Técnicas de medida de la capacitancia

Por Bill Coley y Conrad Proft

Bill Coley es Licenciado en BSEE y MSEE especializado en diseños de circuitos analógicos. Pasó seis años diseñando circuitos de acondicionamiento de señal y de conversores A/D para DMM de alto rendimiento, entre los que se incluyen el Agilent 34410A y 34411A. Además, fue el diseñador del algoritmo de medición de la capacitancia en dichos instrumentos. Su nombre aparece en varias patentes relacionadas con su experiencia a la hora de diseñar multímetros digitales. Bill trabaja actualmente para Linear Technology como ingeniero de diseño de CI analógicos

Conrad Proft es Licenciado en BSEE y MSEE. Conrad lleva trabajando para HP/Agilent desde hace 27 años y ha pasado casi la mitad de ese tiempo alternando entre los departamentos de I+D y marketing, especializándose en la instrumentación de uso generalizado para medidas en bancos de prueba y sistemas. Desde ingeniería de aplicaciones y documentación técnica de marketing hasta alcanzar el puesto de director de proyectos de I+D en generadores de funciones y multímetros digitales.

Los resultados obtenidos al medir un mismo condensador utilizando un multímetro portátil de 100 dólares pueden diferir de manera substancial de si se mide con un medidor LCR de 10.000 dólares. Asimismo, al medir dicho condensador utilizando dos multímetros portátiles diferentes, los resultados obtenidos podrían mostrar distintos porcentajes en función del material dieléctrico del condensador y del algoritmo de medida utilizado. Para conocer los factores que contribuyen a esta variación y, más exactamente, para saber cuándo es realmente necesario actualizar su equipo a ese medidor LCR de 10.000 dólares, resulta absolutamente esencial entender los principios que rigen los algoritmos de medida utilizados para efectuar medidas de capacitancia.

La mejor manera de comprender el análisis de las medidas de capacitancia es examinando el modo utilizado para medir las resistencias. Cuando un multímetro digital mide una resistencia, utiliza una fuente de corriente constante de un valor conocido para generar voltaje a través de la resistencia que se está probando. El resultado obtenido es un voltaje de CC interpretado fácilmente como un valor de resistencia por el firmware del ADC (conversor analógico digital) y de procesamiento de señal. De esta manera se entienden y se evitan fácilmente los valores de error que se producen específicamente al medir resistencias. Las frecuencias electromagnéticas (EMF) térmicas, la resistencia del cableado, las corrientes de fuga y el autocalentamiento son algunas de las causas más importantes de error y pueden ser controladas mediante técnicas de medida apropiadas y funciones incorporadas en los multímetros, tales como el factor de compensación para corregir la desviación. Incluso en instrumentos de precio módico, las medidas de resistencia proporcionan una precisión superior a las 30 ppm y pueden efectuarse sin demasiados problemas. No obstante, efectuar una medida lo suficientemente precisa de otro tipo de componente pasivo, como por ejemplo un condensador, es un tema completamente diferente.

Este documento describe varias técnicas de medida de la capacitancia y proporciona un estudio comparativo sobre la eficacia de la precisión de cada una.

Cómo conseguir medidas de capacitancia de gran precisión

La manera obvia de transferir el principio de medida utilizado para las resistencias a los condensadores es estimulando el condensador bajo prueba mediante una fuente de alimentación de CA. En medidores LCR de alto rendimiento, la técnica utilizada para averiguar el valor de un condensador es precisamente esa. Para empezar se hace pasar una señal de CA de una frecuencia conocida a través de una resistencia interna de poco valor y del condensador bajo prueba cuando ambos están instalados en serie. La corriente de CA que fluye por el condensador debe también pasar por la resistencia, generando un voltaje de CA a través de la misma. La magnitud y fase de este voltaje pueden medirse y compararse a la señal original de CA, lo que permite calcular la capacitancia.

Técnicas como esta medida en el dominio de la frecuencia pueden resultar muy precisas y proporcionar información sobre parámetros adicionales, tales como el factor de disipación. Sin embargo, los instrumentos capaces de implementar estas técnicas se utilizan especialmente para medir exclusivamente redes pasivas y tienen un coste superior a los 3.500 dólares.

Hay más instrumentos para usos más generalizados que están restringidos por unos costes que no les permiten incluir una fuente de señal de CA, aunque siguen contando con una función para medir capacitancias. El modo que emplean para efectuar tales medida es usar la misma fuente de CC utilizada para medir resistencias.

Medidas de la capacitancia a precios módicos

Como se ha explicado anteriormente, los multímetros digitales incluyen una fuente de corriente interna bastante precisa que se utiliza para generar voltaje de CC a través de una resistencia. Esta misma fuente de corriente de precisión puede utilizarse igualmente para generar voltaje a través de un condensador. Un supuesto condensador cargado por una supuesta fuente de corriente constante generará una rampa que se ajustará a la ecuación siguiente:

$$I = C \cdot \frac{dV}{dt}$$

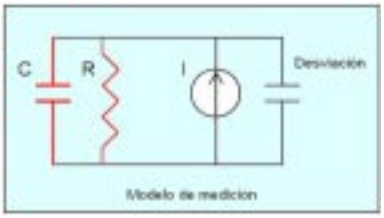
Por lo tanto, será posible calcular el valor de la capacitancia *C* en el dominio del tiempo aplicando una fuente de corriente constante y observando la velocidad de cambio del voltaje que pasa a través del condensador. Muchos multímetros económicos, tanto portátiles como de bancos de prueba, efectúan medidas de la capacitancia asumiendo que tanto la fuente de corriente como el condensador son idóneos.

Los condensadores idóneos no existen. Los condensadores poseen características tan poco idóneas como su absorción dieléctrica, valor de fuga, factor de disipación y resistencia equivalente en serie (ESR). Estos valores pueden suponer errores importantes en la técnica de medida en el dominio del tiempo descrita anteriormente. Por lo tanto, la mayoría de los instrumentos de bajo coste capaces de medir capacitancias incluyen notas de aviso que

indican que sus «especificaciones sólo son aplicables a condensadores de película». Los condensadores de película, tales como los que incorporan dieléctricos de poliéster y polipropileno, poseen unos valores de pérdidas tan bajos que esta técnica en el dominio del tiempo puede proporcionar resultados de una exactitud de hasta el 1%. No obstante, los errores producidos por los dieléctricos que no son del tipo película no requieren necesariamente la utilización de un medidor LCR de alto rendimiento. Recientemente se han introducido otras técnicas en los multímetros de bancos de prueba que logran reducir el error producido por los dieléctricos que no son del tipo película sin tener que asumir los costes de un medidor LCR.

Mejores medidas de la capacitancia a precios módicos

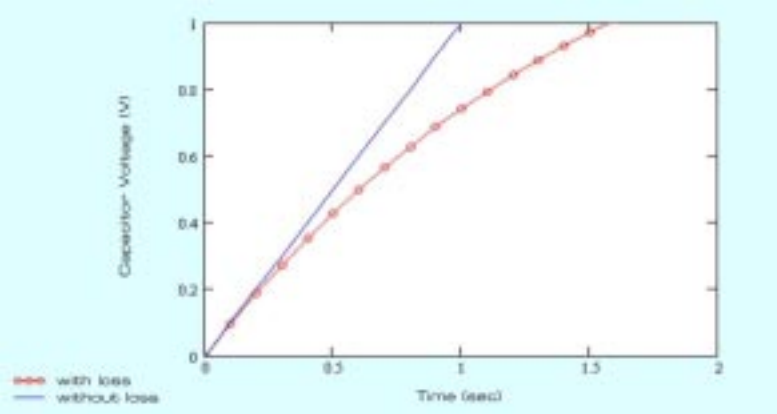
Los valores de pérdida de un condensador cargado con una fuente de CC pueden representarse de una manera óptima como si se tratara de una resistencia en paralelo. Dicha representación se muestra a continuación en la figura 1.



Una fuente de corriente constante conectada a un circuito paralelo de RC proporciona una curva gráfica del voltaje que cambia en el dominio del tiempo y que está representada por la fórmula:

$$v(t) = IR\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

Se asume que no existe voltaje inicial que fluye por el condensador. En esta ecuación, τ es la constante de tiempo que equivale a $R * C$,



mientras que I es el valor de la fuente de corriente constante. Tanto esta curva como la representación gráfica de la línea recta idónea pueden verse en la figura 2. Observe que la resistencia en paralelo tiende a curvar la línea recta de forma descendente debido a un factor exponencial. El área existente entre la línea recta y la curva se debe al valor de pérdida que provoca errores de medida. Esta ecuación posee unas características transcendentales que hacen que sea bastante difícil de resolver sin usar una técnica iterativa.

La derivada de esta ecuación,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I}{C}\left(e^{-t/\tau}\right)$$

puede resolverse de manera analítica. Si se conociese la constante de tiempo de RC "τ", podría calcularse el valor de la capacitancia C sustituyéndolo en esta ecuación de manera similar al método utilizado para el algoritmo de la capacitancia en el dominio del tiempo y sin que existiese rechazo de pérdida. La mejora esencial de la medida estriba por lo tanto en hallar la magnitud de la constante de tiempo de RC "τ".

Para calcular la constante de tiempo de RC, se descarga primero el condensador bajo prueba conectando una resistencia en paralelo o invirtiendo la polaridad de la fuente de corriente. A continuación, la corriente constante vuelve a ACTIVARSE y se toman lecturas a alta velocidad utilizando el ADC del multímetro. Seguidamente, se efectúa un ajuste exponencial en estas lecturas y, utilizando las lecturas propiamente dichas y el gradiente de la línea existente entre lecturas adyacentes, puede calcularse con éxito la constante de tiempo de RC.

Este algoritmo requiere varios requisitos rigurosos que no lo hace adecuado para cualquier multímetro. Lo primero y más importante es que el ADC incluido en el multímetro digital debe realizar un muestreo lo suficientemente rápido como para poder obtener puntos múltiples en la rampa de carga del condensador bajo prueba, sin introducir ruido de importancia en la medida. En segundo lugar, la fuente de corriente constante del multímetro no debe tener un funcionamiento erróneo, como por ejemplo producir residuos térmicos al encenderse. En tercer lugar, se deberá calibrar la diferencia entre la capacitancia interna del multímetro y la capacitancia del cableado de las sondas. Para ello bastará con utilizar una función «matemática que se iguala a cero» (Math Null) que permita restar la lectura actual de todas las lecturas subsiguientes. Finalmente, la capacitancia interna del multímetro deberá tener un factor de calidad relativamente alto para evitar que se introduzcan errores debidos a su propia constante de tiempo de RC. Si se cumplen todos estos requisitos, se logrará mejorar de

manera substancial la precisión de las lecturas. La medida de la capacitancia realizada por el Agilent 34410A se basa en un método muy similar al que se ha descrito anteriormente.

El método de medida previamente descrito requiere una fuente de corriente unipolar, ya que es posible utilizar una resistencia interna para descargar el condensador bajo prueba. Un método diferente de rechazo de pérdidas puede utilizarse efectuando una inversión mínima adicional en la fuente de corriente. Si existe disponible una fuente de corriente de precisión capaz al mismo tiempo de absorber y generar corriente, será posible generar una señal de CA de onda cuadrada invirtiendo su polaridad en un intervalo de tiempo predeterminado. Esta fuente de CA generará un voltaje con una forma de onda triangular cuando esté conectada a un condensador. Si el condensador desarrolla pérdidas, los gradientes de la onda triangular incluirán valores exponenciales (como se indica en la figura 2). Estos valores exponenciales cambian la magnitud de los armónicos en el espectro de frecuencia de la forma de onda del voltaje. Si se examinan los armónicos, es posible eliminar los valores de pérdida. El multímetro de National Instruments NI 4072 utiliza un método similar al indicado, en el que una Transformada Rápida de Fourier (FFT) se utiliza para determinar el espectro de frecuencia, comparándose los primeros y terceros armónicos para eliminar los valores de pérdida.

Errores en las medidas de capacitancia en función del tiempo

Habría que destacar una par de temas específicos con respecto a la ejecución de medidas de capacitancia en función del tiempo. El primero es que el valor de la capacitancia puede cambiar de manera substancial dependiendo de la frecuencia. Los medidores LCR, tales como el Agilent 4263B, tienen la capacidad de medir capacitancias en frecuencias múltiples utilizando una fuente interna de CA variable. En el caso de un condensador electrolítico de aluminio, la capacitancia puede llegar a variar en algunos porcentajes entre las frecuencias de 100 Hz y 1 kHz. Un tipo de algoritmo menos costoso suele funcionar a una frecuencia única y, por lo tanto, no proporciona información complementaria sobre el rendimiento a frecuencias más altas. Aunque las medidas obtenidas con multímetros pueden no ser del todo incorrectas, diferirán de aquellas obtenidas con un medidor LCR debido simplemente a la diferencia existente en la frecuencia de medida.

Otro comportamiento poco idóneo de los condensadores que puede inducir a una interpretación incorrecta de los resultados obtenidos mediante medidas de bajo coste es la resistencia equivalente en serie del condensador o ESR. Supongamos de momento que se utiliza una corriente positiva para cargar el condensador bajo prueba durante el ciclo de medidas. Si se utiliza una resistencia conectada entre el condensador y masa para descargar el condensador y prepararlo para el siguiente ciclo de medida, el menor voltaje posible en el condensador será de 0 V. Debido a que la corriente constante genera una rampa del voltaje en el condensador, la media del voltaje obtenido en los ciclos múltiples de medida será superior a 0 V. Este valor de polarización de la CC no produce errores importantes en el caso de condensadores de película y cerámicos. Sin embargo, en condensadores electrolíticos de aluminio, puede tener un efecto importante en el resultado obtenido. Esto se debe a que la ESR cambia en una proporción alineal con respecto a la polarización de la CC.

La manera simple de solucionar este problema es manteniendo la polarización de la CC en el condensador al mínimo valor posible. Esto se consigue utilizando una fuente de CA, descargando voltajes inferiores a 0 V, o reduciendo la amplitud de la variación de voltaje en el condensador. Cualquiera de estas técnicas puede proporcionar resultados precisos.

En algunos casos puede necesitarse el valor del condensador al que se ha aplicado una polarización de CC si se va a utilizar el condensador en un circuito por el que se implemente una polarización de CC durante su funcionamiento normal, por ejemplo al desacoplar la fuente de alimentación. Los medidores que utilizan una fuente de CA, como por ejemplo los medidores LCR, suelen proporcionar una opción de polarización de CC para medir dicho valor en estas condiciones.

Este análisis ha demostrado que existen numerosas características a tener en cuenta a la hora de medir el valor de un condensador. Cuando se trata de solucionar problemas generales en bancos de pruebas o de medir condensadores de película de alta calidad, la simple y económica técnica en función del tiempo incorporada en los multímetros de uso generalizado es más que suficiente. Para aquellas medidas que requieren una precisión extremadamente alta, además de medidas de parámetros adicionales, un medidor LCR de alto rendimiento será sin lugar a dudas el instrumento a elegir. No obstante, según puede deducirse de las explicaciones proporcionadas anteriormente, existe un término medio entre estas dos opciones capaces de reducir los valores de pérdida con métodos relativamente económicos. Es posible que estos métodos no permitan calcular características tales como el factor de disipación, pero conseguirán mejorar la precisión de las medidas en condensadores de una calidad más baja.