

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PATRÓN DE CALIBRACIÓN PARA EQUIPOS INYECTORES DE CORRIENTES ALTERNAS ALTAS

Carlos Rosi

Instituto de Ingeniería; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Innovación e Industrias Intermedias
Instituto de Ingeniería, Tecnópolis USB, Urbanización Monte Elena II, Baruta, Caracas, Venezuela
Teléfono: +58-212-903.4788
Fax: +58-212-903.4782
crosi@fii.org

Resumen: El funcionamiento de los sistemas de protección en las subestaciones eléctricas depende del buen desempeño de los mismos. Para verificar su funcionamiento se utilizan inyectores primarios de corriente. Siguiendo las tendencias mundiales de implementación de sistemas de calidad ISO 9000, las empresas venezolanas que realizan este tipo de pruebas están calibrando sus equipos para garantizar la trazabilidad de las mediciones, pero existe el problema de que en el país no hay patrones apropiados ("Shunts" de corriente alterna de 3 000 A), lo cual obliga a las empresas a calibrar en el exterior. Una aproximación diferente al problema se expone en este trabajo, el cual permite la calibración de inyectores de corriente alterna de 3 000 A o más mediante el uso de bobinas Rogowski, permitiendo la calibración en el país con el uso de equipos ya existentes en ENINSEL (bobinas Rogowski, multímetro digital de alto desempeño, bobina normal fabricada por la Unidad de Ensayos e Inspecciones Eléctricas de ENINSEL específicamente para esta aplicación), con el consecuente ahorro de divisas y tiempo por parte de la empresa al calibrar sus inyectores. Las incertidumbres conseguidas con este enfoque fueron del 1% de la magnitud, lo cual permite la calibración de la mayoría de los inyectores comerciales.

1. INTRODUCCIÓN

Las subestaciones eléctricas son un pilar fundamental en el suministro de energía en cualquier país, y es considerado como servicio imprescindible y de seguridad nacional. El buen funcionamiento de las mismas se verifica (y si es necesario se ajusta) con equipos que generan altas corrientes AC para poner a punto los interruptores que conforman el sistema de protección de dichas subestaciones. En el marco de las tendencias internacionales, las empresas que realizan este tipo de servicios deben cumplir con las normas ISO 9000 para asegurar la calidad del servicio prestado; esto implica directamente la trazabilidad de los equipos usados apuntando a la calibración de los mismos.

Los equipos que inyectan estas corrientes tiene rangos de funcionamiento de hasta 5 000 A @ 60 Hz y presentan incertidumbres del orden del 3% del rango utilizado; para efectuar dicha calibración es necesario tener un patrón de corriente AC con una incertidumbre de al menos 1%, de modo que se cumpla con las prácticas aceptadas a nivel internacional.

El método más usado en la medición de altas corrientes involucra el uso de "Shunts", elementos

cuya resistencia eléctrica es bien conocida, que se intercalan con el equipo generador para medir la caída de potencial en sus extremos y calcular la corriente que circula por ley de Ohm. Estos elementos para AC son particularmente más costosos que los de DC porque su construcción es totalmente diferente: deben tener un diseño no inductivo que asegure una impedancia 100% resistiva.

Debido a esto, la mayoría de las compañías nacionales se encuentran con el dilema de tener que enviar sus equipos al exterior porque nadie en Venezuela posee la capacidad de calibrar este tipo de inyectores. Otra manera de medir altas corrientes es mediante pinzas amperimétricas o bobinas de inducción (que se basan en la inducción de Faraday), pero el problema es que la incertidumbre de medición es demasiado grande (3%) para servir de patrón apropiado. Adicional a esto, las bobinas con núcleo magnético tienden a saturarse limitando el ancho de banda de respuesta y afectando la linealidad de la misma.

Sin embargo, es posible caracterizar una bobina para disminuir la incertidumbre y usarla como patrón de medición.

Entre las bobinas normales, la de tipo Rogowski¹, que consiste de un bobinado helicoidal de cable alrededor de un núcleo toroidal de aire, presenta características interesantes en comparación con las normales:

- Al poseer un núcleo de aire, éste no se magnetiza y por lo tanto no se pierde energía en ello, lo cual se traduce en una gran linealidad y precisión incluso para altas corrientes (~ 10 000 A).
- Al no tener material magnético, se evita la saturación de la bobina y el desfase de las señales, que impedirían el funcionamiento correcto de la misma para grandes corrientes.
- El estar hecha de manera tal que el extremo final del cable se regresa sobre sí mismo, los dos extremos de la bobina están en un mismo lado. Esto permite hacer bobinas abiertas y flexibles que puede ser fácilmente colocadas alrededor de un conductor recto para hacer la medición sin necesidad de desconectar el sistema.
- Su poca inductancia implica buena respuesta a cambios rápidos de la corriente, lo cual le da un ancho de banda considerablemente mayor al de las bobinas normales.
- Una bobina Rogowski bien hecha, con espiras de sección transversal idéntica y distribuidas uniformemente, es altamente inmune a interferencia electromagnética.

El único inconveniente importante con respecto a las otras bobinas es que el voltaje producido no es proporcional a la corriente medida sino a su

¹ Un dispositivo similar a la bobina Rogowski fue descrito en "On a magnetic potentiometer", *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. XXIV, no. 5th Series, pp. 94–96, Jul-Dec 1887, por A. P. Chattock de la Universidad de Bristol, que la usó para medir campo magnético en vez de corriente. Una descripción completa fue dada por W. Rogowski y W. Steinhaus en "Die Messung der magnetischen Spannung", *Archiv für Elektrotechnik*, 1912, 1, Pt.4, pp.141-150.

derivada temporal (rata de cambio a lo largo del tiempo).

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La bobina Rogowski funciona como sensor del campo magnético producido por la corriente que circula por el conductor, estando ambos relacionados por la ley de Ampère, la cual describe que la integral del campo magnético a lo largo de un circuito cerrado es igual a la corriente neta que atraviesa este circuito, independientemente de la forma que toma el circuito. La expresión matemática es la siguiente [1]:

$$\oint H \cdot \cos(\alpha) dl = I \quad (1)$$

donde dl es un elemento de longitud del circuito, H es el campo y α es el ángulo entre la dirección del campo y el dl . Teniendo la bobina n vueltas por unidad de longitud y una sección A , el flujo creado viene dado por:

$$\Phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \int H \cdot \cos(\alpha) dl = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot I \quad (2)$$

Por tanto, utilizando (1) y (2) y conociendo que la tensión de salida es igual a la variación del flujo respecto al tiempo, obtenemos:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} = - \mu_0 \cdot n \cdot A \frac{dI}{dt} = - M \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

siendo M la inductancia mutua entre el cable conductor y la bobina. Esta expresión basada en principios físicos básicos, muestra que obtenemos una tensión de salida proporcional a la variación de la corriente con respecto al tiempo que pasa por el cable conductor.

El problema principal de este método, se debe a que la salida no es exactamente proporcional a la corriente de entrada, tal y como pasa en los transformadores de corriente convencionales (bobinas), sino que es proporcional a la derivada con respecto al tiempo de la misma. Por tanto, a la salida de la bobina de Rogowski debe colocarse un integrador, de tal forma que obtengamos una tensión de salida proporcional a la corriente que circula por el cable conductor. Esto se resuelve de manera simple colocando un circuito RC en serie

con la bobina, el cual se comporta como un circuito integrador dependiendo de la frecuencia de la corriente y de los valores de R y C .

Para que una bobina Rogowski funcione como patrón de medición, es necesario calibrarla previamente. Esto implicó el diseño de un sistema especial para generar altas corrientes.

Como se necesita que la incertidumbre sea de 1%, el sistema debe generar corrientes de $\approx 5\ 000\ \text{A}$ con incertidumbre total no superior al 0,33%. Dicho sistema consta de una bobina de inducción rígida de 587 vueltas², que fue caracterizada en un puente LCR³, una fuente de corriente regulable, un multímetro digital de alta precisión (8½ dígitos) para medir la caída de tensión sobre la bobina rígida y otro para medir la salida del integrador. El montaje experimental se muestra en la figura 1.

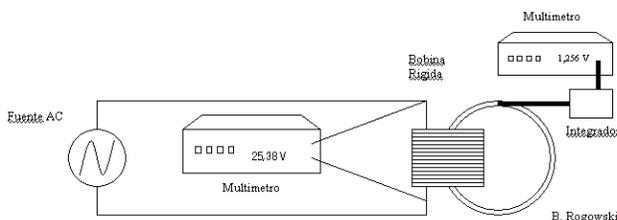


Fig. 1: Esquema del montaje

La bobina rígida se caracterizó durante un lapso de 2 horas con el puente LCR antes de hacer la calibración. El proceso de calibración constó de tres series de diez medidas cada una (a intervalos de una hora) para comprobar la repetibilidad del montaje. Luego se varió el valor de la corriente inyectada a la bobina rígida aumentando el voltaje de la fuente, haciéndola pasar por las 587 vueltas y simulando, para la bobina Rogowski, corrientes de hasta 5 000 A. Se calcularon los valores promedios, desviaciones estándar para cada serie de medidas y con esos datos se realizó la calibración.

Cada vez que se implementa un sistema nuevo de medición se debe comprobar, por lo menos con otro método alternativo, que se obtienen resultados coherentes y no existe ningún error grave en el planteamiento. Esto se llevó a cabo usando un calibrador Fluke 5500A, el cual puede generar hasta 11 A, y su bobina auxiliar de 50 vueltas (máximo

550 A). Al colocar la bobina Rogowski rodeando 2 veces la bobina auxiliar se logra el efecto de duplicar el campo magnético sentido por la bobina. Esto trae como consecuencia que mida un campo equivalente al doble del generado por la corriente que circula por la bobina auxiliar, con una incertidumbre conocida.

3. RESULTADOS

Los valores obtenidos para L y R de la bobina rígida fueron:

$$L = (34,362 \pm 0,011) \text{ mH}$$

$$R = (6,517\ 00 \pm 0,000\ 70) \ \Omega$$

a una frecuencia de 60 Hz. Con estos valores se calculó de manera indirecta el valor de la corriente en la bobina rígida con la lectura del voltaje sobre la misma, obteniéndose la siguiente tabla de valores para la corriente patrón y la medida por la bobina Rogowski:

I bobina Rogowski [A]	I patrón [A]	Error porcentual [% lectura]
1 010,02	1 008,82	+ 0,118
2 000,69	2 003,71	- 0,150
3 013,01	3 016,92	- 0,128
3 944,26	3 945,42	- 0,029
4 731,89	4 732,53	- 0,014

Tabla 1: Valores del patrón de corriente, medición de la bobina Rogowski y error porcentual.

Tal y como se observa en la tabla anterior, la desviación es inferior al 0,16% en todos los puntos para el sistema desarrollado.

Al evaluar el valor de $(1\ 000,0 \pm 2,5)$ A generado por el calibrador Fluke y la bobina de 50 vueltas (método alternativo, incertidumbre 0,25% lectura) se obtuvo una lectura de 999,46 A con la bobina Rogowski, que corresponde a una diferencia del 0,054%.

4. DISCUSIÓN

Esto nos permite afirmar que el método propuesto cumple con los requerimientos necesarios para calibrar bobinas Rogowski con una incertidumbre del 0,33% de la lectura para corrientes del orden de 5 000 A. Al tener la bobina Rogowski calibrada, ésta

² Construida en ENINSEL (Unidad de Ensayos y mediciones) específicamente para este proyecto.

³ Puente que permite medir las componentes inductivas, capacitivas y resistivas de un elemento eléctrico.

sirve de patrón para la medición de corriente en inyectores industriales con especificaciones que usualmente son del 3% del rango usado.

5. CONCLUSIONES

El uso de bobinas Rogowski en la calibración de equipos inyectores de altas corrientes industriales se presenta como una opción atractiva por varias razones:

- El núcleo de aire no presenta histéresis, no satura y es lineal. Además la inductancia mutua no depende ni de la corriente ni de la frecuencia de la señal a medir.
- Dispone de un ancho de banda elevado. La única limitación en frecuencia viene determinada por la frecuencia de resonancia de la bobina, la cual depende del diseño.
- La misma bobina sirve para medir un gran rango de corrientes (desde los miliamperios al millón de amperios).
- Dispone de un bajo consumo de potencia.
- La variación de la salida con la temperatura es muy baja.
- Evita el uso de "Shunts" de alta corriente que son engorrosos de usar tanto por sus dimensiones físicas como por el calentamiento de los mismos.
- Hace posible el realizar calibraciones especiales en el país, con el consecuente ahorro de divisas y tiempo para las empresas nacionales.

Permite obtener incluso incertidumbres inferiores al 0,1% mediante el uso de bobinas Rogowski cerradas no flexibles para aplicaciones de muy alta

exactitud en locaciones permanentes.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar las gracias a los ingenieros Gilberto Graterol y Luis Rodríguez Q., los cuales fueron un apoyo fundamental en las discusiones preliminares de diseño, construcción e implementación del sistema completo. Sin ellos este trabajo no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

Las referencias deben numerarse de manera secuencial a medida que aparezcan en el texto. Al final deben listarse entre corchetes ("paréntesis cuadrados"). Favor de seguir los siguientes ejemplos:

- [1] Halliday & Resnick., Física, parte 2. Editorial Continental, S.A. de C.V., DF, México, 1977.