

Convertidor AC/DC/AC: Modelado y Control

David Antonio Tobar López, Jonathan de los Santos

Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica, Biomédica

tob20217@uvg.edu.gt, jadelossantos@uvg.edu.gt



Resumen

Este proyecto de graduación diseñó y validó un convertidor AC/DC/AC, planteado como una fuente de voltaje AC conmutada que resuelve dos problemas: el acople del factor de potencia en la red eléctrica y la limpieza de la señal AC a la que se conecta el usuario. La topología constó de un convertidor *Boost* PFC con un esquema de control en modo de corriente promedio (ACM) y un inversor monofásico de puente completo, controlado mediante un PID. La topología se modeló, y con los modelos obtenidos se diseñaron los controladores. Estos se validaron con simulaciones en lazo cerrado en LTspice, y con los controladores validados, se simuló el controlador AC/DC/AC que acopla ambas etapas. Finalmente, se verificó que la integración mantenía la salida deseada y la corrección del factor de potencia.

Demostrador



Objetivos

Objetivo General: Implementación de una fuente de voltaje AC conmutada con corrección de factor de potencia en la entrada y reducción de armónicos a la salida.

Objetivos Específicos:

- Diseño de un circuito de rectificación con corrección de factor de potencia activa.
- Modelado y simulación de un circuito de rectificación con corrección de factor de potencia.
- Implementación del convertidor *Boost* PFC para corrección del factor de potencia.
- Diseño de un sistema de control que logre un factor de potencia mayor a 0.9 y una salida mayor a 36 VDC en el circuito PFC diseñado.
- Implementación del controlador diseñado para el circuito PFC.
- Diseño e implementación de un circuito inversor DC/AC.
- Diseño de un sistema de control tal que la salida del inversor sea de 60 Hz.
- Implementación del controlador diseñado para el circuito inversor.

Metodología

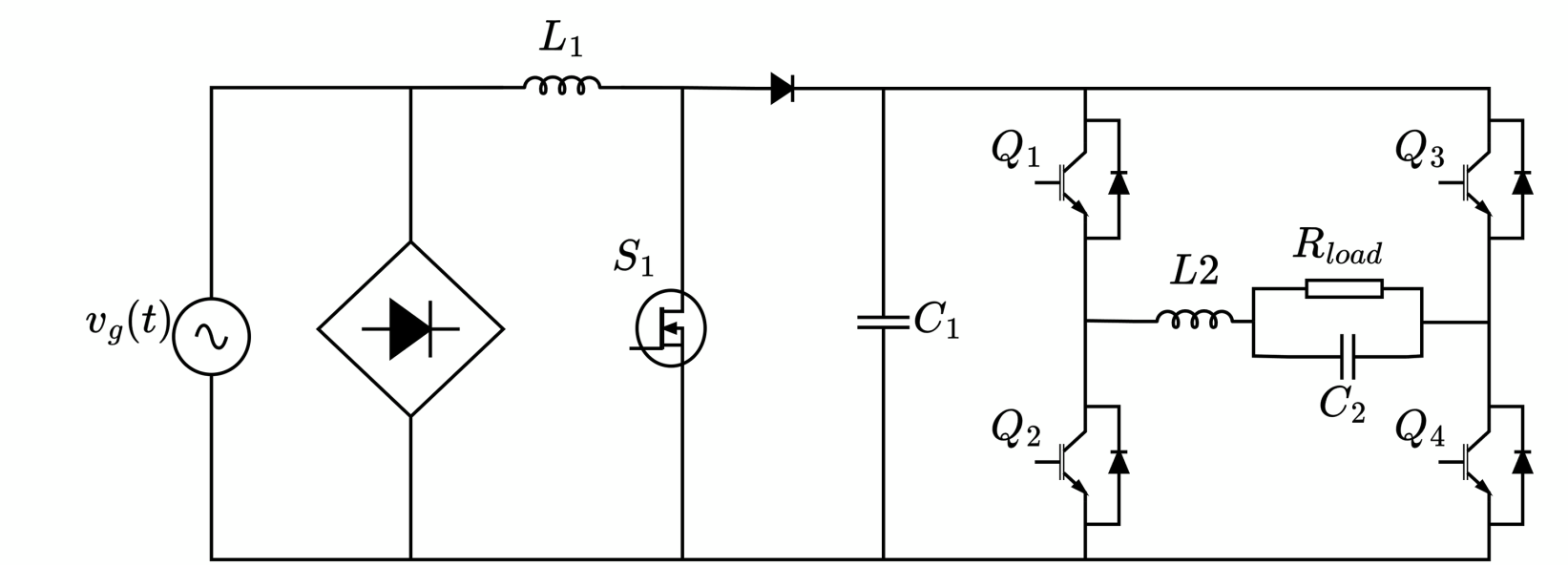


Figura 1. Topología AC/DC/AC propuesta

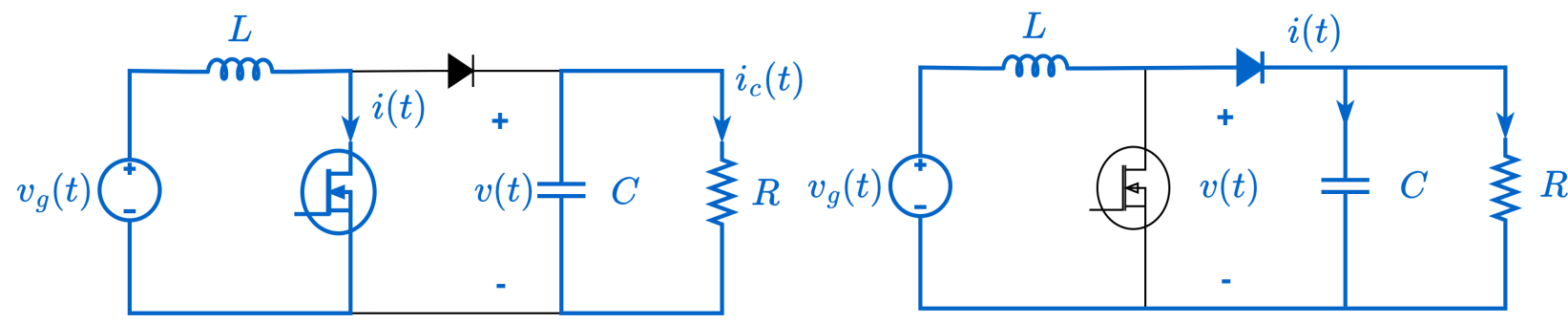


Figura 2. Dos posibles estados de un convertidor Boost

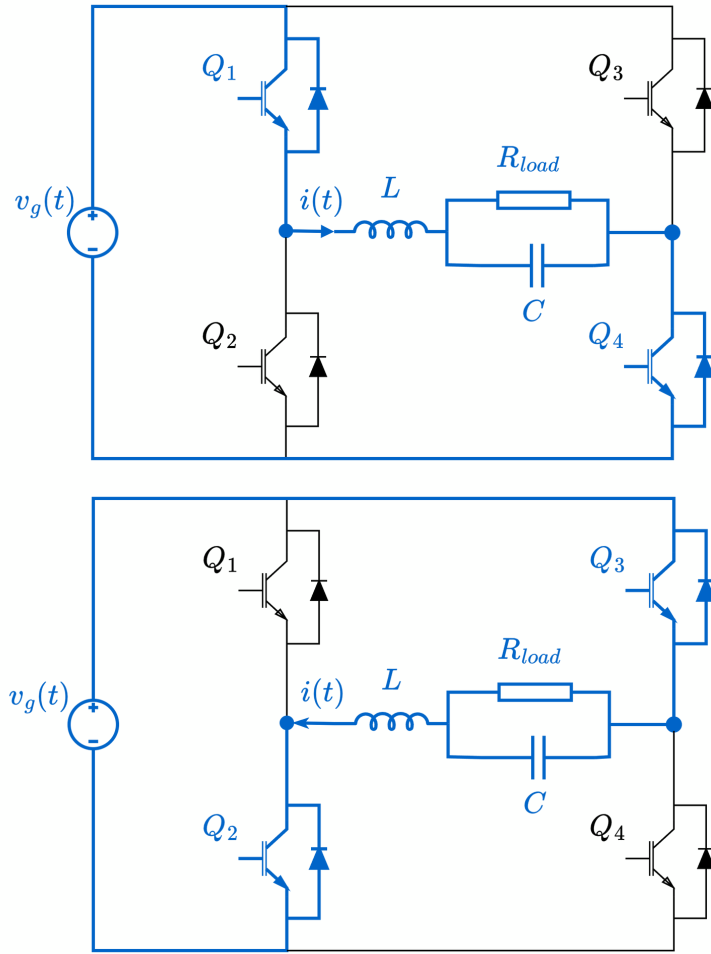


Figura 3. Dos posibles estados de un inversor de puente completo con conmutación bipolar

Resultados

Modelado

Convertidor Boost: A partir de Figura 2 se obtienen las ecuaciones promediadas del circuito

$$L \frac{d(i(t))}{dt} = \langle v_g(t) \rangle_{Ts} - d'(t) \langle v(t) \rangle_{Ts}$$
$$C \frac{d(v(t))}{dt} = d'(t) \langle i(t) \rangle_{Ts} - \frac{\langle v(t) \rangle_{Ts}}{R}$$

Las ecuaciones se linealizan por método de perturbaciones

$$L \frac{d\hat{i}(t)}{dt} = \langle v_g(t) \rangle_{Ts} - D' \hat{v}(t) + V \hat{d}(t)$$
$$C \frac{d\hat{v}(t)}{dt} = D' \hat{i}(t) - \hat{d}(t) - \frac{\hat{v}(t)}{R}$$

Circuito Inversor: A partir de Figura 3 se obtienen las ecuaciones promediadas del circuito

$$L \frac{d(i(t))}{dt} = \langle v_g(t) \rangle_{Ts} (d(t) - d'(t)) - \langle v(t) \rangle_{Ts}$$
$$C \frac{d(v(t))}{dt} = \langle i(t) \rangle_{Ts} - \frac{\langle v(t) \rangle_{Ts}}{R}$$

Las ecuaciones se linealizan por método de perturbaciones

$$L \frac{d\hat{i}(t)}{dt} = 2V_g(t)d(t) - \langle v(t) \rangle_{Ts}$$
$$C \frac{d\hat{v}(t)}{dt} = \langle i(t) \rangle_{Ts} - \frac{\langle v(t) \rangle_{Ts}}{R}$$

Diseño del controlador ACM - Boost PFC

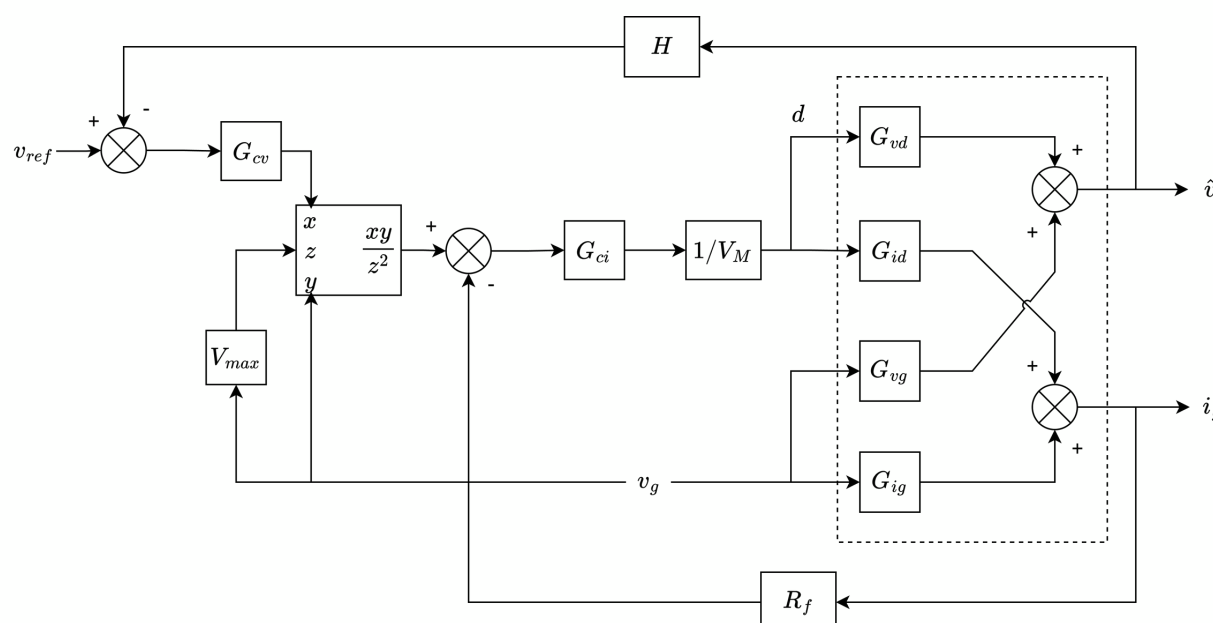


Figura 4. Diagrama de control del convertidor Boost

Funciones de Transferencia:

$$G_{id}(s) = \frac{V}{sL} \quad G_{vi}(s) = \frac{R}{sRC + 1} \frac{V_g}{V}$$

Lazo de corriente: se logró un margen de fase de 80.7° a una frecuencia de corte de 6kHz

$$T_i(s) = R_f \frac{1}{V_M} G_{ci}(s) G_{id}(s) \quad G_{ci}(s) = 3.89 \left(1 + \frac{2 \times \pi \times 1kHz}{s} \right)$$

Lazo de voltaje: se logró un margen de fase de 82.7° a una frecuencia de corte de 10Hz

$$T_v(s) = \frac{1}{R_f} H(s) G_{cv}(s) V_{mult} G_{vi}(s) \quad G_{cv}(s) = 0.1247 \left(1 + \frac{2 \times \pi \times 2Hz}{s} \right)$$

Diseño del controlador PID - Circuito Inversor

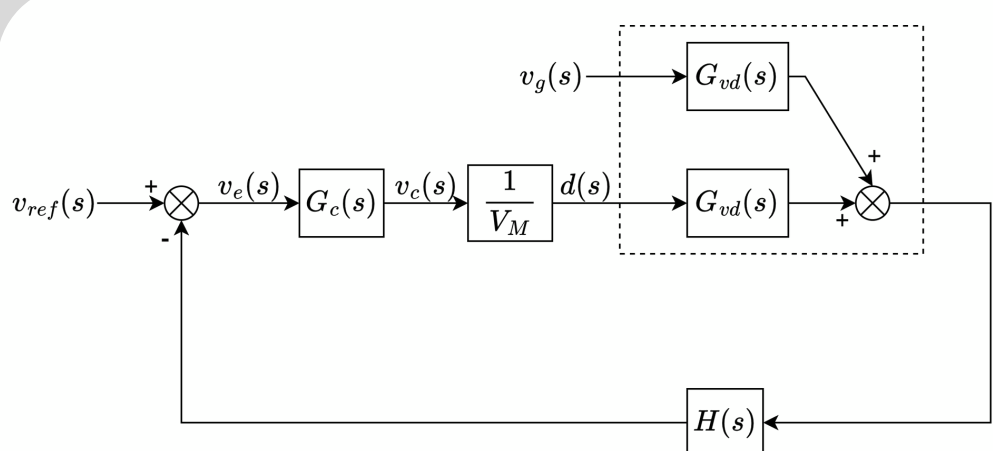


Figura 5. Diagrama de control del circuito Inversor

Función de Transferencia:

$$G_{vd}(s) = \frac{2V_g}{s^2 LC + \frac{sL}{R} + 1}$$

Lazo de voltaje: se logró un margen de fase de 37.8° a una frecuencia de corte de 2kHz

$$T(s) = H(s) \frac{1}{V_M} G_{ci}(s) G_{vd}(s)$$
$$G_c = 0.096 \frac{(1 + \frac{2 \times \pi \times 400Hz}{s})(1 + \frac{s}{2 \times \pi \times 828.4Hz})}{(1 + \frac{s}{2 \times \pi \times 4.83kHz})}$$

Integración del convertidor AC/DC/AC en LTspice

Simulación del convertidor AC/DC/AC: se realizaron simulaciones de lazo cerrado de ambas etapas AC/DC en LTspice y se acoplaron a través del capacitor de enlace C1 en Figura 1.

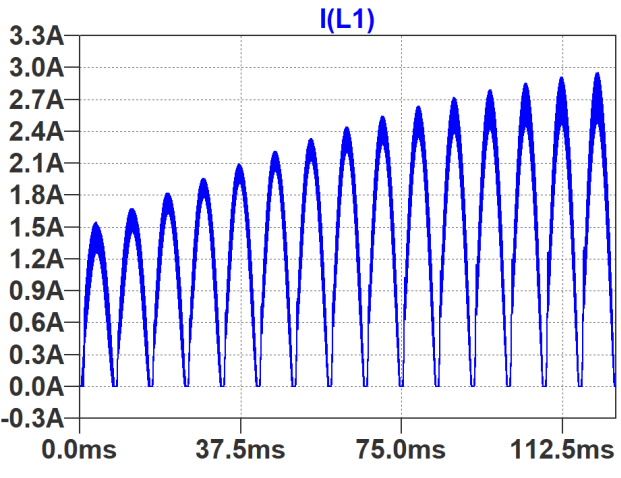


Figura 6. Corriente en el inductor de la etapa Boost PFC

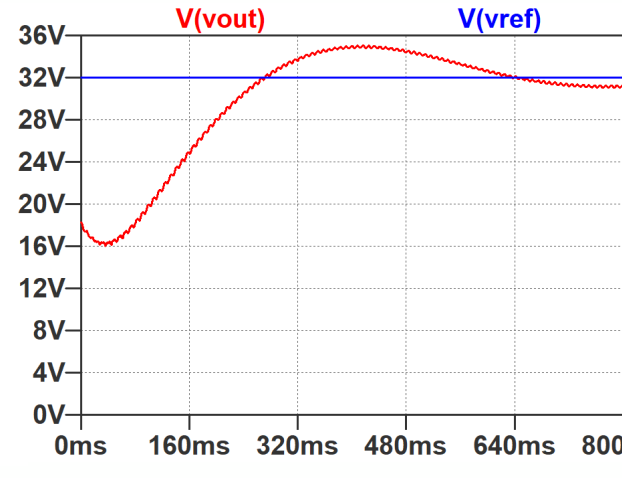


Figura 7. Voltaje de DC-Link AC/DC/AC

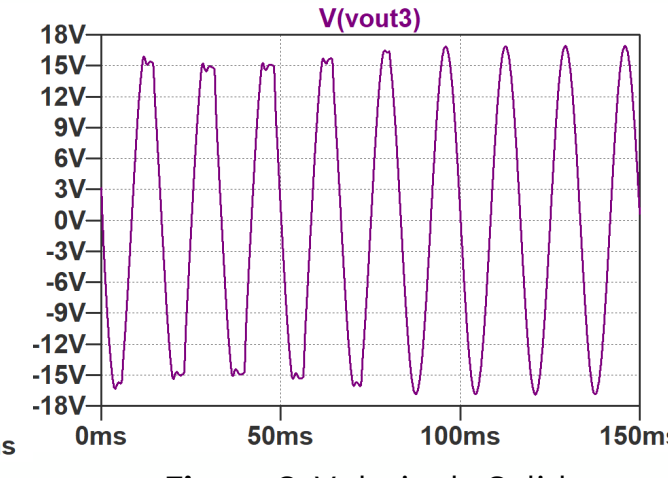


Figura 6. Voltaje de Salida AC/DC/AC

Conclusiones

- Se diseñó un convertidor AC/DC/AC a través del acople de un Boost PFC y un Inversor monofásico de puente completo.
- Se diseñó y modeló un circuito Boost PFC para la etapa de rectificación con corrección de factor de potencia
- La implementación de un control PI en el lazo de corriente del Boost PFC logra un Factor de Potencia de hasta 0.995.
- La implementación de un control PI en el lazo de voltaje del Boost PFC regula el voltaje de enlace a 32VDC.
- Se diseñó y modeló un circuito inversor monofásico de puente completo para la etapa DC/AC
- La implementación de un control PID en el lazo de voltaje del circuito inversor logra una salida de 12Vrms a 60Hz con un THD de 0.04%.
- Se efectuó la validación del convertidor AC/DC/AC a través de simulaciones de LTspice en lazo cerrado

Trabajo Futuro

- Diseño del hardware que permita la implementación de la topología AC/DC/AC propuesta.
- Validación experimental de los controladores diseñados.
- Ampliación del esquema de control del circuito inversor
- Modificaciones a la topología del convertidor para mejorar eficiencia energética
- Experimentación con controladores más modernos: LQI, LQR, Control óptimo, etc.

Referencias

- R. W. Erickson y D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 3rd. Springer, 2020, isbn: 978-3-030-43879-1.
- B. McDonald y B. Lough, "Power Factor Correction (PFC) Circuit Basics", Texas Instruments Power Supply Design Seminar, 2020, TI Literature Number: ZHCP224.
- N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 2nd. Wiley, 1995, isbn: 9780471584087.
- R. Valascho y S. Abdel-Rahman, "Digital PFC CCM Boost Converter", Infineon Technologies AG, inf. tíc., 2016, Technical document on digital power factor correction in continuous conduction mode using a boost converter.
- R. Ortega, E. Figueres, G. García, C. Trujillo y D. Velasco, "Control techniques for reduction of the total harmonic distortion in voltage applied to a single-phase inverter with nonlinear loads: Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, n.o 3, págs. 1754-1761, 2012, isbn: 1364-0321. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.027.
- R. Keim, "Closed-Loop Control for an LTspice Switching Regulator", 2023. dirección: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/closed-loop-control-for-an-ltspice-switching-regulator/.