

# DISEÑO DE REDES SNUBBERS, MEDIANTE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN, PARA LA PROTECCIÓN DE TIRISTORES CONTRA SOBRETENSIONES

PEDRO CARRIÓN PÉREZ  
y  
PEDRO MORALES GÁLVEZ

*Univ. de Castilla la Mancha, E.U.P. de Albacete,  
Avda. España s/n, Campus Universitario, 0271 Albacete.*

## RESUMEN

Para proteger los tiristores contra sobretensiones se utilizan las redes denominadas "snubbers". El dimensionamiento de los componentes de éstas debe satisfacer requerimientos a menudo contrapuestos por lo que su diseño no resulta fácil. Proponemos una técnica de cálculo basada en la programación no lineal (técnicas de optimización), que permite obtener los valores de los componentes tales que el comportamiento de la red se ajuste lo máximo posible a las características deseadas. La técnica indicada se ha implementado en un programa de ordenador, realizado en Turbo Pascal 6.0, de fácil utilización, que incluye una parte de simulación para diferentes redes snubbers y otra para el diseño mediante técnicas de optimización.

## SUMMARY

Networks called snubbers to protect thyristors from overvoltages. Sizing the snubber network components must often satisfy opposed requirements, therefore their design is not easy. We are proposing here a calculation technique based on non-linear programming (optimizing techniques), which allows us to obtain the component values in such a way that the network behaviour best conforms to required features. This technique has been implemented in a computer program, run in an easily used Turbo Pascal 6.0, which is made up of a simulation part for different types of snubber networks and another for the design by means of optimization techniques.

## INTRODUCCIÓN

Los tiristores son sensibles a las sobretensiones, a las sobrecorrientes y en general a cualquier forma de transitorios tanto en su magnitud como en su velocidad de variación ("derivadas"). La aparición de sobretensiones o fuertes derivadas de tensión en bornas de tiristores puede ocasionar, entre otras consecuencias, la puesta en conducción indeseada de los mismos e incluso su destrucción. Las sobretensiones

Recibido: Julio 1993

transitorias externas, normalmente, no pueden ser controladas por el diseñador del sistema de potencia, por lo que éste debe contemplar la protección de los componentes semiconductores frente a ellas. Esta protección puede realizarse utilizando los tiristores muy por debajo de sus valores límite o utilizando redes especiales de protección en paralelo con los tiristores a proteger, estas redes se denominan "SNUBBERS".

### REDES SNUBBERS<sup>4,6,7</sup>

Las redes snubbers se utilizan para suprimir transitorios indeseables y eliminar problemas en los circuitos de conmutación con elementos inductivos y capacitivos. La conmutación en estos circuitos puede producir EMI (interferencias electromagnéticas) que afecten a otros equipos y si no se suprimen las sobretensiones transitorias se pueden exceder los límites de los dispositivos y producir su degradación o destrucción.

Existen numerosas topologías de redes snubbers para la protección de transistores, tiristores, triacs, etc.. Estas redes pueden ser disipativas o no disipativas, para la protección de sobretensiones directas o inversas, con polarización o sin ella, etc.. En nuestro caso tomaremos como base las tres topologías de redes snubbers para tiristores que se muestran en la Figura 1 y las posibles modificaciones o combinaciones entre ellas. Cualquier otro tipo de red puede ser estudiado a partir de las técnicas expuestas.

En la Figura 1(a) se muestra una red con polarización directa y con un diodo ( $D_1$ ) conectado en antiparalelo con el tiristor: La resistencia  $R$  limita la derivada de tensión directa y  $R_1$  la descarga de corriente del condensador cuando se dispara el tiristor.

En la Figura 1(b) podemos ver una red que, con polarización inversa, limita la derivada de tensión inversa. La misión de  $R_2$  es limitar la descarga del condensador a través del tiristor.

Por último, la Figura 1(c) muestra una red sin polarizar que se utiliza para proteger un par de tiristores en antiparalelo, en la cual la protección debe ser efectiva en ambas direcciones.

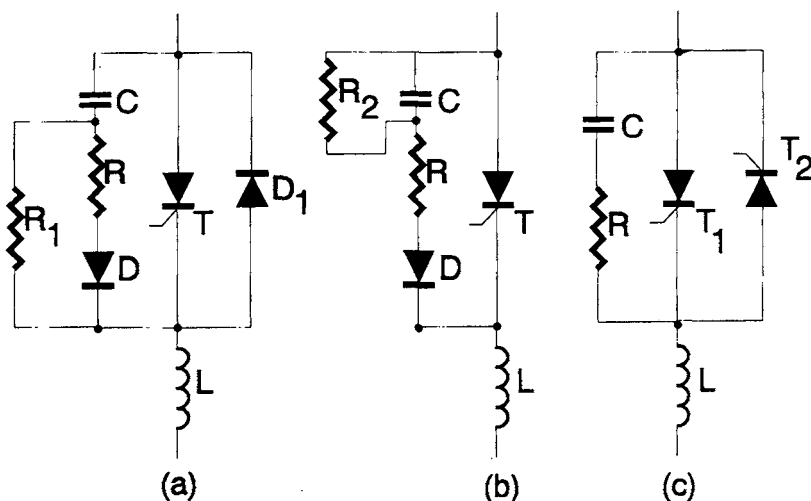


Figura 1. Redes Snubbers.

Con la utilización de redes snubbers en los circuitos con tiristores se pretende, por un lado amortiguar los posibles picos transitorios de tensión y por otro que la derivada de tensión en bornas del tiristor quede por debajo de un determinado valor límite. La consecución de estos objetivos resulta parcialmente contrapuesta, ya que los valores de los componentes que minimizan la derivada de tensión no lo hacen con los picos de tensión y a la inversa. Además será necesario tener en cuenta los posibles picos de corriente y la potencia que se disipa en la red de protección.

Existen diversas técnicas para obtener soluciones de compromiso entre los valores de los componentes que proporcionan la mejor solución en cada caso. El tanteo directo de los valores de los componentes resulta una técnica tediosa que difícilmente conduce a una solución satisfactoria. Mc Murray<sup>3</sup> propone una red  $RC$  óptima para conseguir el mínimo valor del producto de la tensión de pico por la máxima derivada. Los parámetros de esta red se obtienen de forma gráfica siendo necesario realizar una serie de tanteos hasta alcanzar el valor deseado. Existen nomogramas de diseño<sup>8</sup> que, basados en el análisis de una red snubbers  $RC$  (como la de la Figura 1(c)) excitada con un escalón para la tensión de entrada, permite obtener el valor de la resistencia y del condensador para conseguir, por ejemplo, la limitación en los picos de tensión, en la derivada de ésta para una determinada disipación de la red.

Los criterios de diseño de este tipo de redes pueden ser muy variados. En función de cada tipo de aplicación, se busca la optimización de una o más características que, afectadas por un factor de ponderación representen la importancia o peso de cada una.

El problema de diseño se puede plantear siguiendo el diagrama de la Figura 2. El circuito debe cumplir ciertas especificaciones para que su funcionamiento sea correcto. Existe un conjunto de valores, conocidos de antemano que denominamos datos (tensiones de alimentación, valores de componentes fijos, etc.). El resto de los valores del circuito (parámetros de diseño) debe ajustarse por el diseñador hasta conseguir que el circuito funcione adecuadamente (cumpla las especificaciones).

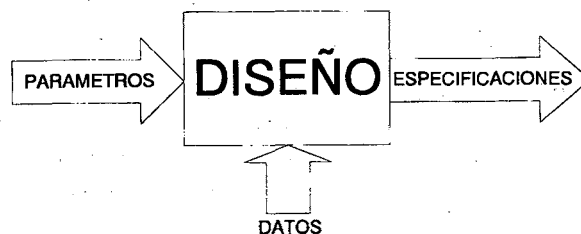


Figura 2. Diagrama para el diseño.

## TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

Las técnicas de optimización pueden ser incorporadas a los procesos de diseño aumentando su eficacia. En otros métodos de diseño, un cambio en el valor de algún componente (resistencia o condensador) supone casi siempre la mejora de unas características en detrimento de otras.

La finalidad de las técnicas de optimización es ajustar, automáticamente, los valores de los parámetros de diseño de tal forma que se mejoren globalmente las características del circuito. En la Figura 3 se representa el diagrama del proceso de diseño.

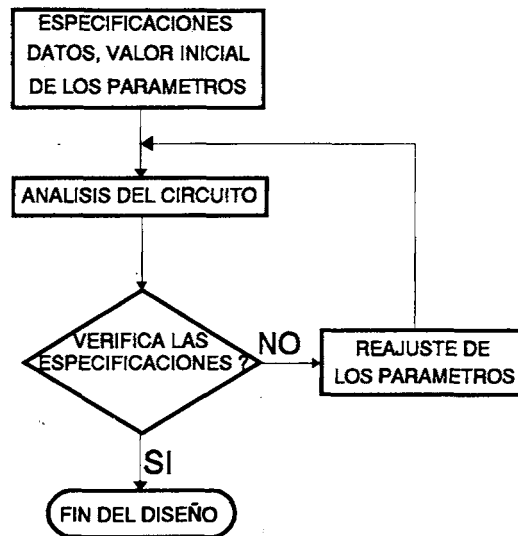


Figura 3. Diagrama del proceso de diseño.

El cálculo de los parámetros de las redes de protección, que deben tomar valores que satisfagan un compromiso entre varias características de diseño, puede ser abordado como un problema de optimización cuyo planteamiento formal requiere la definición de los siguientes elementos<sup>2</sup>:

1. Variables instrumentales, representadas por el vector  $\mathbf{x}$ , que son en este caso, los parámetros de diseño cuyo valor se pretende optimizar.

2. Función objetivo  $FObj(\mathbf{x})$ . Es una función de los parámetros de diseño cuyo valor hay que minimizar o maximizar, según el caso. Su definición es uno de los aspectos más delicados del problema y debe representar la diferencia entre las especificaciones deseadas y las características correspondientes a los valores actuales de los parámetros. Proponemos para esta aplicación la norma ponderada de segundo orden:

$$FObj(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m [P_i (s_i(\mathbf{x}) - sq_i)]^2 \quad (1)$$

donde:

$s_i(\mathbf{x})$  : valor de la  $i$ -ésima especificación de diseño para el valor  $\mathbf{x}$  de los parámetros

$sq_i$  : valor deseado de la  $i$ -ésima especificación

$P_i$  : factor de ponderación

El valor del vector  $\mathbf{x}$  que haga  $FObj(\mathbf{x}) = 0$  será la solución del problema que se producirá cuando:

$$s_i(\mathbf{x}) = sq_i \quad (2)$$

Si ello no fuera posible, como ocurre en la mayoría de los problemas reales, se intenta buscar el valor de  $\mathbf{x}$  que minimice  $FObj(\mathbf{x})$ , es decir que aproxime lo máximo  $s_i(\mathbf{x})$  a  $sq_i$ .

Por lo general en el diseño se tienen en cuenta varias especificaciones y para ello se incluyen los factores de ponderación que sirven para equilibrar el valor numérico de aquellas que se miden con distintos factores de escala y también para primar (destacar) unas sobre otras, según su importancia.

**3.** Conjunto de restricciones que han de verificar determinadas funciones dependientes de las variables instrumentales. En nuestro caso están determinadas por el hipercubo definido por los valores máximos y mínimos que limitan la variación de cada parámetro de diseño:

$$\mathbf{x}_{imin} < \mathbf{x}_i < \mathbf{x}_{imax} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Una vez planteado el problema, se aplica un algoritmo de búsqueda para localizar un valor de  $\mathbf{x}$  que minimice la función objetivo.

Los algoritmos propuestos por la investigación operativa se pueden clasificar en dos grupos: deterministas y no deterministas.

Los deterministas se basan en el cálculo del gradiente de la función objetivo y su éxito depende de que dicha función cumpla unas condiciones muy estrictas referentes a su convexidad.

Los no deterministas, en cambio, resultan menos exigentes en cuanto a las condiciones de la función objetivo, son más eficaces y más fáciles de programar; aunque su convergencia es más lenta.

Dado que los algoritmos de gradiente presentan muchas dificultades, especialmente en las zonas de variación brusca o zonas muy planas, hemos optado por el empleo de un algoritmo no determinista que es una variante del salto aleatorio propuesto en la referencia [1].

Consiste en un método de búsqueda aleatoria (Figura 4), independiente del comportamiento local de la función objetivo (como su continuidad). No está dirigido por ninguna información en la selección de los puntos de búsqueda; por esta razón, es apropiado para la localización del mínimo global cuando la función posea múltiples mínimos, evitándose el problema de que el algoritmo se quede "enganchado" en cualquier mínimo local, tan característico de los métodos dirigidos por el gradiente.

Si deseamos buscar un mínimo de  $FObj(\mathbf{x})$  en un hipercubo definido por:

$$MIN \mathbf{x}_i < \mathbf{x}_i < MAX \mathbf{x}_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

la forma más simple de búsqueda aleatoria es generar vectores aleatorios  $\mathbf{x}_{md}$ , uniformemente distribuidos en el hipercubo y calcular el valor de la función objetivo

$FObj(x_{md})$  para cada uno de los vectores generados. Después de un número suficiente de pruebas nos quedamos con el vector que haga mínimo el valor de  $FObj$ .

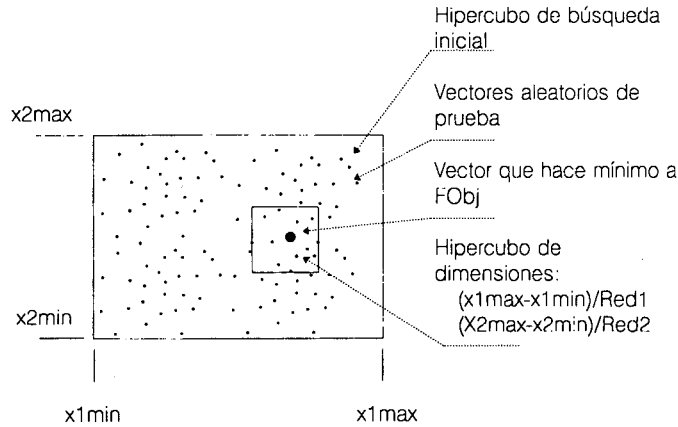


Figura 4. Búsqueda aleatoria.

Spang<sup>1</sup> ha demostrado que el número de evaluaciones de la función que se precisan para que, con un 90% de probabilidad, el mínimo se encuentre en un hipercono delimitado por  $(MAX x_i - MIN x_i)/Red_i$ , siendo  $Red_i$  un factor de reducción, es:

$$N(0.9) = 2.3 \prod_{i=1}^n Red_i \tag{5}$$

El algoritmo de búsqueda directa empleado, en líneas generales, consiste en:

1°. Realizar la búsqueda aleatoria en el hipercono inicial definido por las restricciones del problema, determinando el vector para el cual la función objetivo se hace mínima. El número de vectores aleatorios generados se calcula por la fórmula de Spang<sup>1</sup>.

2°. Reducir el tamaño del hipercono de búsqueda a un entorno del vector  $x_{FObjmin}$  (obtenido en el paso anterior) que hace mínima la función objetivo. Los límites del nuevo hipercono se calculan en función de los coeficientes de reducción del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \text{NUEVO } x_i \text{ MIN} &= x_{FObjmin} \left( 1 - \frac{1}{Red_i} \right) 0.9 \\ \text{NUEVO } x_i \text{ MAX} &= x_{FObjmin} \left( 1 + \frac{1}{Red_i} \right) 0.9 \end{aligned} \tag{6}$$

donde  $Red_i$  son los coeficientes de reducción. La finalidad del coeficiente 0.9 es acelerar la convergencia. Puede ser eliminado sin menoscabo de la eficacia del algoritmo.

La determinación de los límites del hipercono reducido por el método propuesto tiene la ventaja de que una parte del mismo podrá estar situada fuera del anterior (si el punto  $x_{FObjmin}$  se encontrase en las cercanías de sus límites). Sería un error

restringir el ámbito de búsqueda al hipercono reducido mostrado en la Figura 4 porque la probabilidad de que el mínimo de la función se encuentre en dicho hipercono es del 90%, no del 100%. En cada iteración se reduciría en un 10% la probabilidad de encontrar el mínimo, siendo necesario, por tanto permitir que el nuevo hipercono de búsqueda exceda los límites del anterior.

3°. Realizar la búsqueda aleatoria en el hipercono reducido y volver al punto 2°.

El proceso se interrumpe cuando el error esté por debajo del valor prefijado o se haya alcanzado el número máximo de iteraciones.

### APLICACIÓN AL DISEÑO DE REDES SNUBBERS

Como especificaciones de diseño para las redes snubbers de protección tomaremos, de forma general el máximo pico de tensión, la máxima derivada de ésta, el máximo pico de corriente y de potencia disipada en la red de protección, y la obtención del mínimo producto de la tensión de pico por derivada de la tensión.

Para obtener los valores de las especificaciones para cada  $x$  proponemos la utilización de un simulador discreto, para sistemas lineales o no lineales, de excelentes características por sus resultados y su simplicidad que permite una elevada velocidad de resolución, fundamental en un método iterativo como el propuesto. El diseño de los simuladores discretos se describe en la referencia bibliográfica [5].

Como se indicó anteriormente, y dada la cantidad de topologías de redes snubbers existentes, nos ocuparemos aquí del estudio de las tres redes snubbers para tiristores que se muestran en la Figura 1 y las posibles modificaciones o combinaciones entre ellas.

En la Figura 5 se muestra el circuito resultante de la combinación de las tres redes snubbers de la Figura 1.

Como puede observarse, la apertura o cierre de los interruptores  $SW$  da lugar a diferentes configuraciones de redes de protección. Concretamente, en este caso se pueden obtener dieciséis topologías diferentes.

#### Simulador discreto de las redes<sup>5</sup>

Para la obtención del simulador se han considerado diodos ideales, con lo que se simplifica notablemente el planteamiento del problema y se comete un error pequeño.

En la Figura 6 se muestra el diagrama del simulador del circuito de la Figura 5.

Las funciones lógicas de los interruptores  $S$  del simulador se obtienen a partir de la configuración escogida (mediante los interruptores  $SW$  del circuito de la Figura 5) y del estado de conducción o bloqueo de los diodos (si existen).

Denominamos  $D_{ON}$  y  $D_{1ON}$  a sendas variables lógicas que serán "1" en caso de que conduzcan  $D$  y  $D_1$ , respectivamente, y "0" en caso contrario. Se verificará que:

$$D_{ON} = 1 \text{ si } v_s(t) - v_i(t) \geq 0 \tag{7}$$

$$D_{1ON} = 1 \text{ si } v_s(t) \leq 0 \tag{8}$$

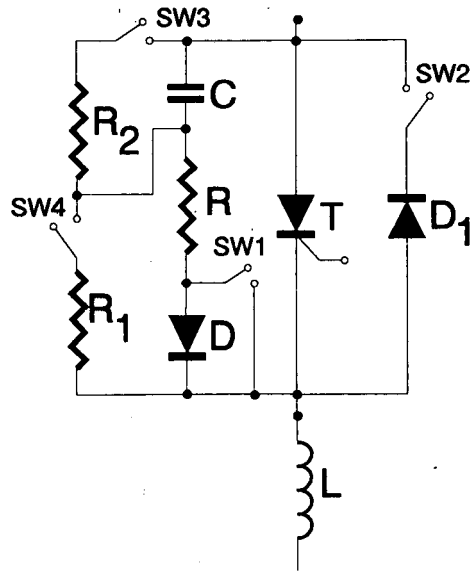


Figura 5. Red snubbers general.

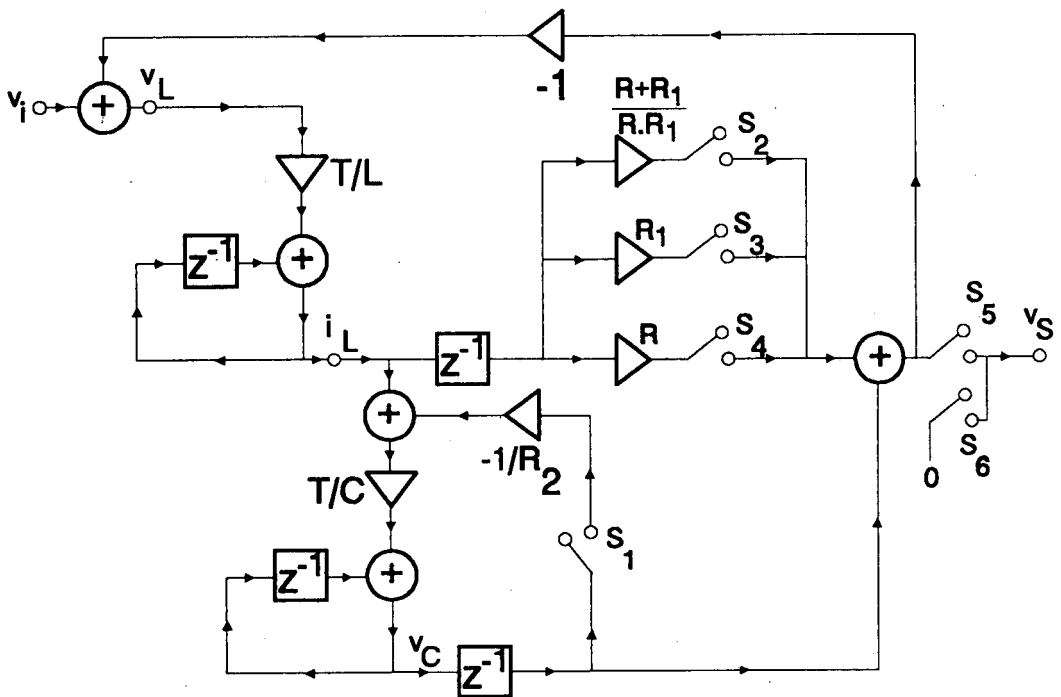


Figura 6. Diagrama del simulador.

Las funciones para los interruptores son:

$$S_1 = SW3 ; S_2 = SW4 (SW1 + \overline{SW1} \cdot D_{ON}) ; S_3 = \overline{SW4} (SW1 + \overline{SW1} \cdot D_{ON}) \quad (9)$$

$$S_4 = SW4 (\overline{SW1 + \overline{SW1} \cdot D_{ON}}) ; S_5 = \overline{SW2 \cdot D_{1ON}} ; S_6 = SW2 \cdot D_{ON}$$

y las ecuaciones de recurrencia:

$$v_C[n] = v_C[n-1] + \frac{T}{C} \left[ i_L[n-1] - \frac{v_C[n-1]}{R_2} \cdot SW3 \right] \quad (10)$$

$$v_s[n] = \overline{SW2 \cdot D_{1ON}} \cdot \left[ v_C[n-1] + i_L[n-1] \cdot \left( \frac{R \cdot R_1}{R + R_1} \cdot SW4 + R \cdot \overline{SW4} \right) \cdot \left( SW1 + \overline{SW1} \cdot D_{ON} \right) + R_1 \cdot SW4 \cdot \left( \overline{SW1 + \overline{SW1} \cdot D_{ON}} \right) \right] \quad (11)$$

$$i_L[n] = \frac{T}{L} (v_i[n] - v_s[n]) + i_L[n-1] \quad (12)$$

### Algoritmo de diseño

Para el cálculo de los valores de las variables instrumentales que hacen que la red se comporte conforme a las especificaciones de diseño, aplicaremos el método de optimización descrito en el apartado 3:

1. Las variable instrumentales son los valores de los componentes de la red snubbers que, en el caso más general (Figura 5), serán  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  y  $C$ .
2. Como función objetivo empleamos la norma ponderada de segundo orden (ecuación (1)).

Las especificaciones que se han considerado con carácter general son los valores máximos admisibles siguientes:

- Tensión (de pico) ( $v_{smax}$ ).
- Derivada de tensión ( $dv_s/dt|_{max}$ ).
- Corriente (de pico) ( $i_{Lmax}$ ).
- Potencia disipada ( $Pt_{max}$ ).

así como la obtención del mínimo valor del producto tensión por derivada de ésta ( $v_{smax} \cdot dv_s/dt|_{max}$ ).

En el caso que se desee un valor mínimo de una o más especificaciones, bastará con indicar valores máximos para las especificaciones deliberadamente bajos. En el caso límite:

$$sq_i = 0 \quad (13)$$

La función objetivo, teniendo en cuenta todas las especificaciones de diseño será:

$$FObj = (P_1 \cdot (v_s - v_{smax}))^2 + \left( P_2 \cdot \left( \frac{dv_s}{dt} - \frac{dv_s}{dt} \Big|_{max} \right) \right)^2 + (P_3 \cdot (i_L - i_{Lmax}))^2 + \\ + (P_4 \cdot (Pt - Pt_{max}))^2 + \left( P_5 \cdot \left( v_s \cdot \frac{dv_s}{dt} - v_{smax} \cdot \frac{dv_s}{dt} \Big|_{max} \right) \right)^2 \quad (14)$$

siendo  $P_i$  los diferentes factores de ponderación para cada una de las especificaciones. A través de estos factores se puede hacer que un término no se considere en la función objetivo (haciendo  $P_i = 0$ ); equilibrar el orden de magnitud de los términos que se expresen en distintas unidades o primar unos sobre otros.

3. El conjunto de restricciones lo constituye el hipercono que limita la variación de cada parámetro de diseño y está determinado por:

$$R_{min} < R < R_{max} ; R_{1min} < R_1 < R_{1max} ; R_{2min} < R_2 < R_{2max} ; C_{min} < C < C_{max} \quad (15)$$

El algoritmo de búsqueda para los valores de los componentes se aplica según lo indicado en un apartado anterior, realizando el cálculo de las magnitudes del circuito, en cada iteración, con el simulador discreto.

### EL PROGRAMA "S.D.R.S."

Se ha implementado un programa de ordenador, en Turbo Pascal 6.0, que permite, por un lado, el diseño de las diferentes topologías de redes snubbers (dieciséis en total) que se pueden obtener del circuito general planteado en la Figura 5 y, por otro, la simulación con representación gráfica e indicación de valores máximos de las citadas redes para unos valores determinados de sus componentes. El programa consta por tanto de dos partes diferenciadas (diseño y simulación), que están muy relacionadas entre sí. El principal objetivo del programa es el diseño de las redes snubbers. Para ello hay que realizar numerosas simulaciones (una en cada iteración). No siendo el resultado de cada una de éstas interesante para el usuario, no se visualizan. (Si se hiciera así el tiempo de procesamiento aumentaría considerablemente). Por el contrario, sí resulta de gran interés comprobar, mediante la simulación, el comportamiento de la red para los valores de componentes obtenidos.

Como fuentes de tensión para la red se han considerado el escalón de cualquier amplitud y signo y con cualquier tiempo de subida desde 0s., la señal senoidal de

cualquier amplitud, frecuencia y fase inicial y la onda cuadrada de cualquier amplitud; Duty Cycle, frecuencia, etc..

Para realizar un diseño se indica, por un lado, la topología escogida, las características de la alimentación y el valor de la bobina serie (que se considera constante) y por otro las especificaciones del diseño (máxima tensión de pico, máxima derivada de tensión, etc.) y los factores de ponderación que se consideren según se quiera o no primar unas especificaciones sobre otras.

Ejecutado el procedimiento de cálculo, el programa nos presenta los valores de los componentes (resistencias y condensador) que hacen que el comportamiento del circuito se aproxime lo máximo posible a las especificaciones de partida.

Como características del programa destacaremos su facilidad de uso y las múltiples situaciones de diseño que contempla tanto para fenómenos de recuperación directa como inversa en los circuitos con tiristores.

Aunque el programa puede ejecutarse en cualquier ordenador tipo PC con tarjeta gráfica VGA, debido a la cantidad de iteraciones que hay que realizar para el diseño, se recomienda la utilización de ordenadores de la gama alta (486 DX o 386 DX con procesador matemático).

## EJEMPLO DE DISEÑO

Para mostrar las posibilidades del método propuesto se resolverá un caso cuyos resultados se contrastarán con los obtenidos por otros métodos.

Se pretende diseñar una red snubbers sin polarizar para proteger un par de tiristores en antiparalelo. Utilizaremos la red de la Figura 1(c) y tomaremos los siguientes datos de partida:

- Excitación: escalones de tensión de  $\pm 600V$  a una frecuencia de  $400Hz$ .
- Inductancia ( $L$ ):  $9.4675\mu H$ .

Las especificaciones serán los valores máximos permitidos de:

- Pico de tensión:  $\pm 732V$ . (22% sobre  $v_i$ ).
- Derivada de tensión:  $\pm 500V/\mu s$ .
- Pico de corriente:  $\pm 50A$ .
- Disipación de potencia:  $50W$ .

Al haber limitado los valores máximos de pico de tensión y de derivada, no se considera necesario incluir la condición de mínimo al valor producto de éstas.

Las **variable instrumentales** en este caso son  $R$  y  $C$ .

Antes de plantear la función objetivo haremos algunas consideraciones de carácter práctico sobre la misma. En principio se podría pensar que la mejor solución es considerar a todas las especificaciones como nulas ( $sq_i = 0$ ) ya que así los valores que se obtendrían serían mínimos. En realidad esto no ocurre y se produciría un desequilibrio entre los términos de la función objetivo de manera que algunos serían muy bajos a costa de otros que resultarían excesivamente grandes. Si tomamos los valores de las especificaciones ( $sq_i$ ) exactamente iguales a los valores máximos, podría

ocurrir que la aproximación a ese valor se hiciese por arriba con lo que superaríamos el máximo valor fijado. Recomendamos tomar un valor de las  $sq_i$  ligeramente inferior a los valores máximos permitidos. Hemos comprobado que una reducción del 10% proporciona excelentes resultados.

La función objetivo, con las consideraciones anteriores será:

$$FObj = (P_1 \cdot (v_s - 685))^2 + \left( P_2 \cdot \left( \frac{dv_s}{dt} - 450 \right) \right)^2 + (P_3 \cdot (i_L - 45))^2 + (P_4 \cdot (Pt - 45))^2 + \left( P_5 \cdot \left( v_s \cdot \frac{dv_s}{dt} - 0 \right) \right)^2 \quad (16)$$

Los factores de ponderación, teniendo en cuenta que damos el mismo peso a los diferentes términos y que no consideramos el producto tensión por derivada, los hemos tomado como:

$$P_1 = 1 ; P_2 = 1 ; P_3 = 1 ; P_4 = 1 ; P_5 = 0 \quad (17)$$

Se ha aplicado el programa S.D.R.S. con los valores anteriormente indicados y, para el escalón positivo (sería igual para el negativo) se obtiene el siguiente resultado:

$$R = 7.8\Omega \quad C = 0.29\mu F \quad (18)$$

Con el método de los nomogramas de diseño propuestos en la referencia [8] el resultado es:

$$R = 7.6\Omega \quad C = 0.25\mu F \quad (19)$$

que coincide prácticamente con los anteriores.

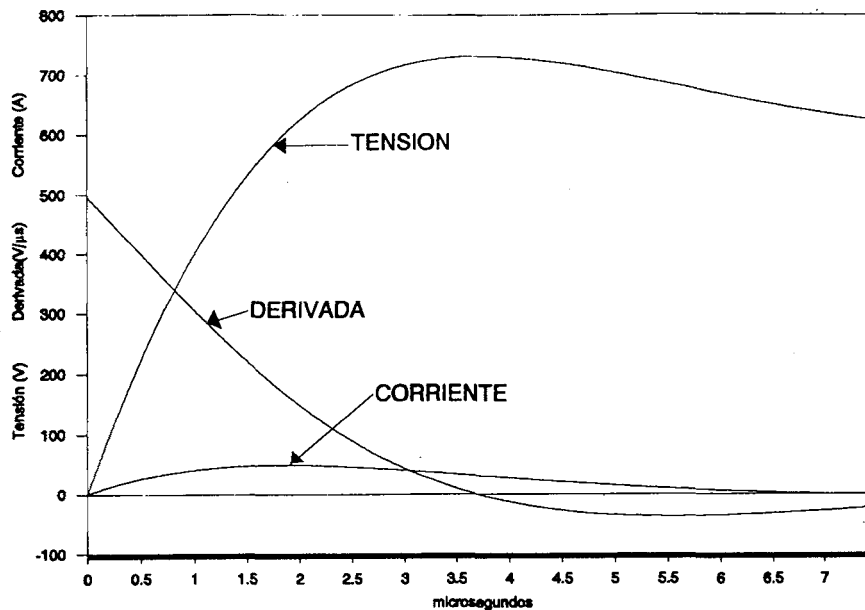


Figura 7. Valores de la tensión, la corriente y la derivada de tensión obtenidos por simulación.

Con los primeros resultados se ha realizado la simulación, con el programa comercial PSPICE y con la opción de simulación de nuestro programa habiéndose obtenido los mismos resultados en ambos casos. La Figura 7 nos muestra los valores de la tensión, la corriente y la derivada de tensión obtenidas por simulación.

Los valores de las especificaciones máximas resultantes son:

$$v_{Smax} = 730.70V \quad \left. \frac{dv_s}{dt} \right|_{max} = 496.51V/\mu s \quad i_{Lmax} = 49.1A \quad Pt = 43.88W \quad (20)$$

### CONCLUSIONES

Con el método que proponemos, el diseño de las redes snubbers de protección se realiza de una forma directa y rápida, para el caso más general, aprovechando las posibilidades de cálculo del ordenador.

Se ha comprobado, igualmente, las excelentes características de los simuladores discretos en cuanto a su fiabilidad y, especialmente en nuestro caso, la sencillez de las ecuaciones de recurrencia que permiten una elevada velocidad de simulación, lo cual es fundamental para un método iterativo como el propuesto.

El programa S.D.R.S.. de fácil utilización, permite el diseño y la simulación del comportamiento de este tipo de redes de una forma versátil, utilizando los algoritmos indicados.

### REFERENCIAS

1. F.J. Belaza, "Fundamento del análisis y diseño de circuitos ayudado por ordenador", Dto. Publicaciones de la E.T.S.I.T., Madrid, (1981).
2. O.L. Mangasarian, "Nonlinear Programming", McGraw-Hill, USA, (1969).
3. W. McMurray, "Optimum snubbers for power semiconductor", *IEEE Sixth Annual Meeting of I.A. Group*, (1971).
4. N. Mohan, T.M. Underland y W.P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications and Design", Wiley, Nueva York, (1989).
5. P. Morales y P. Carrión, "Modelado y simulación de circuitos electrónicos no lineales", *Instrumentación y Automática*, no. 231, (1993).
6. Rashid, "Power Electronics", Wiley, Nueva York, (1988).
7. R.E. Tarter, "Principles of Solid-State Power Conversation", Sams, Indiana, (1985).
8. "SCR MANUAL", General Electric, 5th. ed., (1972).