

Sistema de Medida de Potencia y Factor de Potencia Basado en Voltímetro de Verdadero Valor Eficaz

PABLO BRAGA, MEMBER, IEEE, Y DANIEL SLOMOVITZ, SENIOR MEMBER, IEEE

UTE-Laboratorio, Paraguay 2385, Montevideo, Uruguay

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 responden 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.

I. 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 del 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 conocen los valores de determinadas resistencias. 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 aun pequeños laboratorios, del tipo de los que existen en nuestros países 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.

II. 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, $RMS(X)$:

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

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

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

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

si X e Y son proporcionales a la tensión y corriente de entrada:

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

y

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

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

$$Pot = \langle vi \rangle = \langle XY \rangle AB/R \quad (8)$$

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

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

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

El factor de potencia está definido por la ecuación:

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

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

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

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

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

III. 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 (10 ppm en el corto plazo), un amplificador de transconductancia que se conecta a una de las fuentes y un desfasador que permite variar el ángulo entre 0 y 360°. Las dos fuentes se comandan desde la computadora a través del bus IEEE 488.

La corriente i se hace pasar por el shunt R, uno por cada rango (0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10A). 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 multímetro en alterna mide verdaderos valores eficaces usando un método térmico que le permite alta precisión (básicamente 120 ppm), en un amplio rango de frecuencias (40 Hz a 20 kHz). Este instrumento también se conecta al bus IEEE 488.

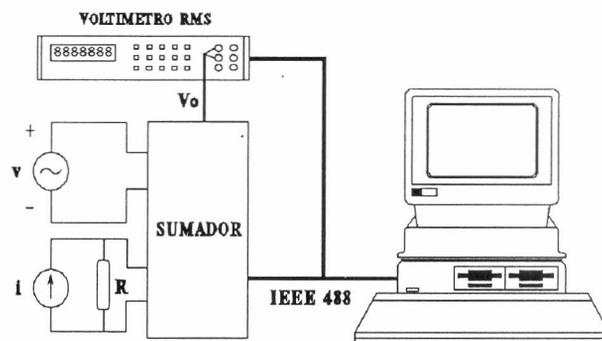


Fig. 1

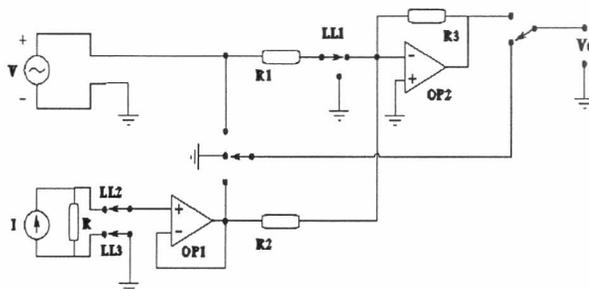


Fig. 2

Finalmente, tenemos el dispositivo que llamamos sumador. Este cambia su configuración a través de reed relés según mandato de la computadora, via IEEE 488 y se encarga de presentarle al multímetro 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 (OP27 de PMI), son de muy alta ganancia, muy bajo ruido y bajísimo 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 ohms y muy estables. LL1 permite sumar un valor proporcional a v y LL2 y LL3 permiten sumar valores proporcionales a $-R_i$ y R_i . 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 R_1 . El resto de las llaves permiten medir directamente las señales de entrada v y R_i .

El programa controla la secuencia en que el multímetro 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.

Cuando 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 multímetro. 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 multímetro afecta por igual a L1 y L2. Cuando se realiza la resta de estos valores en las ecuaciones, los errores se cancelan.

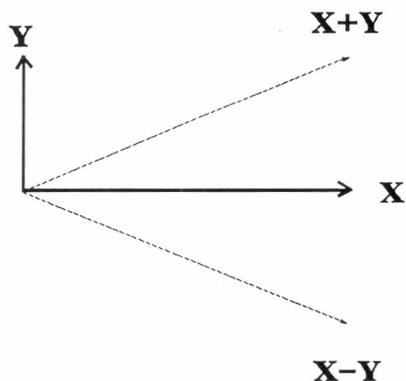


Fig. 3

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:

$$A = R_1/R_3 \quad (14)$$

$$B = R_2/R_3 \quad (15)$$

lo que se hace durante la autocalibración es calcular el verdadero valor de estos coeficientes.

IV. 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 en la lectura de potencia. Esta se ha bajado a 10 ppm realizando un promedio móvil sobre las últimas tres lecturas.

El error propio del voltímetro es la segunda fuente de error. Si bien su error básico es menor a 120 ppm, la variación del mismo dentro de las 24 horas siguientes a una calibración es menor a 25 ppm. 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.

El método seguido para calibrar este instrumento es el siguiente: primero se ajusta el valor nominal de un determinado rango y luego utilizando un divisor especialmente diseñado se calibran los demás rangos que interesan, de manera que las variaciones del error relativo entre lecturas realizadas en rangos distintos también sean menores a 10 ppm.

Con los medios que disponemos en el Laboratorio de UTE en la actualidad podemos asegurar entonces, que el error de este instrumento en todos los rangos, una vez calibrado, será menor a 100 ppm y las variaciones del mismo, menores a 10 ppm, aun cuando se consideren puntos de distintos rangos. Esta 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. Usamos la hipótesis que L3 es aproximadamente igual a L4. Llamando e1 al error relativo del voltímetro cuando mide L1, e2 al error cuando mide L2 y e3 al error 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:

$$E = 2(e1 - e3) + 2 \cdot e1 \cdot \text{Facpot} \quad (16)$$

$$E = e1 - e2 + (e1 + e2) \cdot \text{Facpot} \quad (17)$$

Suponiendo válida la hipótesis de muy buena linealidad del voltímetro, los errores e1, e2, y e3 serán aproximadamente iguales. Si la medida se realiza con factores de potencia cercanos a 1 el primer sumando será despreciable frente al segundo en las dos ecuaciones. Por lo tanto, para ambos métodos, el error relativo a la potencia aparente será menor al doble del error propio del voltímetro.

Si la medida se realiza con factores de potencia cercanos a cero, el primer sumando no es despreciable y se debe considerar. 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 e1 y e2 independientemente de los errores de linealidad. De (17) se sigue que el error E será mucho menor que e1 y e2.

Otras fuentes de error son los valores asignados al shunt R y a los coeficientes A y B. Al primero lo conocemos con una incertidumbre de 15 ppm, y a los coeficientes los calculamos con un error menor a 10 ppm.

Es interesante notar que en la medida de factor de potencia (ver ecuaciones (12) y (13)), desaparecen estas fuentes de error, por no depender de A, B y R.

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 debida al error introducido por los desfases.

V. MEDIDAS REALIZADAS

En las medidas realizadas se ha usado un instrumento que mide potencia y energía, con un error máximo de 500 ppm y del cual se posee un certificado de calibración reciente del INTI (Argentina), que se ha usado a efectos de la comparación. Las diferencias que surgen de comparar el sistema propuesto con este patrón, teniendo en cuenta el certificado del INTI, son del orden de las 100 ppm.

El certificado mencionado no cubre los puntos con factores de potencias menores a 0.5. A efectos de determinar que sucede a bajos factores de potencia se desarrolló un dispositivo que permite hacer un contraste en condiciones de potencia nula, con un error menor a las 20 ppm. Este dispositivo se construyó a partir de un transformador de corriente compensado electrónicamente y de un condensador de muy bajas pérdidas. El error obtenido en este caso también fue del orden de las 100 ppm.

VI. 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 conocen los valores de determinadas resistencias.

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.

Los resultados experimentales usando los medios descriptos muestran que los errores, en una hipótesis de peor caso, son menores a las 200 ppm. Es necesaria una comparación con patrones de mayor precisión para acotar más estas incertidumbres.

El método es promisorio, si tenemos en

cuenta que los voltímetros de alterna de última generación han bajado los errores a 20 ppm.

VII. TRABAJOS FUTUROS

Se realizará una evaluación del sistema propuesto en conjunto con el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) en Braunschweig, Alemania. Se probará con voltímetros de distintos fabricantes. Se utilizarán señales sinusoidales y también señales no sinusoidales con un alto contenido armónico. En estas últimas condiciones podemos esperar muy buenos resultados si los voltímetros de verdadero valor eficaz a utilizar mantienen su precisión sobre todo el ancho de banda de las señales de entrada.

REFERENCIAS

[1] G. Goffin, G. Marchal, "Etude théorique de l'emploi du thermo-couple 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", IEE Paper 2461M, pp. 61-68, 1958.

[3] F. Bombi, 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. Schuster, "Thermal instrument 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.