



Diseño de un sistema de medición de alta tensión

José G. Sánchez
Juan A. Almirall

Recibido: Junio del 2005
Aprobado: Septiembre del 2005

Resumen / Abstract

El objetivo de este trabajo es el diseño de un sistema de medición de tensión a partir de elementos existentes en el centro, para corriente alterna y directa que permita mediciones de hasta 150 kV. El principio seleccionado para el diseño del sistema fue el de la impedancia calibrada. El sistema consta de dos partes fundamentales: Resistor de alta tensión y Sistema de medición de alta tensión de 4 rangos de medición: 150; 100; 50 y 25 kV.

Palabras clave: diseño, sistema de medición, impedancia calibrada

The objective of this work is to design an alternating and direct current high voltage measurement system with recovered components that allow measurements up to 150 kV. The principle of measurement by gauged impedance was used to design the system. The system consists of 2 fundamental parts: High voltage resistor; Measurement system of high voltage with 4 measurement scales: 150; 100; 50 and 25 kV.

Key words: design, measurement system, gauged impedance

INTRODUCCIÓN

El laboratorio de Alta Tensión del Departamento Docente del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, CIPEL, para contribuir a la continuación de la ejecución de sus actividades, se planteó la necesidad de diseñar un sistema de medición de alta tensión a partir de elementos existentes en el CIPEL, para corriente alterna y directa, confiable para el trabajo propio que se realiza con los estudiantes de la especialidad.

De los diferentes tipos básicos de sistemas de medición en alta tensión que se construyen en la actualidad, se seleccionó el método de impedancia calibrada, el cual se basa en la utilización de un resistor de alta tensión y un sistema de medición, que permitiera medir hasta 150 kV de corriente alterna (CA) y corriente directa (CD).

El sistema de medición debe disponer de facilidades de calibración, tanto por comparación con un instrumento de medición de tensión patrón o con su calibración interna a partir de condiciones pre-establecidas.

DESARROLLO

Bases generales del diseño

Las bases generales para el diseño¹ del equipo quedaron establecidas de la siguiente forma:

- El equipo tendrá 4 escalas de medición: 25; 50; 100 y 150 kV para que se ajuste a las necesidades de precisión requeridas en los trabajos que se realizan actualmente en el CIPEL.
- Para el resistor empleado en la rama de alta tensión se decidió utilizar un valor de resistencia,² igual a 250 MΩ. Con esto se logra que la corriente máxima tenga un valor pequeño y el equipo no represente una

carga para el sistema de prueba donde se utilizan fuentes de pequeña potencia.

- Para garantizar la rigidez dieléctrica superficial y una alta resistencia superficial alta de los componentes del resistor y adicionalmente mejorar su comportamiento térmico, esta debía estar inmerso en aceite dieléctrico.

Resistor de alta tensión

La exactitud de las mediciones³ en este tipo de equipo depende fundamentalmente del diseño del resistor de alta tensión,² es por ello que se le plantean los siguientes requerimientos:

- Deben estar libre de descarga por efecto corona.
- La corriente de escape o fuga a través del resistor y la estructura de soporte de las unidades resistivas debe ser muy pequeña.
- Las unidades resistivas empleadas deben tener un coeficiente de variación de su valor con la temperatura, pequeño.
- Que sus valores nominales sean independientes de la elevación de temperatura propia de la medición.

Teniendo en cuenta las exigencias enumeradas anteriormente se concibió un resistor para la rama de alta, constituido fundamentalmente por los siguientes elementos:

- Un conjunto de unidades resistivas de valor y tipo apropiado.
- Una estructura aislante de soporte de las unidades resistivas.
- Un líquido aislante que disminuya la formación de corona en las unidades resistivas y que contribuya a la evacuación del calor.
- Un recipiente aislante hermético que contenga las unidades resistivas y el líquido aislante, evitando su contacto con la atmósfera y los inconvenientes que esto trae aparejado.
- Una pantalla exterior para evitar el efecto corona del resistor como un todo.

Recipiente del resistor

Decidido el uso de un recipiente de porcelana⁴ por sus buenas características dieléctricas, para la selección del mismo existían las siguientes restricciones:

1. La altura mínima del recipiente de porcelana a utilizar está definida fundamentalmente por la tensión de descarga de la superficie exterior del mismo, que va a estar en contacto con el aire, pues la combinación porcelana-aceite en su interior tiene una tensión de descarga muy superior.

En el caso de porcelana-aire la longitud de fuga debe ser tal que la tensión de descarga superficial sea igual o mayor que 5 kV/cm.

Conociendo que la tensión nominal del resistor es de 150 kV y con un coeficiente de reserva (k_r) de 2,5 se calcula la longitud de fuga necesaria.

2. El diámetro interno del recipiente de porcelana está definido por el volumen de aceite necesario para absorber la energía disipada por los resistores y mantener la temperatura en valores que no dañen el aceite ni alteren el valor de los resistores.

El aceite de transformador opera satisfactoriamente a temperatura de hasta 55 °C por encima de la temperatura ambiente, pero la disipación de calor en los resistores a utilizar es relativamente alta, y como su resistencia varía con la temperatura se estableció que el límite máximo de la temperatura permisible a alcanzar con respecto al ambiente sea del orden de 20 °C, rango para el cual no es apreciable el cambio de valor en los resistores.

La expresión para analizar el incremento de temperatura de un cuerpo homogéneo está dado por:

$$\Delta T = \frac{E}{MC_e} \quad \dots(1)$$

En dicha expresión se desprecia la componente que considera la transferencia de calor al exterior a través de la porcelana, la cual tiene entre sus características un coeficiente de transferencia de calor muy pequeño. Como:⁵

$$\Delta T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_e = 1880 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$M = \frac{E}{C_e \Delta T}$$

donde:

E : Energía absorbida.

C_e : Calor específico del aceite para transformador.

M : Masa (cantidad de aceite en kilogramos).

La potencia (P) que se disipa en el resistor de la rama de alta tensión se calcula a partir de los datos de diseño de esta componente para la peor condición, es decir, para el caso de que se le aplique los 150 kV, la misma es de 90 W.

Considerando que el equipo se utilice durante 0,5 h con una tensión aplicada de 150 kV la energía disipada expresa en joule es

$$E = 162 \text{ kJ} \quad \dots(2)$$

Por lo que la cantidad de aceite óptimo se calcula por la expresión 1.

$$M = 4,31 \text{ kg}$$

Con la cantidad de aceite óptimo para disipar la potencia del resistor manteniendo la temperatura en los límites establecidos y para la máxima tensión de trabajo se requiere de una distancia mínima a tierra de 30 cm, se puede determinar el diámetro mínimo del recipiente a emplear, que debe ser de 13,66 cm.

Por razones de espacio para ubicar los resistores en el recipiente será necesario emplear un recipiente de porcelana de 105 cm de altura por 16 cm de diámetro, muy superior al requerido, lo que mejorará aun más las condiciones de operación térmicas del resistor de medición.

Rama de baja tensión del sistema de medición de alta tensión

La medición de la tensión a través de una impedancia calibrada se realiza indirectamente. Consiste en medir la corriente que circula por ella y luego la tensión de sus terminales se determina multiplicando el valor de esta por el módulo de la impedancia que se conoce de antemano.

La rama de baja tensión del sistema de medición de alta tensión⁶ consta de:

- Sistema de medición propiamente dicho.
- Sistema de calibración.
- Sistema de señalización.

Sistema de medición

Para el sistema de medición⁴ se selecciona un microamperímetro de escala 0-100 μA , pero como para la máxima tensión de medición (150 kV) la corriente que debe circular por el resistor de alta tensión (250 $\text{M}\Omega$) es de 600 μA ; es necesario situar en paralelo resistencias, de forma tal que el mismo deflece a máxima escala cuando por el sistema de medición circulen 600 μA . El mismo principio se sigue para las demás escalas de tensión.

Las resistencias en paralelo fueron calculadas en función de la resistencia interna del microamperímetro. Para cada escala los valores seleccionados para corriente directa fueron:

Escala de 25 kV ————— No es necesario resistencia

Escala de 50 kV ————— 0,5 R_g
Escala de 100 kV ————— 0,33 R_g
Escala de 150 kV ————— 0,2 R_g

Dado que los valores necesarios no se corresponden con valores normalizados de resistencia, se procede de la siguiente forma: en lugar de resistores fijos se emplean resistencias variables y el sistema se ajusta, de forma tal, que para cada una de las escalas de tensión del equipo se varía la resistencia hasta que el microamperímetro deflece a plena escala.

Como el microamperímetro es de corriente directa, para poder efectuar mediciones en corriente alterna es necesario rectificar la señal, para lo cual se debe usar un puente de onda completa conectado, tal como se muestra en la figura 1. En este caso los errores de la resistencia paralelo deben ser, para cada rango de medición, 1,11 veces menor.

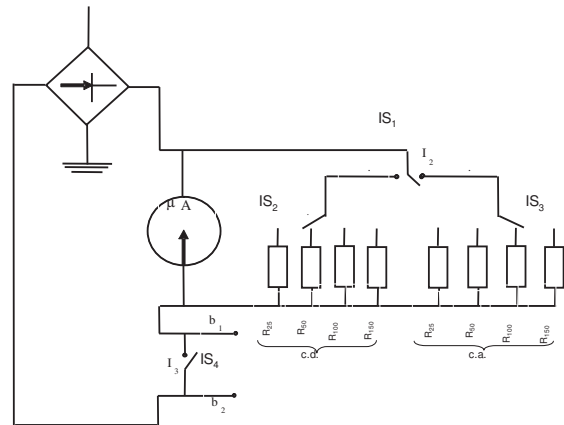
La función del interruptor IS_1 es la de seleccionar la medición para corriente alterna o para corriente directa y los interruptores IS_2 e IS_3 permiten seleccionar la escala de medición para CD y CA respectivamente.

En el caso del interruptor IS_4 , su función es la de permitir o no el empleo de un instrumento externo de mayor precisión para la medición de la corriente.

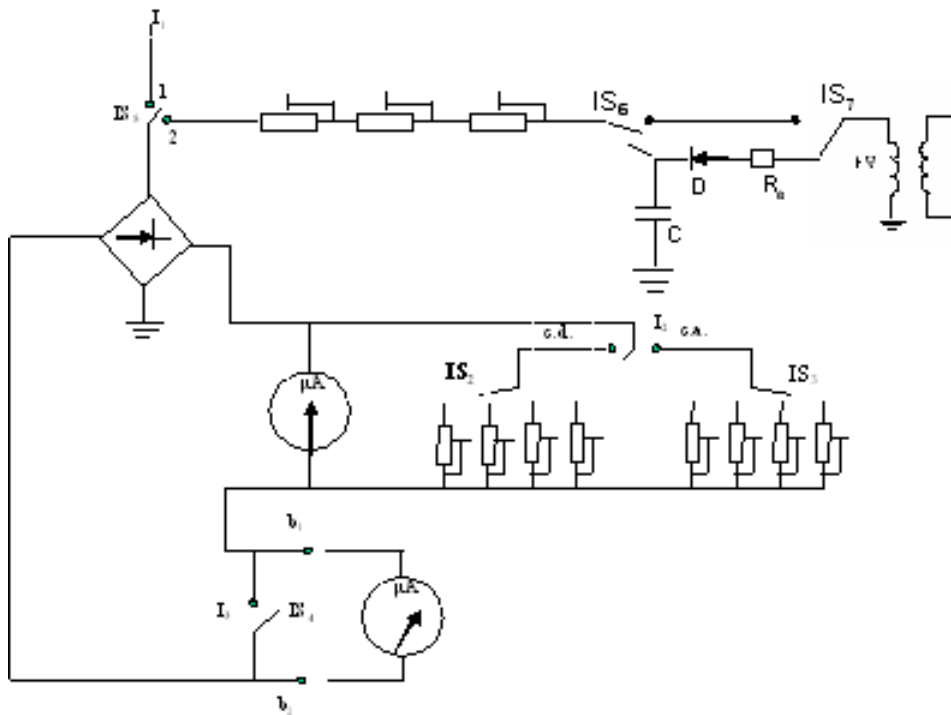
Sistema de calibración

El sistema de calibración está constituido, básicamente, por un transformador 110/4 V y 3 potenciómetros conectados en serie con el terminal de baja tensión del transformador, dos para el ajuste grueso y el tercero para el ajuste fino.

En la figura 2 se puede ver el circuito de calibración y su interconexión con el sistema de medición.



Representación del circuito para efectuar mediciones a corriente alterna y directa.⁷⁻¹⁰

Esquema del circuito de calibración.⁷⁻¹⁰

2

El objetivo de este sistema es verificar si ha existido con el tiempo, u otro factor, alteraciones en los valores de los resistores paralelo con la consecuente alteración de los resultados obtenidos en las mediciones. Para esto se requiere de un instrumento de medición externo. Al conectar el equipo para la posición de calibración circulará por el sistema una corriente determinada por los valores de los resistores variables del sistema de calibración, gracias a los que se puede ajustar el microamperímetro de la rama de baja tensión del sistema de medición a su deflexión máxima conocido el valor de corriente que debe circular por el sistema para cada nivel de tensión.

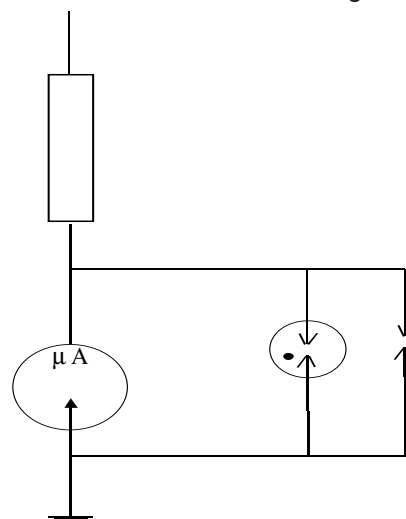
Para la calibración del sistema a corriente directa se debe proceder de la siguiente forma:

1. El interruptor IS_5 se conecta para la posición 2.
2. Los interruptores IS_6 e IS_7 se conectan para la posición 2.
3. Con los resistores variables del sistema de calibración y la resistencia paralelo del sistema de medición se ajusta el valor de la corriente necesaria para que el microamperímetro deflexe a plena escala cuando por el sistema de medición circula la corriente correspondiente al rango de medición de que se trate.

Para la calibración del sistema a corriente alterna se debe proceder de forma similar, pero en este caso los interruptores IS_6 e IS_7 se conectan para la posición 1.

Sistema de protección

Se sitúa físicamente en la base del resistor de alta tensión (figura 3) y estará constituido por un descargador gaseoso como protección principal y un entrehierro como protección secundaria conectados tal como se muestra en la figura 3.



Esquema donde se representa el sistema de protección

3

El descargador gaseoso opera en caso de que por cualquier razón se abra el circuito de medición, evitando con ello que aparezca una sobretensión peligrosa en la rama de baja tensión del sistema de medición. En caso de rotura de este, operará el entrehierro como protección de respaldo.

Las tensiones de operación del sistema de protección se muestran en la tabla 1.

Para proteger al microamperímetro de sobrecorrientes al cambiar de escalas el sistema de medición mediante los interruptores IS_1 , IS_2 e IS_3 es necesario que estos interruptores no permitan que en el paso de una conexión a otra el circuito quede abierto. Por lo que se deben seleccionar interruptores que cierren el circuito de la siguiente conexión antes de abrir el anterior, aunque siempre que sea posible se deben evitar cambios de escalas con el sistema energizado.

Tabla 1
Tensión de operación de los elementos de protección

Elemento	Tensión de Operación (V)	
	CD	CA
Descargador	100-140	142-198
Entrehierro	180-220	255-311

CONCLUSIONES

Al analizar los resultados obtenidos en este trabajo se establecen las siguientes conclusiones:

1. El sistema de medición diseñado reúne los requisitos de confiabilidad y precisión requeridos para el trabajo a que está destinado.
2. El sistema diseñado para la calibración periódica satisface las necesidades de calibración del equipo.
3. Es factible la construcción de este equipo, con medios fundamentalmente disponibles en el Centro.

REFERENCIAS

1. **Almirall Mesa, Juan:** *Técnica de alto voltaje*, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana, Cuba, 1984.
2. **Perera Escobar, Regla:** "Diseño, construcción, prueba y ajuste de dos resistores de 250 MW, 125 kV", Tesis de Maestría, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1997.
3. **Salazar Alonso, José Ernesto:** "Cálculo de la distribución de tensión a partir de las características de la instalación y el aislador. Estudio de la compensación por pantalla", Tesis de Maestría, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana, 1996.

4. **Harris, Forest, K:** *Electrical Measurements*, 1962.
5. *Sistema Internacional de Unidades de Medida. Factores y Tablas*, 1983.
6. **Santos Pérez, Guillermo:** "Diseño y construcción de un kilovoltímetro", Trabajo de Diploma, CIPEL, ISPJAE, La Habana 1975.
7. **NC 02-07-10. SUDP.** *Símbolos gráficos convencionales en los esquemas eléctricos. Bobinas de inducción y de choque, transformadores, autotransformadores y amplificadores magnéticos*, 1978.
8. **NC 02-07-14. SUDP.** *Símbolos gráficos convencionales en los esquemas eléctricos. Resistores y capacitores*, 1978.
9. **NC 02-07-15. SUDP.** *Símbolos gráficos convencionales en los esquemas, Eléctricos, Instrumentos de medición eléctricos*, 1978.
10. **NC 02-07-16. SUDP.** *Símbolos gráficos convencionales en los esquemas, eléctricos. Dispositivos semiconductores*, 1978.

AUTORES

José G. Sánchez Glean

Ingeniero Agroindustrial y Electricista, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: jguillermo@electrica.cujae.edu.cu

Juan A. Almirall Mesa

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail: almirall@electrica.cujae.edu.cu

FÁBRICA DE TRANSFORMADORES

