

Transformador Patrón de Tensión de Errores Calculables

Ricardo I. Garcia ¹, Jorge J. Quintana ²

¹ Retirado, Buenos Aires, Argentina, garcia-levi@arnet.com.ar

² INTI, Buenos Aires, Argentina, jquinta@inti.gob.ar

Abstract: We describe the design, construction and testing of a standard voltage transformer, with ratio 5.0:0.1 kV, which errors are calculated.

The maximum difference between measured and calculated values was $7\mu\text{V/V}$ in phase and $5\mu\text{rad}$ in quadrature when input voltage is 120% of nominal value.

Palabras claves: transformadores patrones de tensión, transformadores de dos etapas.

1. INTRODUCCIÓN

La comercialización de grandes volúmenes de energía eléctrica, no solo dentro del país sino también a nivel internacional, exige que la calibración de los transformadores para medición sean trazables a patrones que tengan reconocimiento internacional a través de los institutos nacionales de metrología. Ésto implica mejorar la exactitud de las calibraciones y contar con procedimientos claros y verificables que llegan desde baja tensión hasta extra alta tensión, con relaciones de transformación que varían de 1 a 5000 y tensiones de 0,1 kV a 500 kV.

Los laboratorios de metrología, particularmente los nacionales, no solo son los encargados de conservar sus patrones de referencia en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades (SI), sino que además tienen como labor el establecer las diversas escalas con las que se efectuarán las calibraciones de instrumentos y otros patrones.

En el caso de los transformadores de tensión, para establecer las escalas de tensión, los laboratorios de alta tensión utilizan métodos de tipo directo o indirecto. Entre los primeros se encuentran los métodos puente o por comparación con transformador patrón (diferencial) y para los últimos los métodos basados en sistemas que utilizan capacitores, o bien métodos con divisores inductivos [1,2]. Estas últimas calibraciones se realizan para tensiones comprendidas entre los 200 V y los 1000 V.

En los transformadores de tensión para medición, uno de los parámetros a determinar es la relación de transformación, es decir la relación entre la tensión primaria aplicada y la tensión secundaria resultante. Esta relación es adimensional, y al tratarse de tensiones alternas sinusoidales, es un número complejo.

El Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI – está desarrollando un sistema basado en comparadores de

corriente, divisores inductivos y capacitores de alta y baja tensión.

Para recalibrar sus patrones el INTI decidió construir un patrón de errores calculables de relación 50, de 5 kV, que es un poco inferior a la media geométrica de las relaciones mencionadas. Por razones de sensibilidad, la calibración se realiza a 5 kV.

2. CONSIDERACIONES GENERALES

En un transformador de tensión, el error de relación sin carga es el parámetro mas importante, los errores en carga pueden ser determinados por mediciones directas o indirectas.

El circuito operacional más conveniente para el análisis del transformador es el que se muestra en la Figura 1 [2]. Con este circuito puede caracterizarse el transformador con solo tres mediciones directas, a saber: la primera corresponde a la medición en la condición de vacío, la segunda a la condición de cortocircuito y la tercera a la determinación de la relación de transformación.

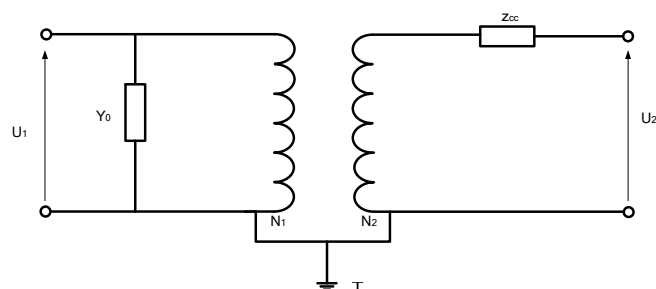


Figura 1: circuito operacional del transformador

Al no tratarse de un transformador ideal, la relación de espiras primario/secundario, “ k ”, está afectada por el factor $(1 + \bar{\epsilon})$, donde $\bar{\epsilon}$ es el error de relación.

En la figura 1 los parámetros se encuentran referidos al primario del transformador y representan:

U_1 es la tensión primaria

U_2 es la tensión secundaria

Y_0 es la admitancia de vacío

Z_{cc} es la impedancia de cortocircuito

La relación de transformación se determina por el cociente entre la tensión aplicada al primario, U_1 , y la tensión inducida en el arrollamiento secundario, E_{20} , es decir:

$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{E}_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \times (1 + \varepsilon_0), \text{ con } \varepsilon_0 = \alpha - j\beta \quad (1)$$

siendo,

N_1 el número de espiras del arrollamiento primario,

N_2 el número de espiras del arrollamiento secundario,

ε_0 el error total en vacío, cometido en la determinación de la relación de transformación,

α el error en fase

β el error en cuadratura

El apartamiento de la relación de transformación real de la relación del número de espiras puede ser calculada en base al cuadripolo equivalente T del transformador (Figura 2) [3].

Este error esta dado por la expresión $\bar{\varepsilon}_0 = -\bar{Z}_1 \bar{Y}_0$, con

$\bar{Z}_1 \ll \frac{1}{\bar{Y}_0}$, dónde \bar{Z}_1 es la impedancia de dispersión del

primario e \bar{Y}_0 la admitancia de vacío, que se obtiene en el ensayo del transformador sin carga. La determinación de la impedancia de dispersión primaria es mas compleja, se determina junto a la secundaria en la medición de la impedancia de cortocircuito, si bien las componentes resistivas pueden evaluarse mediante la resistencias de los bobinados, no es el caso de las reactivas, ya que el flujo de dispersión [4,5] depende de la posición relativa de los bobinados, es éste el factor limitante para la determinación del error.

El parámetro más importante es el error sin carga, por tal motivo el modelo constructivo que se adoptó es el del transformador en dos etapas, pero sin adoptar la construcción clásica de apilar los núcleos sino usando dos transformadores separados, uno principal y otro de compensación, de esta manera se pueden evaluar en forma independiente.

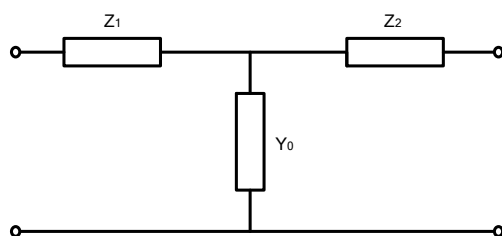


Figura 2: cuadripolo equivalente T del transformador

3. EL TRANSFORMADOR PRINCIPAL

El núcleo es de tipo toroidal, compuesto por un núcleo de acero de grano orientado y otro de hierro-níquel para obtener un rango amplio de trabajo. El metal posee alta permeabilidad, la que es relativamente constante para valores de inducción magnética por debajo de 0,4T (valor próximo a la saturación), mientras que el acero al silicio de

grano orientado puede ser utilizado a valores de inducción de hasta 1T para la construcción de transformadores de tensión para medición, pero su permeabilidad cae rápidamente con la disminución de la inducción magnética, especialmente la componente real, mientras que la componente imaginaria, que es la representativa de las pérdidas, se mantiene prácticamente constante en un amplio campo de variación de la inducción.

Para una elevada inducción del núcleo el producto número de espiras por sección es bajo.

$$N \times S = \frac{E}{4 \times f \times B \times f} \quad (2)$$

siendo,

N el número de espiras

S la sección del núcleo

E la f.e.m. inducida en el arrollamiento

f el factor de forma

B la inducción magnética

f la frecuencia

Un bajo número de espiras conduce a una baja impedancia de cortocircuito.

Si la sección es pequeña, la potencia de magnetización es baja y por lo tanto la admitancia de vacío también será baja. Adicionalmente, la admitancia de vacío disminuye utilizando núcleos toroidales.

Para disminuir la reactancia de dispersión primaria, los bobinados primarios están arrollados uniformemente alrededor del núcleo y están compuestos por dos alambres esmaltados trenzados de manera tal que concatenen el mismo flujo. La salida de alta tensión esta junto al núcleo, el secundario esta arrollado en la parte externa, de esta forma el bobinado secundario muestrea todo el flujo debido al primario, la figura 3 muestra el circuito del transformador completo.

La corriente magnetizante circula por P1-P2 y P1-PR es el bobinado de sensado (figura 4). Para comprobar que ambos bobinados muestrean el mismo flujo fueron realizadas dos determinaciones; en la primera se conectó el sistema amperométrico de un wattmetro digital (DWM) entre P1 y PR y el voltimétrico entre P1 y P2. Se aplicó una tensión de 50 V y se determinaron los valores de I, P y Q cuyo valor fue 0 VAr, lo que implica que no hay reactancia de dispersión, es decir no hay flujo magnético disperso ya que ambas bobinas muestrean el mismo flujo; luego se aplicó una tensión variable de 10 a 120 V en el secundario y se midió la diferencia de potencial entre P2 y PR, que a la tensión nominal fue de unos pocos milivolt, es decir que se verificó que los bobinados muestrean el mismo flujo.

Para evaluar la impedancia de dispersión primaria se realizó la determinación de la impedancia de cortocircuito alimentado el transformador desde el secundario, P1 y P2 cortocircuitados, se sensó la corriente en el secundario y la tensión fue medida entre los bornes S1 y SA y luego en entre P1 y PR. De la segunda medición se obtiene la

impedancia de dispersión primaria y de la primera la total, luego se calculan ambas lo cual permite asignarle valores a todos lo elementos del circuito, resultando que la reactancia de dispersión primaria es despreciable. De este modo se pueden calcular el valor de todos los elementos del circuito de la figura 2 y calcular el error sin carga.

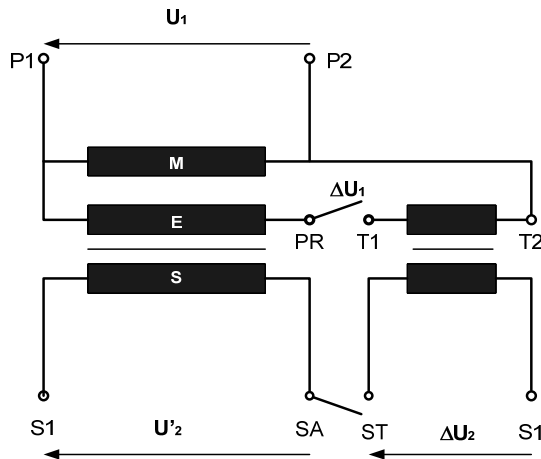


Figura 3: Esquema circuital del transformador

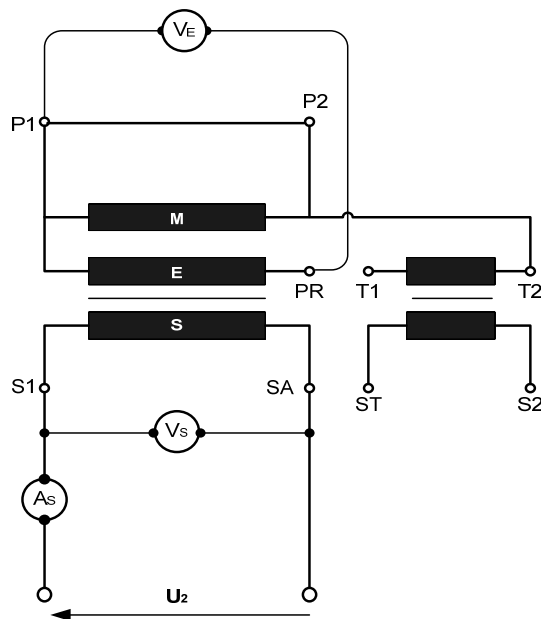


Figura 4: Medición de la impedancia de cortocircuito

4. TRANSFORMADOR DE COMPENSACIÓN

Este transformador se utiliza para compensar la caída de tensión en el transformador principal debido a la resistencia propia del bobinado primario, como indica la teoría del transformador de dos etapas, su primario se conecta en serie con el bobinado P1-PR. Se utilizó un núcleo toroidal de material magnético nano cristalino, lo que asegura una alta permeabilidad. El número de espiras se calculó de tal forma que la corriente que circulara por él fuese aproximadamente 100 veces inferior a la que circula por el bobinado P1-P2. de esta forma el error sin carga es prácticamente cero, de

algunas ppm. El error total resulta como producto de los errores de ambos transformadores.

$$\varepsilon_0 = Z_1 Y_{10} \times Z_T Y_{T0} \quad (3)$$

5. TRANSFORMADOR DE DOS ETAPAS CIRCUITO EQUIVALENTE

En la Figura 5 [7] se muestra el circuito equivalente del transformador de 2 etapas. En el mismo puede observarse que la caída de tensión, ΔU , sobre la impedancia de dispersión primaria es la responsable del error de relación que se produce en el caso de un transformador convencional de una etapa. Para el caso del transformador de dos etapas, la caída de tensión es compensada por el agregado del segundo núcleo, con lo cual el error se reduce considerablemente.

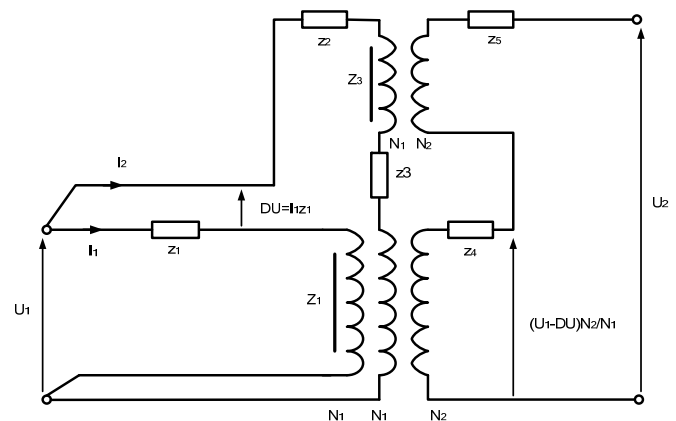


Figura 5: circuito equivalente del transformador de 2 etapas

6. EVALUACION

Para la evaluación del transformador se comparó con un patrón calibrado de la misma relación. La comparación se realizó primero contra el transformador principal y luego con el de dos etapas, la diferencia de ambos valores, se deben corresponder con los calculados del transformador patrón.

7. RESULTADOS

7.1 Determinación de las impedancias de cortocircuito y de las admitancias de vacío

La determinación de las impedancias de cortocircuito del transformador principal fue realizada utilizando los circuitos indicados en las figuras 5, 6 y 7.

La Tabla 1 muestra los valores medidos en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 1: Valores medidos

Medición	U [V]	I [A]	P [W]	Q [VAr]	S [VA]
1	50,00	0,58	29,11	0	29,11
2	0,78	5,00	3,61	1,50	3,91
3	4,35	5,00	21,71	0,002	21,71

En la medición número 1 (figura 5) se verificó que el flujo muestreado por ambos arrollamientos primarios es el mismo ($Q = 0$).

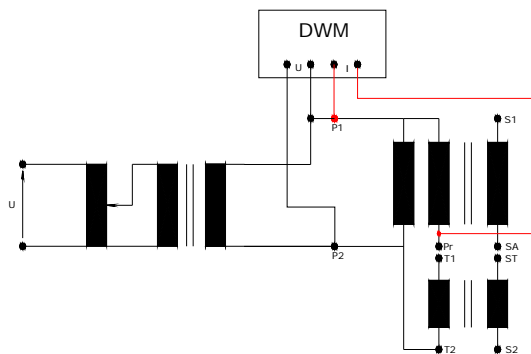


Figura 5: Circuito de verificación de flujo muestreado por los arrollamientos primarios.

De la medición 2 (figura 6) se determina la impedancia de dispersión total del núcleo principal.

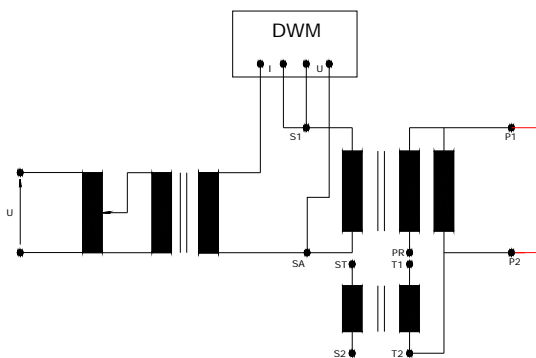


Figura 6: Circuito de ensayo para la determinación de la impedancia total de cortocircuito.

Los valores de la resistencia y de la reactancia de dispersión que comprende a los bobinados primario y secundario se determina por medio de las fórmulas siguientes:

$$r_{cc} = \frac{P}{I^2} = \frac{3,61 \text{ W}}{(5 \text{ A})^2} = 0,146 \Omega \quad (4)$$

$$x_{cc} = \frac{Q}{I^2} = \frac{1,50 \text{ VAr}}{(5 \text{ A})^2} = 0,06 \Omega \quad (5)$$

Refiriendo éstos valores al primario del transformador (relación de transformación 50), se tiene:

$$r_{cc} = 365 \Omega \text{ y } x_{cc} = 150 \Omega \quad (6)$$

Por último, de la tercera medición (figura 7), se obtiene la impedancia de dispersión del arrollamiento primario.

La tensión fue medida entre los terminales P1 – PR, y la corriente que pasa por S1-SA, por tal motivo, para poder adecuar los valores de cálculo, el valor de la corriente debe referirse al bobinado primario:

$$r_1 = \frac{U_{P1-PR}}{(I_{S1-SA})^2} = \frac{4,35 \text{ V}}{(0,100 \text{ A})^2} = 43,5 \Omega \quad (7)$$

El por qué se considera el valor de la impedancia como puramente resistiva puede determinarse de la Tabla 1. En ella se observa que la potencia reactiva es muy inferior a la activa, con lo que se infiere que la reactancia de dispersión total puede asignarse al bobinado secundario.

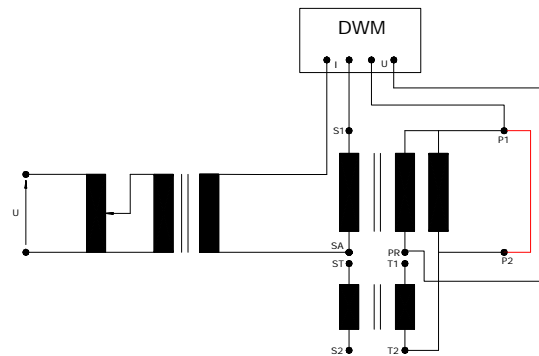


Figura 7:

De lo antes expuesto se tiene que las impedancias de los arrollamientos primario y secundario toman los valores siguientes referidos al primario del transformador:

$$Z_1 = 43,5 \Omega$$

$$Z_2 = 321,5 + j 150 \Omega$$

Para el transformador de compensación, la impedancia de cortocircuito fue obtenida midiendo la resistencias de los arrollamientos primario (Z_{TC1}) y secundario (Z_{TC2}) (se supuso que la dispersión en dichos arrollamientos es despreciable. La caída de tensión en el transformador es de unos 140 mV para la tensión nominal del transformador primario)

$$Z_{TC1} = 4,5 \Omega$$

$$Z_{TC2} = 0,0232 \Omega$$

La admitancias de vacío del transformador principal se relevaron (por medio de la curva de vacío) para tensiones de $0,2 U_n$ a $1,2 U_n$.

La Tabla 2 muestra las componentes de la admitancia de vacío del transformador principal para los valores de tensión indicados. Los valores de las admitancias están referidos al primario del transformador.

Tabla 2: Admitancia de vacío del transformador principal

U [V]	G [siemens]	B [siemens]	Y [siemens]
1000	5,82E-7	5,32E-7	7,89E-7
2000	5,65E-7	3,95E-7	6,90E-7
3000	5,72E-7	2,88E-7	6,40E-7
4000	5,77E-7	2,46E-7	6,27E-7
5000	5,80E-7	2,70E-7	6,40E-7
6000	6,09E-7	4,54E-7	7,59E-7

La admitancia de vacío del transformador de compensación fue determinada por lectura directa. Para ello se utilizó un puente RLC.

Tabla 3: Admitancia de vacío del transformador de compensación

G	B	Y
[siemens]	[siemens]	[siemens]
1,67-6	154,82E-6	154,83E-6

7.2 Determinación de los errores

Los errores presentados aquí corresponden a la condición de vacío.

7.2.1 Valores medidos

Los errores fueron determinados por un método de comparación con un transformador patrón, primero contra el transformador principal y luego contra el de dos etapas. La Tabla 4 muestra la diferencia entre los valores medidos, los que se deben corresponder con los valores calculados.

Tabla 4: Diferencia de valores medidos

$\%U_n$	$\varepsilon_{\text{fase}}$	$\varepsilon_{\text{cuadratura}}$
20	-2,97E-05	2,36E-05
40	-2,35E-05	1,59E-05
60	-2,69E-05	1,19E-05
80	-2,62E-05	1,02E-05
100	-2,40E-05	1,19E-05
120	-1,97E-05	1,52E-05

7.2.2 Valores calculados

Los valores calculados fueron determinados utilizando la expresión:

$$\bar{\varepsilon}_0 = -\bar{Z}_1 \bar{Y}_0 \quad (8)$$

siendo,

Z_1 es la impedancia de cortocircuito del arrollamiento primario del transformador principal,
 Y_0 es la admitancia de vacío del transformador principal.

En la Tabla 5 se indican los valores calculados.

Tabla 5: Valores calculados

$\%U_n$	$\varepsilon_{\text{fase}}$	$\varepsilon_{\text{cuadratura}}$
20	-2,53E-05	2,31E-05
40	-2,46E-05	1,72E-05
60	-2,49E-05	1,25E-05
80	-2,51E-05	1,07E-05
100	-2,52E-05	1,17E-05
120	-2,65E-05	1,97E-05

7.2.3 Diferencias halladas

En la Tabla 6 se indican las diferencias de los errores en fase y cuadratura determinados por medición y por cálculo.

Tabla 6: Diferencias

$\%U_n$	$\Delta\varepsilon_{\text{fase}}$	$\Delta\varepsilon_{\text{cuadratura}}$
20	4,37E-06	4,68E-07
40	1,10E-06	1,28E-06
60	2,00E-06	6,22E-07
80	1,11E-06	4,81E-07
100	1,25E-06	1,68E-07
120	6,78E-06	4,55E-06

8. CONCLUSIONES

Se construyó un transformador de tensión con errores calculables. Se estima que el error total es inferior a 5 ppm en módulo y 5 micro radianes en ángulo. Estas diferencias determinadas en la tabla 6 la podemos atribuir a las aproximaciones el modelo utilizado

AGRADECIMENTOS

A la empresa CONIMED S.A. por la construcción del transformador

REFERENCIAS

- [1] Classification and Recommended use of calibration methods for voltage transformers, IEEE C57.13, pp 41-46, 2008.
- [2] A. Braun, H. Richter, Intercomparison of the calibration of a voltage transformer, bcr information – Applied metrology - Final report. Luxembourg, 1985.
- [3] Circuitos Magnéticos y Transformadores – E.E. STAFF – MIT – Editorial Reverté. 1965.
- [4] A.H.M. Arnold. "Leakage phenomena in ring-type current transformer", J. Inst. Electr. Eng., Vol 74, pp 413-423, May 1934.
- [5] H. W. Price, C. Kent Duff. "Effects of magnetic leakage in current transformers", 1921. Bulletin - University of Toronto – School of Engineering Research.
- [6] Deacon. T. A. and Hill J. J. - Two stage inductive voltage dividers - Proc. IEE v.115 pp 888-92. 1968.
- [7] B. P. Kibble and G. H. Rayner, Coaxial AC Bridges, pp 100-101. Adam Hilger Ltd, Bristol.