

TIRISTORES Y TRIACS - RECOMENDACIONES

Estos apuntes intentan proveer una interesante, descriptiva y práctica introducción a las reglas de oro que deben seguirse en el uso exitoso de tiristores y triacs en aplicaciones de control de potencia.

El Tiristor

Un tiristor es un rectificador controlado, donde la corriente que circula de forma unidireccional desde el ánodo al cátodo, esta circulación de corriente es iniciada por una corriente pequeña de señal desde la puerta al cátodo.

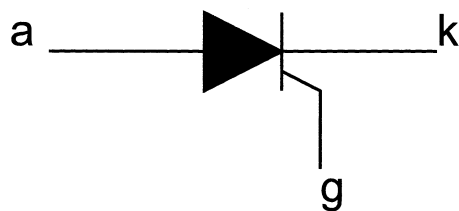


Fig. 1. TIRISTOR

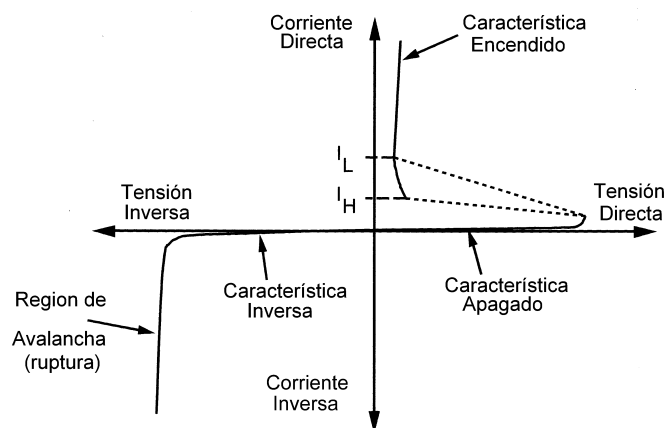


Figura 2. Tiristor Curvas V-I

Disparo del tiristor

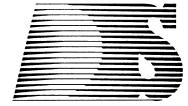
Un tiristor es encendido haciendo su puerta positiva con el respecto a su cátodo, esto hace que circule corriente en la compuerta.

Cuando el voltaje de puerta alcanza el voltaje de umbral V_{GT} , hace que la corriente de compuerta I_{GT} , llegue al valor umbral dentro de un tiempo muy corto conocido como “tiempo de encendido, controlado por compuerta”, t_{gt} , la corriente de carga puede fluir desde 'a' a 'k'. Si la corriente de puerta consiste de un pulso muy estrecho, por ejemplo menos de $1\mu s$, su nivel de pico tendrá que aumentar para anchos de pulso progresivamente más estrechos para garantizar el disparo efectuado de esta manera.

Cuando la corriente de carga aumente, hasta el valor de corriente de enganche (latching) del tiristor, la corriente de carga se mantendrá pareja después de la remoción de la corriente de puerta. Mientras la corriente adecuada de carga continúa circulando, el tiristor continuará conduciendo, sin la corriente de puerta. Esto es lo que denominamos tiristor disparado.

Nótese que el valor de V_{GT} , I_{GT} e I_L de especificaciones dadas en datos están a $25\text{ }^\circ\text{C}$. Estos parámetros aumentarán a temperaturas más bajas, así también el circuito de disparo debe proveer voltaje adecuado, corriente y duración para la temperatura de funcionamiento mas baja.

1° REGLA. Para disparar un tiristor (o triac), una corriente de compuerta $\geq I_{GT}$ debe aplicarse hasta que la corriente de carga sea $\geq I_L$. Esta condición debe encontrarse también al bajar la temperatura de funcionamiento esperada.



El tiristores de puerta sensible (sensitive gate), tal como el BT150 puede ser proclive a dispararse por corriente de fuga (ánodo a cátodo), a altas temperaturas. Si la temperatura de juntura T_j es incrementada por encima de T_{jmax} , en este punto las corrientes de fuga son tales que pueden alcanzar la corriente de disparo del tiristor o triac. Por lo cual puede ser conveniente su reemplazo o bien tener en cuenta este efecto al momento de su utilización.

Para resolver los problemas de los disparos no deseados (espurios o aleatorios) se pueden seguir algunos de los siguientes métodos:

- 1- Asegurar que la temperatura no exceda a T_{jmax} .
- 2- Utilizar un tiristor con compuerta menos sensible por ejemplo el BT151, o reducir la sensibilidad del tiristor existente por una resistencia de 1kohm o menor entre el cátodo y la compuerta (resistencia de desensibilización).
- 3- Si esto no es posible utilizar un tiristor de menor sensibilidad en compuerta, aplicar en la compuerta una pequeña señal negativa durante los periodos de inactividad del tiristor en cuestión. Esta señal tiene el efecto de incrementar I_L . Durante la circulación de corriente negativa, debe tenerse una particular atención a fin de minimizar la potencia disipada en compuerta.

Apagado (conmutación).

Para apagar al tiristor, la corriente de carga debe reducirse por debajo de la I_H (corriente de mantenimiento), por el tiempo suficiente para permitir a todos los portadores evacuar la juntura. Esto es logrado por "conmutación forzada" en circuitos CC o al final del hemiciclo de conducción en circuitos de CA. (La conmutación forzada es cuando la corriente de carga neta del circuito ocasiona que la misma se haga cero de forma tal, que el tiristor se apague). A este punto, el tiristor habrá vuelto totalmente a su estado bloqueando.

Si la corriente de carga no es mantenida por debajo de I_H por el tiempo suficiente, el tiristor no habrá vuelto totalmente al estado bloqueando, y cuando la tensión ánodo – cátodo suba nuevamente, el tiristor podrá volver al estado de conducción sin excitación de puerta.

Note que esta I_H se especifica también a la temperatura de sala, y reduce a altas temperaturas. Por lo tanto el circuito debe permitir tiempo suficiente para la corriente de carga caiga por debajo de I_H a l máxima temperatura esperada, para una conmutación exitosa.

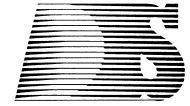
2° REGLA. Para apagar (conmutar) un tiristor (o triac), la corriente de carga debe ser $< I_H$ por un tiempo suficiente para permitir que este retorne al estado de bloqueo. Esta condición tiene que ser satisfecha para alcanzar la mejor operación con la temperatura.

Triac

Un triac poder mirarse como un "tiristor bidireccional" debido a que conduce en ambas direcciones. Por el triac estándar, la corriente circula actual en cualquiera de las dos direcciones entre los terminales principales MT1 y MT2. Esto es iniciado por una corriente pequeña de señal aplicada entre el terminal de puerta y MT1.

Encendido

Distinto de los tiristores, el triac estándar puede ser disparado por circulación de corriente positiva o negativa entre compuerta y MT1. (Las reglas para V_{GT} , I_{GT} e I_L son al igual que para el



tiristor. Vea Regla 1). Esto permite el disparo del triac en cuatro “cuadrantes” como se muestra en el Figura 4.

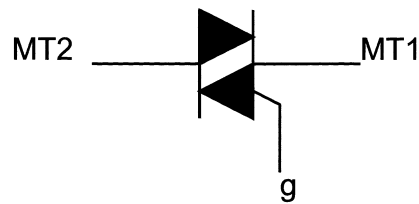


Figura 3. TRIAC

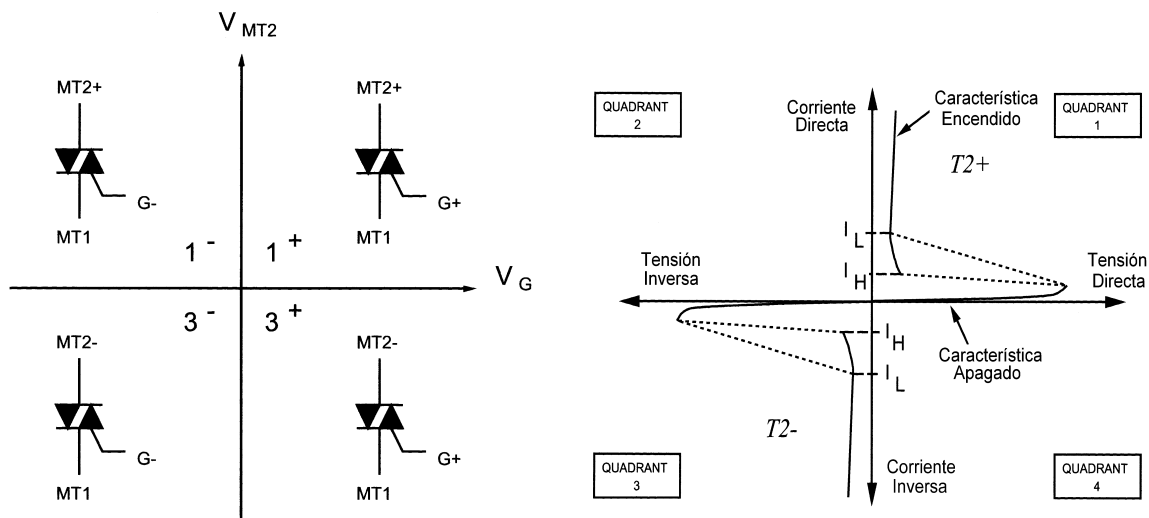


Figura 4. Cuadrantes de disparo del triac

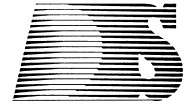
Figura 5. Características V - I del TRIAC

Donde la compuerta debe ser excitada por Corriente Continua o por pulsos unipolares en el cruce por cero de la corriente de carga, corriente negativa de compuerta es la preferida por las siguientes razones.

La construcción interna de los triac medios hace que la compuerta este más alejada desde la región de portadores mayoritarios cuando opera en el 3° cuadrante. Esto resulta en:

1. I_{GT} más alta, esto implica un pico más alto de I_G requerido.
2. Retraso mayor entre I_G y el principio de la circulación de corriente principal, esto requiere una mayor duración de I_G .
3. Mucha menor capacidad de di/dt esto puede implicar una degradación progresiva de puerta cuando controlamos cargas con di/dt iniciales (P.E: filamentos de lámpara incandescente fría).
4. Mayor I_L (también cierto para la 1° operación) - $\rightarrow I_G$ más largo, la duración mayor podría necesitarse para cargas muy pequeñas cuando conduzcan desde el comienzo de un hemisiciclo para permitir la corriente de carga alcanzar el I_L .

En controles comunes de ángulo de fase, como por ejemplo atenuadores de luces y controles de motores universales (taladros de mano), la polaridad de la tensión entre compuerta y MT2 son siempre las mismas. Esto significa la operación es siempre en el 1° o 3° cuadrante, donde los parámetros de conmutación del triac son iguales. Esto resulta en un simétrico funcionamiento de conmutación del triac donde la puerta está a su más sensible estado.



Nótese que: El 1^+ , 1^- , 3^- y 3^+ como indicaciones, para los cuatro cuadrantes, se usa para la brevedad en vez de escribir "MT2+, G +" para 1^+ , etc. Esto se deriva desde las curvas características de V/I del triac.

De aquí en adelante, la operación está en cuadrantes 1 y 3 únicos. Los símbolos + y serán para referirnos al interior a corriente entrante de compuerta y saliente respectivamente.

3° REGLA. Cuando diseñamos un circuito de disparo para triacs, trataremos de no dispararlo al mismo en el 3° cuadrante. (MT2-,G+), cuando esto sea posible.

Métodos alternativos de disparo.

Hay algunas maneras indeseables con las que un triac pueden encenderse. Algún son benignas, mientras otras son potencialmente destructivas.

(a) Señal de ruido en la compuerta.

En ambientes eléctricamente ruidosos, disparos espurios pueden ocurrir si el nivel de ruido excede la tensión VGT y si suficiente corriente de puerta circula para iniciar acción regenerativa dentro de el triac. La primer línea de defensa es minimizar la ocurrencia del ruido en primer lugar. Uno de los mejores resultados es logrado por realizar las conexiones de puerta tan corta tan sea posible y asegurando que el retorno común desde el circuito de disparo se conecte directamente al terminal MT1 (o cátodo en el caso de un tiristor). (los tiristores y triac de potencia incluyen este terminal en su dispositivo). En situaciones donde las conexiones de puerta son de conductor macizo, par torcido o apantallado podría ser necesario minimizar acortarlo.

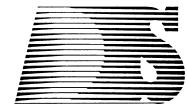
La inmunidad adicional de ruido puede proveerse agregando un resistor de $1k\Omega$ o menor entre la puerta y MT1 para reducir la sensibilidad de puerta. También es posible la utilización de un capacitor de tipo cerámico o de poliéster para filtrar las altas frecuencia o dv/dt .

La Alternativa de usar una serie **H** de triac (p. ej. BT139-600H). Estos son los tipos insensibles con 10 mA min. de I_{GT} . Estos son triac diseñados específicamente para proveer un alto el grado de inmunidad de ruido.

4° REGLA. Para minimizar el ruido que toma la compuerta, el largo de conexión tiene que ser lo mas corto posible. El retorno al terminal MT1 (o cátodo) tiene que retornar en forma directa al terminal propiamente dicho. Colocar una resistencia de no mas de $1k\Omega$, entre los terminales de compuerta y MT1 o cátodo. Una red snubber es aconsejable para la compuerta. La alternativa de utilizar la serie **H** de triacs, si lo anterior es insuficiente.

(b) Excediendo el valor permitido de dv/dt

Esta es la mas probable ocurrencia cuando tenemos una carga altamente reactiva, donde existe un considerable desfasaje entre la tensión de carga y la corriente de la misma. Cuando el triac conmuta, esto es la corriente se hace cero, la tensión aplicada en los bornes del mismo no es cero, debido al desfasaje entre ambas magnitudes, como es mostrado en la figura N°6. El triac entonces repentinamente requerirá bloquear esta tensión. El resultado de esta



conmutación puede forzar al triac a volver al estado de conducción si se excede el valor permitido de dv/dt . Esto es debido a que los portadores en la juntura no tienen el tiempo suficiente para abandonarla totalmente.

La capacidad para soportar dv/dt es afectada por dos condiciones:

1. El valor de la caída de corriente en la conmutación esto es la di/dt . Alta di/dt implica una capacidad de dv/dt .
2. La temperatura de juntura T_j . Si esta temperatura aumenta disminuye la capacidad de soportar dv/dt .

Si el triac es probable que supere la máxima dv/dt permitida por el dispositivo, es probable también, que sufra falsos disparos. La manera mas común para mitigar este problema es con el uso de una red RC de amortiguación. Estas redes se las conoce como red snubber.

Esta deberá estar entre los terminales MT1-MT2 para limitar el valor de cambio de voltaje. Los valores comunes son: resistencia de 100 Ω de carbón elegida por su manejo de corriente y un capacitor de 100nF.

Otra alternativa es usar un Hi-Com triac.

Nótese que la resistencia de la red snubber nunca debe omitirse, porque si así fuere cuando el triac se dispare, pueda sufrir daños, debido a el dispositivo puede superar el valor máximo de di/dt permitido al descargarse el capacitor entre los bornes MT1 y MT2 sin limitación de corriente.

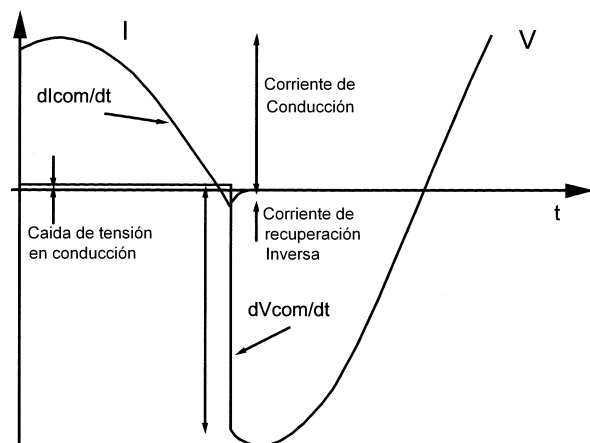


Figura 6. TRIAC di/dt y dv/dt

(b) Excediendo el valor permitido de di/dt

Altas di/dt son causadas por cargas altamente inductivas, alta frecuencia de línea o onda no senoidal de corriente de carga. Una causa bien conocida de corrientes de carga no senoidales y de di/dt un rectificador que alimenta una carga inductiva. Esto puede generalmente implicar una conmutación fallada en un triac común. Como la tensión de alimentación baja mas, el EMF la corriente de la carga y de el triac baja rápidamente a cero.

El efecto de esto se muestra en la Figura 7. Durante esta condición de corriente cero de triac, la corriente de carga será informal sobre el circuito rectificador. Las cargas de esta naturaleza pueden generar di/dt tan altas que el triac no las soportar una dv/dt suave reemplazada de 50 Hz que sube desde cero Volt. En este caso no trae ningún

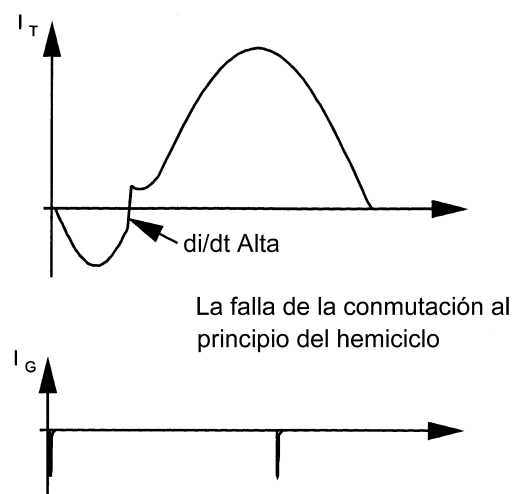
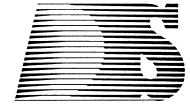


Figura 7. Efectos de un rectificador controlado con carga inductiva



beneficio poner una red snubber, ya que el problema no es la dv/dt . La di/dt tendrá que ser limitada agregando una inductancia de algunos mH en serie con la carga.

(d) Excediendo el valor permitido de dv/dt

Si un valor muy alto de cambio de voltaje se aplica a través de un triac bloqueado (o el tiristor sensible de puerta en particular) *sin exceder su V_{DRM}* (en Figura. 8), por la capacidad interna puede circular la corriente suficiente para activar al triac, esta condición se ve magnificada por el aumento de la temperatura.

Cuando ocurre este problema, la dv/dt debe ser limitada por una red snubber entre sus terminales MT1 y MT2 (o ánodo y cátodo, para el caso del tiristor). La utilización de Hi-com triacs en este caso puede ser beneficioso.

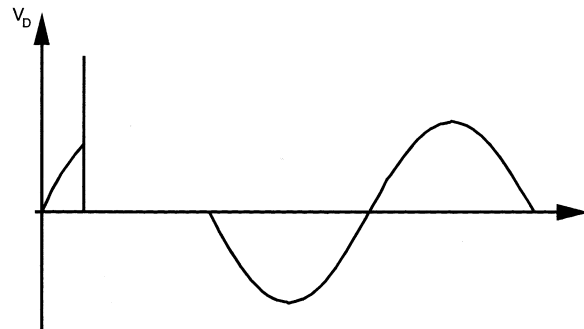


Figura 8. TRIAC encendido por exceso de dv/dt

(e) Excediendo el valor permitido de V_{DRM} (Tensión máxima repetitiva de trabajo)

5° REGLA. Cuando altas dv_D/dt o dv_{COM}/dt es probable que causen problemas, una solución es la colocación de una red snubber entre los terminales MT1 y MT2.

Cuando altas di_{COM}/dt son probables causas del problema, la colocación de un inductor de algunos mH en serie con la carga mitiga el problema.

El uso de Hi-com Triacs es una solución alternativa para ambos casos.

Si el MT2 de voltaje excede V_{DRM} tal como podría ocurrir durante severo y anormal transitorio de línea, la corriente de fuga entre los terminales MT2 y MT1, podrá hacer que el dispositivo pase al estado de conducción. Esto se ve en la Figura 9.

Si la carga permite que un alto incremento de corriente fluya hacia la misma, la densidad de corriente dentro de la pastilla del semiconductor puede hacer que se forme un "punto caliente", estos puntos van destruyendo las características del triac (o tiristor), hasta su destrucción total del mismo.

Las lámparas incandescentes, cargas capacitivas y protecciones del tipo *crowbar* son circuitos que frecuentemente ocasionan estos inconvenientes.

El encendido por sobrepasamiento de V_{DRM} NO es necesariamente la amenaza principal a su supervivencia. Si lo es la di/dt que le sigue, esta si es muy probable que pueda ocasionar el

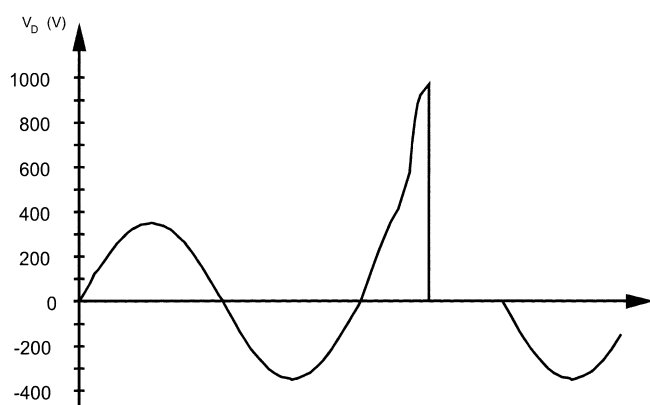
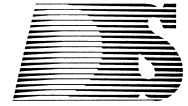


Figura 9. Encendido del triac (o tiristor) por sobrepasar V_{DRM}



daño. Debido al tiempo requerido para que la conducción sea generalizada en toda la juntura. El valor permitido de di/dt en estas condiciones, es inferior al que se produce si el triac es encendido correctamente por una señal de puerta. Si de alguna manera se puede proteger al triac para que la di/dt en estas condiciones no sobrepase a este valor (dado en los manuales de datos del dispositivo), es muy probable que el Triac o tiristor en cuestión sobreviva.

Esto podría lograrse adaptando un inductor no saturable (núcleo de aire), de algunos μH en serie con la carga.

Si la solución anteriormente es inaceptable o poco práctica, una solución alternativa sería proveer un filtro adicional y clamping para impedir que los picos de tensión alcancen los bornes del semiconductor. Esto involucraría probablemente el uso de un Varistor (de Oxido Metálico- **MOV**) como un "suavizador" de los picos de voltaje de la línea de alimentación del sistema, en serie con la inductancia seguida por el paralelo del capacitor y MOV.

Las dudas han sido expresadas por algunos fabricantes sobre la confiabilidad de circuitos que usan MOVs, debido principalmente que en temperaturas ambientales altas las características de los mismos fallan catastróficamente. Esto se debe al hecho que su voltaje activo posee un coeficiente de temperatura negativo. Sin embargo, si el grado recomendado de voltaje de 275V RMS se usa para 220V de tensión de alimentación, el riesgo de que el MOV falle, debería ser insignificante. Los tales fracasos son más probables si MOVs de $V_n = 250V$ RMS se usan, son utilizados para 220 VAC, a temperaturas ambiente potencialmente altas.

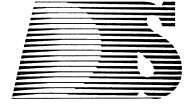
Encendido di_T/dt

Cuando un triac o tiristor se provoca es disparado por el método correcto, esto es vía compuerta,

- 6° REGLA. Si la tensión V_{DRM} del triac es probablemente superada, por transitorios de línea se pueden adoptar las siguientes medidas:
- Limitar la di/dt con una inductancia no saturable de algunos μH en serie con la carga.
 - Usar MOV entre la alimentación en combinación con filtros del lado de la alimentación.

la conducción comienza en el área adyacente a la compuerta, entonces rápidamente se esparce para cubrir el área activa entera. Esta demora de tiempo impone un límite sobre el valor permisible de incremento por unidad de tiempo de la corriente de carga. En otras palabras estamos hablando de la di_T/dt que es la causa de "puntos calientes" dentro de la juntura. Estos puntos son fusiones, lo cual lleva en un corto tiempo a un corto circuito entre los terminales MT1 y MT2.

Si el disparo es en el 3° cuadrante, un mecanismo adicional reduce la di_T/dt permitida. Es posible momentáneamente tomar la puerta en la avalancha inversa durante el rápido incremento inicial de corriente. Esto no llevará a la destrucción inmediata sino que habría progresivos puntos calientes en la juntura compuerta - MT1 (dados como disminución de la resistencia efectiva), después de la exposición repetida a estos procesos. Esto daría lugar a un aumento de la I_{GT} hasta que el triac no podrá ser mas disparado. Los triacs sensibles son probablemente los más susceptibles.



La capacidad de soportar di/dt es afectada por cuan rápida aumenta la corriente de compuerta (di_G/dt) y el valor pico de I_G . Un alto valor de di_G/dt y de I_G (sin exceder las características de compuerta), dan como resultado un mayor capacidad de absorber di_T/dt .

7° REGLA . Un buen circuito de disparo y evitar los disparos en el 3° cuadrantes mejora notablemente la capacidad de absorción de di_T/dt

Como mencionado anteriormente, una carga común con una corriente alta inicial es la lámpara incandescente que tiene una resistencia de filamento fría muy baja. Para cargas resistivas tal como esta, la di_T/dt estaría a su más alto valor si la conducción comienza en el pico de la senoidal de la tensión de alimentación. Si es probable que la corriente exceda la característica de di/dt triac adoptado, se debe limitar esta di/dt con la inclusión de un inductor de unos μH o con un termistor de Coeficiente Negativo de Temperatura con la carga, de forma de que con la carga fría el ángulo de disparo sea grande ($<V_{ef}$). Nuevamente, el inductor no debe saturarse durante el pico de corriente máximo. Si lo hace, su inductancia se derrumbaría y no limitaría más la di_T/dt . Un inductor de núcleo de aire es aceptado para este requerimiento. Una solución más elegante que puede evitar el requerimiento de un limitador de corriente en serie dispositivo estaría en usar el disparo en el cruce por cero. Esto permitiría a la corriente comenzar a crecer mas gradualmente, desde el comienzo de la onda senoidal.

NOTA: Es importante recodar que el disparo por el cruce de cero es únicamente aplicable sobre cargas resistivas. Usar el mismo método para cargas inductivas donde hay desfase entre el voltaje y la corriente puede ocasionar conducciones en media onda o unipolares, conduciendo a la saturación de las cargas reactivas, produciendo recalentamientos y corrientes de pico mayores y posibles destrucciones. Más avanzó control y en la actualidad se da el disparo por corriente cero o disparo de ángulo variable como requiere en este caso.

8° REGLA . Si la di_T/dt se espera superar un inductor de núcleo de aire de algunos μH o una termistor NTC debe ser colocado en serie con la carga, o en el circuito de control (este último circuito de disparo).
Una alternativa puede ser el empleo de circuitos de disparo por cruce por cero para cargas resistivas.

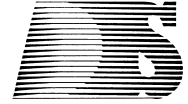
Apagado

Desde que apareció en el mercado el triac se usa en los circuitos de Corriente Alterna, ellos conmutan naturalmente al final de cada ciclo medio de corriente de la carga a menos que una señal de puerta se aplique en el inicio del siguiente hemicycle para mantener conducción. Las reglas para I_H son al igual que para el tiristor. Vea la Regla 2.

Hi-Com triac

El triac Hi-Com tiene una construcción interna diferente al triac convencional. Una de las diferencias es que las dos mitades de tiristor "son bien separadas para reducir la influencia que ellos tienen sobre el uno al otro. Esto ha rendido varios beneficios:

- 1- Más alto dV_{COM}/dt . Esto los permite de controlar cargas reactivas sin la necesidad que una red snubber en la mayoría de los casos, mientras todavía evite la falla de conmutación. Esto reduce la cantidad de componentes, baja los costos y elimina disipación de potencia de la red snubber.



2- Más alto di_{COM}/dt . Esto drásticamente mejora las oportunidades de conmutar a frecuencia mas alta o señales no senoidales, sin la necesidad de un limitador de di_{COM}/dt (inductor en serie con la carga).

3- Más alta dv_D/dt . El Triacs llega a ser más sensible a temperaturas activas altas. La mayor capacidad de dv_T/dt del triac Hi-com reduce su tendencia a disparos aleatorios producidos por dv/dt , cuando el dispositivo esta a una alta temperatura. Esto los habilita a ser utilizados en aplicaciones de alta temperatura, como control de cargas resistivas como: hornos eléctricos, cocinas eléctricas, donde el uso de triacs comunes se dificulta por su temperatura de entorno.

La construcción interna diferente también significa, que el disparo en el 3° cuadrante no es posible. Esto no debería ser un problema en la gran mayoría de los casos porque este es el el cuadrante en el cual no debería dispararse un triac, o sea que es conveniente en reemplazo de un triac convencional por uno Hi-com. Siempre que sea posible.

Métodos de Montaje para triacs

Para cargas pequeñas o de corriente de muy corta duración (es decir menos de 1 segundo), podría ser posible operar el triac en el aire libre. En la mayoría de los casos, sin embargo, se fijaría al disipador de calor o al chasis del equipo (siempre que pueda disipar calor).

Los tres métodos principales de sujetar el triac al disipador son:

- a) broche o clip
- b) atornillando
- c) remachando.

Los métodos más comunes son a y b. El sistema remachado no es aconsejado, salvo excepcionalmente.

Resistencia térmica

La resistencia térmica R_{th} es la resistencia, al flujo de calor, desde el ambiente hasta la junta. Es análogo a la resistencia eléctrica; es decir así como:

- Resistencia eléctrica $R = V / I$.
- Resistencia térmica $R_{th} = T / P$.

Donde T es la temperatura que sube en °K y P es la potencia a disipar en Vatios. Por lo tanto R_{th} se expresa en °K / W.

Para un dispositivo montado verticalmente en el aire libre, la resistencia térmica es determinada por la resistencia térmica junta – ambiente (R_{thj-a}). Esta es típicamente 100 °K/W para el encapsulado SOT82, 60 °K / W para el SOT78 y 55 °K / W para los encapsulados aislados F-pack y X-pack.

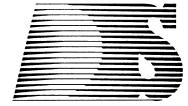
Para un dispositivo NO aislado montado en un disipador, la resistencia junta–ambiente es la suma de la resistencia térmica junta - carcaza (R_{thjc}) mas la resistencia térmica carcaza - disipador (R_{thcd}) mas la resistencia térmica disipador – ambiente (R_{thda}).

$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thjc} + R_{thjc}$ (para montaje sin aislación)

$R_{thj-a} = R_{thj-h} + R_{thh-a}$ (paquete aislado).

R_{thj-c} [= R_{thj-mb}] o R_{thj-d} [= R_{thj-h}], se fijan y puede encontrarse en la hoja de datos para cada dispositivo.

R_{thh-a} es regido por el tamaño del disipador y del aire que pasa sin restricción por el disipador.

**El cálculo del disipador**

Para calcular la resistencia térmica requerida para un triac dado y una corriente de carga, nosotros debemos primero calcular la potencia a disipar en el triac usando la siguiente ecuación:

$$P = V_0 \times I_{T(AVE)} + R_S \times I_{T(RMS)}^2$$

El voltaje de codo V_0 y la pendiente de la resistencia R_S y V_T se obtienen del manual Usando la ecuación de la resistencia térmica antes vista:

$$R_{th} = T / P$$

La máxima temperatura permisible es la que T_j alcanza T_{jmax}