

El tiristor

Original de:

**Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior**

Autor:

Juan Domingo Aguilar Peña

Autorizado para:

<http://www.redeya.com>

1.1 ESTRUCTURAS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL SEMICONDUCTOR Y ESTRUCTURA

El tiristor (SCR) es un dispositivo semiconductor biestable de cuatro capas, PNPN (Fig 1.1), con tres terminales: ánodo (A), cátodo (K) y puerta (G), (Fig. 1.2). Puede conmutar de bloqueo a conducción, o viceversa, en un solo cuadrante.

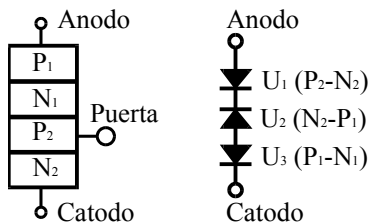


Fig.1.- Estructura del tiristor.

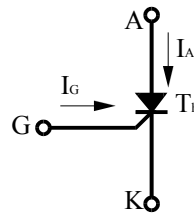


Fig.2.- Símbolo del tiristor.

La curva característica del SCR es la representada en la figura 1.3, donde:

- V_{DRM} = Valor máximo de voltaje repetitivo directo.
- V_{RRM} = Valor máximo de voltaje repetitivo inverso.
- V_T = Caída de tensión de trabajo.
- I_T = Intensidad directa de trabajo.
- I_H = Intensidad de mantenimiento en estado de conducción.
- I_{DRM} = Intensidad directa en estado de bloqueo.
- I_{RRM} = Intensidad inversa en estado de bloqueo.

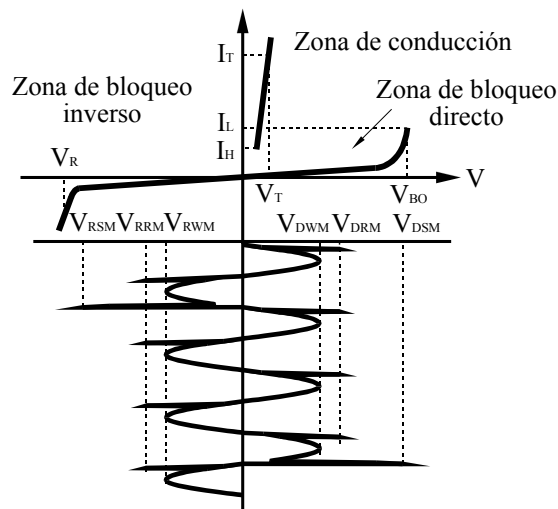


Fig.3.- Curva característica del tiristor.

1.1.2 MODOS DE FUNCIONAMIENTO

- $V_{AK} < 0 \Rightarrow$ Zona de bloqueo inverso: SCR bloqueado (circuito abierto) (Fig. 1.3).
 - Solo lo recorre una débil corriente de fuga inversa (I_{RRM}).
 - Hay que intentar no sobrepasar la tensión inversa máxima (V_{RRM}).
- $V_{AK} > 0$; sin excitar puerta \Rightarrow Zona de bloqueo directo: SCR bloqueado (circ. abierto).
 - Solo lo recorre una débil corriente de fuga directa (I_{DRM}).
 - Hay que intentar no sobrepasar la tensión directa máxima (V_{DRM}) (Fig. 1.3).
- $V_{AK} > 0$; excitada en puerta, \Rightarrow Zona de conducción: SCR conduce (cortocircuito).
 - entre G y K circula un impulso positivo de corriente (Fig. 1.3).
 - Duración del impulso de cebado: lo suficiente para que $I_A = I_L$ (de enganche).
 - Mientras el SCR conduce, este se comporta como un diodo.
- El SCR se bloquea cuando la corriente directa (I_T) $<$ corriente de mantenimiento (I_H), en cuyo caso la puerta pierde todo poder sobre el SCR.
- Los modos de funcionamiento del SCR pueden ser:
 - Todo o nada: para una señal de entrada (Fig. 1.4.a), el SCR suprime algunos semiperíodos suministrando a la carga paquetes de semiondas (Fig. 1.4.b).
 - Ángulo de fase: (Fig. 1.4 c) se mantienen todos los semiperíodos, se suprime parte de cada uno de ellos (ángulo de bloqueo) y el resto se transmite a la carga (ángulo de conducción).

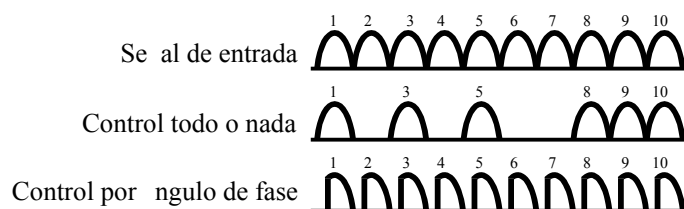


Fig.4.- Modos de funcionamiento del tiristor.

1.1.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES

- Interruptor casi ideal.
- Soporta tensiones altas.
- Amplificador eficaz.
- Es capaz de controlar grandes potencias.
- Fácil controlabilidad.
- Relativa rapidez.
- Características en función de situaciones pasadas (memoria).

1.2 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

Corresponden a la región ánodo-cátodo. Son aquellos valores que determinan las posibilidades máximas de un determinado SCR. Estos datos son:

- Tensión inversa de pico de trabajo V_{RWM}
- Tensión directa de pico repetitiva V_{DRM}
- Tensión directa V_T
- Corriente directa media I_{TAV}
- Corriente directa eficaz I_{TRMS}
- Corriente directa de fugas I_{DRM}
- Corriente inversa de fugas I_{RRM}
- Corriente de mantenimiento I_H

Las características térmicas a tener en cuenta al trabajar con tiristores son:

- Temperatura de la unión T_j
- Temperatura de almacenamiento T_{stg}
- Resistencia térmica contenedor-disipador R_{c-d}
- Resistencia térmica unión-contenedor R_{j-c}
- Resistencia térmica unión-ambiente R_{j-a}
- Impedancia térmica unión-contenedor R_{j-c}

1.3 CARACTERÍSTICAS DE CONTROL

Corresponden a la región puerta-cátodo y determinan las propiedades del circuito de mando que responde mejor a las condiciones de disparo. Los fabricantes definen las siguientes características:

- Tensión directa máx. V_{GFM}
- Tensión inversa máx. V_{GRM}
- Corriente máxima I_{GM}
- Potencia máxima P_{GM}
- Potencia media P_{GAV}
- Tensión puerta-cátodo para el encendido V_{GT}
- Tensión residual máxima que no enciende ningún elemento V_{GNT}
- Corriente de puerta para el encendido I_{GT}
- Corriente residual máxima que no enciende ningún elemento ... I_{GNT}

1.3.1 ÁREA DE DISPARO SEGURO

En este área (Fig. 1.5) se obtienen las condiciones de disparo del SCR. Las tensiones y corrientes admisibles para el disparo se encuentran en el interior de la zona formada por las curvas:

- **Curva A y B:** límite superior e inferior de la tensión puerta-cátodo en función de la corriente positiva de puerta, para una corriente nula de ánodo.
- **Curva C:** tensión directa de pico admisible V_{GF} .
- **Curva D:** hipérbola de la potencia media máxima P_{GAV} que no debemos sobrepasar.

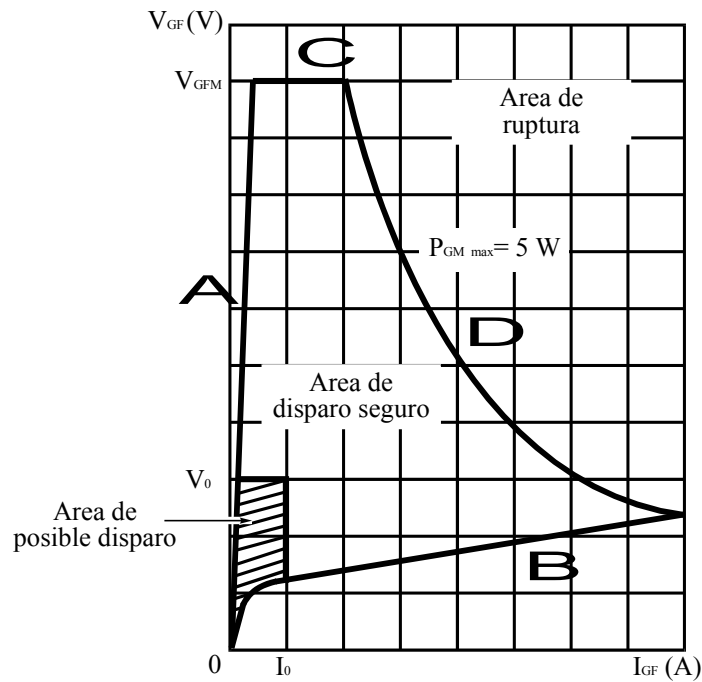


Fig.5.- Curva características de puerta del tiristor.

1.4 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

1.4.1 CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

- **Tensiones transitorias:**

- Valores de la tensión superpuestos a la señal de la fuente de alimentación.
- Son breves y de gran amplitud.
- La tensión inversa de pico no repetitiva (V_{RSM}) debe estar dentro de esos valores.

- **Impulsos de corriente:**

- Para cada tiristor se publican curvas que dan la cantidad de ciclos durante los cuales puede tolerarse una corriente de pico dada. (Fig. 1.6).
- A mayor valor del impulso de corriente, menor es la cantidad de ciclos.
- El tiempo máximo de cada impulso está limitado por la T^{ca} media de la unión.

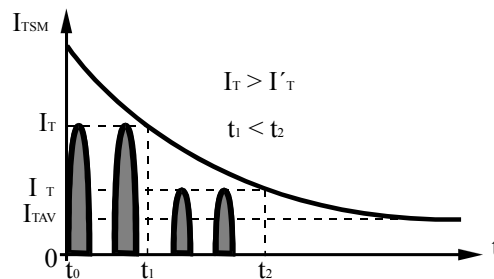


Fig.6.- Curva de limitación de impulsos de corriente

- **Ángulos de conducción:** (Fig. 1.7)

- La corriente y tensión media de un SCR dependen del ángulo de conducción.
- A mayor ángulo de conducción, se obtiene a la salida mayor potencia.
- Un mayor ángulo de bloqueo o disparo se corresponde con un menor ángulo de conducción:

$$\boxed{\text{ángulo de conducción} = 180^\circ - \text{ángulo de disparo}}$$

- Conociendo la variación de la potencia disipada en función de los diferentes ángulos de conducción podremos calcular las protecciones necesarias.

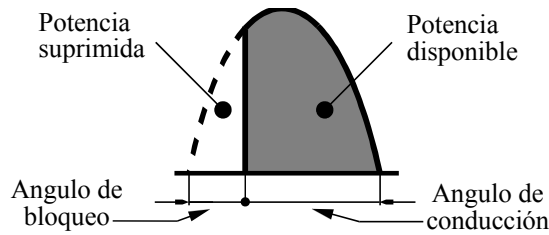


Fig.7.- Ángulo de bloqueo y conducción de un tiristor.

1.4.2 CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN

Los tiristores no son interruptores perfectos, necesitan un tiempo para pasar de corte a conducción y viceversa. Vamos a analizar este hecho.

1.4.2.1 TIEMPO DE ENCENDIDO (T_{ON})

Tiempo que tarda el tiristor en pasar de corte a conducción (Fig. 1.8).

- **Tiempo de retardo (t_d):** tiempo que transcurre desde que la corriente de puerta alcanza el 50 % de su valor final hasta que la corriente de ánodo alcanza el 10 % de su valor máximo.
- **Tiempo de subida (t_r):** tiempo necesario para que la corriente de ánodo pase del 10 % al 90 % de su valor máximo, o, el paso de la caída de tensión en el tiristor del 90 % al 10 % de su valor inicial.

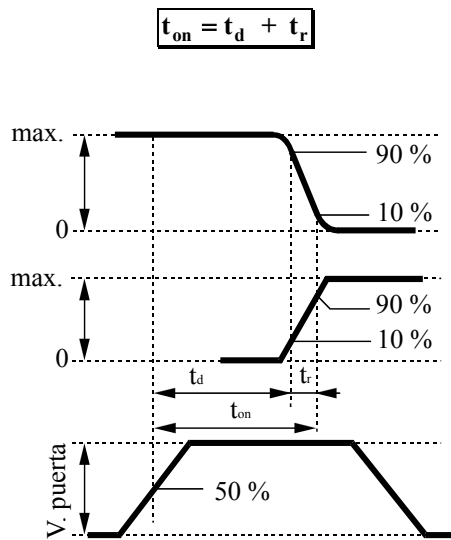


Fig.8.- Tiempo de encendido T_{on} .

El tiristor

1.4.2.2 TIEMPO DE APAGADO (T_{OFF})

Tiempo que tarda el tiristor en pasar de conducción a corte (Fig. 1.9).

- **Tiempo de recuperación inversa (t_{rr}):** tiempo en el que las cargas acumuladas en la conducción del SCR, por polarización inversa de este, se eliminan parcialmente.
- **Tiempo de recuperación de puerta (t_{gr}):** tiempo en el que, en un número suficiente bajo, las restantes cargas acumuladas se recombinan por difusión, permitiendo que la puerta recupere su capacidad de gobierno.

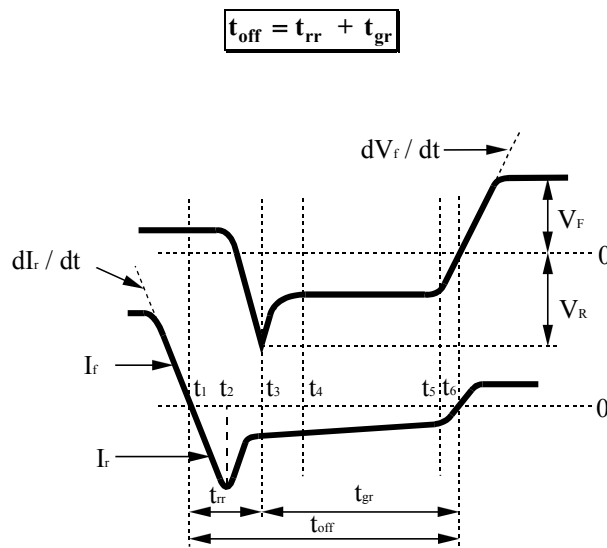


Fig.9.- Tiempo de apagado T_{off} .

1.4.3 MODOS DE EXTINCIÓN DEL TIRISTOR

1.4.3.1 EXTINCIÓN POR CONTACTO MECÁNICO

Extinción del SCR interrumpiendo el circuito mediante un cortocircuito (Fig.1.10 a-b) o introduciendo una corriente inversa usando una fuente auxiliar (Fig.1.10 c) o un condensador cargado (Fig.1.10 d-e).

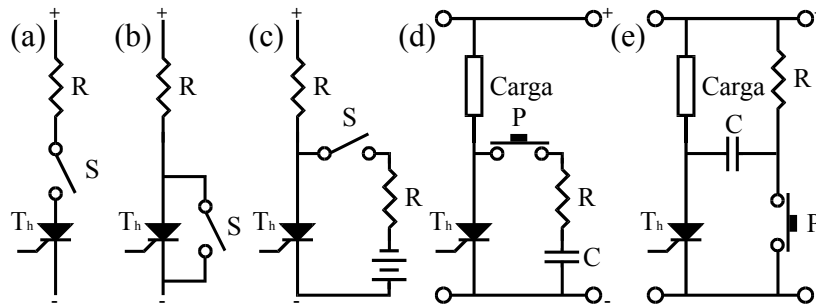


Fig. 10.- Formas de extinción por contacto mecánico.

1.4.3.2 EXTINCIÓN POR CONMUTACIÓN FORZADA

Se fuerza a la corriente a pasar a través del tiristor en sentido inverso, consiguiendo un tiempo de descebado menor.

- **Conmutación forzada por autoconmutación:** circuitos que desceban al SCR automáticamente tras un tiempo predeterminado desde la aplicación del impulso de disparo. Los más usados son:
 - Circuito oscilante LC en paralelo: C cargado \Rightarrow disparo del SCR \Rightarrow C se descarga sobre SCR en sentido directo \Rightarrow por oscilación del circuito LC, C se carga en sentido opuesto hasta que I_R (de carga) $< I_{GT}$ \Rightarrow se produce el descebado (Fig. 1.11).

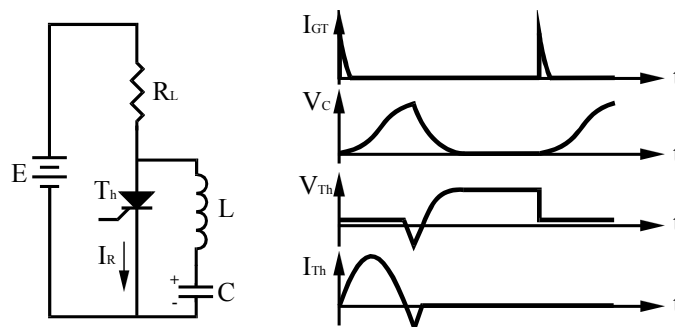


Fig. 11.- Extinción por circuito LC en paralelo.

El tiristor

- Circuito oscilante LC en serie: La I que circula al disparar el SCR excita al circuito LC, pasado el 1^{er} semiciclo de la oscilación, la I se invierte y desceba el SCR (Fig. 1.12).

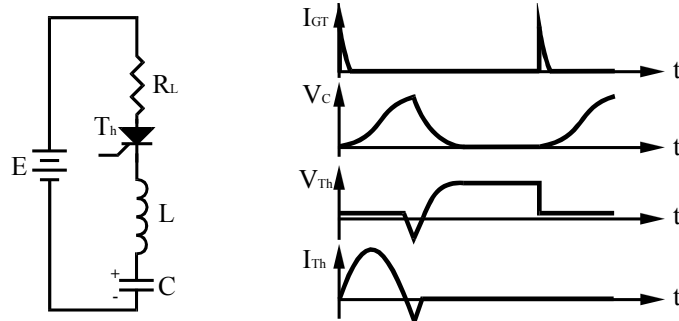


Fig. 12.- Extinción por circuito LC en serie.

- **Conmutación forzada por medios exteriores**: circuitos que desceban al SCR sin depender del tiempo en que se produjo el disparo. Los más usados son:
 - Conmutación por medio de C.A.: el SCR se desceba cada vez que cambia el sentido de la tensión al semiperíodo negativo (Fig. 1.13). La frecuencia no debe superar al tiempo de conmutación.

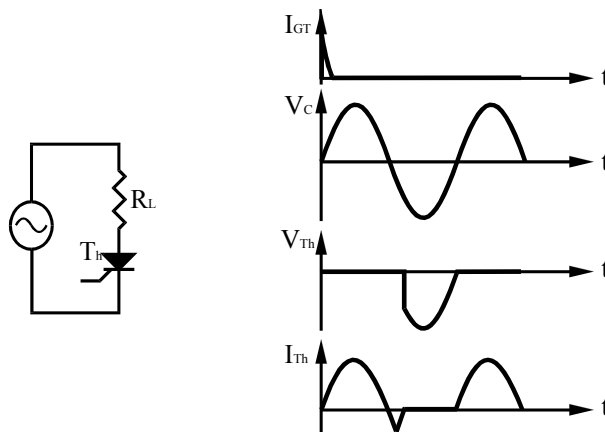


Fig. 13.- Circuito de conmutación por medio de C.A.

El tiristor

- Conmutación por tiristor auxiliar: si T_1 conduce y T_2 está en corte \Rightarrow C se carga por T_1 ; cuando T_2 conmuta a conducción \Rightarrow T_1 se bloquea \Rightarrow C se carga por R_L en sentido inverso; pasado un tiempo t_q , que depende de C y debe ser $> t_{off}$ del SCR \Rightarrow la tensión en T_1 (V_{T1}) tiende a hacerse positiva (Fig. 1.14).

$$V_{Th1} = V - R_L \cdot I(t) = V \cdot (1 - 2e^{-t/R_L C})$$

$$t_q \geq 0,7 \cdot R_L \cdot C$$

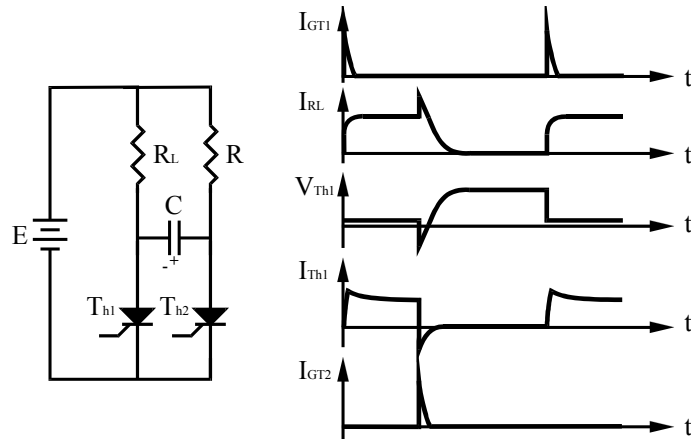


Fig.14.- Circuito de conmutación por tiristor auxiliar.

1.5 MÉTODOS DE DISPARO

Para producir el disparo del SCR: $I_{AK} > I_L$. Para mantenerse en la zona de conducción, por el SCR debe circular I_H , por debajo de la cual el SCR se bloquearía.

1.5.1 MÉTODOS DE DISPARO

1.5.1.1 DISPARO POR PUERTA

- En la figura 1.15 tenemos un circuito de disparo por puerta.
- El valor requerido de V_T necesario para disparar el SCR es: $V_T = V_G + I_G \cdot R$
- R viene dada por la pendiente de la recta tangente a la curva de máxima disipación de potencia (Fig 1.16) para obtener la máxima seguridad en el disparo. $R = V_{FG} / I_{FG}$
- Una vez disparado el SCR perdemos el control en puerta.
- Las condiciones de bloqueo se recobran cuando $V_{AK} < V_H$ y cuando $I_{AK} < I_H$

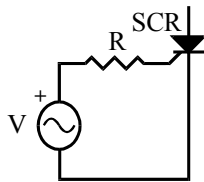


Fig.15.- Circuito de control por puerta de un SCR

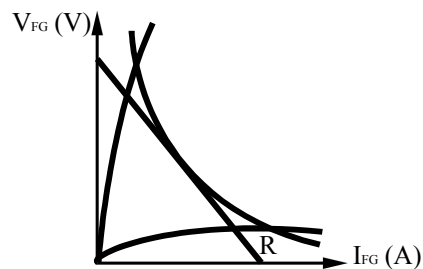


Fig.16.- Recta tangente a la curva de máx. disipación de potencia

1.5.1.2 DISPARO POR MÓDULO DE TENSIÓN

Es el debido al mecanismo de multiplicación por avalancha.

1.5.1.3 DISPARO POR GRADIENTE DE TENSIÓN

Una subida brusca del potencial de ánodo en el sentido directo de conducción provoca el disparo (Fig. 1.17). Este caso más que un método, se considera un inconveniente.

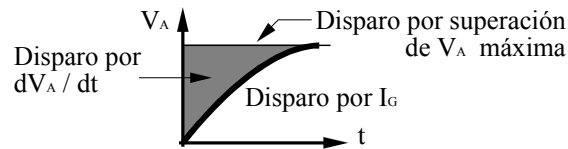


Fig.17.- Zona de disparo por gradiente de tensión.

1.5.1.4 DISPARO POR RADIACIÓN

Está asociado a la creación de pares electrón-hueco por la absorción de la luz del elemento semiconductor. El SCR activado por luz se llama LASCR.

1.5.1.5 DISPARO POR TEMPERATURA

Asociado al aumento de pares electrón-hueco generados y recogidos por la unión N_2-P_1 de la estructura del SCR (Fig. 1.1).

La tensión de ruptura V_{BR} (si se alcanza durante 10 ms, el SCR puede destruirse) permanece cte. hasta un cierto valor de la T^a y después disminuye al aumentar esta.

1.5.2 CONDICIONES NECESARIAS PARA EL CONTROL DE UN SCR

- Disparo: – Ánodo positivo respecto al cátodo.
– La puerta debe recibir un pulso positivo con respecto al cátodo.
– En el momento del disparo $I_{AK} > I_L$
- Corte: – Anulamos la tensión V_A
– Incrementamos R_L hasta que $I_{ak} < I_H$

1.6 LIMITACIONES DEL TRANSISTOR

1.6.1 LIMITACIONES DE LA FRECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO

- La frecuencia de trabajo en los SCR no puede superar ciertos valores.
- El límite es atribuible a la duración del proceso de apertura y cierre del dispositivo.
- La frecuencia rara vez supera los 10 KHz.

1.6.2 LIMITACIONES DE LA PENDIENTE DE TENSIÓN dv/dt

dv/dt es el valor mínimo de la pendiente de tensión por debajo del cual no se producen picos transitorios de tensión de corta duración, gran amplitud y elevada velocidad de crecimiento.

A) CAUSAS

- **La alimentación principal** produce transitorios difíciles de prever en aparición, duración (inversamente proporcional a su amplitud) y amplitud.
- **Los contactores entre la alimentación de tensión y el equipo:** cuya apertura y cierre pueden producir transitorios de elevada relación dv/dt (hasta $1.000 V/\mu s$) produciendo el basculamiento del dispositivo.
- **La conmutación de otros tiristores cercanos** que introducen en la red picos de tensión.

B) EFECTOS

- Puede provocar el cebado del tiristor, perdiendo el control del dispositivo.
- La dv/dt admisible varía con la temperatura.

1.6.3 LIMITACIONES DE LA PENDIENTE DE INTENSIDAD di/dt

di/dt es el valor mínimo de la pendiente de la intensidad por debajo de la cual no se producen puntos calientes.

A) CAUSAS

- Durante el cebado, la zona de conducción se reduce a una parte del cátodo cerca de la puerta, si el circuito exterior impone un crecimiento rápido de la intensidad, en esta zona la densidad de corriente puede alcanzar un gran valor.
- Como el cristal no es homogéneo, existen zonas donde la densidad de intensidad es mayor (puntos calientes).

B) EFECTOS

- En la conmutación de bloqueo a conducción la potencia instantánea puede alcanzar valores muy altos.
- La energía disipada producirá un calentamiento que, de alcanzar el límite térmico crítico, podría destruir el dispositivo.

1.6.4 PROTECCIONES CONTRA dv/dt Y di/dt

- Solución: colocar una red RC en paralelo con el SCR y una L en serie (Fig. 1.18).
- Cálculo: método de la constante de tiempo y método de la resonancia.

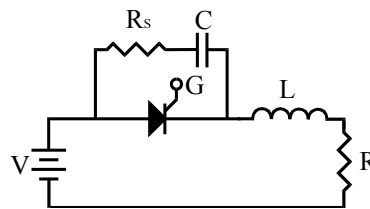


Fig.18.- Circuito de protección contra dv/dt y di/dt

1.6.4.1 MÉTODO DE LA CONSTANTE DE TIEMPO

- **Cálculo de R y C:**

1.- Hallamos el valor mínimo de la cte. de tiempo τ de la dv/dt :
donde $V_{DSM} = V$ de pico no repetitiva de bloqueo directo.

Calculamos el valor de R y C:
$$\tau = \frac{0,63 \cdot V_{DSM}}{(dv / dt)_{min}}$$

I_L = corriente en la carga
 R_L = resistencia de carga.
 I_{TSM} = corriente directa de pico no repetitiva.
 V_A = tensión de ánodo.
 Γ = coeficiente de seguridad (de 0,4 a 0,1).

$$C = \frac{\tau}{R_L}$$
$$R_s = \frac{V_{A(max)}}{(I_{TSM} - I_L) \cdot \Gamma}$$

El tiristor

- 2.- Hallamos el valor de R_{\min} que asegura la no superación de la di/dt máxima especificada (a partir de la ecuación de descarga de C):

$$R_{\min} = \frac{\sqrt{V_{A(\max)}}}{(di/dt) \cdot C}$$

- **Cálculo de L:**

$$L = \frac{V_{A(\max)}}{(di/dt)}$$

1.6.4.2 MÉTODO DE LA RESONANCIA

- Elegimos R, L y C para entrar en resonancia

- El valor de la frecuencia es: $f = \frac{dv/dt}{2\pi \cdot V_{A(\max)}}$

- en resonancia: $f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \Rightarrow C = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot L}$

- El valor de L es el que más nos interese, normalmente: $L = 50 \mu H$

- El valor de R será: $R_s = \frac{\sqrt{L}}{C}$

1.6.5 LIMITACIONES DE LA TEMPERATURA

- Hallamos la potencia que disipa el dispositivo sin radiador: $P_{(AV)} = \frac{T_j - T_a}{R_{ja}}$

- Hallamos el valor de la intensidad media de conducción ($I_{T(AV)}$) para el factor de forma a de un ángulo de conducción dado:

$$a = \frac{I_{T(RMS)}}{I_{T(AV)}} \Rightarrow I_{T(AV)} = \frac{I_{T(RMS)}}{a} \quad \left(I_{T(RMS)} = \frac{P_L}{V_{e(RMS)}} \right)$$

- Observando las curvas de disipación de potencia (Fig. 1.19) obtenemos la potencia disipada sin radiador, si esta es menor que la teórica, el dispositivo necesita radiador.

El tiristor

- De dichas las curvas obtenemos el valor de la R_{ca} (contenedor-ambiente) que, para una R_{cd} (contenedor-disipador) dada obtenemos el valor de la resistencia térmica del disipador:

$$R_d = R_{ca} - R_{cd}$$

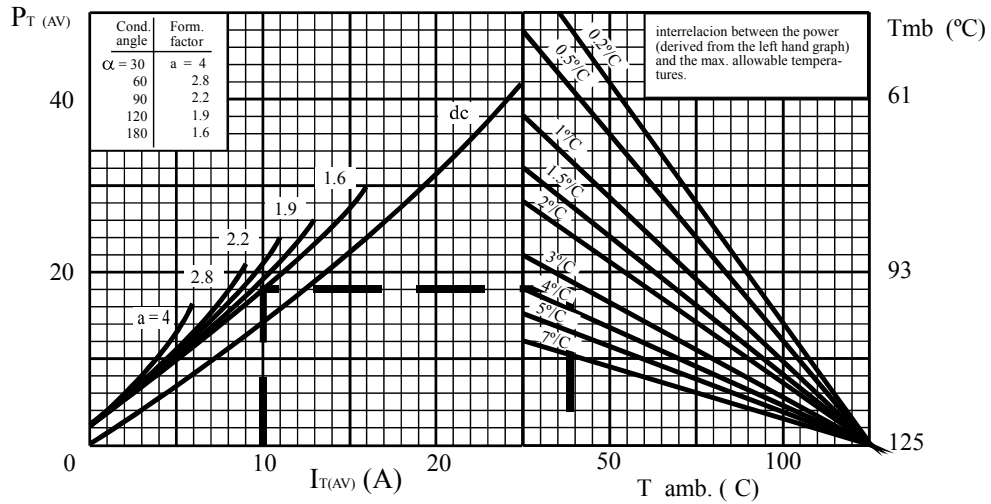


Fig. 19.- Relación entre la potencia y la temperatura para una intensidad dada.

INDICE

1.1	<u>ESTRUCTURAS Y CARACTERÍSTICAS generales</u>	1
1.1.1	<u>descripción del semiconductor y estructura</u>	1
1.1.2	<u>modos de funcionamiento</u>	2
1.1.3	<u>características generales</u>	2
1.2	<u>características estáticas</u>	3
1.3	<u>características de control</u>	3
1.3.1	<u>área de disparo seguro</u>	4
1.4	<u>características DINÁMICAS</u>	5
1.4.1	<u>características dinámicas</u>	5
1.4.2	<u>características de conmutación</u>	6
1.4.3	<u>modos de extinción del tiristor</u>	8
1.5	<u>métodos de disparo</u>	11
1.5.1	<u>métodos de disparo</u>	11
1.5.2	<u>condiciones necesarias para el control de un SCR</u>	12
1.6	<u>limitaciones del transistor</u>	13
1.6.1	<u>limitaciones de la frecuencia de funcionamiento</u>	13
1.6.2	<u>limitaciones de la pendiente de tensión dv/dt</u>	13
1.6.3	<u>limitaciones de la pendiente de intensidad di/dt</u>	13
1.6.4	<u>protecciones contra dv/dt y di/dt</u>	14
1.6.5	<u>limitaciones de la temperatura</u>	15