

## Máster en Transformación Energética Power Electronics

# Máquinas eléctricas y sistemas de alta tensión en convertidores

### Práctica: Generación Alta Tensión

José Giménez Llanos  
Álvaro Navarro Jorquera



# Índice

1. Desarrollo de la propuesta	2
Referencias	7

## Índice de figuras

1. Esquema con los multiplicadores necesarios . . . . .	2
2. Esquema para los cálculos del circuito de medida . . . . .	5
3. Circuito final . . . . .	6

## 1. Desarrollo de la propuesta

Como ya se ha mencionado vamos a diseñar un circuito basado en multiplicadores de tensión o duplicadores de Greinacher para conseguir a la salida los 3kV especificados.

En primer lugar, vamos a calcular cuántas celdas duplicadoras son necesarias en el diseño para obtener los 3kV a la salida. Para ello hay que tener en cuenta que el condensador de salida de cada celda duplicadora se carga a una tensión igual al doble de la tensión de pico de la fuente, por lo que al poner varias celdas en serie, la tensión entre el terminal positivo del último condensador y la referencia (terminal negativo de la fuente) se irá duplicando. Por tanto, el cálculo queda de la siguiente forma:

$$n^{\circ} \text{ duplicadores} = \frac{3000 V}{220 \cdot \sqrt{2} \cdot 2} = 4,821 \quad (1)$$

Por tanto, con cinco duplicadores de tensión podemos obtener los 3kV de continua a partir de la fuente de  $220 V_{rms}$ .

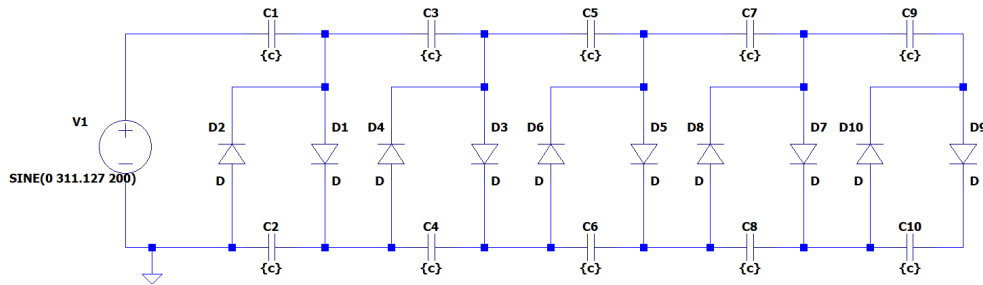


Figura 1: Esquema con los multiplicadores necesarios

Con este esquema, idealmente y sin carga tendremos a la salida la siguiente tensión:

$$V = 5 \cdot 2 \cdot 220 \cdot \sqrt{2} = 3111,27 V \quad (2)$$

Por otro lado, la corriente de salida del circuito multiplicador tiene que ser aproximadamente de 5 mA. Para conseguir esta corriente de salida tenemos que calcular una carga que se conecte a la salida del multiplicador y que consuma esa corriente, ya que el multiplicador aislado, una vez se han cargado todos los condensadores, no consume ninguna corriente. La carga se puede calcular fácilmente mediante la Ley de Ohm:

$$V = R \cdot I \rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{5 \cdot 2 \cdot 220 \cdot \sqrt{2}}{0,005} = 622254 \Omega \quad (3)$$

Este consumo de corriente provoca que los condensadores se descarguen más rápidamente, aumentando el rizado y provocando una caída de tensión final, por lo que hay que emplear unos condensadores con una capacidad lo suficientemente elevada para minimizar el rizado y la caída de tensión.

Como hemos mencionado en las especificaciones, el rizado máximo debe ser de un  $\pm 20\%$ . En este caso realizaremos el diseño para tener un rizado de pico a pico de aproximadamente 10V, que sería un rizado de aproximadamente  $\pm 8\%$ . Para el cálculo del rizado vamos a comenzar calculándolo en el supuesto de que solo tuviésemos una celda duplicadora. Si llamamos  $t_1$  al tiempo en el que conduce el diodo que carga el condensador en cada ciclo y  $t_2$  al tiempo en el que no conduce el diodo, es decir, el tiempo de descarga del condensador en cada ciclo, podemos expresar la corriente que el condensador aporta a la carga R de la siguiente forma (llamamos q a la carga transferida en cada ciclo):

$$I = \frac{dq}{dt} \approx \frac{q}{t_2} \quad (4)$$

Como pasado el transitorio el tiempo  $t_1$  es mucho menor que  $t_2$  podemos aproximar  $t_2$  de la siguiente forma:

$$t_2 \approx \frac{1}{f} \quad (5)$$

Por otro lado, sabemos que el rizado de tensión en un condensador en función de la carga transferida en un ciclo es el siguiente:

$$\delta V = \frac{q}{C_2} \quad (6)$$

Por tanto, combinando las tres ecuaciones anteriores obtenemos la siguiente ecuación:

$$\delta V = \frac{I}{f \cdot C_2} \quad (7)$$

No obstante, en una celda duplicadora, la carga primero se transfiere del condensador  $C_1$  al condensador  $C_2$ , por lo que el rizado de pico a pico total a la salida de una sola celda duplicadora será el siguiente:

$$\delta V = \frac{I}{fC_1} + \frac{2I}{fC_2} = \frac{I}{f} \left[ \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right] \quad (8)$$

Extrapolando este resultado a nuestro ejercicio y considerando todos los condensadores iguales con una capacidad C, el rizado de pico a pico queda de la siguiente

forma:

$$\delta V = \frac{I}{fC} [1 + 2 + 3 + 4 + 5] = \frac{I}{fC} \cdot 15 \quad (9)$$

Por tanto, para obtener un rizado pico a pico de 10V, la capacidad de los condensadores debe ser la siguiente:

$$C = \frac{I}{\delta V \cdot f} \cdot 15 = \frac{0,005}{10 \cdot 50} \cdot 15 = 150 \mu F \quad (10)$$

El cálculo anterior se ha realizado para una frecuencia de 50 Hz porque es más restrictivo, ya que a menor frecuencia mayor rizado. Podemos comprobar el rizado de pico a pico que se obtendrá con ese condensador a 200 Hz:

$$\delta V = \frac{I}{fC} \cdot 15 = \frac{0,005}{200 \cdot 150 \mu F} \cdot 15 = 2,5 V \quad (11)$$

Por otro lado, podemos calcular la caída de tensión que va a provocar una carga con ese consumo de corriente. A partir de la expresión obtenida en la referencia [1]:

$$V_{\text{drop}} = \frac{I}{fC} \left( \frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad (12)$$

En la ecuación anterior, n es el número de celdas duplicadoras por lo que sustituyendo datos a 50 Hz la caída del voltaje final es la siguiente:

$$V_{\text{drop}} = \frac{0,005}{50 \cdot 150 \mu F} \left( \frac{2 \cdot 5^3}{3} + \frac{5^2}{2} - \frac{5}{6} \right) = 63,33 V \quad (13)$$

Por tanto, el voltaje medio de salida que obtendremos con esa carga a 50 Hz será el siguiente:

$$V = 5 \cdot 2 \cdot 220 \cdot \sqrt{2} - V_{\text{drop}} = 3047,93 V \quad (14)$$

Por otro lado, a 200 Hz la tensión final será la siguiente:

$$V_{\text{drop}} = \frac{0,005}{200 \cdot 150 \mu F} \left( \frac{2 \cdot 5^3}{3} + \frac{5^2}{2} - \frac{5}{6} \right) = 15,83 V \quad (15)$$

$$V = 5 \cdot 2 \cdot 220 \cdot \sqrt{2} - 15,83 = 3095,44 V \quad (16)$$

Por último, nos faltaría el diseño del circuito de medida. Este circuito de medida estará basado en un divisor de tensión para poder medir con un fondo de escala de 200V. Además, la resistencia del sensor es de 10 MΩ.

El circuito de medida para el que se van a realizar los cálculos es por tanto el siguiente:

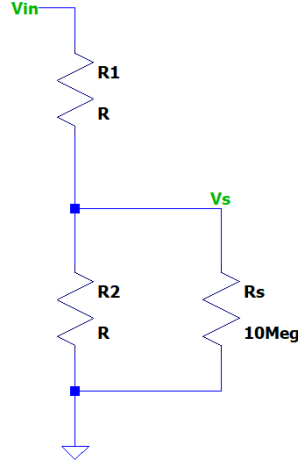


Figura 2: Esquema para los cálculos del circuito de medida

El valor de  $V_{in}$  es conocido y es el siguiente:

$$V_{in} = 5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 220 = 3111,27 V \quad (17)$$

Por otro lado, queremos que  $V_s$  sea igual a 200V. Además,  $R_2$  en paralelo con  $R_s$  debe ser menor a  $10 M\Omega$ . Si fijamos el valor del paralelo en  $9 M\Omega$  podemos calcular el valor de  $R_2$ :

$$\frac{1}{9 M\Omega} = \frac{1}{10 M\Omega} + \frac{1}{R_2 M\Omega} \rightarrow R_2 = 90 M\Omega \quad (18)$$

Por último, obtenemos el valor de  $R_1$  a partir del divisor de tensión:

$$V_s = V_{in} \cdot \frac{R_2 // R_s}{R_1 + R_2 // R_s} \rightarrow R_1 = \frac{(R_2 // R_s) \cdot (V_{in} - V_s)}{V_s} \quad (19)$$

Sustituyendo valores, el valor de la resistencia  $R_1$  queda:

$$R_1 = \frac{90 M\Omega \cdot (3111,27 V - 200 V)}{200 V} = 131,007 M\Omega \quad (20)$$

No obstante, uno de los requerimientos de diseño es que los componentes tuviesen una tensión de trabajo inferior a 1000V. En la resistencia  $R_1$  en las condiciones de

diseño va a caer aproximadamente la siguiente tensión:

$$V_{R1} = 3111,27 V - 200 V = 2911,27 V > 1000 V \quad (21)$$

Por tanto, si dividimos la resistencia  $R_1$  en tres resistencias iguales, cada una tendrá una tensión de trabajo igual a un tercio de la tensión de trabajo de  $R_1$ , es decir:

$$V_{R'} = \frac{V_{R1}}{3} = \frac{2911,27}{3} = 970,42 V < 100 V \quad (22)$$

Por tanto, el circuito final del multiplicador de tensión con la carga y el circuito de medida de tensión queda de la siguiente forma:

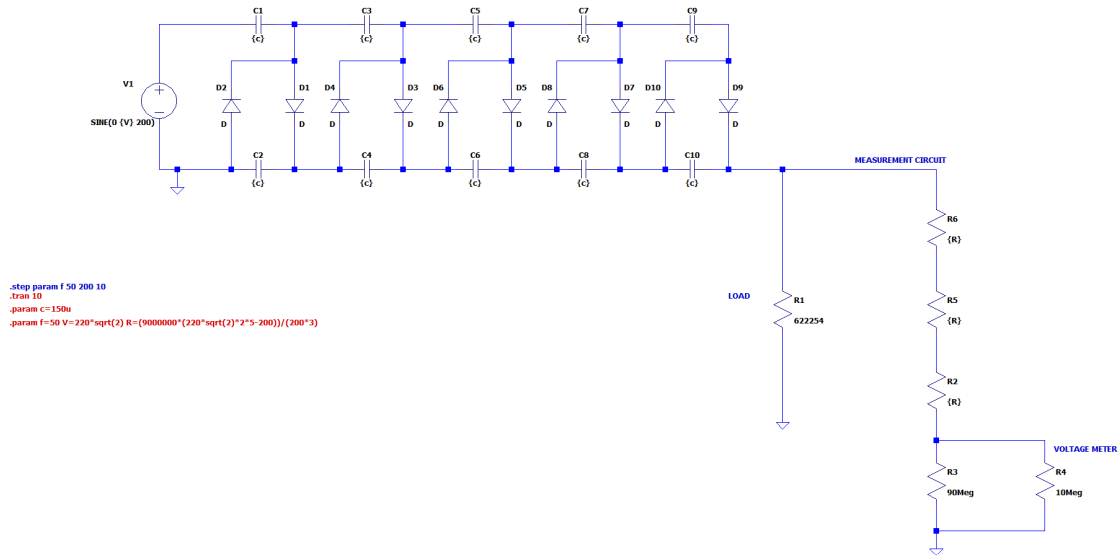


Figura 3: Circuito final

Por último, podemos calcular el consumo de corriente máxima aproximado que consume el circuito de medida<sup>1</sup>:

$$I_{meas} = \frac{V_{in}}{R_{total}} = \frac{3111,27}{9 M\Omega + 131,007 M\Omega} = 22,22 \mu A \quad (23)$$

<sup>1</sup>Nos referimos a la corriente máxima que consume el circuito de medida porque estamos considerando la tensión de salida teórica sin caída debido a la carga.

## Referencias

- [1] Se Hyun Park, Liran Katzir y Doron Shmilovitz. «Reduction of voltage drop and ripple in voltage multipliers». En: *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*. IEEE. 2015, págs. 1-7.
- [2] EEEGuides. *Voltage Multiplier Circuits*. URL: <https://www.eeeguide.com/voltage-multiplier-circuits/>.