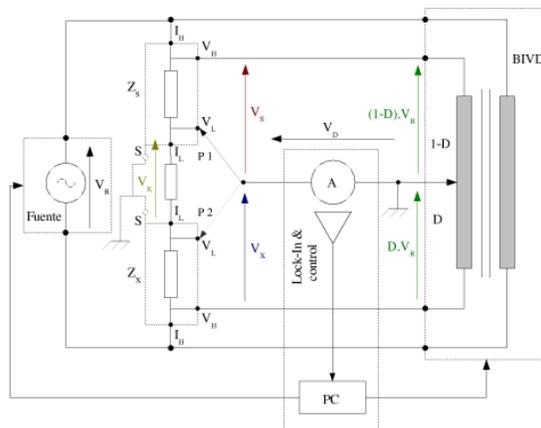


Fig. 1: Esquema circuital del sistema puente

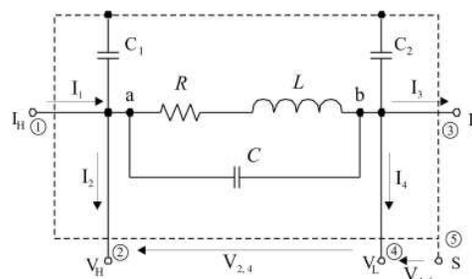


Fig. 2: Modelo circuital completo para un resistor en c.a. Se observan los terminales de conexión de corriente I_H, I_L y de tensión V_H, V_L. El terminal de blindaje S.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R + j\omega L} + j\omega C} \quad (1)$$

Realizando operaciones algebraicas y simplificaciones válidas sobre la ec. (1) se llega la siguiente expresión simplificada para la impedancia Z, ver ec. (1.1),

$$Z = \frac{R}{1 - \omega^2(2LC - R^2C^2)} \left[1 + j\omega \left(\frac{L}{R} - RC \right) \right] \quad (1.1)$$

donde se puede definir la resistencia efectiva, R_{AC} ,

$$R_{AC} = \frac{R}{1 - \omega^2(2LC - R^2C^2)} \quad (1.2)$$

y la constante de tiempo, τ ,

$$\tau = \frac{L}{R} - RC \quad (1.3)$$

quedando claramente definida la impedancia Z , según la ecuación,

$$Z = R_{AC}(1 + j\omega\tau) \quad (1.4)$$

La medición de la impedancia Z (ver Fig. 2) debe de satisfacer las condiciones expresadas en la ecuación (1.5)^[2]

$$Z = \frac{V_{2,4}}{I_3} \text{ con } V_{4,5} = 0 \text{ e } I_2 = I_4 = 0 \quad (1.5)$$

Metodo de medición

La calibración de resistores consiste en su comparación contra un patrón; a su vez este patrón fue calibrado por comparación con un resistor calculable, para asegurar la cadena de trazabilidad^[2].

En la figura 1 se muestra el diagrama de conexiones en el sistema puente para la comparación de resistores a cuatro terminales. Los terminales de corriente de los resistores son conectados al bobinado de magnetización y los terminales de tensión de los resistores son conectados al bobinado de exactitud. Esta conexión debe de ser realizada de esta manera porque al utilizar un divisor inductivo de doble núcleo, toda la corriente circula por el bobinado de magnetización y por los bobinados de exactitud la corriente que circula es prácticamente cero. La llave S_1 es utilizada para medir la tensión V_S y V_X , esta es conectada alternadamente sobre uno de los terminales de tensión del resistor patrón, $R_S(Z_S)$, y sobre uno de los terminales de tensión del resistor incógnita, $R_X(Z_X)$. De esta manera se toman dos mediciones de tensión, V_S y V_X .

En la figura 1 se puede ver la convención asignada para representar las tensiones en el puente. La calibración de una resistencia incógnita, $Z_X(R_X)$, con respecto a una resistencia patrón, $Z_S(R_S)$, se realiza mediante la relación que existe entre ambas:

$$\frac{Z_X}{Z_S} = \frac{R_{ACX}(1 + j\omega\tau_X)}{R_{ACS}(1 + j\omega\tau_S)} = \frac{V_X}{V_S} \quad (2.1)$$

Para eliminar errores en la comparación se realiza la medición de la relación R_X/R_S , la que se denomina *relación normal* (r_{NORMAL}), y luego la relación inversa R_S/R_X , la que se denomina *relación inversa* ($r_{INVERSA}$), invirtiendo las conexiones de los resistores en el puente, (ver Fig. 1). De esta forma se obtienen dos pares de valores para R_{ACX} y para τ_X . El resultado final resulta de tomar el promedio.

Resultados

Se realizó una comparación de resistores de valores nominales 30 Ω y 60 Ω , fabricados en INTI.

Los resistores fueron medidos en el rango de frecuencias entre 75 Hz a 1000 Hz. Los resultados de la relación se muestran en la Tabla I. La incertidumbre u_c informada es la combinación entre la incertidumbre en la relación de resistencias con la incertidumbre aleatoria de la medición^[3].

Tabla I. Resultados de la comparación de los resistores de 30 Ω y 60 Ω . Se muestra la parte real de relación r .

f (Hz)	$r_1=30/60$	$1/r_2$ $r_2=60/30$	relación promedio	σ (10^{-6})	u_c (10^{-6})
75	0.50003848	0.50003446	0.50003647	2.84	3.01
400	0.50003458	0.50003782	0.50003620	2.30	2.50
1000	0.50003900	0.50003295	0.50003597	4.28	4.39

En base a estos resultados se puede calcular el valor de R_{AC} y de τ para el resistor de valor nominal 30 Ω , tomando como patrón al resistor de valor nominal de 60 Ω , según su calibración realizada en PTB, $R=(60.00953 \pm 0.0006)$ Ω y $t=(5.2 \pm 1.5)$ ns. La Tabla II muestra los valores para $f=400$ Hz.

Tabla II. Valores finales para el resistor de 30 Ω a $f=400$ Hz, tomando como patrón al resistore de 60 Ω .

Resultados resistor de 30 Ω a $f=400$ Hz			
R^{NOR} (Ω)	30.00684	τ^{NOR} (ns)	6.07
R^{INV} (Ω)	30.00703	τ^{INV} (ns)	3.52
R_{AC} (Ω)	30.00694	τ (ns)	4.80
σ (m Ω)	0.138	σ (ns)	1.8

Conclusiones

Se desarrolló un sistema puente de corriente alterna para ser utilizado en la comparación de resistores en el rango de frecuencias: 40 Hz a 2000 Hz, con una incertidumbre sobre la parte real de la relación de resistencias igual a $\pm 1.7 \times 10^{-6}$ y una incertidumbre sobre la parte imaginaria igual a $\pm 17 \mu\text{rad}$ (@ $f=400\text{Hz}$) (con $k=1$). Extendiendo estos resultados a la determinación de la resistencia efectiva, R_{AC} y la constante de tiempo, τ , da una incertidumbre combinada igual a $\pm 4.7 \times 10^{-6}$ y una incertidumbre de ± 7.7 ns, respectivamente ($k=1$).

Referencias

[1] Günther Ramm, Reinhold Vollmert, and Hans Bachmair, "Microprocessor - Controlled Binary Inductive Voltage Dividers", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-34, No. 2, pp 335-337, June 1985.

[2] Günther Ramm, "Calibración de Resistencias de Medición de Corriente Alterna", PTB-E-41s, Braunschweig, diciembre 1992.

[3] "Guía para la expresión de incertidumbres de medición", traducción INTI-CEFIS del documento: "Guide to expression of uncertainty in measurements (BIPM, IEC; IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993)", 2^{da} edición, 2000.

Para mayor información contactarse con:

nombre del autor de contacto – ricardo.iuzzolino@inti.gov.ar