

## **SIMULACIÓN DE CONVERTIDORES DE POTENCIA AC-DC CON CARGA ACTIVA EN EL ENTORNO MATLAB-SIMULINK**

R.PINDADO

Departament d'Enginyeria Electrónica. EUETIT. Universitat Politècnica de Catalunya. C/Colón,1 08222 Terrassa. España. E-mail: [pindado@ecl.upc.es](mailto:pindado@ecl.upc.es)

*Esta contribución desarrolla una aplicación de Simulink a la simulación de convertidores estáticos trifásicos AC-DC basados en tiristores, mediante las técnicas combinadas de espacio de estado y funciones de conmutación de Wood. Al tratar con sistemas de topología variable, se presenta un procedimiento capaz de variar los coeficientes de la ecuación de estado, así como las condiciones iniciales por tramos temporales y permite además la introducción indirecta de parámetros.*

### **1. Introducción**

La docencia de sistemas de Electrónica de Potencia ofrece grandes dificultades por el carácter no lineal de los mismos, y la consecuente restricción de la herramientas analíticas, tanto en el campo de las matemáticas como de la teoría de circuitos. Para paliar tales limitaciones, es cada vez más frecuente la incorporación de programas de simulación a los recursos docentes.

Dentro de los programas frecuentemente utilizados en la docencia de convertidores de potencia, destacan Pspice y Matlab-Simulink, que constituyen verdaderos estándares cuyos resultados son aceptados en todos los foros de especialistas, a la que unen la existencia de versiones de estudiante, bien gratuitas o bien de módico precio. En el presente trabajo se ha optado por la aplicación de Matlab-Simulink por reportar un mayor control sobre los intervalos de cálculo, obviando determinados problemas de convergencia que con frecuencia presenta el Pspice. Por otra parte, la posibilidad de equiparar los valores máximo y mínimo de dicho intervalo, conduce a ficheros de datos con muestras equiespaciadas en el tiempo, facilitando el empleo de técnicas en el dominio frecuencial, FFT en particular.

En el campo de Convertidores de Potencia, resultan particularmente complicados los sistemas que utilizan componentes con conmutación natural en corte y en presencia de cargas reactivas, por la imposibilidad de predecir el final de la conducción del interruptor. Una dificultad añadida se suma cuando además la conducción es discontinua, al imponer la propia carga el valor de la tensión de salida. En ese contexto se enmarcan los convertidores AC-DC basados en tiristores.

La figura 1 muestra el esquema del convertidor AC-DC en puente trifásico y con carga activa, al que se ha dotado de control separado de los dos conmutadores (CP y CN) pudiendo así, en un único sistema, estudiar sus configuraciones más usuales: puente controlado (PC) y puente semicontrolado (PSC).

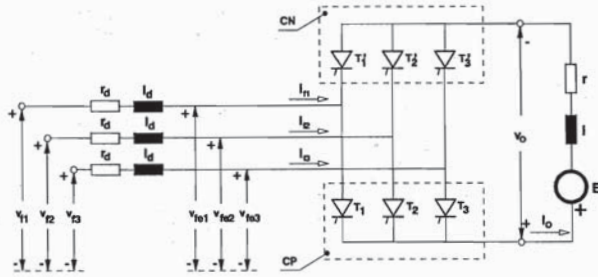


Figura 1: Esquema y notación utilizada para el puente trifásico.

Es bien sabido que por efecto del control se producen cambios topológicos en el circuito, de tratamiento particularmente tedioso en caso de conducción discontinua ante la dificultad de predecir el paso por cero de la intensidad. La impedancia de la red ( $r_d$   $i_d$ ) aumenta la complejidad del sistema por la aparición, durante la conmutación, de una intensidad circulante o interna entre los componentes que participan en la transferencia y, por tanto, transparente aunque relacionada con las etapas de red y carga. Una formulación completa del proceso, basada en el espacio de estado, se expone en [1].

## 2. La aplicación desarrollada

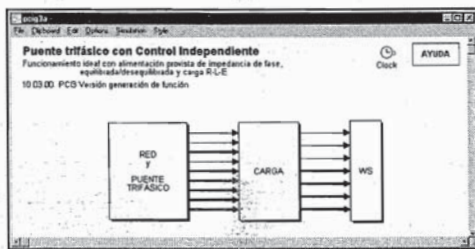


Figura 2: Pantalla de entrada al programa PCI3.

El programa principal, cuya pantalla de entrada ilustra la figura 2, se denomina PCI (*Puente de Control Independiente*) en alusión al control separado de los dos conmutadores del puente trifásico y comprende tres módulos generales, posteriormente descritos. Los citados módulos comparten ciertas variables como recurso de transformación en variables globales [2] puesto que, como es sabido, los subcircuitos de Simulink son subrutinas en Matlab y sus variables tienen carácter local.

**A. Red y puente trifásico.** Su esquema está representado en la figura 3, acepta los datos relativos a la red de alimentación, tensión nominal de línea así como de sus coeficientes de desequilibrio y está destinado a la generación de las funciones de control de los dos conmutadores o funciones de Wood [3]. Suministra también las tensiones de entrada al puente trifásico, en regímenes de conducción normal y solapada ( $v_s$  y  $v_{s1}$ ), y también de la necesaria para el cálculo de la intensidad circulante durante la conmutación ( $v_{s2}$ ). En el bloque relativo al puente trifásico acepta el vector de ángulos de disparo de los conmutadores [ $a_p$   $a_n$ ].

**B. Carga.** Comprende los sistemas de carga propiamente dicha y de la red y admite los datos relativos a la carga ( $r, I, E$ ) y los correspondientes a la impedancia de red ( $r_d$   $i_d$ ). El módulo incluye, véase figura 4, los siguientes bloques de cálculo: (i) *Intensidad de salida* o intensidad en el lado DC, (ii) *Circuito de conducción solapada* o intensidad circulante durante la

conmutación, (iii) *Intensidad de fase* o intensidad en el lado AC y (iv) *Tensiones de entrada y de salida* o tensiones en bornes del puente trifásico, lados AC y DC respectivamente.

El módulo *Carga* resuelve el principal problema de cálculo. Debe operar con ecuaciones diferenciales con coeficientes variables por tramos en el tiempo y con condiciones iniciales impuestas según valores obtenidos durante la simulación. Para resolver el problema se ha desarrollado un método que: (i) se fundamenta en la integración indirecta de las ecuaciones (método de estado) bien conocida en técnicas analógicas y (ii) permite variar los coeficientes de la ecuación de estado en función de una variable externa.

**C. WS (Work Space).** Destinado al traslado de las variables de interés al espacio de trabajo, para su posterior procesado en el entorno Matlab. Genera también la base de tiempos para el cálculo y permite definir el tiempo final de la simulación así como el número de ciclos o periodos de red, que determina el tamaño de las variables almacenadas.

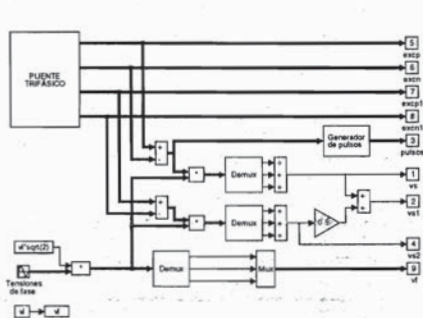


Figura 3: El módulo Red-puente trifásico.

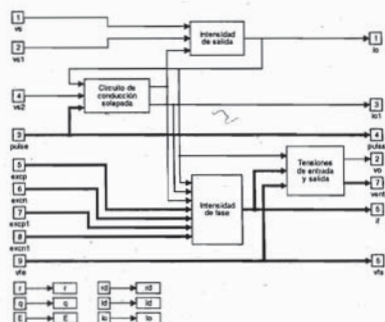


Figura 4: El módulo Carga.

El programa principal PCI dispone del siguiente conjunto de programas auxiliares:

- A. **APCI**, que debe procesarse solamente al principio de la sesión de trabajo y tiene por objeto colocar inicialmente determinadas variables en el espacio de trabajo (WS) que permitan la posterior entrada indirecta de los parámetros de los bloques del sistema; no obstante los valores introducidos no condicionan las simulaciones futuras del programa PCI.
- B. **POTE**. Constituye una aplicación para el cálculo de las potencias activa y reactiva consumidas por el convertidor. Para el cálculo de esta última se utiliza el criterio de Pillet.
- C. **FFTPCI**. Aplicación orientada al escalado automático de la FFT de las variables elegidas.

### 3. Resultados

A título de ejemplo se presentan algunos resultados correspondientes al régimen permanente de un PSC con ángulo de control de  $30^\circ$  conectado a red de  $3 \times 380V$  50Hz e impedancia de fase de  $10m\Omega$  y  $250\mu H$ , trabajando con carga constituida por  $1\Omega$ ,  $0.32$  mH y f.e.m. de  $E=300V$ . La figura 5 representa la evolución temporal de tensión (vo) e intensidad (io) de salida así como de la intensidad de fase 1 (if1) mientras que la figura 6 ilustra el módulo de los espectros de esta última así como de la tensión de entrada al puente (vfe1).



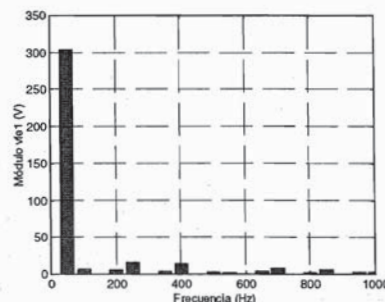
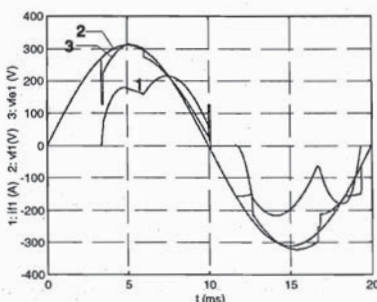
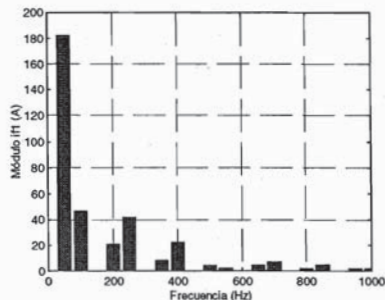
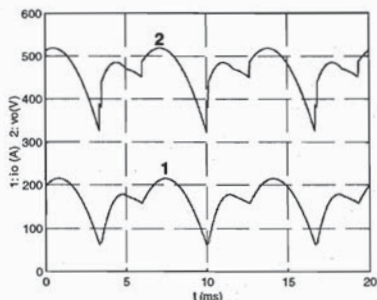


Figura 5: Superior: tensión e intensidad de salida. Inferior: intensidad de fase y tensión de entrada al puente trifásico.

Figura 6: Espectro en frecuencia. Superior: intensidad de fase. Inferior: tensión de entrada al puente trifásico.

#### 4. Conclusiones

Previa la construcción de nuevos bloques funcionales, el programa Simulink ha demostrado ser una herramienta apta para la simulación de circuitos de potencia, incluso de alta complejidad. La posibilidad de operar en Matlab, dota al sistema de una alta versatilidad y potencia de cálculo, en un entorno grato. La principal contribución de este trabajo reside en la técnica para modificar los coeficientes de la ecuaciones diferenciales del convertidor y el traslado de las condiciones del estado entre transiciones. Los resultados obtenidos, incluso en el cálculo de las componentes de la potencia, han sido contrastados con otros programas, comerciales o bien desarrollados en nuestro Departamento, avalando el método propuesto.

#### Referencias

- [1] R.Pindado. *Reducción de potencia reactiva en convertidores trifásicos AC/DC, trabajando en dos cuadrantes con cargas activas R-L, mediante control independiente de sus conmutadores*. 4as. Jorn. Luso-Espanholas de Engenharia Electrot. pp.1235-1242 (1995).
- [2] A.Cavallo, R.Setola y F.Vasca. *Using Matlab, Simulink and Control System Toolbox*. The Math Works Inc. London (1996).
- [3] P.Wood. *Switching Power Converters*. Van Nostrand Reinhold Co. New York (1981).