

Bobina Rogowski como sensor de corriente para monitoreo de transformadores de distribución.

Sergio A. Campos Montiel⁽¹⁾, René D. Carranza López Padilla⁽¹⁾, Adrián González Parada⁽²⁾

¹⁾ Centro Nacional de Metrología, CENAM.

km 4,5 Carretera a los Cués, Municipio El Marqués, 76246 Querétaro, México

acampos@cenam.mx, rcarranz@cenam.mx

²⁾ Dpto. de Ingeniería Eléctrica, DICIS Universidad de Guanajuato.

gonzaleza@salamanca.ugto.mx

Resumen: El incremento en las exigencias de calidad y confiabilidad de los sistemas de transmisión y distribución de la energía eléctrica, han impulsado el desarrollo de dispositivos y sensores para el monitoreo de diferentes variables presentes en las redes de distribución. Esta supervisión se ha enfocado en los generadores, transformadores de potencia, cables y transformadores de distribución de energía eléctrica, con el fin de asegurar su confiabilidad y reducir las horas por año de interrupción del suministro eléctrico a los usuarios. Este trabajo muestra el estudio, desarrollo y caracterización de un transductor del tipo no intrusivo para medir y monitorear la corriente eléctrica en los devanados primario y secundario de los transformadores instalados en redes de distribución.

1. INTRODUCCIÓN.

La confiabilidad y calidad en el suministro de la energía eléctrica es una prioridad a nivel nacional e internacional. Las fallas más frecuentes en el sistema de suministro eléctrico ocurren en los transformadores de distribución, ocasionando costos muy altos, y muchas veces se requiere el reemplazo del transformador en su totalidad.

Existen diversas técnicas para diagnosticar fallas potenciales en los transformadores de distribución. Por lo general, estas pruebas requieren que los equipos estén desenergizados, lo cual resulta en costos adicionales:

- 1) desinstalación e instalación del transformador de distribución
- 2) suspensión del servicio de energía eléctrica
- 3) costos de transporte de personal técnico hasta los transformadores

Las revisiones predictivas y preventivas continuas pueden ayudar a resolver estos problemas y agregan calidad y confiabilidad en el servicio de distribución de energía eléctrica.

Las variables principales a supervisar dentro de un sistema de distribución de energía eléctrica son: variaciones de la tensión de operación, variaciones en el consumo de la energía eléctrica y posibles interferencias causadas por descargas atmosféricas y sobre cargas del sistema.

Estos fenómenos afectan la vida útil de los elementos de potencia en los sistemas de distribución, particularmente, los transformadores. En la figura 1 se muestra el esquema equivalente de una red distribución de energía eléctrica.

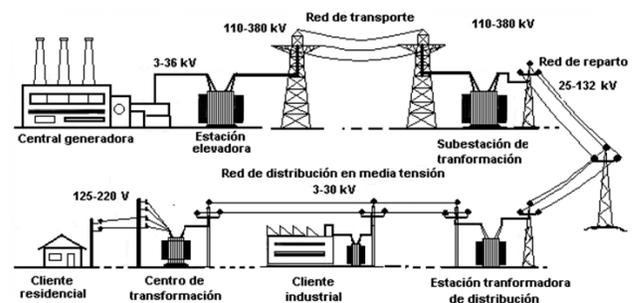


Figura 1. Esquema equivalente de una red distribución de energía eléctrica.

Existen diversos sensores para el monitoreo de la corriente, que operan con principios de medición distintos. La tabla 1 muestra una comparación de métodos de medición de corriente que son empleados en la vigilancia de transformadores de distribución, así como algunos elementos que permiten distinguir los beneficios principales de los métodos comparados.

Técnica de medición	Derivador de corriente	Transformador de corriente	Sensor Efecto Hall	Bobina Rogowski
Costo	Medio	Alto	Alto	Bajo
Linealidad	Excelente	Bueno	Malo	Excelente
Intervalo medición	Malo	Bueno	Bueno	Excelente
Consumo potencia	Alto	Bajo	Medio	Bajo
Saturación cc	No	Si	Si	No
Coefficiente térmico	Medio	Bajo	Alto	Bajo
Offset cc	Si	No	Si	No
Medición intrusiva	Si	Si	Si	No
Saturación histéresis	No	Si	Si	No

Tabla 1. Características principales de las diferentes tecnologías de medición de corriente en sistemas de distribución.

En este trabajo se muestra el estudio, desarrollo y caracterización de un transductor de corriente del tipo inductivo basado en una bobina Rogowski. Debido a las características de esta bobina, que es un dispositivo basado en el principio de inducción de tensión eléctrica asociada con el paso de una corriente, este transductor se ubica como un instrumento del tipo no intrusivo para la medición y monitoreo de la corriente eléctrica en las terminales de los devanados primario y secundario de un transformador.

2. DESARROLLO.

La bobina Rogowski es una bobina de inducción, que se construye sobre un material diamagnético. Un transductor de corriente basado en una bobina Rogowski tiene características que le otorgan ventajas sobre otros transductores de corriente. Algunas estas características son [11]:

- 1) Alta linealidad: debido a la ausencia de materiales ferromagnéticos en su núcleo.
- 2) Amplio ancho de banda: de acuerdo a su diseño puede medir corrientes desde algunos Hz hasta cientos de kHz.
- 3) Sistema de medición no intrusivo: no introduce carga en VA al sistema donde circula la corriente que se desea medir.
- 4) Aislación eléctrica: provee de aislación galvánica respecto del circuito eléctrico en donde circula la corriente que se desea medir.

- 5) Fácil instalación: se trata de una bobina flexible, basta con rodear al conductor por el cual circula la corriente que se desea medir.
- 6) Tiempo de respuesta: de acuerdo a su diseño puede obtenerse un tiempo de respuesta del orden de millonésimas de segundo.
- 7) Tolerancia a sobre corrientes: la bobina Rogowski y el integrador no sufren daño alguno cuando se someten a un nivel de corriente más alto del que fueron diseñados.
- 8) Problemas de componentes de frecuencia cero, saturación del núcleo e histéresis: estos fenómenos no están presentes debido a que el núcleo de la bobina es de aire.
- 9) Bajo coeficiente térmico: el alambre de cobre con que se construye la bobina Rogowski, lo cual resulta en que no hay disipación de energía en la bobina, situación que afectaría su tiempo de respuesta.
- 10) Bajo consumo de potencia: el circuito de integración activa es alimentado por baterías.

2.1. Principio de operación.

El principio de operación de una bobina Rogowski para medición de corriente se conoce desde 1912. Si la bobina Rogowski forma un circuito cerrado en torno a un conductor eléctrico, cuya corriente a ser medida es I , se induce una tensión eléctrica E en los terminales de la bobina; esta tensión es teóricamente independiente de la forma y posición del conductor de corriente dentro de la ventana de la bobina [5, 6, 8, 9, 10]. La ecuación 1 muestra la tensión inducida en las terminales de la bobina con respecto de la corriente que atraviesa la ventana de la bobina.

$$E = H \cdot \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

donde H , expresada en Vs/A, es la intensidad de campo magnético que se desarrolla en el núcleo de aire de la bobina, causado por la variación en el tiempo de la corriente I que atraviesa la ventana de la bobina. Esta fuerza representa la sensibilidad de la bobina según se muestra en la siguiente ecuación [5, 6, 8, 9, 10].

$$H = \mu_0 \cdot N \cdot A \quad (2)$$

donde:

μ_0 es la permeabilidad magnética del núcleo.

N es el número de vueltas

A es el área de una vuelta [m²]

La tensión inducida E en los extremos de la bobina, corresponde a la variación en el tiempo del flujo magnético que cruza el área transversal de esta. La integral de la tensión E en el tiempo, recupera la información de la corriente medida. Con una constante de tiempo de integración T_i , la tensión de salida queda expresada en la ecuación 3 [5, 6, 8, 9, 10].

$$V = R_{sh} \cdot I \tag{3}$$

donde:

$R_{sh} = H/T_i$ es la sensibilidad del transductor de corriente (V/A).

En la figura 2 se ilustra el principio de medición con un transductor de corriente basado en una bobina Rogowski.

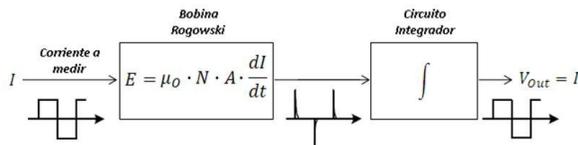


Figura 2. Principio medición de un transductor de corriente basado en una bobina Rogowski.

2.2. Características geométricas y eléctricas.

Para describir el funcionamiento de una bobina Rogowski es necesario calcular los parámetros que describen su comportamiento. Estos cálculos se basan en la hipótesis de que la resistencia (R), la Inductancia propia e inductancia mutua de la bobina (L, M) y la capacitancia (C) se distribuyen homogéneamente a lo largo de la longitud de la bobina como se muestra en la figura 3.

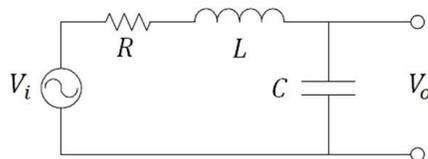


Figura 3. Parámetros eléctricos de una bobina Rogowski.

Los parámetros eléctricos de la bobina Rogowski pueden calcularse a partir de sus características geométricas y de los materiales empleados para su construcción [4]. Los aspectos más relevantes de la geometría de la bobina y de los materiales son:

- l_1 : longitud del cable de cobre
- l_2 : longitud del núcleo
- d_1 : diámetro del cable de cobre
- d_2 : diámetro del núcleo
- S_2 : área transversal del núcleo
- N : número de vueltas
- ρ : resistividad del cobre
- μ_0 : permeabilidad magnética del núcleo
- ϵ_0 : permitividad eléctrica del núcleo

La figura 4 muestra las características geométricas de una bobina Rogowski para el cálculo de sus parámetros eléctricos.

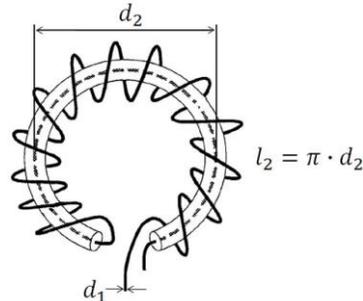


Figura 4. Características geométricas de la bobina Rogowski.

El ancho de banda (AB) de la bobina puede calcularse a partir de la ecuación 4.

$$AB = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{4}$$

La tabla 2 muestra las características geométricas, los parámetros eléctricos y el ancho de banda calculados para una bobina Rogowski construida de una capa.

	d_1	1,43E-04	[m]
	d_2	1,10E-02	[m]
	l_1	87,26	[m]
	l_2	0,36	[m]
	S_2	9,50E-03	[m ²]
	N	2525	[Vueltas]
	R	84,14	[Ω]
	L	2,11E-03	[H]
	M	8,38E-07	[H]
	C	1,87E-12	[F]
	AB	2,53E+06	[Hz]

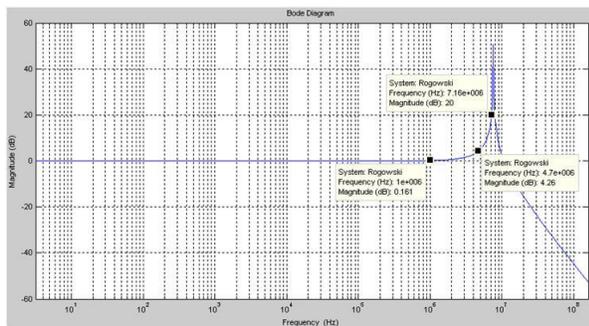
Tabla 2. Características geométricas y eléctricas de la bobina Rogowski construida de una capa.

2.3. Respuesta en frecuencia.

La respuesta en frecuencia de la bobina Rogowski se obtuvo con la función de transferencia del modelo eléctrico y de los parámetros eléctricos calculados presentados en la figura 3 y en la tabla 2 respectivamente. La ecuación 5 muestra la función de transferencia de la bobina Rogowski.

$$G(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{LC} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (5)$$

La figura 5 muestra la respuesta en frecuencia teórica de la bobina Rogowski obtenida a través de una simulación realizada en MatLab.



Sistema: Bode Rogowski	
Frecuencia (MHz):	1,01 2,03
Magnitud (dB):	1,6 9,03

Figura 5. Respuesta en frecuencia de la bobina Rogowski.

2.4. Métodos de integración.

Los diferentes métodos para realizar la integración de la señal de tensión entregada por la bobina Rogowski son:

- 1) integración pasiva L/R: este método utiliza la inductancia propia de la bobina en conjunto con una resistencia no inductiva.
- 2) integración pasiva CR: este método utiliza una resistencia en conjunto con un capacitor.
- 3) integración activa: este método utiliza amplificadores operacionales.

La figura 6 muestra el concepto de integración para los métodos descritos anteriormente.

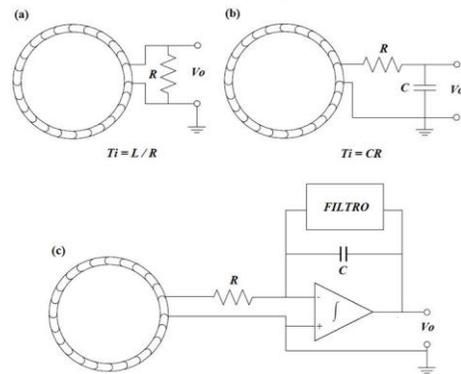


Figura 6 (a): Método de integración L/R
(b): Método de integración CR
(c): Método de integración activa

Los métodos de integración activa L/R y CR se emplean principalmente para la medición de corrientes de alta frecuencia (> 100 kHz) o pulsos de corriente de corta duración (< 5 μs).

A frecuencias bajas, 50 ó 60 Hz, la tensión inducida en las terminales de la bobina por lo general es del orden de algunos μVs/A. Por ello, es necesario utilizar el método de integración activo que tenga una respuesta en frecuencia como se muestra en la figura 7.

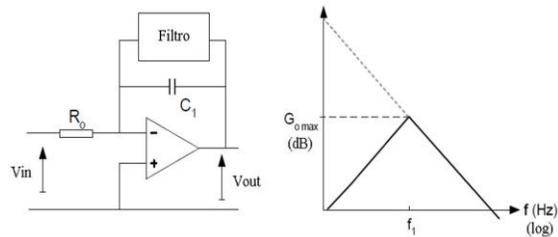


Figura 7. Respuesta en frecuencia del circuito integrador activo.

En la figura anterior, se puede observar que la ganancia del circuito integrador activo aumenta conforme disminuye la frecuencia de la señal de la corriente a medir, y en teoría, la ganancia se hace infinita cuando la frecuencia se aproxima a cero, por lo tanto, el ancho de banda del circuito integrador debe de limitarse, de lo contrario a muy bajas frecuencias el amplificador operacional se saturara. Una forma de limitar estos efectos en el circuito integrador es colocar un filtro paso bajo en paralelo con el capacitor de integración.

La siguiente figura muestra el diagrama eléctrico del circuito integrador.

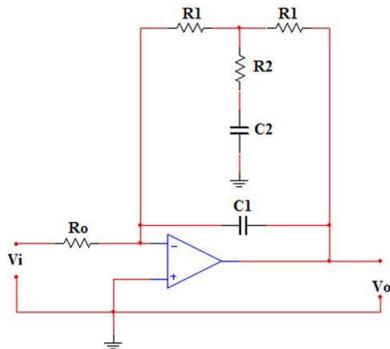


Figura 8. Diagrama eléctrico circuito integrador.

La ecuación 6 [10] muestra la función de transferencia para el circuito integrador de la figura 8.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{G_o(1 + \alpha T_s)}{1 + 2\xi T_s + T^2 s^2} \quad (6)$$

donde:

G_o : es la ganancia del transductor de corriente

$$G_o = \frac{2R_1}{R_o} \quad (7)$$

α : es el factor de atenuación.

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)} \quad (8)$$

ξ : es el factor de amortiguamiento del filtro

$$\xi = \frac{C_2 R_2 + 2C_1 R_1}{2T} \quad (9)$$

T : es la frecuencia mínima de operación del transductor de corriente

$$T = 2\alpha C_1 R_1 \quad (10)$$

T_i : es la constante de tiempo del circuito integrador

$$T_i = \frac{T}{G_o \alpha} \quad (11)$$

La figura 9 presenta el circuito integrador construido para ser utilizado con la bobina Rogowski mostrada en la tabla 2, la sensibilidad de este transductor de corriente es de 1 mV/A.

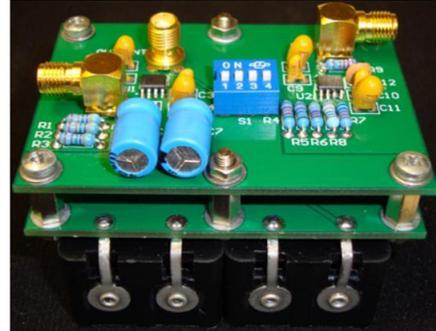


Figura 9. Circuito integrador.

3. CARACTERIZACIÓN.

Para evaluar el desempeño del transductor de corriente se proponen tres sistemas de generación y medición de corriente eléctrica alterna de mínima incertidumbre, con la finalidad de caracterizar la linealidad, el error de medición de corriente y la dependencia del error de medición de corriente con respecto de la posición del conductor de corriente dentro de la bobina Rogowski. A continuación se describe brevemente los instrumentos utilizados durante la caracterización del transductor de corriente:

- 1) una fuente de corriente programable.
- 2) un derivador de corriente para observar la señal de corriente generada.
- 3) un medidor de corriente de referencia para conocer el error de medición del transductor de corriente.

$$Error\ absoluto = I_{med} - I_{ref} \quad [A] \quad (12)$$

donde:

I_{ref} : es la corriente de referencia.
 I_{med} : es la corriente medida.

- 4) un transformador de corriente con núcleo de aire de 50 vueltas, donde:

$$I_{out} = I_{in} \cdot 50\ vueltas \quad [A \cdot Vueltas] \quad (13)$$

- 5) un multímetro para medir la señal de tensión entregada por el transductor de corriente.
- 6) un osciloscopio para observar las señales de corriente generada y la tensión entregada por el transductor de corriente.

La figura 10 muestra los diagramas eléctricos de los sistemas de medición utilizados para la caracterización en amplitud del transductor de corriente.

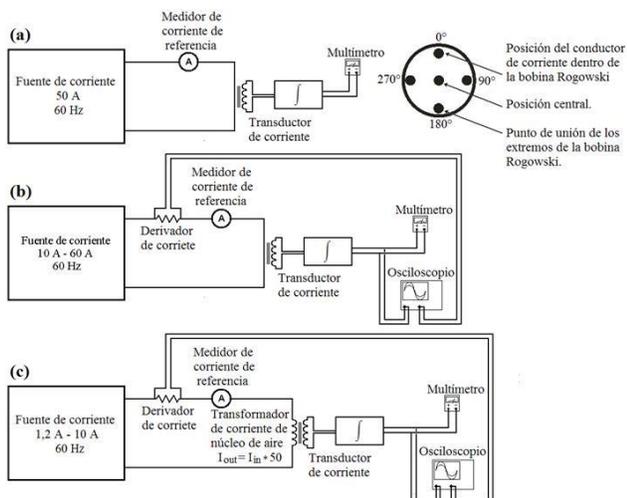


Figura 10 (a): Caracterización del error de amplitud debido a la posición del conductor de corriente.
(b): Caracterización del error de amplitud del transductor de corriente de 10 A – 60 A a una frecuencia de 60 Hz.
(c): Caracterización del error de amplitud del transductor de corriente de 70 A – 500 A a una frecuencia de 60 Hz, utilizando un transformador con núcleo de aire.

4. RESULTADOS.

La tabla 3 presenta los resultados del error de medición del transductor de corriente con respecto de la posición del conductor de corriente para una frecuencia de 60 Hz.

Posición del conductor de corriente	Corriente medida	Corriente de referencia	Error absoluto e incertidumbre k = 2,0		
	I_{med} [A]	I_{ref} [A]	[A]		
Centro	50,0	50,0	0,0	±	0,5
0°	50,1	50,0	0,1	±	1,0
90°	50,3	50,0	0,3	±	1,0
180°	49,4	50,0	-0,6	±	1,0
270°	50,2	50,0	0,2	±	1,0

Tabla 3. Error de amplitud debido a la posición del conductor de corriente.

El cambio del error de amplitud con respecto a la posición del conductor de corriente se debe a asimetrías en la construcción del devanado de la bobina Rogowski.

Se recomienda no posicionar el conductor de corriente en la unión de los extremos de la bobina Rogowski, debido a que existe una pequeña discontinuidad en este punto que incrementa el error de medición considerablemente.

La tabla 4 y 5 presenta los resultados del error de medición del transductor con el conductor de corriente posicionado en el centro de la bobina Rogowski para una frecuencia de 60 Hz.

Corriente medida	Corriente de referencia	Error absoluto e incertidumbre k = 2,0		
I_{med} [A]	I_{ref} [A]	[A]		
10,0	10,0	0,0	±	0,1
20,0	20,0	0,0	±	0,2
30,0	30,0	0,0	±	0,3
40,0	40,0	0,0	±	0,4
50,0	50,0	0,0	±	0,5
59,9	60,0	-0,1	±	0,6

Tabla 4. Error de amplitud en el transductor de corriente en el intervalo de 10 A – 60 A.

Corriente medida	Corriente de referencia	Error absoluto e incertidumbre k = 2,0		
I_{med} [A]	I_{ref} [A]	[A]		
69,9	70,0	-0,1	±	0,7
79,9	80,0	-0,1	±	0,8
89,9	90,0	-0,1	±	0,9
100	100	0,0	±	1,0
150	150	0,0	±	1,5
200	200	0,0	±	2,0
250	250	0,0	±	2,5
300	300	0,0	±	3,0
350	350	0,0	±	3,5
400	400	0,0	±	4,0
450	450	0,0	±	4,5
500	500	0,0	±	5,0

Tabla 5. Error de amplitud en el transductor de corriente en el intervalo de 70 A – 500 A.

5. CONCLUSIONES.

Este trabajo muestra los conceptos básicos empleados en el desarrollo de un transductor de corriente del tipo inductivo para medir y monitorear corriente eléctrica alterna, la instrumentación presentada al ser no intrusiva, no afecta el funcionamiento del transformador de distribución, por lo que reduce el costo de su instalación.

Los resultados presentados en la tabla 3, muestran la importancia de realizar una correcta instalación del transductor de corriente para evitar errores en la medición debidos a la posición del conductor de corriente.

Los resultados presentados en las tablas 4 y 5, indican que el transductor de corriente desarrollado es adecuado para la medición y monitoreo de la corriente eléctrica en las terminales de los devanados primario y secundario de un transformador de distribución.

6. TRABAJO A FUTURO.

La siguiente etapa de este proyecto, se enfoca en la instalación del transductor de corriente construido, con el objetivo de analizar y evaluar su desempeño en las condiciones ambientales y de operación a las que se encuentra sometido un transformador de distribución.

REFERENCIAS

- [1] Luka Ferković, Damir Ilić and Roman Malarić, Mutual inductance of a precise Rogowski coil in dependence of the position of primary conductor, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 1, 2009, 122-128.
- [2] Ehsan Abdi-Jalebi, Richard McMahon, High-performance low-cost Rogowski transducers and accompanying circuitry, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 3, 2007, 753-759.
- [3] C. R. Hewson, W. F. Ray and R. M. Davis, Verification of Rogowski current transducer's ability to measure fast switching transients", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Twenty-First Annual IEEE, 2006, 573-579.
- [4] Marta Argüeso Montero, Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2005.
- [5] Ray W. F., Davis R. M., High performance Rogowski current transducers, Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE Vol. 5, 2000, 3083 – 3090.
- [6] Ray W. F., Davis R. M., Practical aspects of Rogowski current transducer performance, Power Electronic Measurements Ltd., Nottingham - U.K.
- [7] Ray, W.F., Hewson, C.R., Metcalfe, J.M., High frequency effects in current measurement using Rogowski coils, Power Electronic Measurements Ltd., Nottingham - U.K.
- [8] Ray W. F., Davis R. M., Coil and cable behavior for Rogowski current transducers", Power Electronic Measurements Ltd., Nottingham - U.K.
- [9] Ray W. F., Davis R. M., Wide bandwidth Rogowski current transducers: Part 1 – The Rogowski coil", EPE Journal, Vol. 3, No. 1, 1993, 51-59.
- [10] Ray W. F., Davis R. M., Wide bandwidth Rogowski current transducers: Part 2 – The Integrator", EPE Journal, Vol. 3, No. 2, 1993, 116-122.
- [11] David E. Shepard, Donald W. Yauch, An overview of Rogowski coil current sensing technology, LEM DynAmp Inc., 3735 Gantz Road, Grove City, Ohio 43123.