

## COMPENSACION ELECTRONICA PARA TRANSFORMADORES DE MEDIDA DE POTENCIAL

Daniel Slomovitz

Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE), Laboratorio

Montevideo, Uruguay

Resumen - Se propone un método para disminuir los errores de relación y desfase en transformadores de medida de potencial, a través del uso de un circuito electrónico compensador. Este circuito conserva la aislación eléctrica entre el primario y el secundario, por lo cual el método puede ser aplicado a cualquier uso de transformadores de potencial. Incluso es apropiado, cuando existan grandes consumos de potencia en el secundario.

## INTRODUCCION

La tecnología actual utilizada en el diseño de transformadores de medida de potencial trata de lograr que las caídas de tensión producidas en las ramas de cortocircuito ( $V_1$  y  $V_2$ , figura 1) por las corrientes de carga y magnetizante, sean suficientemente bajas para que los errores no superen a los correspondientes a la clase de precisión que se pretende lograr [ 1 ]. Para obtener ésto es necesario usar grandes tamaños incrementando el costo y convirtiendo al equipo en un elemento difícil de incorporar a sistemas portátiles de medida.

En este trabajo se propone una solución alternativa en la cual las caídas de tensión  $V_1$  y  $V_2$  son compensadas mediante un generador de tensión electrónico.

## CIRCUITO DE COMPENSACION

En la figura 1 se detalla el modelo de transformador utilizado en este trabajo. Las ramas  $Z_1$  y  $Z_2$  son las impedancias de cortocircuito,  $Z_m$  es la impedancia magnetizante y  $Z_c$  la impedancia de carga. Se despreciaron las capacidades parásitas y otros efectos presentes en altas frecuencias, pues este trabajo está dedicado al uso de los transformadores en baja frecuencia, fundamentalmente a la frecuencia de la red.

Asumimos que  $Z_1$  y  $Z_2$  son resistivas - inductivas, por tanto :

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 + L_1 \cdot dI_1/dt \quad (1)$$

$$V_2 = R_2 \cdot I_2 + L_2 \cdot dI_2/dt \quad (2)$$

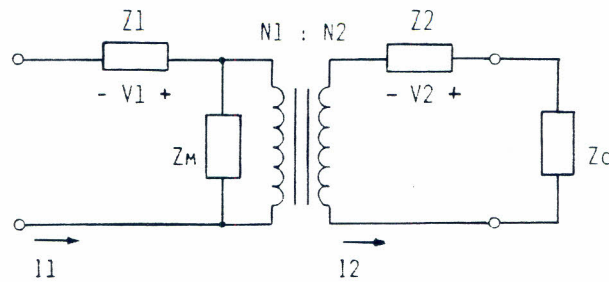


figura 1

Circuito equivalente del transformador de medida sin compensación.

$R_1$  y  $L_1$  son las componentes resistiva e inductiva de  $Z_1$ . Lo mismo para  $Z_2$ .

En la figura 2 se detalla el diagrama de bloques del circuito de compensación. Hay 2 sensores de corriente, uno en cada lado del transformador, y una fuente de tensión controlada por las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ . Dado que esta fuente está en el arrollado secundario, la tensión de compensación habrá que referirla a dicho arrollado. Por tanto el voltaje  $V_1'$  necesario para compensar la caída de tensión  $V_1$  deberá ser :

$$V_1' = V_1 \cdot N_2 / N_1 \quad (3)$$

Por lo tanto la tensión de compensación teórica  $V_c$  deberá ser:

$$V_c = V_1' + V_2 \quad (4)$$

Entonces:

$$V_c = (R_1 \cdot N_2 / N_1) \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 + (L_1 \cdot N_2 / N_1) \cdot dI_1 / dt + L_2 \cdot dI_2 / dt \quad (5)$$

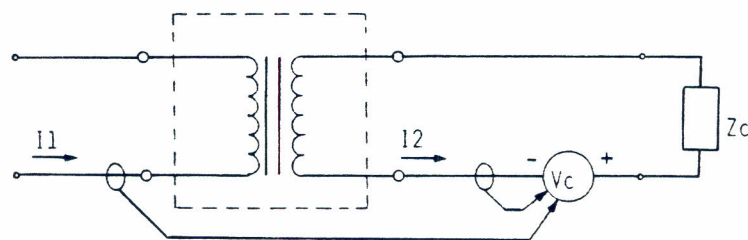


figura 2

Diagrama de bloques del circuito de compensación.

$V_c$  : fuente de tensión controlada por las corrientes  $I_1$  e  $I_2$ .

Desde el punto de vista teórico, la compensación mostrada en la figura 2 es total y tiene en cuenta tanto los efectos de las corrientes debidas a la carga  $Z_c$ , como las corrientes debidas a la magnetización del núcleo. Por otro lado quedan compensados tanto los errores de relación como los errores de desfase.

En la figura 3 se presenta un detalle del circuito compensador. T es un pequeño transformador auxiliar que suma las corrientes  $I_1$  e  $I_2$  con los coeficientes apropiados, mediante un adecuado diseño de sus relaciones de transformación. "A" es un amplificador operacional en la configuración de amplificador de transimpedancia, produciendo un voltaje de salida  $V_o$  proporcional a la corriente  $I_5$ .

La determinación de  $N_3/N_4$  y de los valores  $R$  y  $L$ , se ríse por las siguientes ecuaciones (ver apéndice):

$$\frac{N_3}{N_4} = \frac{N_2}{N_1} \frac{R_1}{R_2} \quad (6)$$

$$R = R_t \cdot \frac{N_5 / N_3}{N_2/N_1 + N_4/N_3} \quad (7)$$

$$L = L_t \cdot \frac{N_5 / N_3}{N_2/N_1 + N_4/N_3} \quad (8)$$

siendo  $R_t$  la resistencia de cortocircuito total y  $L_t$  la inductancia de fuga total, referidas al secundario del transformador de potencial. 0 sea:

$$R_t = R_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + R_2 \quad (9)$$

$$L_t = L_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + L_2 \quad (10)$$

Este análisis asume que  $R_1/R_2=L_1/L_2$ . Si esta condición no se cumple, entonces existiría un error que no podría compensarse. Su magnitud depende de la relación entre  $L_t$  y  $R_t$ . Este error es generalmente despreciable dado que en este tipo de transformadores  $R_t$  es usualmente mucho mayor que  $X_{L_t}$  (reactancia inductiva).

En el caso que  $X_{L_t}$  no fuera despreciable frente a  $R_t$ , la relación  $N_3/N_4$  debería determinarse como compromiso entre  $R_1/R_2$  y  $L_1/L_2$ . Otra forma de solucionar este problema consiste en duplicar el circuito compensador (integrado por T, A, R y L) compensando cada bobinado del transformador de potencial separadamente, sumando las salidas de ambos amplificadores. Esto conduce a una solución analíticamente exacta.

El transformador T añade caídas de tensión adicionales a las existentes en las ramas de cortocircuito del transformador de potencial,



umentando los errores. Sin embargo las caídas en  $N3$  y  $N4$  son mucho menores que  $V1$  y  $V2$  y más aún, ellas pueden compensarse por el propio circuito si  $R$  y  $L$  se eligen apropiadamente.

En cuanto al dimensionado del transformador  $T$  debe notarse que basta con que esté dentro de la clase 1 de precisión, para que los errores del transformador de potencial disminuyan en un orden de 100 veces.

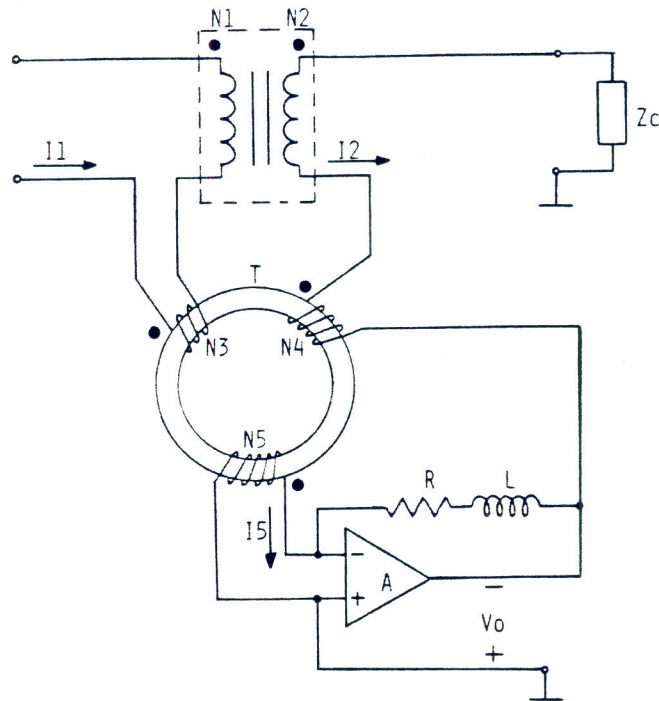


figura 3

Circuito detallado del compensador.

$T$  es un pequeño transformador de corriente auxiliar.

$A$  es un amplificador operacional.

#### ANALISIS EXPERIMENTAL

Se verificó el desarrollo anterior, mediante la compensación de un transformador de potencial comercial clase 1, relación 150V /120V, 10VA. Los errores medidos sobre el transformador sin modificación alguna se muestran en la tabla I. En la tabla II se muestran los errores obtenidos al utilizar la compensación propuesta. Para ambas tablas se usó como referencia de la relación de transformación, a la relación del número de vueltas  $N2/N1$ . En el transformador utilizado, dicha relación vale 0.80215. La diferencia entre este valor y el valor teórico: 0.8, se debe a que de esta manera el fabricante compensaba los errores con cargas de alto consumo.

Las tablas muestran los errores correspondientes a diferentes cargas conectadas al transformador. En un caso se usó OVA (circuito abierto) y en los restantes, cargas que consumen 10 VA a tensión nominal ( $V_n$ ), con factor de potencia inductivo 1 y 0.8 ( $\cos \text{FI}=1$  ;  $\cos \text{FI} = 0.8$ ).

De la comparación de ambas tablas surge que los errores disminuyen sustancialmente al utilizar la compensación propuesta. El error de relación posee variaciones de 0.6% en la Tabla I, mientras que en la tabla II el error está dentro de los errores del instrumental utilizado. Por otro lado los errores en desfase disminuyen alrededor de 10 veces.

CARGA	TENSION PRIMARIA (V)	ERROR DE RELACION (%)	ERROR ABSOLUTO EN DESFAJE (minuto)
OVA	60	-0.02	1.1
	100	-0.02	1.5
	130	-0.06	2.6
	150	-0.08	5.4
10VA @ $V_n$ $\cos \text{FI}=1$	60	-0.52	0.9
	100	-0.52	0.7
	130	-0.53	0.6
	150	-0.57	3.4
10VA @ $V_n$ $\cos \text{FI}=0.8$	60	-0.56	10
	100	-0.57	11
	130	-0.57	11
	150	-0.61	14

TABLA I

Errores del transformador de potencial sin compensación alguna.

CARGA	TENSION PRIMARIA (V)	ERROR DE RELACION (%)	ERROR ABSOLUTO EN DESFAJAJE (minuto)
0VA	60	0.00	0.0
	100	+0.01	0.0
	130	+0.01	0.1
	150	-0.01	0.3
10VA @ $V_n$ cos FI=1	60	0.00	0.2
	100	0.00	0.1
	130	0.00	0.1
	150	-0.01	0.3
10VA @ $V_n$ cos FI=0.8	60	0.00	0.3
	100	0.00	0.4
	130	0.00	0.5
	150	-0.01	0.7

TABLA II  
Errores del transformador de potencial con la compensación propuesta.

#### DETALLES DEL CIRCUITO

El transformador de potencial particular usado en este trabajo, posee  $R_1=5.259\text{ohm}$ ,  $R_2=3.515\text{ohm}$  y  $L_t=3.238\text{mH}$ . Se utilizaron valores de  $R=84\text{ohm}$  y  $L=40\text{mH}$  aproximadamente. El transformador auxiliar T se construyó en un núcleo toroidal de ferrite de 45mm de diámetro exterior, con  $N_3=6$  vueltas,  $N_4=5$  vueltas y  $N_5=120$  vueltas, quedando dentro de clase 1.

A los efectos de que la compensación no dependa de la temperatura ambiente, es necesario que R posea el mismo coeficiente de temperatura que el cobre de los arrollados del transformador. Para ello se incluyó un termistor PTC de coeficiente adecuado. La unión térmica entre el termistor y los arrollados no es necesaria, pues en general el calentamiento del transformador es despreciable.

En aplicaciones donde el consumo de la carga sea alto y la corriente magnetizante baja, es posible eliminar el arrollado 3 y medir sólo la corriente de salida mediante el arrollado 4. Esto es útil en transformadores de alta tensión con ambos polos aislados, donde la aislación del arrollado 3 puede constituir un inconveniente.

Asimismo sería posible prescindir del inductor L, si las resistencias de los arrollados fuesen mucho mayores que las reactancias de dispersión y si se estuviera dispuesto a admitir

errores mayores en desfase, dado que L influye marcadamente en dichos errores.

En lo referente al amplificador, cabe resaltar que la potencia y la tensión de salida, son muy reducidas ya que sólo debe compensar los errores. En general basta con un amplificador operacional integrado, más un transistor a la salida.

### CONCLUSIONES

Se presentó un método de compensación de los errores de relación y desfase en transformadores de medida de potencial, mediante la aplicación de un simple circuito electrónico. Mediante este método es posible utilizar transformadores más pequeños y económicos para cumplir con los requisitos de precisión y potencia de carga.

El método es de aplicación general y puede ser usado en todo tipo de transformadores de potencial usados en baja frecuencia. Con pequeños cambios es aplicable a transformadores con varios secundarios o con múltiples tomas en el primario.

### REFERENCIAS

[ 1 ] Settles J.L., Farber W.R., Conner E.E., "The analytical and graphical determination of complete potential transformer characteristics", AIEE Trans., vol 79 part III, pp 1213-1219, Feb. 1961.

### APENDICE

Del circuito de la figura 3 se concluye :

$$V_o = R \cdot I_5 + L \cdot dI_5/dt \quad (11)$$

Suponiendo T ideal :

$$I_5 = I_1 \cdot N_3/N_5 + I_2 \cdot N_4/N_5 \quad (12)$$

Entonces :

$$V_o = R(I_1 \cdot N_3/N_5 + I_2 \cdot N_4/N_5) + L[(N_3/N_5) \cdot dI_1/dt + (N_4/N_5) \cdot dI_2/dt] \quad (13)$$

El voltaje real  $V_o$  debe coincidir con el teórico  $V_c$ . Comparando (13) y (5) se concluye que debe verificarse el siguiente sistema de ecuaciones:



$$R1.N2/N1 = R.N3/N5 \quad (14)$$

$$R2 = R.N4/N5 \quad (15)$$

$$L1.N2/N1 = L.N3/N5 \quad (16)$$

$$L2 = L.N4/N5 \quad (17)$$

De (14) y (15) concluimos :

$$N3/N4 = (R1/R2).N2/N1 \quad (18)$$

Pero de (16) y (17):

$$N3/N4 = (L1/L2).N2/N1 \quad (19)$$

De (18) y (19) nos vemos forzados a admitir la hipótesis siguiente:

$$R1/R2 = L1/L2 \quad (20)$$

Finalmente :

$$R = \frac{Rt (N5/N3)}{N2/N1 + N4/N3} \quad (21)$$

$$L = \frac{Lt (N5/N3)}{N2/N1 + N4/N3} \quad (22)$$