



SISTEMA DE ALTA PRECISION PARA LA MEDIDA DE LA POTENCIA Y EL FACTOR DE POTENCIA, BASADO EN UN SUMADOR ELECTRONICO

Daniel Slomovitz, Pablo Braga, Carlos Faverio

UTE LABORATORIO

Resumen. En general no se disponen en la región, de los medios para hacer posible la transferencia entre las medidas de potencia en corriente alterna y las de corriente continua. Como consecuencia se debe enviar al exterior periódicamente, costoso equipamiento, con todos los riesgos y pérdidas de tiempo que ello acarrea.

Este trabajo plantea un método original, a partir de ecuaciones conocidas, que permite realizar dicha transferencia utilizando voltímetros que respondan al verdadero valor eficaz.

El sistema propuesto es especialmente adecuado para aquellos laboratorios que ya tienen funcionando un sistema de calibración de instrumentos de corriente alterna.

El mismo fue evaluado por el PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt) de Alemania, las medidas realizadas confirmaron los resultados esperados.

Palabras clave: potencia, factor de potencia, patrón, voltímetro.

1. INTRODUCCION

La medida de potencia y energía es un tema de vital importancia para las compañías de electricidad. Tradicionalmente se ha usado y se seguirá usando, el clásico contador de inducción para medir la energía requerida por los pequeños consumidores. Sin embargo, cuando se trata de medir la energía intercambiada entre las empresas de energía de un mismo país o entre distintos países de una misma región, o aún el consumo de grandes clientes, se requieren precisiones mayores a las que se pueden alcanzar con el contador de inducción.

La moderna instrumentación electrónica ha permitido el desarrollo de medidores que poseen la precisión y confiabilidad que demandan estas aplicaciones. Es común hoy el uso de aparatos clase 0.2 para tales fines. Mantenerlos dentro de su clase requiere el uso de instrumentos con errores menores al 0,05%. Estos últimos a su vez deben ser calibrados periódicamente. La incertidumbre requerida para ello es del orden de 0,01%.

Medidas de potencia y energía con esta precisión no se realizan en todos los países, y cuando se realizan no siempre están referidas a los patrones primarios de continua. Estos últimos son el primer

eslabón de la cadena metrológica, contra los cuales en definitiva, se comparan todas las demás magnitudes eléctricas.

De manera que, o bien se disponen en el país de los medios para hacer esta transferencia o se recurre a laboratorios del exterior. Esta última alternativa implica el traslado de costoso equipamiento, con todos los riesgos y pérdidas de tiempo que esto significa.

En este trabajo se propone un sistema de calibración para patrones de medida de potencia, cuya precisión descansa exclusivamente en la de un voltímetro que responde al verdadero valor eficaz y en la exactitud con que se conoce el valor de una resistencia. Naturalmente, este voltímetro necesitará calibrarse a partir de los patrones primarios de continua para hacer que esta medida de potencia sea trazable a dichos patrones. Sin embargo es usual, que aún pequeños laboratorios tengan ya esa capacidad instalada.

Las ecuaciones que fundamentan este método de medida de potencia, son conocidas desde hace mucho tiempo [1] y se las ha empleado de diversas formas con el mismo fin. Es más, constituyen el principio de funcionamiento de algunos de los vatímetros más precisos existentes [2,3,4,5,6]. Sin embargo a diferencia de los anteriores, el sistema propuesto facilita enormemente la trazabilidad de las medidas de potencia con respecto a las de corriente continua. Esto es debido a que los integrantes del sistema responsables del error, se pueden calibrar independientemente a partir de los patrones primarios.

2. DESCRIPCION DEL METODO

El método de medida se basa en las siguientes ecuaciones:

$$\langle (X-Y)^2 \rangle = \langle X^2 \rangle + \langle Y^2 \rangle - 2\langle XY \rangle \quad (1)$$

$$\langle (X+Y)^2 \rangle = \langle X^2 \rangle + \langle Y^2 \rangle + 2\langle XY \rangle \quad (2)$$

que resultan de tomar el valor medio, $\langle \rangle$, a $(X-Y)^2$ y $(X+Y)^2$.

A partir de la ecuación (3), que define el verdadero valor eficaz de X, RMS (X):

$$\text{RMS}^2(X) = \langle X^2 \rangle \quad (3)$$

y de las ecuaciones (1) y (2), se sigue:

$$2\langle XY \rangle = \text{RMS}^2(X+Y) - \text{RMS}^2(X) - \text{RMS}^2(Y) \quad (4)$$

$$4\langle XY \rangle = \text{RMS}^2(X+Y) - \text{RMS}^2(X-Y) \quad (5)$$

siendo X e Y magnitudes proporcionales a la tensión y corriente de entrada:

$$X = v/A, Y = Ri/B \quad (6)$$

Definiendo

$$\begin{aligned} L1 &= \text{RMS}(X+Y), L2 = \text{RMS}(X-Y), \\ L3 &= \text{RMS}(X), L4 = \text{RMS}(Y) \end{aligned} \quad (7)$$

entonces, de la definición de potencia y de las ecuaciones (6), se llega a:

$$\text{Pot} = \langle v_i \rangle = \langle XY \rangle AB/R \quad (8)$$

usando las ecuaciones (4), (5), (7) y (8), tenemos dos alternativas para calcular la potencia:

$$\text{Pot} = (L1^2 - L3^2 - L4^2) AB / (2R) \quad (9)$$

$$\text{Pot} = (L1^2 - L2^2) AB / (4R) \quad (10)$$

El factor de potencia está definido por la ecuación:

$$\text{Facpot} = \text{Pot} / (\text{RMS}(v) \text{RMS}(i)) \quad (11)$$

con (9) y (10) se llega a:

$$\text{Facpot} = (L1^2 - L3^2 - L4^2) / (2L3L4) \quad (12)$$

$$\text{Facpot} = (L1^2 - L2^2) / (4L3L4) \quad (13)$$

Es interesante notar que estas dos últimas ecuaciones no dependen de A, B y R.

3. SISTEMA PROPUESTO

En la Fig. 1 se muestra el sistema propuesto. La tensión y la corriente, se obtienen a partir de dos fuentes de tensión alterna de gran estabilidad, un amplificador de transconductancia que se conecta a una de las fuentes y un desfaseador que permite variar el ángulo entre 0 y 360°.

La corriente i se hace pasar por el Shunt R, uno por cada rango (0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 A). Los valores de sus resistencias son tales que para las corrientes nominales, siempre tienen entre bornes aproximadamente 0.5 V. Estos shunts están diseñados para trabajar en continua y en alterna hasta 100 kHz.

El voltímetro en alterna debe medir verdaderos valores eficaces. En general usan métodos térmicos o muestrean la señal. En ambos casos, existen instrumentos comerciales con errores muy bajos. Este instrumento se comanda a través del bus IEEE 488.

Finalmente, tenemos el dispositivo que llamamos sumador. Este cambia su configuración a través de reed relés según mandato de la computadora, vía IEEE 488 y se encarga de presentar al voltímetro las señales v y Ri de entrada, X e Y proporcionales a éstas, y X+Y, X-Y.

La Fig. 2 muestra la implementación de este circuito. Los amplificadores operacionales de precisión usados, son de muy alta ganancia, muy bajo ruido y bajo offset.

Las resistencias son del tipo metal film, con muy buen comportamiento en alta frecuencia (muy pequeñas inductancias y capacidades parásitas).

Los reed relés tienen resistencias de contacto

menores a 0.3 Ω y muy estables. LL1 permite sumar un valor proporcional a v y LL2 y LL3 permiten sumar valores proporcionales a -Ri y Ri. El operacional OP1 actúa como buffer evitando el efecto de la variación de las resistencias de LL2 y LL3. Con LL1 esto no es necesario ya que su resistencia es despreciable frente al valor de R1. El resto de las llaves permiten medir directamente las señales de entrada v y Ri.

El programa controla la secuencia en que el voltímetro envía las lecturas y realiza los cálculos. Primero y luego del calentamiento necesario para alcanzar el equilibrio térmico, se calculan los coeficientes A y B (con las ecuaciones (6)), y se guardan en memoria. Luego con estos valores y las ecuaciones (9) o (10) se calcula la potencia. El factor de potencia se calcula a partir de las ecuaciones (12) o (13) en las cuales no aparecen A y B.

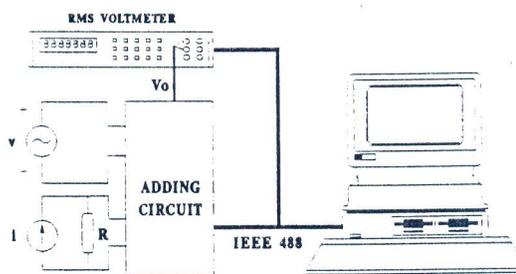


fig. 1

Quando se realizan medidas con factores de potencia cercanos a cero el programa usa las ecuaciones (10) y (13) para los cálculos ya que con éstas minimiza la influencia del error propio del voltímetro. Esto se ve claramente en el diagrama de la Fig. 3. Los vectores X+Y y X-Y tienen aproximadamente la misma magnitud, por lo cual el error del voltímetro afecta por igual a L1 y L2. Cuando se realiza la resta de estos valores en las ecuaciones, los errores se cancelan.

El cálculo de A y B funciona como una autocalibración que puede realizarse cada vez que se considere necesario, por ejemplo, luego de cambios en los valores de corriente o tensión.

Del circuito de la Fig. 2 se deduce:

$$A = R1/R3 \quad (14)$$

$$B = R2/R3 \quad (15)$$

Lo que se realiza durante la autocalibración es calcular el verdadero valor de estos coeficientes.

4. ANALISIS DE LOS ERRORES

Los errores se entienden relativos a la potencia aparente. Esta es la definición comúnmente usada cuando se trata de cuantificar el error de un vatímetro en todo el rango de variación del factor de potencia.

La primer fuente de error proviene de variaciones en la tensión y en la corriente durante el tiempo necesario para una medida. Estas fluctuaciones si bien son muy pequeñas para las fuentes usadas, igual provocan una variación de la lectura de potencia. Esta es menor a 5 ppm realizando un promedio móvil sobre las últimas tres lecturas y tomando unas 30 lecturas por punto. La deriva es menor a 5 ppm en 48h.

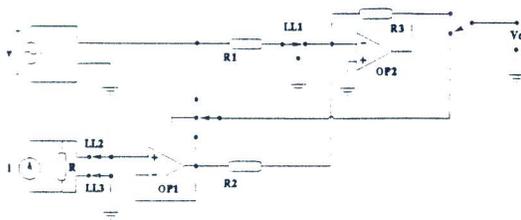


fig. 2

El error propio del voltímetro es la segunda fuente de error. Se han usado voltímetros FLUKE 8606 A y HP 3458 A. En el primero, el error básico es de 120 ppm. Sin embargo baja a 25 ppm dentro de las 24h siguientes a la calibración. Por otro lado, hemos determinado que su linealidad es muy buena, resultando las variaciones de su error relativo dentro de la zona útil de cada rango, menores a 10 ppm.

Para el HP se especifican errores de 100 ppm. Sin embargo, usando un programa de cálculo externo [7], es posible reducirlo por debajo de 10 ppm, siempre que las ondas sean sinusoidales y la frecuencia cercana a la de la red.

La excelente linealidad es importante para minimizar el error en el cálculo de los coeficientes A y B. Es fácil, a partir de (9) y (10), deducir el error que resulta de utilizar cada una de aquellas ecuaciones para calcular la potencia. Hacemos la hipótesis de que L3 es aproximadamente igual a L4. Llamando el al error relativo del voltímetro cuando mide L1, e2 al error cuando mide L2 y e3 cuando mide L3 o L4 y suponiendo formas de onda sinusoidales, se obtienen para cada uno de los dos métodos las siguientes expresiones para el error relativo a la potencia aparente:

$$E = 2(e1-e3)+2.e1.Facpot \quad (16)$$

$$E = e1-e2+(e1+e2).Facpot \quad (17)$$

Si la medida se realiza con factores de potencia cercanos a 1, la ecuación (16) da errores mayores que la (17). Por lo tanto, es preferible la última, donde para ambos métodos, el error relativo a la potencia aparente será el doble del error propio del voltímetro

Si la medida se realiza con factores de potencia cercanos a cero, también la ecuación (17)

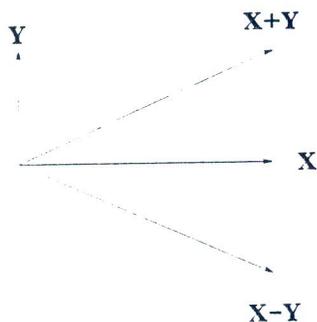


fig. 3

preferible. Como se ha mencionado antes, en esta situación conviene usar las ecuaciones (10) y (13). En este caso L1 y L2 son aproximadamente iguales y lo mismo sucederá con el y e2 independientemente de los errores de linealidad. De (17) se sigue que el error E será muy bajo.

Otras fuentes de error son los valores asignados al shunt R y a los coeficientes A y B. El primero es posible calcularlo con una incertidumbre menor a 10 ppm, y los coeficientes tienen dispersiones del orden de 1 ppm.

Es interesante notar que en la medida de factor de potencia (ver ecuaciones (12) y (13)), como se cancelan A, B y R desaparecen estas fuentes de error (salvo el pequeño desfase del resistor R, el cual puede ser descontado).

La última fuente de error considerada son los elementos parásitos del circuito. Estos introducen pequeños desfases a las señales de entrada, que se hacen notar en un aumento del error cuando se tienen cargas con bajos factores de potencia. La mejor manera de determinar la influencia de estos elementos es realizar una medida en condiciones de potencia nula, es decir con tensión y corriente en cuadratura. En estas condiciones la lectura obtenida, si es distinta de cero, es el error debido a los desfases. Para compensar este error se agrega un pequeño condensador en paralelo con R2. Su valor se ajusta para que la potencia que mide el sistema sea cero cuando la corriente y tensión están en cuadratura.

5. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

En el correr de 1992 el dispositivo sumador fue ensayado en el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) de Alemania. Durante una semana se realizaron un gran número de medidas utilizando voltímetros de distintos fabricantes. Los resultados fueron corregidos teniendo en cuenta los errores de los instrumentos utilizados.

Se ajustó el capacitor mencionado previamente, corrigiendo un desfase total de 30 μ rad. Según estimaciones teóricas, 10 μ rad son debidos al operacional que actúa como seguidor y 10 μ rad son producidos por el resistor de entrada de la rama de voltaje. Los restantes 10 μ rad no pudieron ser atribuidos a ninguna causa específica.

Las diferencias con respecto al patrón PTB no superaron las 30 ppm, en todo el rango de variación del factor de potencia.

Además de las medidas a 50 y 60 Hz, se realizaron medidas a 500 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz y 2000 Hz, en las cuales aparecieron diferencias importantes. No fue posible asignar errores a cada instrumento, dado que se trabajó con 2 patrones secundarios cuyas respuestas en frecuencia eran pobres.

6. CONCLUSIONES

Se propuso un sistema de calibración para patrones de medida de potencia, cuya precisión descansa exclusivamente en la de un voltímetro que responde al verdadero valor eficaz y en la exactitud con que se conoce el valor del shunt R.

A diferencia de otros métodos que usan el mismo principio, éste facilita enormemente la trazabilidad de las medidas de potencia con respecto a los patrones de corriente continua.

El sistema propuesto es una alternativa interesante para aquellos laboratorios que ya tienen montado un sistema de calibración de corriente alterna trazable a patrones de continua. Es usual que a tal efecto dispongan ya de los elementos que requiere este sistema.

Las medidas realizadas muestran diferencias

menores a 30 ppm con respecto al patrón del PTB. El método es promisorio, si tenemos en cuenta que los voltímetros de alterna están en constante evolución. Cada día son más precisos y más fácilmente calibrables. Ya existen en el mercado ejemplares que se ajustan en todos sus rangos y funciones desde una simple referencia de 10 V de tensión continua, con errores del orden de 10 ppm.

7. TRABAJOS FUTUROS

Se ha construido un nuevo dispositivo sumador idéntico al prototipo original, el cual se encuentra en el PTB para una evaluación más intensiva, durante largo tiempo.

Será estudiado el comportamiento del sistema con señales no sinusoidales. La medida de potencia en condiciones no sinusoidales y a factores de potencia cercanos a cero ha sido siempre un desafío. Esta es la situación cuando se miden las pérdidas en transformadores y máquinas eléctricas.

Para minimizar los errores se deben tener en cuenta los siguientes factores. El voltímetro debe mantener su precisión aún cuando la señal tenga un alto factor de cresta. El sumador debe estar diseñado para tener una respuesta plana sobre el rango de frecuencias ocupado por los armónicos relevantes de las señales y los desfases introducidos por los elementos parásitos deben ser minimizados y/o compensados.

Como estas condiciones se cumplen, es razonable esperar buenos resultados.

Referencias

- [1] G. Goffin, G. Marchal, "Etude théorique de l'emploi du thermocouple pour la mesure de précision de la puissance en courant alternatif". Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, Vol.20, pp. 595-600, 1946.
- [2] J.J Hill, "A precision thermo-electric wattmeter for power an audio frecuencies", IEEE Paper 246 1M, pp 61-68, 1958.
- [3] F. Bombi and D. Ciscato, "A New DC-AC Digital Power and Energy Meter", IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol IM-19, pp 57-61, 1970.
- [4] G. Schuster, "Thermal measurement of AC power in comparison with the electrodynamic method", IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol IM 25 pp, 529-533, 1976.
- [5] G. Shuster, "Thermal instruments for measurement of voltage, current, power and energy at power frecuencies" IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-29, pp 153-157, 1980.
- [6] L. Erard, R. Knosp, R. Soucek, "Improvement in the use of the thermal wattmeter principle: application to a broad-band device for nonsinusoidal waveform", IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-34, pp 375-380, 1987.
- [7] R.L Swerlein, "A 10 ppm accurate digital AC measurement algorithm", HP Co, 1991.