



## **Análisis Comparativo de la Respuesta Transitoria en Lazo Abierto de un Rectificador Trifásico de Seis Pulsos Alimentando una Carga RL**

C. Paramo-Cardiel<sup>a</sup>, G. Tapia-Tinoco<sup>b</sup>, J. P. Razón-González<sup>b</sup>, A. Lozano-Luna<sup>b</sup>,

<sup>a</sup>Estudiante Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Ingeniería Electromecánica, Irapuato, Gto., paramocc@hotmail.com

<sup>b</sup>Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Ingeniería Electromecánica, Irapuato, Gto., gutapia@itesi.edu.mx, jurazon@itesi.edu.mx, allozano@itesi.edu.mx

### **RESUMEN :**

En el siguiente trabajo se presenta el modelo matemático, la simulación y la prueba de laboratorio de la respuesta transitoria en lazo abierto de un convertidor trifásico de seis pulsos alimentando una carga resistiva-inductiva (RL). El modelo del convertidor está basado en el retenedor de orden cero y es representado en forma de función de transferencia. El modelo de la carga RL también es representado en forma de función de transferencia, ambas en el dominio continuo. El modelo del sistema convertidor-carga se realiza en el dominio discreto utilizando la transformada Z. Las simulaciones se realizan en el programa Simulink de Matlab. Por su parte para las pruebas de laboratorio se utiliza un convertidor, fuente de alimentación, carga y equipo de adquisición en tiempo real de la marca LabVolt. Se realiza la comparación de las respuestas transitorias del modelo matemático, las simulaciones y los resultados experimentales, dicha comparación permite demostrar que el modelado matemático es válido para el sistema convertidor-carga ya que presenta un comportamiento similar al mostrado en las simulaciones y laboratorio, respectivamente.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Los dispositivos semiconductores de potencia constituyen el corazón de los convertidores de potencia y son usados en forma de una matriz de interruptores funcionando en encendido y apagado. Dependiendo de la función que realicen, los convertidores de potencia se clasifican en convertidores de potencia de CA a CD (rectificador), de CD a CD (recortador), CD a CA (inversor), CA a CA a la misma frecuencia (controlador de CA) o de CA a CA a diferentes frecuencias (ciclo-inversores) [1].

Los rectificadores principalmente convierten voltajes de CA de 50/60 Hz a voltajes de CD. La aplicación de estos convertidores puede presentarse en los siguientes campos: manejadores de motores de CD y CA [2], sistemas de transmisión en alto voltaje (HVDC) [3], conversión de CD a CA de celdas solares [4] y arreglos conectados al sistema eléctrico [5].

En lo que respecta al modelado en los años 60s los convertidores de CA-CD se modelaron en el dominio continuo, básicamente como ecuaciones diferenciales o funciones de transferencia representadas por la transformada de Laplace. El rectificador se modelaba únicamente como un retardo en el tiempo. Posteriormente en los años 80s el modelado se realizó en el dominio discreto ya que se observó que estos convertidores se encuentran operando en dos estados, es decir; en encendido y apagado. Esta nueva tendencia llevó el modelado de convertidores a un plano diferente, por lo que se cambió la forma de analizarlos pasando de un dominio continuo a un dominio discreto. Por lo tanto, el modelo del convertidor paso de ser solamente un retardo a un



retenedor de orden cero [6]. En este trabajo se presenta el modelo matemático de un convertidor trifásico de seis pulsos alimentando una carga RL, dicho modelo se obtiene en el dominio discreto y se obtiene la respuesta transitoria a una entrada escalón, la cual es validada por simulación y de forma experimental.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques para el análisis del rectificador trifásico de seis pulsos operando en lazo abierto y conectado a una carga RL, teniendo como entrada la señal de referencia continua  $R(s)$ . Sin embargo, el convertidor representado por  $G_1(s)$  toma únicamente esta señal en instantes discretos, por lo cual es necesario incluir el muestreador mediante impulsos  $S_I$  para generar la señal  $R^*(s)$ . Físicamente este hecho se puede explicar considerando que una vez que se ha disparado un diodo no se tiene control hasta que este polarizado directamente el siguiente diodo. La constante  $K_c$  corresponde al voltaje promedio entregado por el convertidor a la carga y está dado por el tipo de convertidor. La carga RL se representa con la función de transferencia  $G_2(s)$  y tiene una constante tiempo  $\tau = L/R$ . La señal de salida es la corriente en la carga y se representa dentro del diagrama de bloques como  $I_o(s)$ . Es importante mencionar que  $G_1(s)$  es utilizado para modelar cualquier convertidor controlado a la frecuencia de la línea y no únicamente el rectificador trifásico de seis pulsos no controlado [6].

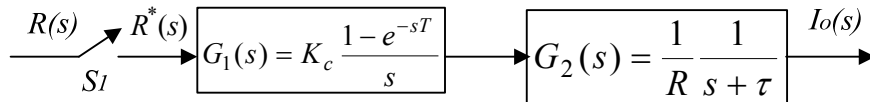


Figura 1 Diagrama de bloques del convertidor de lazo abierto

Para obtener la función de transferencia pulso se tiene la ecuación siguiente,

$$I_o(s) = G_1(s)G_2(s)R^*(s) \quad (1)$$

aplicando la transformada asterisco

$$I_o(s)^* = G_1G_2(s)^* R(s)^*$$

donde

$$G_1(s)G_2(s) = G_1G_2(s)$$

Por lo tanto, la función de transferencia en lazo abierto es.

$$\frac{I_o(z)}{R(z)} = G_1G_2(z) \quad (2)$$

Utilizando las funciones de transferencia  $G_1(s)$  y  $G_2(s)$  del diagrama de bloques mostrado en la Figura 1 se tiene,

$$G_1G_2(s) = \frac{K_c}{R} \left[ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \right] \left[ \frac{1}{1 + s\tau} \right] \quad (3)$$

Desarrollando en fracciones parciales y aplicando la transformada Z,



$$G_1 G_2(z) = \frac{K_c}{R} \left[ \frac{z-1}{z} \right] \left[ \frac{z}{(z-1)} - \frac{z}{\left( z - e^{-\frac{T}{\tau}} \right)} \right] \quad (4)$$

Simplificando la Ecuación (4) y sustituyendo en (2) se obtiene la función de transferencia pulso del sistema conformado por el convertidor y la carga RL.

$$\frac{I_o(z)}{R(z)} = \frac{K_c}{R} \frac{1-a}{z-a} \quad (5)$$

donde  $a = e^{-\frac{T}{\tau}}$ ,  $T$  periodo de conmutación del rectificador y  $\tau$  constante de tiempo de la carga

### 3. MODELO EXPERIMENTAL

La Figura 2 muestra la implementación llevada a cabo en el laboratorio para validar el modelo matemático del convertidor-carga obtenido en la sección anterior. El sistema esta conformado por una fuente de alimentación trifásica la cual puede proporcionar un voltaje de alimentación de CA o CD fija o variable. Se utiliza la fuente de alimentación variable para proporcionar un voltaje al rectificador trifásico integrado por diodos. La salida del convertidor proporciona un voltaje rectificado a la carga RL. Para llevar a cabo la medición de los voltajes y corrientes en el lado de CA y CD se utiliza un sistema de adquisición con cuatro canales de voltaje y cuatro canales de corriente. E1 e I1 corresponden al voltaje y corriente en el lado de CD, mientras que (E2, I2), (E3, I3), (E4, I4) corresponde a los voltajes y corrientes de las fases A, B, y C respectivamente. Para obtener la respuesta al escalón el sistema de adquisición se programa en modo de una sola adquisición, de tal forma que se obtenga el transitorio al momento de cerrar el interruptor de la fuente de alimentación trifásica. Los datos obtenidos de las mediciones se almacenan en un archivo de texto y posteriormente en el caso de estudio se grafican con ayuda de Matlab para poder realizar la comparación de los resultados experimentales con los obtenidos en la simulación y el modelo matemático

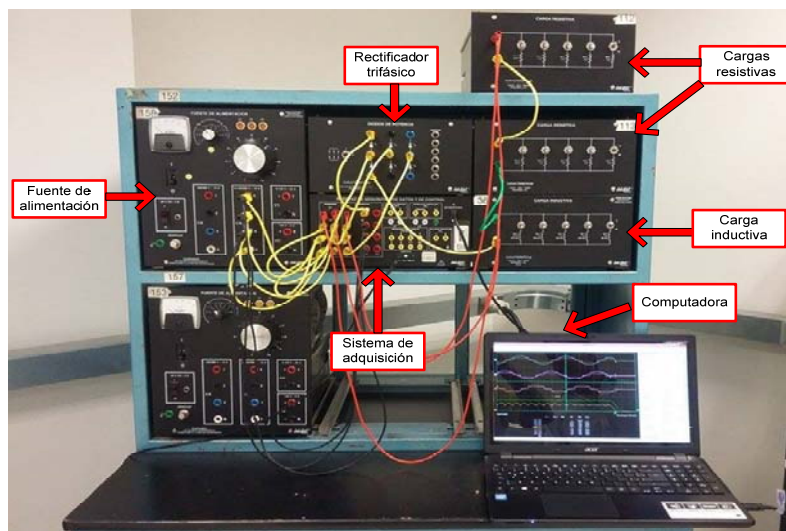


Figura 2 Implementación en laboratorio



#### 4. MODELO DE SIMULACIÓN

La Figura 3 muestra el modelo de simulación implementado en Simulink. Esta compuesto por un conjunto de tres fuentes monofásicas conectadas en estrella, esto con el objetivo de poder controlar el voltaje en cada una de ellas y reproducir el desbalance presentado en el caso práctico. Además se tiene un convertidor trifásico basado en diodos el cual alimenta una carga RL. En la etapa de medición se muestran el voltaje y la corriente en la carga y para ello se utilizan en conjunto los bloques “Multímetro” y “Visualización”. El bloque “powergui” se utiliza para definir el tipo de sistema a analizar, en este caso se analiza como un sistema continuo. El interruptor trifásico se utiliza para tener control del tiempo en el que se aplica el voltaje al convertidor, de tal manera que es posible ajustar el inicio del transitorio de la simulación con el obtenido de forma experimental.

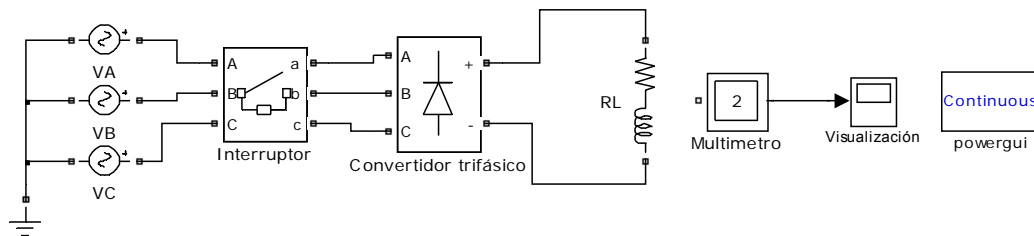


Figura 3 Modelo de Simulación implementado en Simulink

#### 5.- CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio tiene como finalidad validar de forma experimental y por simulación el modelo matemático del convertidor-carga. En los tres casos se aplica una entrada escalón y se mide la corriente en la carga. Para el caso experimental se logra al cerrar el interruptor de la fuente de alimentación, mientras que en la simulación se realiza controlando el tiempo de cierre del interruptor y en el caso del modelo matemático se aplica una entrada escalón a la cual se ajusta el tiempo de transición. La carga utilizada en los tres casos es  $R = 60\Omega$  y  $L = 80 \text{ mH}$ . De la prueba de laboratorio se miden los voltajes y corrientes eficaces en estado estable, en el lado de CA se tiene:  $E_2 = 79.71 \text{ V}$ ,  $E_3 = 78.62 \text{ V}$ ,  $E_4 = 78.49 \text{ V}$ ,  $I_2 = 2.49 \text{ A}$ ,  $I_3 = 2.48 \text{ A}$  e  $I_4 = 2.48 \text{ A}$ , mientras que en el lado de CD se obtiene un voltaje de  $174 \text{ V}$  y una corriente de  $2.94 \text{ A}$ . A partir de los datos experimentales se asignan los parámetros de la simulación, siendo los voltajes de la fuente de alimentación  $VA=E_2$ ,  $VB=E_3$  y  $VC=E_4$ . Por su parte en el modelo matemático la ganancia del convertidor es  $K_c = 174 \text{ V}$  (valor promedio obtenido en la parte experimental),  $T = 0.0028$  (convertidor de seis pulso),  $\tau = 0.0013$ , y  $a = 0.1245$  que se calculan como se mostró en el modelo matemático.

La Figura 4(a) muestra los voltajes aplicados en el experimento de laboratorio (azul), simulación (rojo) y modelo matemático (negro). En los tres casos el voltaje aplicado es cero en  $t < 5 \text{ mseg.}$ , posteriormente el voltaje cambia súbitamente comportándose como una entrada tipo escalón. En el modelo matemático toma un valor de  $174 \text{ V}$  y es constante durante el tiempo restante de la simulación, mientras que en la simulación y en la prueba de laboratorio el voltaje presenta un rizado, el cual es característico al tipo de convertidor, sin embargo el valor promedio del voltaje corresponde a  $174 \text{ V}$ . Otro aspecto a analizar es la disminución del voltaje durante los tres primeros ciclos del voltaje medido en la prueba de laboratorio, lo cual se debe al transitorio asociado al momento de cerrar el interruptor de la fuente trifásica. Además se puede observar ligeras discrepancias entre el voltaje de simulación y el obtenido de forma experimental, esto se debe a que en la simulación los diodos se consideran ideales y no se toma en cuenta la caída de tensión en los mismos. En la Figura 4(b) se presenta el comportamiento de la corriente en los tres casos, laboratorio (azul), simulación (rojo) y modelo matemático (negro).



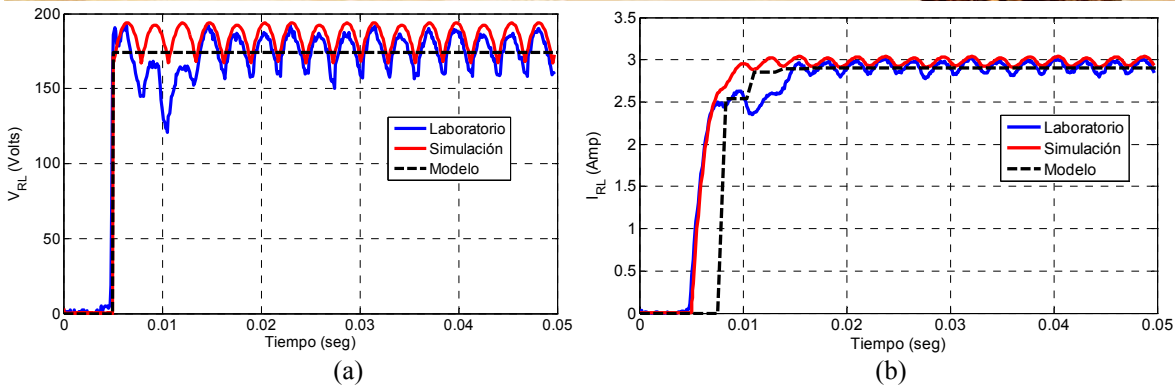


Figura 4 Comparación del modelo matemático, simulación y resultados experimentales. (a).- Voltaje en la carga RL, (b).- Corriente en la carga RL

Se puede observar que el modelo matemático tiene un comportamiento dinámico similar al obtenido por simulación y en laboratorio. Una vez que se aplica la entrada escalón le toma cuatro periodos de muestreo alcanzar el estado estable, tomando los valores de 0, 2.54, 2.855 y 2.894 A, siendo este último el valor que toma en estado estable. Por su parte las corrientes promedio obtenidas de forma experimental y simulación son 2.94 y 2.98 A respectivamente. Se puede observar que el comportamiento dinámico de la corriente sufre una disminución después de 0.01 seg, lo cual se debe a la disminución del voltaje aplicado. También se puede observar que la corriente obtenida por simulación es mayor que la que se obtiene de forma experimental y esto se debe a que el voltaje aplicado en la simulación es mayor.

## CONCLUSIONES

Se presentó un modelo matemático en el dominio discreto de un convertidor trifásico de seis pulso alimentando una carga RL. Dicho modelo se validó de forma experimental y simulación. Los resultados presentados permiten observar el desempeño dinámico de la corriente en la carga, la cual tiene un comportamiento similar en los tres casos. Las discrepancias en el modelo matemático y simulación se deben a que en el modelo matemático no se toman en cuenta características de los diodos del convertidor, además que el voltaje aplicado no presenta rizado ni se modela el efecto de desbalance, mientras que en la simulación las diferencias están asociadas a que los diodos se consideran ideales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, John Wiley and Sons, EUA, 2003.
- [2] R. Menzies, P. Steimer, J. Steinke, "Five Level GTO Inverters for Large Induction Motor Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, No. 4, págs. 938-944, Julio/Agosto, 1994.
- [3] Dragan Jovcic, "Thyristor-Based HVDC with Forced Commutation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 1, págs. 557-564, Enero 2007.
- [4] M. Slonim, L. Rahovich, "Maximum Power Point Regulator for 4KW Solar Cell Array Connected Through Invertor to the AC Grid", *Energy Conversion Engineering Conference IECEC 96*, Vol. 3, págs. 1669-1672, Agosto 1996.
- [5] Bimal K. Bose, "Energy, Environment, and Advances in Power Electronics", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, No. 4, págs. 688-701, Julio 2000.
- [6] F. Luo, H. Ye, M. Rashid, *Digital Power Electronics and Applications*, Elsevier, EUA, 2005.