

# ENSAYO DE ESFUERZOS DE CORTOCIRCUITO DE TRANSFORMADORES EN EL URUGUAY: NORMA CEI 76-5

G. Casaravilla, M. Vignolo  
Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería  
Universidad de la República  
Julio Herrera y Reissig 565. CP 11300, Montevideo-URUGUAY  
tel: 710974, fax: 717435. E-mails: [gcp@iie.edu.uy](mailto:gcp@iie.edu.uy), [jesus@iie.edu.uy](mailto:jesus@iie.edu.uy)

**Resumen-** En el presente trabajo se estudia e interpreta la norma CEI 76-5 (Ability to withstand shortcircuit) para ensayo especial de cortocircuito de transformadores. En base a la experiencia de un ensayo realizado en la Universidad de la Plata se analiza la implementación tecnológica del ensayo; se estudian las dificultades y las formas de superarlas.

Por otra parte se analiza la posibilidad de la realización de ensayos de este tipo en el Uruguay.

## I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores deben estar contruidos para soportar sin dañarse, los efectos térmicos y mecánicos debidos a un cortocircuito. La norma CEI 76-5 establece los ensayos que deben realizarse a los transformadores para garantizar su aptitud respecto a los cortocircuitos. Si bien estos pueden ser de varios tipos (entre fases, entre dos fases y tierra, entre fase y tierra, trifásicos), la norma utiliza el cortocircuito trifásico en bornes del secundario para establecer las condiciones de aptitud del transformador.

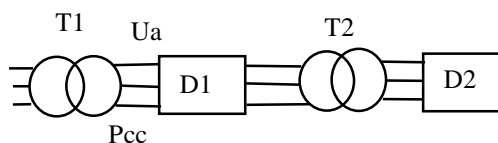
El transformador debe soportar sin dañarse la corriente debida a un cortocircuito trifásico en bornes del secundario cuando éste se encuentra instalado en el lugar definitivo de trabajo.

El comprador del transformador deberá especificar la potencia de cortocircuito del sistema donde será instalado. De lo contrario se adoptan para los cálculos los valores de potencia de cortocircuito indicados en la norma (que están expresados en una tabla como función de la tensión).

En el ensayo se deben imitar estas condiciones; es decir que el transformador es conectado a una tensión próxima a la nominal, con los bornes del secundario cortocircuitados de tal forma que la corriente que circula en los breves instantes en que se hace el cortocircuito es igual a la que resultaría con el transformador conectado a tensión nominal en el sistema especificado antes de que actúen las protecciones correspondientes.

## II. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El circuito utilizado es el siguiente:



T1: Transformador de alimentación  
D1: Disyuntor de alta  
D2: Disyuntor de baja  
T2: Transformador a ensayar (transformador trifásico de dos arrollamientos y potencia menor a 3150 kVA)

Pcc: Potencia de cortocircuito disponible en el laboratorio de ensayo

Ua: Tensión de alimentación

Cerrando D1 y D2 se somete al transformador a la corriente de cortocircuito deseada. Se realiza un total de nueve ensayos, tres por cada columna (en los extremos y en el punto medio del

conmutador), cada uno con una duración de 0.5 s con tolerancia de +/- 10%.

Tanto la corriente que debe circular en régimen permanente luego del transitorio inicial, como la corriente máxima del primer pico se deben calcular para la temperatura de referencia (75°C).

La corriente de régimen se calcula como:

$$I_{cc}(\text{alta}) = \frac{U_s}{(Z_t + Z_s)\sqrt{3}}$$

(corriente del lado de alta)

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}$$

Donde:

Us es la tensión nominal del sistema donde se instalará el transformador.

S es la potencia de cortocircuito del sistema donde se instalará el trafo (de acuerdo con el comprador) o la que la norma indique de acuerdo a la tensión.

Zt es la impedancia de cortocircuito del transformador a ensayar a 75°C.

La amplitud  $\hat{i}$  de la primera cresta de corriente asimétrica se calcula como:

$$i = I_{cc} \times k \times \sqrt{2}$$

$k \times \sqrt{2}$  depende del cociente X / R donde:

X es la suma de las reactancias del trafo y del sistema ( $X_t + X_s$ ), en ohms

R es la suma de las resistencias del trafo a 75°C y del sistema ( $R_t + R_s$ ), en ohms

Nota: La norma da valores del factor de asimetría en función de X/R, pudiéndose interpolar para valores intermedios.

Para obtener durante el ensayo la corriente calculada, la tensión de alimentación  $U_a$  puede ser mayor que la tensión nominal (pero no más de 15%).

Esta tensión se calcula con las ecuaciones anteriores imponiendo los valores de  $\hat{i}$  o  $I_{cc}$  calculados corrigiendo los valores de

resistencia a la temperatura media del transformador durante el ensayo, la cual deberá estar entre 0°C y 40°C.

Al tener dos ecuaciones que verificar, la metodología adoptada es imponer el valor de pico de la primera cresta y luego verificar que  $I_{cc}$  está dentro de los límites permitidos por la norma. Al ser la condición de cresta más exigente que la de  $I_{cc}$ , este procedimiento trata de asegurar los valores requeridos.

El valor de cresta de la corriente obtenida durante el ensayo no debe diferir de más de 5% del valor especificado ni la corriente simétrica de régimen en más de un 10%.

Antes de iniciar los ensayos y luego de cada uno de ellos debe realizarse una medida de la reactancia. Luego de todos los ensayos, el transformador se desencuba y se realiza una inspección visual.

El ensayo es considerado como satisfactorio si las medidas o los exámenes visuales no muestran ningún defecto aparente (desplazamientos, deformaciones de los bobinados, de las conexiones, etc.).

Las medidas se consideran satisfactorias si las inductancias medidas no difieren en más de 7.5, 4 o 2% de acuerdo al tipo constructivo del transformador. Por ejemplo para transformadores con bobinados concéntricos lo aceptado es 2%, excepto si es con folio en el lado de baja, donde se admite hasta 4% de variación si la impedancia de cortocircuito del trafo es mayor o igual a 3%.

### III. ALGUNAS CONSIDERACIONES EN BASE A LA EXPERIENCIA DE UN ENSAYO REALIZADO.

Datos del transformador ensayado:

13.2 kV / 400 V DY11

$Z_t = 3.78\%$ ,  $R_t = 1.34\%$ ,  $X_t = 3.53\%$

$S_N = 200$  kVA

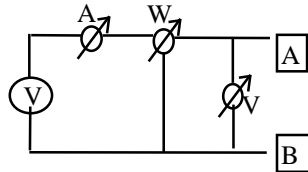
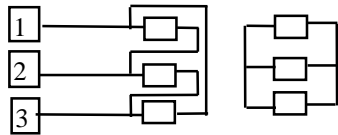
Datos de la instalación:

$S = 150$  MVA

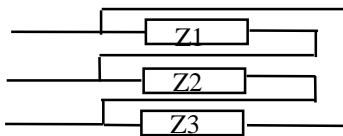
#### Medida de la reactancia

Variaciones en la medida de la reactancia antes y después de cada ensayo reflejan

posibles fallas. En la norma se pide que esta medida se realice antes y después de cada ensayo (son 9 ensayos en total para transformadores de Categoría I). Si bien la norma que estamos considerando (CEI 76-5) establece que antes de todos los ensayos a realizar se realicen los ensayos de rutina (según CEI 76-1) no especifica que la medida de la reactancia deba hacerse según dicha norma. El circuito utilizado para esta medida fue el siguiente:



Se aplica tensión reducida monofásica en cada par de terminales del primario del transformador con el secundario en cortocircuito midiendo tensión, corriente y potencia. Se realizan 9 medidas en total; tres por cada tap. El circuito equivalente en un caso cualquiera (por ej. midiendo entre 1 y 2) es:



Luego entre 1 y 2 lo que mido es una Z equivalente:  $Z = \frac{Z1 \times (Z2 + Z3)}{Z1 + Z2 + Z3}$   
donde, tomando formas binómicas:

$$Z_i = R_i + jX_i$$

$$Z = R + jX$$

se pueden obtener R y X a partir de las medidas de tensión, corriente y potencia:

$$P = RI^2$$

$$Q = \sqrt{(VI)^2 - P^2}$$

$$Q = XI^2$$

Midiendo en los tres pares de terminales se obtienen para cada tap 6 ecuaciones con 6 incógnitas que permiten hallar Z1, Z2 y Z3 correspondientes a cada tap. El sistema se resuelve con la ayuda de una computadora. De los seis valores obtenidos solo interesan los tres valores de reactancia los cuales son promediados para obtener una estimación de la reactancia de cortocircuito del transformador. Esta se utiliza, como ya se mencionó para medir los efectos del cortocircuito sobre el trafo.

Se realizaron 3 medidas en cada par de terminales a los efectos de verificar que la repetibilidad de los valores obtenidos sea inferior a 0.2%. Para ello se tomaron 3 valores de potencia cercanos.

#### Cálculo de corrientes durante el cortocircuito para este ensayo

La corriente permanente y de cresta de cortocircuito se calcularon como establece la norma a la temperatura de referencia.

Los valores de Rt y Xt que se utilizan a continuación son los que resultan de los ensayos de rutina del transformador.

$$I_{cc}(\text{alta}) = \frac{13200}{\sqrt{3} \sqrt{((X_t + X_s)^2 + R_t^2)}} = 231A$$

$$R_t = 0.0134 \times \frac{13.2^2}{0.2} = 11.8\Omega$$

$$X_t = 0.0353 \times \frac{13.2^2}{0.2} = 30.8\Omega$$

$$X_s = \frac{13.2^2}{500} = 0.35\Omega$$

(se asume que como peor caso Rs = 0)

$$I_{cc}(\text{baja}) = 231 \times \frac{13.2}{0.4} = 7.6kA$$

( corriente del lado de baja)

Se verificó con las especificaciones de los disyuntores y los valores calculados de las corrientes que éstos son adecuados para el ensayo realizado.

Cálculo del factor k

cociente  $\frac{X}{R} = \frac{X_t + X_s}{R_t} = 2.64$  por lo que

interpolando  $k=1.88$

Finalmente la corriente de cresta deberá ser de  $1.88 \times 1.42 \times 7.6 = 14.4$  kA.

En la práctica, al no tener en el laboratorio donde se realizó el ensayo posibilidad de regular la tensión, la corriente de cresta resultó ser de 15.5 kA.

#### IV. REALIZACIÓN DE UN POSIBLE ENSAYO DE ESTE TIPO EN URUGUAY

El objetivo final de este trabajo es determinar hasta qué potencia de transformador y en qué lugar se pueden hacer ensayos de cortocircuito de acuerdo a IEC 76-5.

Se estudió exclusivamente el caso de transformadores de 15kV de distribución por lo que se analizarán transformadores de hasta 630kVA.

En base a los datos disponibles de la red de transmisión se seleccionaron en primera instancia los lugares en donde se dispone de 15kV, y de estos se eligió como lugar preferente Nueva Palmira por ser el que presenta mayor potencia de cortocircuito en barras de 15kV. Asimismo en dicho lugar se dispone de tres transformadores iguales, dos de ellos en paralelo rígido y uno para reemplazo.

Datos de cada transformador en paralelo rígido marca BBC:

|     |      |      |     |
|-----|------|------|-----|
| 110 | 31.5 | 16.2 | kV  |
| 7.5 | 5    | 3    | MVA |
| 39  | 92   | 107  | A   |

23 puntos. 0.8kV c/u

Tensión máxima 118.8 kV

Barra de 15kV de Nueva Palmira:

S=71 MVA (incluye la línea y el transformador)

Se realizaron dos tipos de cálculos:

Caso 1: Corriente simétrica  $I_{cc}$  inferior a la corriente nominal del paralelo en 15kV, de modo de no interferir en el ajuste de las protecciones preexistentes.

Caso 2: Permitir durante el cortocircuito corrientes mayores a la nominal del paralelo. Recordar que la duración del ensayo de cortocircuito es de apenas 0.5 segundos.

#### Caso 1

La máxima corriente admisible para el conjunto de los dos transformadores considerando la restricción establecida es de 214 A dado que la corriente nominal de cada transformador es de 107 A.

Por tanto dado que los transformadores de distribución tienen aproximadamente 4% de impedancia de cortocircuito, resulta que la potencia nominal del transformador más grande que se podrá ensayar será de  $214 \times 0.04 \times 1.73 \times 15 = 218$  kVA.

Realizaremos los cálculos para un transformador de 250 kVA.

Datos de un transformador de 250kVA:

15 kV / 230 V DYn11

$U_{z75}(\%) = 3.86$ ,

$U_r75(\%) = 0.95$ ,

$U_x(\%) = 3.74$

$S_N = 250$  kVA

Resistencias y reactivas:

$$R_t(75^\circ C) = 0.0095 \times \frac{15^2}{0.250} = 8.55 \Omega$$

$$R_t(20^\circ C) = 0.0080 \times \frac{15^2}{0.250} = 7.20 \Omega$$

$$X_t = 0.0374 \times \frac{15^2}{0.250} = 33.7 \Omega$$

$$X_s = \frac{15^2}{500} = 0.450 \Omega \quad \text{luego} \quad @75^\circ C$$

$$I_{cc} = \frac{15}{\sqrt{3} \left[ 8.55^2 + (33.7 + 0.450)^2 \right]^{0.5}} =$$

$$I_{cc} = 0.246 \text{ kA}$$

$$\mathcal{F} = k\sqrt{2} \times I_{cc}; \quad \frac{X}{R} = \frac{X_t + X_s}{R_t} = 4 \Rightarrow$$

$$k\sqrt{2} = 2.09 \quad \text{e} \quad \mathcal{F} = 0.514 \text{ kA}$$

Ensayo @20°C:

$$\frac{X}{R} = \frac{X_t + X_{t'}}{R_t} = \frac{33.7 + 3.17}{7.2} = 5.12 \Rightarrow$$

$$k\sqrt{2} = 2.20; \quad X_{t'} = \frac{15^2}{72} = 3.17\Omega$$

$$\mathcal{F} = 2.20 \times I_{cc} = 0.514\text{kA} \Rightarrow$$

$$I_{cc} = 0.234\text{kA} \quad \frac{I - I_{cc}}{I_{cc}} \% = -6\%$$

$$0.234 = \frac{U}{\sqrt{3} \times [7.2^2 + (3.13 + 33.7)^2]^{0.5}} \Rightarrow$$

$$U = 15.2\text{kV} \quad \frac{U}{U_n} = \frac{15.2}{15} = 1.01 < 1.15$$

(Para esto último se aplicó el criterio del 15%).

Como conclusión, en las condiciones establecidas para este caso 1, se podrá ensayar en Nueva Palmira hasta un transformador de 250 kVA, 15 kV, con datos similares a los establecidos en el ejemplo calculado.

### Caso 2

En este no hay limitación en la corriente nominal, por lo que se verificará si es posible ensayar el transformador de distribución más grande disponible, que se ha establecido en 630 kVA. De este cálculo se obtendrá la información necesaria para calibrar las protecciones del transformador que alimenta la barra de 15 kV.

Datos de un trafo de 630 kVA:

15 kV / 400 V DYn11

$U_z \quad 75(\%) = 4.15, \quad U_r \quad 75(\%) = 0.72,$

$U_x(\%) = 4.09 \quad S_N = 630 \text{ kVA}$

Resistencias y reactancias:

$$R_t(75^\circ\text{C}) = 0.0072 \times \frac{15^2}{0.630} = 2.57\Omega$$

$$R_t(20^\circ\text{C}) = 0.0059 \times \frac{15^2}{0.630} = 2.11\Omega$$

$$X_t = 0.0409 \times \frac{15^2}{0.630} = 14.6\Omega$$

$$X_s = \frac{15^2}{500} = 0.450\Omega$$

@75°C

$$I_{cc} = \frac{15}{\sqrt{3} [2.57^2 + (14.6 + 0.450)^2]^{0.5}}$$

$$I_{cc} = 0.568\text{kA}$$

$$\mathcal{F} = k\sqrt{2} \times I_{cc}; \quad \frac{X}{R} = \frac{X_t + X_s}{R_t} = 5.86 \Rightarrow$$

$$k\sqrt{2} = 2.26 \quad e \quad \mathcal{F} = 1.28\text{kA}$$

Ensayo @20°C:

$$\frac{X}{R} = \frac{X_t + X_{t'}}{R_t} = \frac{14.6 + 3.17}{2.11} = 8.42 \Rightarrow$$

$$k\sqrt{2} = 2.40; \quad X_{t'} = \frac{15^2}{72} = 3.17\Omega$$

$$\mathcal{F} = 2.40 \times I_{cc} = 1.28\text{kA} \Rightarrow$$

$$I_{cc} = 0.533\text{kA} \quad \frac{I - I_{cc}}{I_{cc}} \% = -6\%$$

$$0.533 = \frac{U}{\sqrt{3} \times [2.11^2 + (14.6 + 3.17)^2]^{0.5}} \Rightarrow$$

$$U = 16.5\text{kV} \quad \frac{U}{U_n} = \frac{16.5}{15} = 1.1 < 1.15$$

$$\frac{I_{cc}}{I_n} = \frac{0.533}{0.214} = 2.5$$

La corriente en alta de los transformadores causada por este ensayo de cortocircuito representa un 101% de su corriente nominal, por lo que incluso no sería necesario reajustar las protecciones del mismo en alta.

En este caso 2, se concluye que es posible realizar este ensayo sin mayores problemas de sobrecorriente durante los 0.5s del ensayo.

Una vez establecida la posibilidad teórica, en base a datos reales, de la realización de ensayos de este tipo, quedan como problemas a resolver el sincronismo y la adecuada selección de los disyuntores a utilizar. En base al relevamiento de laboratorio y a nuestra propia experiencia, entendemos que estos temas, si bien pueden presentar problemas de implementación, son realizables a costos aceptables.



Gonzalo M. Casaravilla (S' 1988- M'1990). Recibió el título de Ingeniero Electricista en 1990 de la Universidad de la República. Es profesor

adjunto de la Facultad de Ingeniería, IIE, donde trabaja desde 1986. Su área de trabajo se ha centrado en la Electrónica de Potencia, asignatura que imparte. Ha trabajado en la Dinatex s.r.l. (1987-1991) en la construcción de UPS y cargadores de baterías. Desde 1993 asesora en ISAI s.r.l en el área de los convertidores estáticos para el control de velocidad de motores.



J. Mario Vignolo nació en Montevideo el 14 de abril de 1972. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de la República desde 1990.

Se desempeña como docente del Instituto de Ingeniería Eléctrica desde agosto de 1994. Actualmente trabaja en temas relacionados con ensayos y normas, con especial interés en medidas eléctricas, transformadores e iluminación. Desde marzo de 1996 trabaja en GM Instalaciones en ejecución de proyectos de baja y media tensión.