

Fuentes de alta tensión de bajo costo

Este artículo describe dos fuentes de alimentación de alta tensión que pueden ser construidas a bajo costo y que, además, son compactas y fácilmente transportables. Están especialmente pensadas para experimentación general y para efectuar demostraciones de efectos electrostáticos tales como viento iónico, tubos de descarga, lifters, motores y péndulos electrostáticos, tubo de crookes, repulsión/atracción, interacción entre láseres, descargas electrostáticas, etc.

Luis M. Buresti
lmb.tech.consultancy@gmail.com



Figura 1. Trayectoria de una partícula de polvo. Fotografía de una descarga eléctrica realizada durante uno de los ensayos de la fuente de ocho etapas. El potencial aplicado es de, aproximadamente, treinta kilovolts con un resistor limitador de corriente de cien megaohms. Los electrodos tipo aguja están separados unos veinticinco milímetros y la nube de polvo se generó con talco de cosmética. El tiempo de exposición fue de un octavo de segundo en modo manual.

Multiplicador de tensión tipo Cockroft-Walton cuarenta kilovolts, ocho etapas

Arreglo clásico de media onda implementado con diodos de capacidad nominal de trescientos miliamperes por dieciséis kilovolts (BY-16) que admiten una corriente de surge de treinta amperes. El elevado valor de la corriente de pico es muy conveniente para minimizar las posibilidades de falla catastrófica de algún diodo cuando se generan arcos sin limitación de corriente.

Los capacitores empleados son de tipo cerámico de 6,8 nanofaradios por diez kilovolts. En cada posición se han montado dos de estos capacitores en paralelo (obteniéndose, por lo tanto, "C" de 13,6 nanofaradios) con el objetivo de reducir la impedancia total del circuito.

La salida nominal de esta fuente es de cuarenta kilovolts y, debido a que hay ocho capacitores en cada columna, se tiene una caída de tensión de cinco kilovolts por capacitor. Este valor es un cincuenta por ciento del máximo admitido, situación que reduce significativamente la probabilidad de falla por pérdida de aislación de algún capacitor.

URL estable: <https://www.editores.com.ar/node/8544>

Se instalaron terminales laterales de salida en las etapas dos, cuatro, seis y ocho con el objetivo de tener máxima versatilidad de opciones de tensiones de salida

Se instalaron terminales laterales de salida en las etapas dos, cuatro, seis y ocho con el objetivo de tener máxima versatilidad de opciones de tensiones de salida. Estos terminales están fabricados con cobre y terminación redondeada para minimizar el efecto corona, y además se han construido capuchones de polipropileno para cubrir los terminales que no están en servicio.

El inversor empleado es de "calidad comercial" (Amazon.de), admite tensiones de entrada entre ocho y veinticuatro volts y opera a una frecuen-

cia nominal de veinticuatro kilohertz. Este módulo de bajo costo tiene un rendimiento muy aceptable, pero su salida está lejos de ser una onda senoidal pura, lo que dificulta la realización de algunas mediciones precisas, como se verá más adelante.

La máxima corriente de alimentación admitida del módulo inversor es de dos amperes, lo que equivale a una corriente de salida de aproximadamente quinientos microamperes a la máxima tensión de operación de la fuente.

Debido a que el módulo inversor no cuenta con protección por sobret temperatura, durante el uso normal de esta fuente es muy conveniente monitorear permanentemente el valor de la corriente de alimentación ya que, si se supera el máximo admitido por unos pocos minutos, puede ser víctima de una falla catastrófica.

La construcción se realizó por soldadura directa entre los componentes

La construcción se realizó por soldadura directa entre los componentes, y el conjunto fue montado en una bandeja plástica de 240 por 75 por 28 milímetros y luego aislado con resina epoxi cristal con una altura de aproximadamente quince milímetros.

Es interesante destacar que podría evitarse el uso de la resina epoxi ya que esta construcción respeta las distancias mínimas de aislación en aire para que no se produzcan arcos directos, inclusive a la máxima tensión de operación. Pero en la práctica, el uso de la resina reduce casi totalmente las pérdidas por efecto corona en los conductores, con lo cual se incrementa sensiblemente la eficiencia de la fuente.

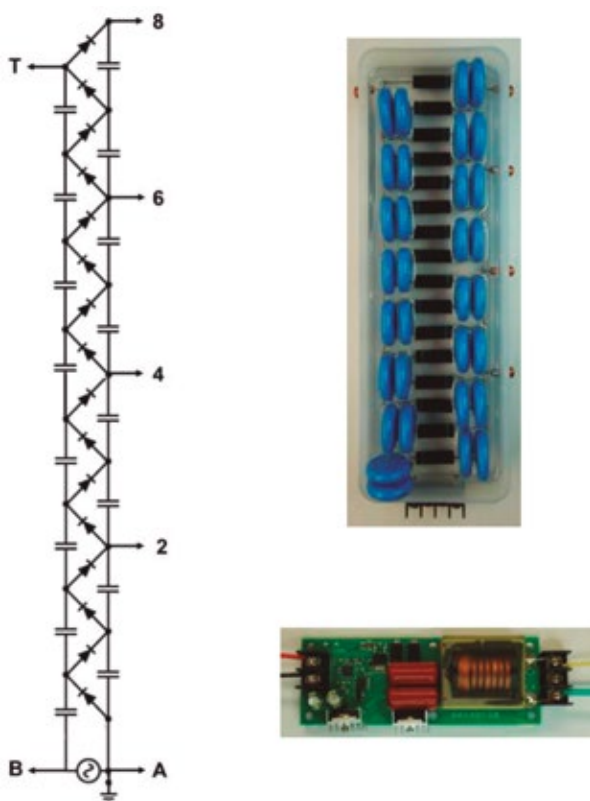


Figura 2. Multiplicador de tensión tipo Cockcroft-Walton cuarenta kilovolts, ocho etapas

| V _{supply} | I _{supply} | Etapa | | | |
|---------------------|---------------------|-------|--------|------|------|
| | | Dos | Cuatro | Seis | Ocho |
| 8 | 110 | 3,6 | 7,1 | 10,7 | 13,8 |
| 12 | 140 | 5,4 | 10,6 | 15,7 | 20,5 |
| 16 | 190 | 7 | 13,7 | 20,5 | 26,9 |
| 24 | 260 | 10,2 | 20 | 29,7 | 38,8 |

Tabla 1.

En la tabla 1, se presentan los valores de tensión de salida en función de las tensiones de alimentación al módulo inversor. Las mediciones consignadas fueron realizadas con un instrumento Fluke 289 equipado con una punta de medición de alta tensión modelo Fluke 80K-40.

Como se dijo anteriormente, uno de los objetivos de esta construcción es la transportabilidad y, por lo tanto, en la práctica el inversor de esta fuente se alimenta desde un pack cuádruple de baterías de ion-litio 18650, por lo que la tensión máxima de alimentación está limitada a unos dieciséis volts.

Detección de fallas

Los multiplicadores de tensión tipo Cockroft-Walton tienen una estructura muy sencilla pero, debido a que muchas veces operan al límite de los valores admitidos por los componentes, son susceptibles de fallar con cierta facilidad.

Entre las fallas más frecuentes se encuentra la pérdida de aislación de alguno de los capacitores, pero también puede ocurrir que se quemé algún diodo.

En esta construcción se ha introducido un terminal adicional (identificado como "T" en el circuito anterior) y, por lo tanto, es posible medir con facilidad tanto los valores de capacitancia total entre los puntos B y T como entre los puntos A y 8.

Es posible medir con facilidad tanto los valores de capacitancia total entre los puntos B y T como entre los puntos A y 8

En la práctica, estas mediciones se realizan con instrumentos que muestrean a baja tensión, pero una lectura satisfactoria del valor de estas capacitancias totales brinda buenos indicios del correcto funcionamiento de cada columna de capacitores.

Otro ensayo de rutina que se puede efectuar es la medición de la caída de tensión en los diodos. Para realizar este ensayo, basta con inyectar un potencial positivo en el terminal A y, mediante una resistencia limitadora, verificar la correspondiente circulación de corriente.

En base a las hojas de datos de los diodos BY-16 se tiene que la caída de tensión nominal por diodo es de aproximadamente quince volts, lo que implica que el potencial mínimo para realizar este ensayo debe ser de unos 240 volts en corriente continua, aunque en la práctica es conveniente utilizar una tensión no menor a quinientos.

Impedancia de la fuente

Es importante conocer el valor de la impedancia de la fuente para poder estimar la tensión real de salida en condiciones bajo carga cuando no se dispone de un instrumento de medición adecuado.

Hay que tener presente que la tensión de salida media real de un multiplicador de tensión (o sea, la que se puede medir con un instrumento convencional) va a estar afectada tanto por la "caída de tensión óhmica" producida por la circulación de la corriente de salida como así también por efecto del *ripple*.

Tanto en el libro *High Voltage Engineering*, de E. Kuffel, W. Zaengl y J. Kuffel, (Editorial Newness, segunda edición, 2000, pág. 18), como en el artículo "Improvement in the Modelling of a Half-Wave Cockroft-Walton Voltage Multiplier" de C. Maennel, (*Review of Scientific Instruments*, 84, 2013, Fórmula 6) se desarrolla detenidamente la teoría de funcionamiento de los multiplicadores de tensión de media onda y se consignan las siguientes expresiones:

- » (1) $V_{out} = 2 n V_p$
- » (2) $Z_{vm} = A/(FC)$
- » (3) $A = 2/3 n^3 + 1/2 n^2 + 1/3 n$

En donde " V_{out} " es la tensión de salida máxima teórica del circuito multiplicador; " V_p ", la tensión de pico de salida del inversor; " n ", la cantidad de etapas (dos diodos y dos capacitores es una etapa); " Z_{vm} ", la impedancia total del multiplicador de tensión (ohms); " A ", el factor dependiente de la configuración del circuito; " F ", la frecuencia del módulo inversor (hertz), y " C ", el valor del capacitor empleado (faradio).

Como se puede apreciar a partir de la expresión (3), el factor A se convierte rápidamente en un número muy grande con un número creciente de etapas y, por lo tanto, influye marcadamente en el resultado de la impedancia del multiplicador de tensión.

El factor A se convierte rápidamente en un número muy grande con un número creciente de etapas

Es importante destacar que en el desarrollo de la fórmula de cálculo del factor A se realizan una serie de suposiciones y simplificaciones y, por lo tanto, diversos autores (libro *Physik der TeilchenBeschLeunger und IonenOptik*, de F. Hinterberger, Springer, 1997, Capítulo 2) llegan a resultados diferentes para este mismo término.

Considerando el punto anterior, pareció conveniente realizar alguna medición práctica del valor real de la impedancia del multiplicador de tensión para determinar el grado de coincidencia con los valores teóricos.

Una de las suposiciones básicas que realizan todos los autores en el desarrollo de la expresión anterior es una alimentación perfectamente senoidal al multiplicador de tensión, condición que no se verifica con el uso del inversor usado en esta construcción. Por lo tanto, para verificar el valor de impedancia se empleó un simple trans-

formador elevador de tensión de 220 a mil volts de alterna, operando a la frecuencia de línea de cincuenta hertz. La tensión de entrada fue mantenida relativamente constante con la ayuda de un transformador variable (variac).

Existen varios métodos para efectuar mediciones de altas impedancias, en este caso se eligió uno que prescinde del valor de la tensión de entrada al multiplicador y solo se basa en la relación entre dos tensiones de salida.

El método empleado utiliza dos cargas resistivas, siendo R_1 mayor a R_2 , lo que resulta en dos tensiones de salida que verifican V_1 mayor a V_2 .

Para los ensayos se utilizaron resistores especiales para alta tensión cuyos valores son: R_1 , mil, y R_2 , 285,7 megaohms.

» (4) $\alpha = V_2/V_1$

En la expresión (4), el término " α " puede ser considerado como la relación de atenuación de las tensiones de salida del multiplicador por incremento de la carga, o sea siempre se va a verificar como menor a uno. Por otro lado, planteando las dos condiciones de divisores de tensión que se generan con las cargas R_1 y R_2 , se llega rápidamente a la siguiente expresión:

» (5) $Z_{vm} = [(1 - \alpha) R_1 R_2] / [(\alpha R_1 - R_2)]$

Para el cálculo práctico de Z_{vm} se realizaron múltiples mediciones de V_1 y V_2 para cada una de las etapas calculadas con la consiguiente promediación de los valores resultantes de α .

| Etapa | Z_{vm} |
|--------|----------|
| Dos | 10,6 MΩ |
| Cuatro | 70,8 MΩ |
| Seis | 222 MΩ |
| Ocho | 511,1 MΩ |

Tabla 2. Impedancia medida

En la tabla 2, se consignan los valores obtenidos para las impedancias del multiplicador de tensión, valores que se ajustan con una tolerancia de aproximadamente cinco por ciento a los resultados que se obtienen con las fórmulas (2) y (3). El valor de 511,1 mehaohms puede parecer exorbitante si se lo compara con los valores equivalentes de una fuente de alimentación “normal”, pero no hay que olvidar que esta medición fue realizada a una frecuencia de cincuenta hertz.

Si se da por buena la relación de proporcionalidad inversa con la frecuencia según la expresión (2), entonces cuando se utiliza el módulo inversor seleccionado que opera a veinticuatro kilohertz este valor de impedancia se reduce unas 480 veces (24.000/50) a “apenas” 1,1 megaohm. Este valor de Z_{vm} todavía podría parecer elevado, pero en realidad es extremadamente “decente” para una fuente de estas características.

Para ponerlo en perspectiva, debemos recordar que la capacidad máxima de salida de corriente es de aproximadamente quinientos microamperes y con este valor de Z_{vm} se tendría una caída de tensión de unos 550 volts (Ley de Ohm, 1,1 megaohm por quinientos microamperes) lo que representa solo un 1,4 por ciento de la tensión máxima de salida de este multiplicador.

Conclusiones

El costo total de los materiales necesarios para construir la fuente de ocho etapas y cuarenta kilovolts se ubica por debajo de los 140 dólares y, por lo tanto, se puede afirmar que esta unidad tiene una excelente relación rendimiento/precio.

Además, por sus reducidas dimensiones y por el hecho de poder ser alimentada fácilmente con

baterías recargables es fácilmente transportable, lo que representa un valor agregado para su uso en demostraciones educativas.

El hecho de poder ser alimentada por baterías tiene una ventaja adicional

El hecho de poder ser alimentada por baterías tiene una ventaja adicional: no es necesario conectar el terminal A a la tierra de seguridad eléctrica, situación que reduce enormemente la posibilidad de que el operador reciba un shock eléctrico. Esto, claro está, si se respeta el conocido consejo de Nikola Tesla cuando se trabaja con alta tensión: “Mantener siempre una mano en un bolsillo”.

Claramente el eslabón más débil de esta cadena es el módulo inversor pero, una vez más, si se considera su costo (menor a veinticinco dólares) y sus prestaciones reales, se llega a una relación calidad/precio bastante satisfactoria.

Multiplicador de tensión de onda completa veinte kilovolts, cuatro etapas

Esta fuente de alta tensión con multiplicador de onda completa guarda muchas similitudes constructivas y dimensionales con la fuente descrita en el punto anterior.

En esta unidad también se han empleado los diodos BY-16, pero en este caso los capacitores cerámicos utilizados tienen un valor de 4,7 nanofaradios por diez kilovolts.

Se mantuvo una caída de tensión máxima de cinco kilovolts por capacitor a los efectos de minimizar la posibilidad de fallas por “pinchadura” de la aislación de algún capacitor.

A fin de tener un circuito de onda completa, se hace necesario que el transformador de salida del módulo inversor tenga punto medio, circunstancia que limitó severamente las opciones disponibles para este componente fundamental.

En esta construcción se empleó un módulo inversor de diseño muy simple que admite una tensión máxima de alimentación de doce volts y genera, en teoría, una salida de aproximadamente dos kilovolts.

La elección de módulo inversor estuvo condicionada por la disponibilidad de transformadores adicionales

La elección de módulo inversor estuvo condicionada por la disponibilidad de transformadores adicionales para permitir realizar el arreglo que se muestra en la figura 3. Este módulo inversor tiene un diseño electrónico extremadamente sencillo, lo cual genera algunas características muy poco deseables: la frecuencia varía, casi erráticamente, entre cincuenta y cien kilohertz dependiendo del estado de carga e incluso de la tensión de alimentación.

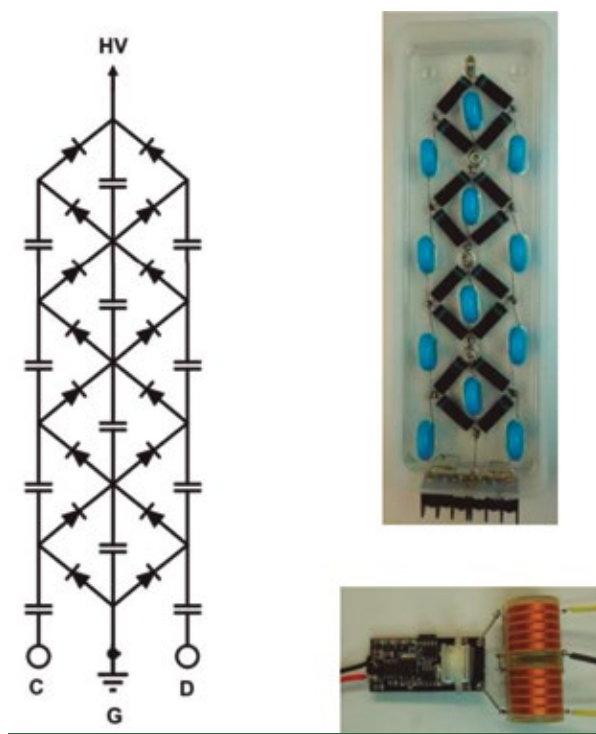


Figura 3. Multiplicador de tensión de onda completa veinte kilovolts, cuatro etapas

| Etapa | V_{Supply} | I_{Supply} | Tensión de salida |
|-------|--------------|--------------|-------------------|
| 1 | 8 | 630 | 4,9 |
| | 12 | 1.030 | 6,3 |
| 2 | 8 | 650 | 8,5 |
| | 12 | 1.050 | 11,8 |
| 3 | 8 | 680 | 10,6 |
| | 12 | 1.100 | 16 |
| 4 | 8 | 720 | 12,9 |
| | 12 | 1.150 | 18,5 |

Tabla 3. Tensión de salida
 $R_{Load} = 1.000 M\Omega$

En la tabla 3, se consignan las tensiones de salida posibles en cada una de las etapas y para cada opción de alimentación. Notar que, en el caso de esta fuente, la tensión máxima de alimentación está limitada a doce volts debido a las características del módulo inversor.

La máxima corriente de alimentación del inversor es de dos amperes, aunque este valor es algo "mentiroso" ya que a esa corriente se ha notado calentamiento excesivo; de hecho, se tuvo que improvisar un disipador de calor para mitigar esta circunstancia.

Considerando ese límite de corriente de alimentación y la menor eficiencia de este módulo, se puede estimar que la corriente máxima posible de salida es de unos 250 microamperes, a la máxima tensión de operación.

Impedancia de la fuente

En el caso de multiplicadores de tensión de onda completa, la expresión general de cálculo (2) sigue siendo válida, pero en este caso el factor de arquitectura de circuito se reduce sensiblemente según la siguiente fórmula (según el artículo "A Cascaded Three-Phase Symmetrical Multistage Voltage Multiplier", de Shahid Iqbal et al., J-Inst Institute of Physics and SISSA, 2006, página 3):

$$\gg (6) A = (n3/18) + (n2/12) + (n/18)$$

A los efectos de hacer una simple comparación, se puede mencionar que para un multiplicador convencional de tensión de cuatro etapas se obtiene un A de 52; mientras que para uno de onda completa resulta 5,1 o sea casi un noventa por ciento menos.

Para un multiplicador convencional de tensión de cuatro etapas se obtiene un A de 52; mientras que para uno de onda completa resulta 5,1 o sea casi un noventa por ciento menos

Es entonces que considerando un valor de capacitancia de 4,7 nanofaradios, una frecuencia mínima de operación de cincuenta kilohertz y un multiplicador de tensión de onda completa de cuatro etapas, se puede calcular Z_{vm} de 3,5 kilohms, indudablemente un valor sensiblemente menor que el que se había determinado para el caso de la fuente anterior.

Para esta fuente basada en multiplicador de tensión de onda completa no se hizo un intento para la determinación experimental de Z_{vm} debido a dos razones: a) como se mencionó en varias ocasiones, el módulo inversor tiene un comportamiento algo errático y se observan fuertes variaciones de frecuencia en función del estado de carga o de la tensión de alimentación, sumado al hecho que la forma de onda resultante se aparta muchísimo de una senoidal pura, y b) debido a que no hay disponible un transformador de media tensión con punto medio, que es absolutamente necesario para poder realizar un ensayo que brinde resultados confiables.

Conclusiones

A partir de los pocos ensayos efectivos que se pudieron realizar con esta fuente, se puede afirmar categóricamente que un multiplicador de tensión de onda completa tiene un desempeño mucho mejor que su contraparte de media onda, pero es más voluminoso y presenta algunos in-

convenientes para implementar un esquema de pruebas en caso de falla.

Adicionalmente al punto anterior, se debe intentar mejorar la selección del módulo inversor, ya que el que está actualmente disponible tiene serias limitaciones en cuanto a su rango de funcionamiento y, además, es muy poco repetitivo en sus resultados.

Dicho esto, se puede afirmar que este módulo debe ser clasificado como "pobre" en base a su relación calidad/precio, a pesar de que su costo de compra es exiguo (menor a diez dólares).

Palabras finales

Con posterioridad a la redacción de este artículo fueron continuados algunos ensayos y, a los efectos de lograr una mejora del módulo inversor empleado en la fuente de onda completa (veinte kilovolts, cuatro etapas), se decidió cambiar el transformador de salida del inversor Sai Dian 12/24 volts por el transformador de alta frecuencia con punto medio. Con este cambio se logró una importante mejora en la estabilidad, rendimiento y rango de operación de esta fuente. ■■