



24 - 25

Setembro

1996

CURITIBA - PR

BRASIL

MEJORA EN LAS CARACTERISTICAS DE DIVISORES INDUCTIVOS MEDIANTE EL USO DE DISPOSITIVOS ELECTRONICOS

Daniel Slomovitz
UTE - LABORATORIO

Resumen: Se presenta un nuevo sistema de compensación electrónica para disminuir los errores de divisores inductivos y transformadores de medida de tensión. Un amplificador de corriente auxiliar reduce la corriente magnetizante, principal fuente de error en estos dispositivos, en baja frecuencia. Simultáneamente se eleva la impedancia de entrada. Este método permite la construcción de pequeños dispositivos, de poco peso y con muy bajos errores, sin que carguen los circuitos de entrada a los cuales se conectan.

Palabras claves: divisor inductivo, compensación, transformador de medida, errores.

1. INTRODUCCION

Son bien conocidas las aplicaciones de divisores inductivos de tensión alterna y transformadores de potencial de alta precisión, en las técnicas de mediciones. El uso más frecuente de estos equipos es sin carga, es decir con corriente de salida muy baja. Sin embargo, aún en este caso existen corrientes no deseadas por los arrollados. Esto se debe, en bajas frecuencias (frecuencia industrial), a la corriente necesaria para la magnetización del núcleo y para suministrar las pérdidas de energía en el hierro.

En frecuencias altas, la reactancia inductiva aumenta y el flujo magnético disminuye. Todo esto contribuye a que la corriente magnetizante sea baja. Pero por otra parte, cobran relevancia las corrientes producidas por capacidades parásitas. Todas las corrientes parásitas producen caídas de tensión en

las impedancias serie de los arrollados, lo cual se refleja como errores de los divisores.

Han sido propuestos múltiples métodos para lograr bajos errores en relación y desfase, aún para amplios rangos de variación de la tensión de entrada y de la frecuencia. Las técnicas convencionales utilizan dobles arrollados y doble núcleo magnético, de forma que un conjunto suministra la corriente magnetizante, disminuyendo sustancialmente la corriente circulante por el otro arrollado usado para la medida [1]. Esta técnica requiere de grandes y pesados núcleos y de arrollados especiales, lo cual implica altos costos e impide el uso en equipos portátiles pequeños. Por otro lado, la corriente total de entrada de estos dispositivos sigue siendo alta, debido a la corriente circulante por el arrollado magnetizante. Esto limita sus aplicaciones en casos que requieren alta impedancia de entrada.

Existen múltiples métodos propuestos de compensación electrónica para transformadores de medida. En [2] se propone un método que elimina los errores debidos a las caídas de tensión producidas por la corriente de carga. Sin embargo, no compensa los errores producidos por la corriente magnetizante, siendo éste el caso de los divisores inductivos. Anteriormente [3], hemos propuesto un método que compensa tanto los errores debidos a la corriente de carga, como a la corriente magnetizante. Este método fue propuesto para uso en transformadores de relación fija. Si bien es posible de aplicar a divisores de relación variable, es engorroso de usar dado que la compensación depende de la relación de división seleccionada. Esto implicaría cambiar valores de los componentes del circuito

compensador, para cada relación.

En [4] se propone un método que intenta disminuir la corriente magnetizante. Sin embargo, los circuitos propuestos no logran una compensación exacta, ni siquiera desde el punto de vista teórico. Por otro lado, ese método necesita amplificadores de alta potencia, aunque prácticamente toda ésta se disipa en un resistor interno, parte del sistema de realimentación. La reducción de los errores no es muy grande, aún usando amplificadores de relativa alta potencia. En el ejemplo mostrado por los autores, el transformador tiene las siguientes características: $N_1=1250$ espiras, área del núcleo 54 cm^2 , diámetro medio 14 cm , permeabilidad magnética relativa $100\,000$. El amplificador electrónico entrega 30 V con una corriente de 1 A . Aún con estas condiciones los errores se reducen solo unas 12 veces a 50 Hz .

2. METODO PROPUESTO

La Figura 1 muestra el principio de funcionamiento de la compensación propuesta. Este método utiliza un arrollado auxiliar (de N_a vueltas) a través del cual se hace pasar una corriente (I_a) producida por un amplificador electrónico. Esta corriente produce la casi totalidad de la excitación del núcleo, disminuyendo la corriente de entrada (I_1). Las únicas corrientes que circulan por los arrollados del transformador son I_1 e I_a . Por tanto, la fuerza magneto-motriz total (A) necesaria para el transformador, vale

$$A = N_1 I_1 - N_a I_a \quad (1)$$

La relación entre I_1 e I_a está dada por un amplificador de corriente de 2 etapas. La primer etapa produce una tensión proporcional a la corriente I_1 , mientras que la segunda está conectada como amplificador de transconductancia. Por lo tanto

$$I_a = -K I_1 \quad (2)$$

donde K es la ganancia del amplificador. Combinando con (1) queda

$$I_1 = A/[N_1(1 + K N_a/N_1)] \quad (3)$$

La fuerza magneto-motriz necesaria para el transformador sólo depende de la tensión aplicada y es independiente del circuito de compensación. Por lo tanto (3) muestra que la corriente I_1 se podría disminuir, en la medida que el factor $K N_a/N_1$ pudiera hacerse suficientemente grande. Esto tiene un límite práctico dado por la estabilidad del circuito. Sin embargo, con componentes comunes es posible

2

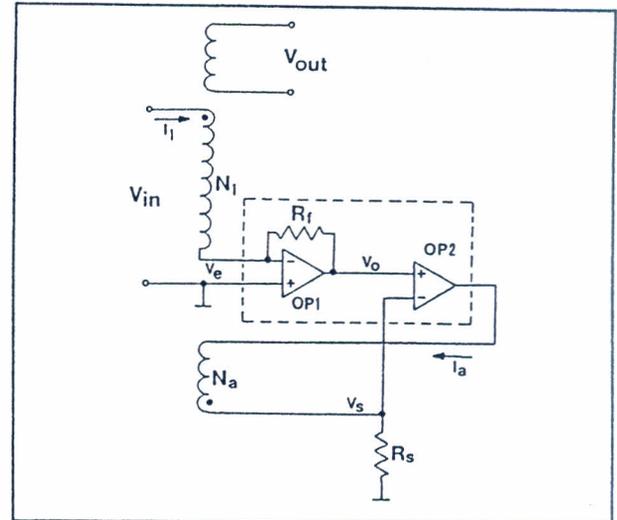


FIGURA 1

Diagrama del circuito de compensación propuesto

alcanzar valores de $K N_a/N_1$ del orden de 200 , reduciéndose la corriente magnetizante en la misma proporción. La potencia necesaria del amplificador electrónico es tan sólo la demandada por la excitación del núcleo de hierro (del orden de 0.5 VA para el ejemplo mostrado).

La impedancia total de entrada del divisor se ve incrementada en el mismo factor $K N_a/N_1$, dado que la corriente I_1 baja, prácticamente, en ese mismo valor.

3. ANALISIS DE ERRORES

Actualmente son de uso común y de bajo costo, amplificadores operacionales con ganancias en d.c. (A_0) de $2 \cdot 10^6$, producto de ganancia por ancho de banda de 8 MHz , ruido propio menor a $5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ y voltajes de offset menores a $10 \mu\text{V}$. Para el cálculo de los errores introducidos por el circuito electrónico (en función de la frecuencia), los operacionales pueden modelarse como pasabajos. La frecuencia de corte del operacional usado está alrededor de 8 Hz , y la ganancia disminuye a razón de 20 dB/octava .

$$A_v = A_0/(1+jw\tau) \quad (4)$$

donde A_v es la ganancia en lazo abierto, τ la constante de tiempo del filtro y w la frecuencia angular. La tensión V_s se diseña de forma que sea mucho menor que $V_{in} N_a/N_1$. Entonces la relación entre la

e I1 es

$$I_a R_s - V_{in} \frac{N_a}{N_1} \frac{1 + j\omega\tau}{A_o} = - \frac{R_f I_1}{1 + (1 + j\omega\tau)/A_o} \quad (5)$$

El transformador compuesto por los bobinados primario y auxiliar es modelado sólo por su impedancia de vacío Z_o (vista desde el primario), dado el bajo valor de I_1 . Se asume que la reactancia de vacío aumenta con la frecuencia y las pérdidas disminuyen, debido a la disminución del flujo de pico. Para este análisis se desprecia la corriente I_1 frente a la N_a/N_1 . Entonces, la fuerza magnetomotriz es $A = V_{in} N_1/Z_o$. Combinándola con (1), queda

$$V_{in} = -Z_o I_a N_a/N_1 \quad (6)$$

De (5) y (6), el coeficiente $K = -I_a/I_1$ puede ser calculado como

$$K = \frac{R_f}{R_s + Z_o (N_a/N_1)^2 (1 + j\omega\tau)/A_o} \frac{1}{1 + (1 + j\omega\tau)/A_o} \quad (7)$$

La ecuación (3) muestra que sólo el módulo de K es relevante para la compensación (suponiendo $K N_a/N_1 \gg 1$). Con los parámetros del prototipo ensayado ($|Z_o| = 18 \text{ k}\Omega @ 70 \text{ V}, 50 \text{ Hz}$) y a partir de (7) se concluye que la reducción de $|K|$, de su valor ideal, es menor que 0.01% a 50 Hz y 1% a 500 Hz. Aún a 5 kHz, el valor de $|K|$ se mantiene por encima del 50% de su valor máximo. Por otra parte a esta frecuencia ya inciden otros factores que predominan como fuentes de error.

En los amplificadores reales es necesario incorporar realimentaciones adicionales para lograr funcionamiento estable, y eventualmente bloqueo para la componente continua. Para cada caso deberá analizarse la relación particular entre K y w . Pequeños apartamientos de la relación ideal degrada la compensación, pero sólo ligeramente, dado que ésta es una fuente de error de segundo orden.

4. EVALUACION

Se construyó un divisor de 3 etapas, de acuerdo al método propuesto. Las principales características constructivas son:

Núcleo: toroidal de 6.6 cm de diámetro externo, 2.6 cm de altura y 3 cm² sección. Chapa tipo ORSI 97 ($\mu_{rel} = 40\,000$ aprox).

Arrollados: Primera etapa: 1000 espiras, en 10 secciones, tipo cordón, diámetro del alambre: 0.2 mm (igual para todas las etapas). Segunda etapa:

3

100 espiras, tercera: 10 espiras, en 10 secciones cada una.

Bobinado auxiliar: 113 espiras, directamente sobre el núcleo, 1 capa.

Se ensayó el comportamiento del divisor con y sin el circuito de compensación conectado. La Tabla 1 muestra la corriente primaria I_1 contra la tensión aplicada en la primer etapa (frecuencia: 50 Hz). La corriente fue medida en la entrada de alto potencial del arrollado.

La segunda columna, de la referida tabla, muestra los valores relevados con el compensador conectado. La tercera columna, muestra los valores de corriente suprimiendo el circuito compensador.

Al conectar dicho circuito, la corriente disminuye entre 150 y 200 veces.

TENSION APLICADA (V)	CORRIENTE CON COMPENSADOR (μA)	CORRIENTE SIN COMPENSADOR (mA)
5	3	0.6
10	5	0.9
20	8	1.4
40	17	2.5
70	24	3.8

TABLA 1

Corriente de entrada del divisor, en función de la tensión primaria aplicada. Segunda columna: compensador electrónico conectado. Tercera columna: compensador sin conectar.

La compensación electrónica se diseñó con una ganancia en corriente (K) de 2200. Esto da un factor: $K N_a/N_1 = 249$. En la realidad, la corriente disminuyó algo menos por los efectos de las capacidades parásitas en la primer etapa y entre la primera y la segunda. Todos los componentes activos del circuito electrónico, se limitan a 2 amplificadores operacionales y 2 pequeños transistores.

La Tabla 2 muestra el error medido, al variar la tensión entre 5 V y 70 V, con y sin el circuito de compensación conectado. La relación usada fue 0.0X. Los resultados indican el error relativo referido a la relación unitaria [5], en fase (e_p) y en cuadratura (e_q) con la tensión de entrada, y en módulo.

El circuito compensador disminuye el módulo del error en unas 170 veces. Este valor concuerda con lo esperado, teniendo en cuenta la incertidumbre de

4

TENSION APLICADA (V)	ERROR CON COMPENSADOR (ppm)			ERROR SIN COMPENSADOR (ppm)		
	e_p	e_q	módulo	e_p	e_q	módulo
5	0.4	-2.4	2.4	150	-350	380
10	0.4	-1.9	1.9	150	-270	310
20	0.4	-1.4	1.5	140	-190	240
40	0.3	-1.1	1.1	140	-130	190
70	0.1	-0.9	0.9	130	-110	170

TABLA 2

Error del divisor, en función de la tensión primaria aplicada, con y sin el compensador electrónico conectado.

las medidas (básicamente las del divisor patrón usado, de clase 1 ppm).

5. CONCLUSIONES

Mediante el método propuesto de compensación electrónica, se disminuye la corriente por el arrollado primario. Este efecto constituye la principal fuente de error que afecta a divisores inductivos y transformadores de medida, a frecuencia industrial.

En el prototipo ensayado, los errores se redujeron más de 150 veces y la impedancia de entrada se elevó a unos 3 M Ω . Esto permite diseñar componentes con pequeños núcleos para obtener transformadores y divisores de muy bajos errores y muy alta impedancia de entrada. Se abre, de esta forma, nuevos campos para su uso en aparatos portátiles de bajo peso y costo.

6. RECONOCIMIENTOS

Deseamos agradecer la colaboración prestada por el Sr. Leonardo Trigo con gran parte del trabajo experimental y por el Sr. Daniel Izquierdo en la construcción del divisor.

7. REFERENCIAS

- [1] T. Deacon, J. Hill, "Two-stage inductive voltage dividers," Proc. IEE, vol. 115, no. 6, pp. 888-892, June 1968.
- [2] P. Sankaran, P. Kanagasabapathy, V. Murti, "Electronic error-compensation of a voltage transformer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-28, no. 1, pp. 86-88, March 1979.

- [3] D. Slomovitz, "Electronic compensation of voltage transformer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. IM-37, no. 4, pp. 652-654, Dec. 1988.
- [4] M. D'Apuzzo, M. Savastano, "Simulation of electronically compensated voltage transformers," Proceeding of 3rd European Simulation Congress, pp. 645-9, Sept. 1989.
- [5] "Inductive voltage dividers," IEC Standard 618, 1978.