

DIODOS, TIRISTORES E IGBT

RESUMEN

La electrónica de potencia concierne a circuitos que bajo ciertas condiciones pasan de un estado de alta impedancia a uno de baja, estado que se mantiene mientras los valores de corriente y voltaje sean superiores a ciertos niveles mínimos denominados de mantenimiento. Uno de los objetivos de la tecnología actual de los circuitos, es construirlos de tamaño y peso pequeños, que procesen la energía con altos niveles de eficiencia. Es esencial tener pérdidas mínimas, por ello deben evitarse elementos con pérdidas como los resistores y los transistores en su región lineal, lo que nos remonta a la idea de uso de *switches* ideales: cuando se encuentran cerrados circula corriente y el voltaje en sus terminales es nulo; pero cuando se encuentran abiertos, la corriente es nula pudiendo existir cualquier voltaje en sus terminales. En cualquier caso, la potencia consumida por el *switch* ideal es cero [1]. Estos *switches* son sustituidos por elementos electrónicos de potencia que tienen comportamiento muy similar, pudiendo ser no-gobernables (diodos) o gobernables (tiristores e IGBT). A continuación se resumen las características principales de estos dispositivos.

Diodos

El diodo semiconductor es un elemento de dos terminales, una unión *pn*. Su representación más simple es la de un interruptor electrónico de alta velocidad, el cual está cerrado si el voltaje es más positivo en el lado *p* que en el *n*, y abierto en el caso contrario. En la figura 2.1 se ilustra esta representación. En un diodo *pn* la corriente convencional fluye del lado *p* (ánodo) al lado *N* (cátodo). El diodo es un elemento de conmutación no-gobernable.

La mayoría de los diodos se producen por la técnica de difusión, esto es, la exposición de un material n a vapores de elementos trivalentes como boro, aluminio, galio, etc., a una temperatura y presión elevadas. Los átomos aceptados son absorbidos por la capa de material n , formando así la unión pn .

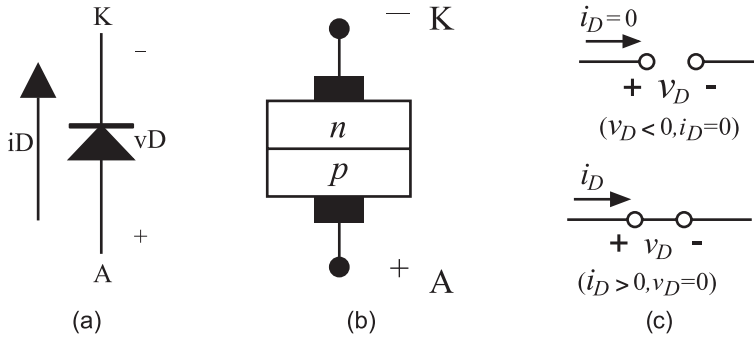


Figura 2.1 a) Símbolo del diodo, b) construcción esquemática de un diodo semiconductor, c) representación simple [12]

El 90% de los diodos rectificadores son de silicio, los cuales presentan mejores características de temperatura y corriente que los diodos de germanio.

La figura 2.2 presenta la forma general de la característica v - i de un diodo. En ésta gráfica se observa lo siguiente:

- Para un flujo de corriente positiva existe una caída de voltaje finita denotada como V_f . Esta caída es típicamente de 0.6-0.7V para dispositivos de baja potencia y puede sobrepasar los 3V para dispositivos de alta potencia
- Debido a que existe una caída de voltaje, se presenta una disipación de potencia en el dispositivo. La disipación máxima está asociada con la corriente máxima del dispositivo I_f .
- Un diodo tiene un límite de voltaje negativo que puede soportar, conocido como voltaje de ruptura inverso y denotado como V_{RB} , sí se excede este voltaje el diodo comienza a conducir en sentido negativo [3],[12].

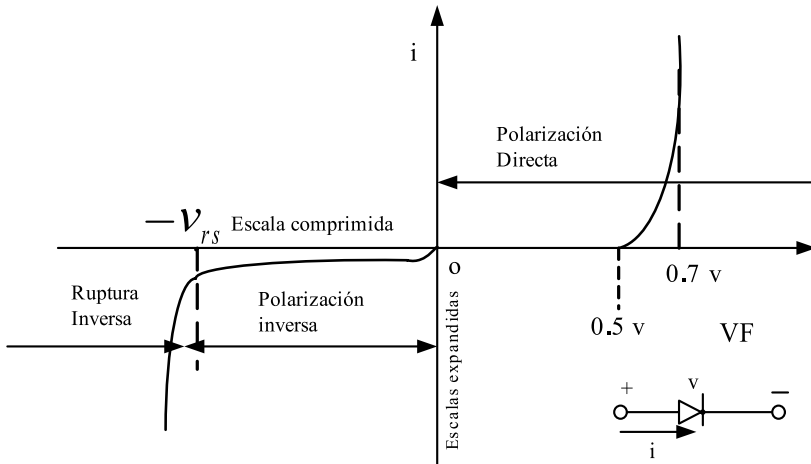


Figura 2.2 Curva voltaje-corriente típica de un diodo semiconductor

TIPOS BÁSICOS DE DIODOS RECTIFICADORES DE POTENCIA

El tipo de diodo es definido por el tiempo de recuperación (intervalo de tiempo desde que la corriente pasa por cero en el cambio de conducción a bloqueo; llega a un valor máximo de reversa, y alcanza un valor especificado). La figura 2.3 muestra empaquetados comunes de diodos de potencia (Stud y Disc).



Figura 2.3 Diodos rectificadores de potencia (Cortesía de Powerex Inc.)

Existen dos tipos básicos de diodos rectificadores de potencia: de propósito general y recuperación rápida [4].

- a) Propósito general:
Voltaje: 200V a 6500V
Corriente 100A a 10000A
Tiempo de recuperación 25 μ s

Usos típicos: soldadoras, controladores de motores de corriente alterna o directa, cargadores de baterías, calentadores, fuentes de alimentación, etc. [4]

- b) Recuperación rápida:
Voltaje: 200V a 6000V
Corriente 100A a 2000A
Tiempo de recuperación: 5 μ s

Usos típicos: soldadoras, controladores de motores de corriente alterna o directa, transporte, equipo médico, calentadores. [4]

La tabla 2.1 presenta la simbología y definiciones usadas comúnmente en hojas de datos de diodos semiconductores.

Circuitos rectificadores

Un circuito *rectificador* es un circuito cuya función es la de convertir corriente alterna en corriente directa. Esto es, dada una señal variante en el tiempo, en sentidos positivo y negativo, al pasar por el circuito rectificador la salida presenta en un solo sentido dicha variación, es decir, se tiene una señal periódica ondulatoria de un solo sentido. La medida de la efectividad del circuito en remover el componente de corriente alterna se conoce como *factor de rizo*, y está definido como la razón del valor de alterna al valor de directa.

Para obtener el factor de rizo de un circuito rectificador es necesario conocer el valor RMS de la señal, así como su valor promedio en CD de la misma.

El factor de forma de una señal alterna es la razón del valor RMS al valor promedio [14]. Como se ilustra en la ecuación (2).

$$F = \frac{V_{RMS}}{V_{CD}} \quad (2)$$

Tabla 2.1 Términos, símbolos y definiciones de los diodos semiconductores

Símbolo	Término	Definición	Unidades
I_{FAV}	Corriente media máxima en conducción.	Valor máximo de corriente media en conducción	A
I_{FRMS}	Corriente efectiva (RMS) máxima	Valor máximo de corriente efectiva RMS en conducción. Relacionada con el efecto I_{rd} , independientemente de la temperatura	A
I_{RRM}	Corriente máxima de reversa	Valor máximo de corriente de reversa, especificado al valor máximo de voltaje de reversa repetitivo (PIV)	mA
I_{FSM}	Corriente máxima pico no repetitivo	Valor máximo de corriente de pico no repetitiva en conducción, en $\frac{1}{2}$ ciclo de operación sin que el diodo se dañe	kA
P_{DMAX}	Potencia máxima de disipación	Valor máximo de potencia de disipación que puede soportar el semiconductor	W
$R_{\theta JC}$	Resistencia térmica unión-encapsulado	Resistencia térmica efectiva entre la unión y el encapsulado	$^{\circ}C/W$
$T_{J(Max)}$	Temperatura máxima de unión	Valor máximo de temperatura en la unión sin que sucedan fallas por desbordamiento térmico	$^{\circ}C$
Mca t_{rr}	Tiempo de recuperación de reversa	Intervalo de tiempo desde que la corriente pasa por cero (en el cambio de conducción a bloqueo), llega a un valor máximo de reversa y alcanza un valor especificado	μs
V_{BR}	Voltaje de rompimiento	Voltaje en el que empieza el efecto de avalancha	V
V_F	Voltaje en conducción	Voltaje de caída en conducción, especificado por la corriente en conducción respectiva	V
V_{RRM}	Voltaje de pico inverso repetitivo (PIV)	Valor máx. de voltaje que puede ser aplicado en reversa en forma repetitiva. (PIV "Peak inverse voltage")	V
V_{RSM}	Voltaje de pico inverso no repetitivo	Valor máx. de voltaje que puede ser aplicado en reversa en forma no repetitiva	V

El factor de rizo es la razón del voltaje de alterna al valor promedio en CD, como se ilustra en la ecuación (3) [14].

$$\gamma = \frac{V_{CA}}{V_{CD}} = \frac{\sqrt{V_{RMS}^2 - V_{CD}^2}}{V_{CD}} = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (3)$$

Este valor proporciona la relación alterna-directa en la onda de salida de un rectificador. Si la ondulación es cero ($\gamma = 0$) significa que no existe componente de alterna en la onda. En la figura 2.4 se ilustra la señal rectificadora de media onda [15]:

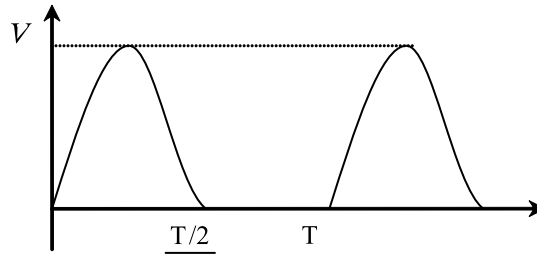


Figura 2.4 Señal rectificada de media onda

Para este caso:

$$V_{RMS} = \frac{V}{2}$$

$$V_{DC} = \frac{V}{\pi}$$

Entonces, para este caso el factor de rizado es:

$$\gamma = \sqrt{\frac{V_{RMS}^2}{V_{DC}^2} - 1} = \sqrt{\left(\frac{\frac{V}{2}}{\frac{V}{\pi}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - 1} = 1.21 = 121\%$$

La relación entre la alterna y la directa es del 121%, por lo que la señal tiene un contenido mayor de alterna que de directa. Así mismo, si la señal se modifica a la de un rectificador de onda completa, como se ilustra en la figura 2.5:

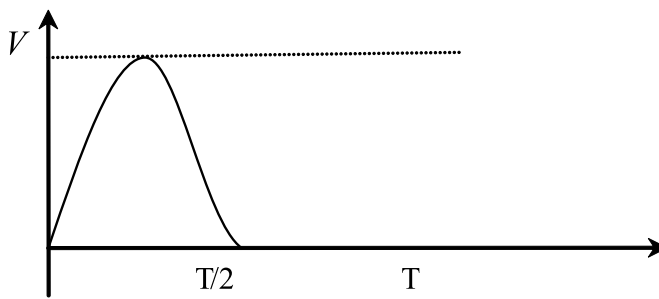


Figura 2.5 Señal rectificada onda completa

Para este caso:

$$V_{RMS} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

$$V_{DC} = \frac{2V}{\pi}$$

Y el factor de rizado:

$$\gamma = \sqrt{\frac{V_{RMS}^2}{V_{DC}^2} - 1} = \sqrt{\left(\frac{\frac{V}{\sqrt{2}}}{\frac{2V}{\pi}}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right)^2 - 1} = 0.48 = 48\%$$

Rectificador monofásico onda completa, carga resistiva

Existen dos configuraciones básicas de rectificadores monofásicos de onda completa. El transformador con derivación central que se ilustra en la figura 2.6, y el puente de diodos completo que se ilustra en la figura 2.7, ambos tienen esencialmente las mismas características, cambia únicamente el número de semiconductores, el valor máximo de voltaje pico inverso V_{RRM} (PIV) que tienen que soportar y algunas magnitudes del transformador.

Para elegir correctamente cuál de estos dos circuitos se debe emplear, debe tenerse en cuenta el número y el costo de los diodos (mayor PIV, mayor costo), y si se cuenta o no con un transformador con derivación central.

En estos rectificadores el factor de rizo es del 48%, lo cual es una gran ventaja en comparación con el rectificador monofásico de media onda, en el que el factor de rizo es de 121%. En algunas aplicaciones industriales se requiere hacer uso balanceado del sistema de alimentación trifásica y, además, el factor de rizo del rectificador monofásico de onda completa puede ser inaceptable, prefiriéndose entonces el uso de rectificadores trifásicos.

Rectificadores trifásicos

La alimentación trifásica es la forma más común de distribuir la energía eléctrica a las industrias. Los rectificadores trifásicos hacen uso de las líneas de alimentación de voltaje alterno. Con los rectificadores trifásicos se disminuye considerablemente el factor de rizo de salida, aumentando así la efectividad en la rectificación y, además, se pueden obtener niveles mayores de potencia, ya que ahora se toma energía de las tres líneas de alimentación. A continuación se presentan los rectificadores trifásicos más utilizados: el rectificador trifásico conexión estrella y el rectificador trifásico en conexión delta.

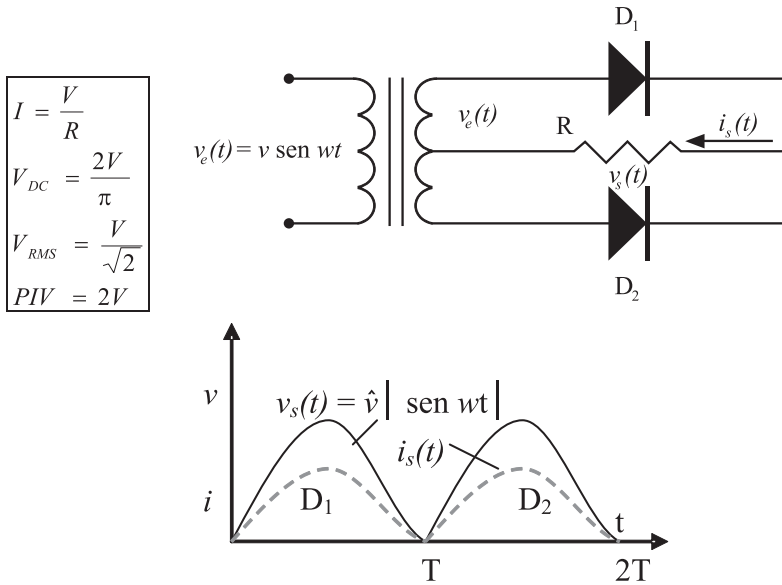


Figura 2.6 Rectificador monofásico onda completa (Transformador con derivación central)

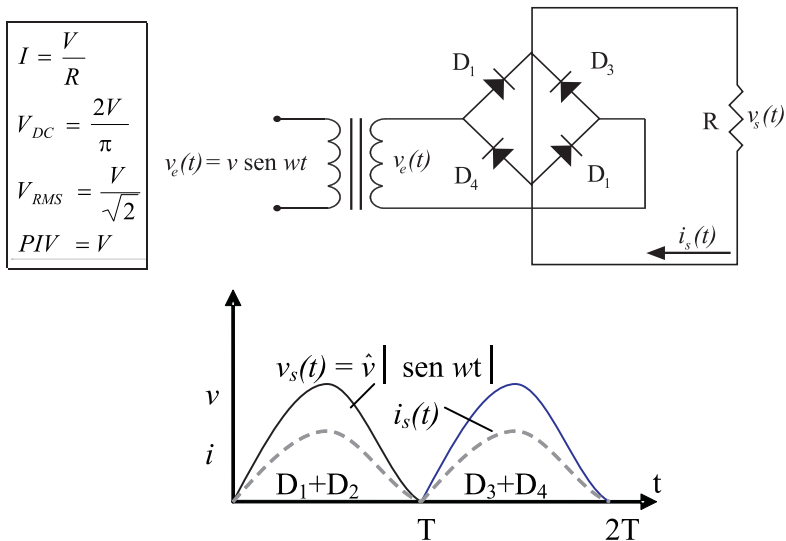


Figura 2.7 Rectificador monofásico onda completa (Puente de diodos completo)

El *rectificador trifásico conexión en estrella* requiere, además de la conexión de las tres líneas de alimentación, del neutro del sistema. El voltaje pico de salida es el mismo que el voltaje pico de línea a neutro. La utilización del transformador del cual se toma la energía no es muy buena, ya que por las ramas del transformador circula corriente en una sola dirección, permitiendo originar problemas de saturación en el núcleo. Debe notarse que el PIV (*voltaje pico inverso*) que los diodos deben soportar es el valor pico del voltaje de línea a línea, esto es $\sqrt{3}\hat{V}$. El factor de rizo u ondulación de este rectificador es: $\gamma = 18.3\%$.

El *rectificador trifásico conexión en delta* no precisa del neutro, y el voltaje de salida es considerablemente mayor que el del rectificador anterior. En este caso, el voltaje pico de salida y el PIV en los diodos es igual al voltaje pico de línea a línea. La salida es prácticamente directa, el factor de rizo solamente es $\gamma = 4.2\%$.

La figura 2.8 muestra la forma de onda del voltaje y corriente en un rectificador trifásico [5].

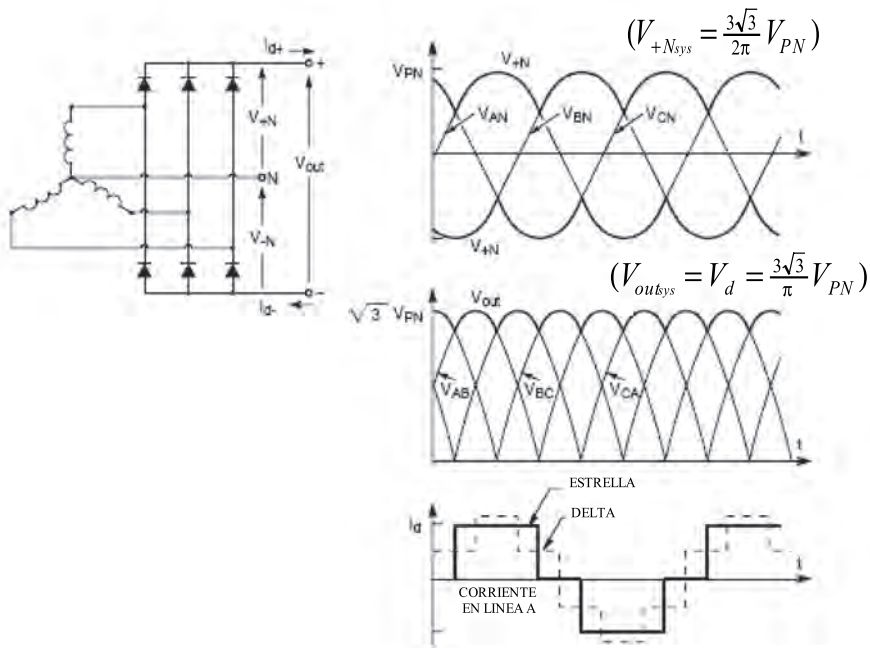


Figura 2.8 Formas de onda en rectificadores trifásicos

TIRISTORES

Los rectificadores basados en diodos producen un voltaje de salida fijo, para poder controlar el valor medio de este voltaje de salida deben usarse los *tiristores*. [14]

Para obtener un voltaje de salida controlado en circuitos rectificadores se utilizan rectificadores controlados, comúnmente llamados *tiristores*; estos componentes electrónicos semiconductores pueden ser conmutados de bloqueo a conducción usando retroalimentación interna. Estructuralmente los tiristores consisten de varias capas alternadas de silicio, dopados con impurezas *p* y *n*. Estos dispositivos electrónicos son gobernables dado que puede ser controlado el ángulo en que pueden ser conmutados.

Tipos de tiristores

Dependiendo de la construcción física y del comportamiento de activación y desactivación, en general, los tiristores pueden clasificarse en nueve categorías [14]:

1. Tiristores de control de fase (SCR).
2. Tiristores de conmutación rápida (SCR).
3. Tiristores de desactivación por compuerta (GTO).
4. Tiristores de triodo bidireccional (TRIAC).
5. Tiristores de conducción inversa (RTC).
6. Tiristores de inducción estática (SITH).
7. Rectificadores controlados por silicio activados por luz (LASCR).
8. Tiristores controlados por FET (FET-CTH).
9. Tiristores controlados por MOS (MCT).

El tipo más común de tiristor es conocido como rectificador controlado de silicio (SCR), que es un dispositivo de tres terminales utilizado para controlar corrientes relativamente grandes de una carga. La figura 2.9 es el símbolo esquemático de un SCR junto con los nombres y letras de identificación de sus terminales [6].

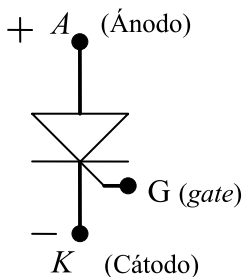


Figura 2.9 Símbolo del SCR

Un SCR puede ser considerado como dos transistores complementarios, uno PNP y otro NPN como ilustra la figura 2.10

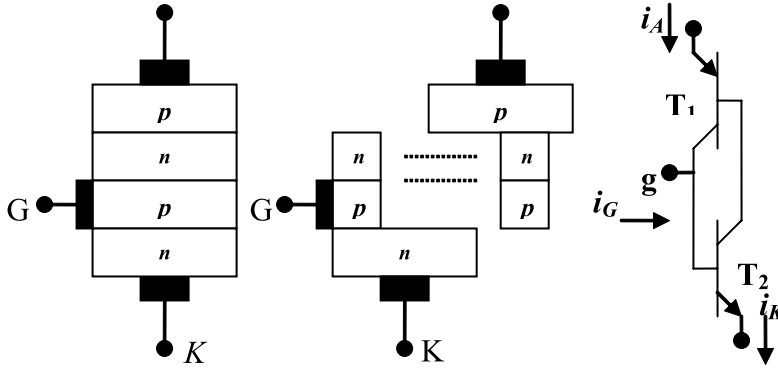


Figura 2.10 Analogía de un SCR con dos transistores bipolares

Formas de encender un tiristor

En general, un tiristor puede ser encendido incrementando la corriente de ánodo a cátodo. Esto se puede lograr de las siguientes maneras [7]:

- a. *Térmica*: Si la temperatura de un tiristor es alta, se aumentará el número de pares electrón-hueco, lo cual incrementará las corrientes de fuga. Este incremento en corriente causará un aumento en las ganancias de corriente en base común. Debido a la acción regenerativa, la suma de las ganancias de corriente con base común tenderán a ser unitarias y el tiristor puede ser encendido.
- b. *Luz*: Si se permite que la luz toque las uniones del tiristor, los pares electrón-hueco se incrementarán y el tiristor podrá encenderse.
- c. *Alto voltaje*: Si el voltaje directo ánodo a cátodo es mayor que el voltaje de ruptura VBO, fluirá una corriente de fuga suficientemente grande para iniciar el encendido regenerativo. Este tipo de encendido puede ser destructivo y debe evitarse.
- d. *dv/dt*: Si la razón de subida del voltaje de ánodo a cátodo es alta, la corriente de carga de las uniones capacitivas puede ser suficientemente grande para encender el tiristor. Un valor alto de corriente de carga puede dañar el tiristor y el dispositivo debe ser protegido contra valores altos dv/dt.
- e. *Corriente de compuerta*: Si un tiristor es polarizado en directa, la inyección de una corriente de puerta aplicando voltaje de puerta positivo, entre puerta y cátodo, encenderá el tiristor. Si la corriente de puerta es incrementada el voltaje de bloqueo directo disminuirá. En la figura 2.11 se ilustra la curva característica de un tiristor.

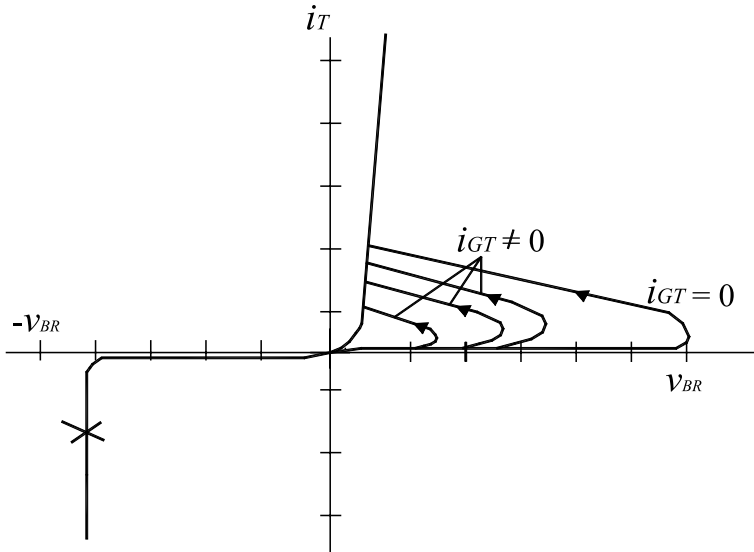


Figura 2.11 Curva característica de un tiristor

Apagado de un tiristor

Un tiristor que se encuentra encendido puede apagarse reduciendo la corriente de ánodo a un nivel menor a la corriente de mantenimiento I_H , durante un tiempo suficientemente grande para que todos los portadores en las cuatro capas sean barridos o recombinados. Las formas de conmutar un tiristor pueden ser de estos tipos:

- a. Conmutación natural. Si la fuente o voltaje de entrada es CA, la corriente en el tiristor pasa por un cero natural y un voltaje inverso aparece a través del tiristor. El dispositivo es, entonces, apagado automáticamente por el comportamiento natural de la fuente de voltaje. Esta conmutación es conocida como conmutación natural o de línea.
- b. Conmutación forzada. En algunos circuitos con tiristores, el voltaje de entrada es CD y la corriente directa del tiristor es forzada a cero por un circuito de conmutación para apagar el tiristor. La conmutación forzada de un tiristor puede lograrse de las siguientes siete formas:
 - Auto conmutación.
 - Conmutación de impulso.
 - Conmutación de pulso resonante.
 - Conmutación complementaria.
 - Conmutación de pulso externo.
 - Conmutación del lado de carga.
 - Conmutación del lado de línea

Circuitos de disparo de tiristores

La manera más común de disparar un tiristor es haciendo su puerta positiva con respecto a su cátodo, esto hace que circule corriente en la compuerta. Existen numerosos circuitos de disparo de tiristores que pueden ser clasificados en tres tipos en función del tipo de señal de disparo: corriente continua, fase alterna o pulsos, como se ilustra en las figuras 2.12 y 2.13 respectivamente. Cuando se tiene disparo por pulsos, se requiere un circuito aislante entre un tiristor individual y su circuito generador de pulso de puerta. El aislamiento puede lograrse con transformadores de pulsos como se ilustra en la figura 2.14, u optoacopladores, como se ilustra en la figura 2.15 [7], [8], [14].

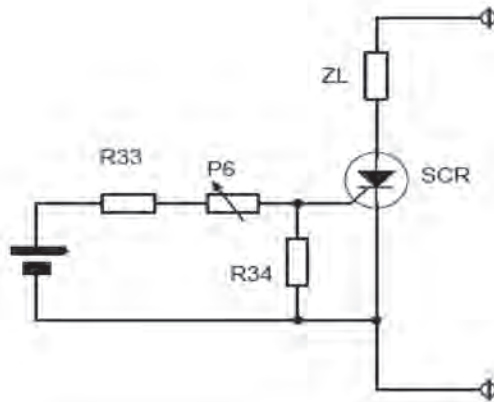


Figura 2.12 Disparo por corriente continua

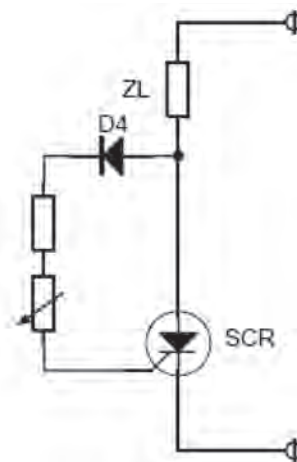


Figura 2.13 Disparo por fase alterna

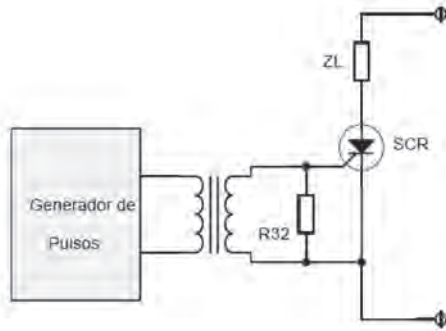


Figura 2.14 Disparo por transformador de pulsos

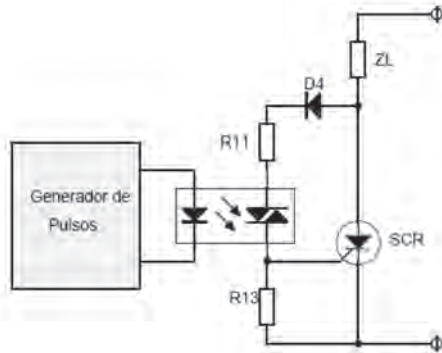


Figura 2.15 Disparo por acoplamiento óptico

La tabla 2.2 presenta la simbología y definiciones usadas en los tiristores.

IGBT

Para aplicaciones donde se requiere controlar grandes cantidades de potencia entregada a una carga, el transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT) es el dispositivo idóneo, ya que requiere tensiones de puerta relativamente bajas y puede conmutar a frecuencias elevadas. Este dispositivo es un componente híbrido entre dos transistores de potencia: el transistor de unión bipolar (BJT) y el transistor de metal óxido semiconductor de efecto de campo (MOSFET). Del BJT toma las características de pérdidas por conducción muy bajas en estado de encendido y voltajes de bloqueo grandes, mientras que del MOSFET toma las características de conmutación rápida [9]. Con la combinación de la estructura de puerta MOS y la corriente de conducción bipolar, la estructura del IGBT puede dar no solo una impedancia de entrada muy alta, sino también una alta densidad de corriente de operación con un bajo voltaje de saturación. La figura 2.16 muestra un equivalente esquemático con transistores y el símbolo de un IGBT.

Tabla 2.2 Términos, símbolos y definiciones de los tiristores

Símbolo	Término	Definición	Unidades
IT	Corriente en conducción	Corriente principal en conducción. Puede especificarse en valor medio o efectivo	A
I_{RRM}	Corriente máxima de reversa	Valor de corriente de reversa al aplicar V_{RRM}	mA
I_{TSM}	Corriente máxima no repetitiva	Corriente máxima en conducción de corta duración, no repetitiva, especificada para cierta forma de onda	A
I_H	Corriente de sostenimiento	Corriente principal que se requiere para mantener al tiristor encendido.	mA
I_L	Corriente de accionamiento	Corriente principal mínima requerida para mantener al tiristor en conducción una vez retirada la señal de compuerta	mA
I_{GT}	Corriente de compuerta	Corriente mínima entre la compuerta y el cátodo requerida para encender al tiristor	mA
dv/dt	Pendiente crítica de voltaje	Valor mínimo de pendiente de voltaje que causa el encendido del tiristor.	V/ μ s
di/dt	Pendiente crítica de corriente	Valor máximo de pendiente de corriente que el tiristor soporta sin deteriorarse.	A/ μ s
P_T	Potencia máxima de disipación	Potencia máxima que soporta el tiristor	W
$R_{\omega JC}$	Resistencia térmica unión-encapsulado	Resistencia térmica efectiva de unión a encapsulado.	$^{\circ}$ C/W
$T_{Jmax.}$	Temperatura máxima de unión	Valor máximo de temperatura en la unión sin que existan fallas por desbordamiento térmico	$^{\circ}$ C
t_{tr}	Tiempo de recuperación	Intervalo de tiempo desde que la corriente principal pasa por cero, en el cambio de conducción a bloqueo, llega a un valor máx. de reversa y alcanza un valor especificado	μ s
V_{BR}	Voltaje de rompimiento	Voltaje a partir del cual ocurre el efecto de avalancha	V
V_{DRM}	Voltaje pico repetitivo en conducción	Valor máximo de voltaje que el tiristor puede bloquear en el cuadrante de conducción en forma repetitiva	V
V_{GT}	Voltaje de compuerta	Voltaje entre compuerta y cátodo asociado a una corriente de compuerta I_{GT}	V
V_{RRM}	Voltaje pico de reversa repetitivo	Valor máximo de reversa que el tiristor puede soportar en forma repetitiva	V
V_{RSM}	Voltaje pico de reversa no repetitivo	Valor máximo de reversa que puede ser aplicado al tiristor en forma no repetitiva	V
V_T	Voltaje en conducción	Valor de voltaje de caída entre ánodo y cátodo dado a una corriente de conducción específica	V

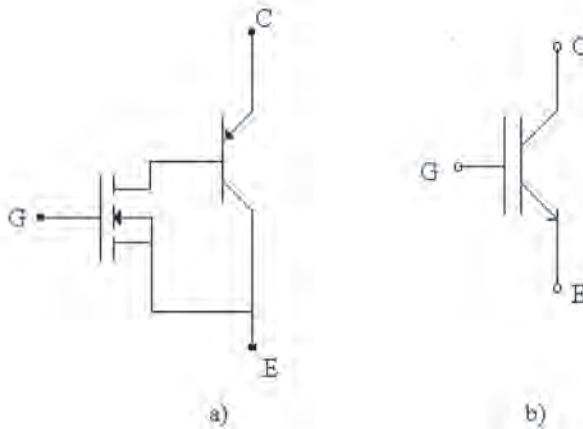


Figura 2.16 a) Equivalente esquemático de un IGBT con MOSFET y BJT b) Símbolo del IGBT

Estados de los IGBT

El IGBT tiene dos estados de funcionamiento estables: el de saturación y el de corte. Para mantener el IGBT en conducción se mantiene la tensión puerta-emisor (V_{GE}) por encima de la tensión umbral, o tensión umbral de puerta $V_{GE(th)}$. En conducción, el IGBT se comporta como un transistor bipolar con una tensión de saturación, o tensión de saturación colector a emisor V_{CEsat} , cuyo valor es función de V_{GE} , la corriente de colector (I_C) y la temperatura. El IGBT se encuentra en corte cuando, una vez terminado el proceso de apagado, la tensión V_{GE} se mantiene por debajo de la tensión de umbral. La máxima tensión que soporta un IGBT se denomina tensión de ruptura colector-emisor V_{CES} [10].

La transición entre estos dos estados se realiza durante las conmutaciones de encendido y apagado; dichas conmutaciones se verán fuertemente influenciadas por estas capacidades y por la resistencia de puerta (R_G).

Selección de IGBT [17]

La selección apropiada de un IGBT envuelve dos puntos claves, que están relacionados con mantener al IGBT dentro de sus parámetros máximos durante la operación. El primer criterio es que la corriente de pico de colector durante la operación, incluyendo cualquier sobrecarga de corriente, debe ser menor que dos veces el valor de la corriente nominal. El segundo criterio es que la temperatura de operación de la unión en el IGBT debe mantenerse siempre por debajo de $T_{j(max)}$ en operación normal, incluyendo sobrecargas esperadas. Si no se dispone de un sistema de enfriamiento o ventilación apropiado, es necesario usar un IGBT que soporte mucho mayor corriente que la esperada para el circuito.

Circuito de puerta

Un IGBT requiere voltaje en la puerta para establecer conducción de colector a emisor; este voltaje de puerta puede ser aplicado por una gran variedad de circuitos. Los parámetros a considerar para seleccionar un circuito de puerta incluyen los requerimientos de polarización de apagado, carga de la puerta y disponibilidad de fuente de potencia.

Para encender un IGBT se recomienda un voltaje de alrededor de 15V. Este valor es suficientemente alto para saturar completamente al IGBT y minimizar las pérdidas en estado de encendido, pero es suficientemente bajo para limitar la corriente de cortocircuito y el estrés de potencia resultante. Se recomienda utilizar un voltaje en el rango de 12-20V para el encendido.

Un IGBT se apagará cuando el voltaje de la puerta sea cero, sin embargo, para asegurar que el IGBT permanezca en estado de apagado cuando el ruido dv/dt se presente en el voltaje de colector a emisor, debe utilizarse un voltaje de polarización de apagado. El uso de polarización inversa también disminuye las pérdidas de apagado.

Seleccionar la resistencia adecuada para la puerta de un IGBT es muy importante. El valor de la resistencia de puerta tiene un impacto significativo en el comportamiento dinámico del IGBT. El IGBT es encendido y apagado cargando y descargando la capacitancia de puerta. Un resistor pequeño de puerta cargará y descargará la capacitancia de puerta más rápidamente, reduciendo las pérdidas y el tiempo de conmutación.

En cortocircuitos, o durante el apagado del diodo paralelo al IGBT, el dv/dt aplicado al IGBT, y la capacitancia de colector a puerta, pueden causar que una corriente fluya en el circuito de puerta. Si esta corriente es suficientemente grande, el voltaje en el resistor de puerta puede causar que el IGBT se encienda. Entonces, aunque una resistencia ofrece mejoras en el rechazo al encendido por dv/dt , también proveen menor margen para ruido y pueden conducir a problemas de oscilación en conjunto con la capacitancia de puerta a emisor y cualquier inductancia parásita en el alambrado de la puerta. Además, resistencias de puerta menores permiten encendidos más rápidos en el IGBT (di/dt).

Consideraciones térmicas

Al utilizar los IGBT se tendrán pérdidas por conducción y conmutación. El calor resultado de esas pérdidas debe eliminarse de los dispositivos utilizando disipadores de calor. Si no se utiliza un sistema térmico apropiado, los dispositivos de potencia se sobrecalentarán, lo cual podría resultar en falla. En muchas aplicaciones la máxima salida de potencia utilizable en el módulo estará limitada por el diseño térmico del sistema.

El primer paso en el diseño térmico es la estimación de la pérdida total de potencia. En circuitos electrónicos de potencia que utilizan IGBT, las

dos fuentes de disipación de potencia más importante que deben ser consideradas son: las pérdidas por conducción y las pérdidas por conmutación.

La tabla 2.3 muestra los términos, símbolos y definiciones usados en las hojas de datos de módulos IGBT.

Tabla 2.3 Términos, símbolos y definiciones de los IGBT [18]

Símbolo	Término	Definición	Unidades
V_{CC}	Fuente de Voltaje	Máximo voltaje de CD	Volts
V_{CES}	Voltaje colector-emisor	Máximo voltaje de colector a emisor en estado de apagado utilizando una señal de entrada de apagado	Volts
I_C	Corriente de colector	Máxima corriente de colector en polarización directa con temperatura de unión menor a los 150°C	Amp
I_{CP}	Pico de corriente de colector	Pico máximo en la corriente de colector en polarización directa con temperatura de unión menor a los 150°C	Amp
P_C	Disipación de colector	Máxima disipación de potencia con una temperatura de unión de 25°C	Watt
T_j	Temperatura de unión	Rango de temperatura de unión durante la operación	°C
V_D	Fuente de Voltaje	Máximo voltaje de control en CD	Volts
V_{CIN}	Voltaje de entrada	Máximo voltaje de control entre entrada y tierra	Volts
V_{FO}	Voltaje de falla	Máximo voltaje entre la salida de falla y tierra	Volts
I_{FO}	Corriente de falla	Salida máxima de corriente en el pin de falla	Amp
t_{DEAD}	Tiempo de bloqueo por rama	Retraso de tiempo recomendado entre las señales de encendido y apagado de los lados alto y bajo	μS

REFERENCIAS

- [1] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*. Second Edition, Springer Science+Business Media Inc, 2001.
- [2] Gustavo A. Ruiz Robredo, *Electrónica básica para ingenieros*, Universidad de Cantabria, ISBN: 84-607-1933-2 Depósito Legal: SA-138-2001.
- [3] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans, *Máquinas eléctricas*, Sexta Edición, Mc Graw Hill, 2004.
- [4] Discrete Rectifiers selector grids, Powerex Inc., www.Pwr.com, 2007.
- [5] John William Motto, Jr. *Introduction to Solid State Power Electronics* Powerex Semiconductor Division, 1997.
- [6] Timothy J. Maloney, *Electrónica industrial. Dispositivos y sistemas*, Prentice-Hall, 1992.
- [7] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. Prentice Hall, 1988.
- [8] V.R. Moorthi, *Power Electronics Devices Circuits and Industrial Applications*, Oxford University Press, 2005.
- [9] Mohan, Undeland and Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, Wiley, 1989.

- [10] P. Sanchis, Ó. Alonso, A. Guerrero y L. Marroyo, *Dossier IGBT. Características y utilización* Dep. de Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, Universidad Pública De Navarra, 31006 Pamplona.
- [11] JEDEC STANDARD: *Terms, Definitions, and Letter Symbols for Discrete Semiconductor and Optoelectronic Devices*, JESD77B.01 (Minor Revision of JESD77-B, February 2000) JULY 2006, JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION.
- [12] Sedra, Smith, *Microelectronic Circuits*, Third Edition. Oxford University Press 1991.
- [13] Denis Fewson, *Introduction to Power Electronics*, Oxford University Press, 1998.
- [14] Ronald DeFour, *EE33D - Power Electronic Circuits*, University of the West Indies, 2001, www.eng.uwi.tt/depts/elec/staff/rdefour/ee33d.
- [15] Hwei P. Hsu, *Análisis de Fourier*, Prentice-Hall, 1998.
- [16] *General Considerations for IGBT and Intelligent Power Modules*, Powerex, Inc. www.pwr.com.
- [17] *Using IGBT Modules*, Powerex, Inc. www.pwr.com.
- [18] *Introduction to Intellimod™ Intelligent Power Modules*, Powerex, Inc. www.pwr.com.