Circuitos de potencia

Dispositivos y Circuitos básicos

<<F. Franco>>

Contenido

1 Introducción 5

1.1 Electrónica de potencia 5

1.2 Semiconductores de potencia 6

1.3 Circuitos básicos de la electrónica de potencia 7

2 Circuitos con diodos de potencia 9

2.1 Diodos de potencia 9

2.2 Tipos de diodos de potencia 10

2.3 Circuitos básicos con diodos 11

2.3.1 Diodo con carga RC 11

2.3.2 Diodo con carga RL 15

2.3.3 Diodo con carga LC 18

2.3.4 Diodo con carga RLC 22

2.3.5 Rectificador monofásico de media onda 26

2.3.6 Rectificador monofásico de onda completa 31

Ejercicios propuestos 38

3 Rectificadores Controlados 41

3.1 Tiristores 41

3.1.1 Tipos de tiristores 43

3.2 Convertidor monofásico controlado por fase 49

3.3 Semiconvertidor monofásico 54

3.4 Convertidor Monofásico Completo 60

Ejercicios propuestos 64

4 Circuitos con tiristores..... 69

4.1 Controladores de voltaje..... 69

4.1.1 Control ON-OFF 69

4.1.2 Control por fase 71

4.1.3 Control bidireccional con cargas R, L y C 74

4.1.4 Cicloconvertidor monofásico..... 78

4.2 Técnicas de conmutación de los tiristores 79

4.2.1 Conmutación natural 79

4.2.2 Conmutación forzada 80

4.3 Circuitos de conmutación para tiristores. 80

4.3.1 Circuito para TRIAC 81

4.3.2 Circuito para SCR..... 83

1 *Introducción*

1.1 Electrónica de potencia

En el campo de desarrollo industrial se evidencian dos necesidades importantes que deben ser tratadas por la ingeniería electrónica. Por un lado se requiere sistemas electrónicos que permitan la conversión eficiente de energía eléctrica así como también sistemas capaces de controlar los procesos industriales que involucran energía eléctrica.

La electrónica de potencia combina la energía eléctrica, la electrónica y el control. La energía tiene que ver con equipo eléctrico de energía estática y rotatoria en el campo de la transmisión, generación, conversión y distribución de energía eléctrica. La electrónica se encarga de los dispositivos y circuitos requeridos para el procesamiento de las señales que permitan cumplir las tareas del controlador. El control se encarga tanto de los transitorios como del estado estable de las variables eléctricas en el desempeño dinámico del sistema que componen.

La electrónica de potencia se basa esencialmente en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia, los cuales manejan y distribuyen el flujo de energía eléctrica. Los desarrollos actuales en dispositivos semiconductores de la mano con los avances tecnológicos en la velocidad de conmutación y en la capacidad de manejo de energía eléctrica de los dispositivos semiconductores de potencia brindan un ilimitado campo de aplicación comercial y de soluciones a problemáticas en el sector industrial. Estos avances permiten un control más preciso e inteligente de los procesos con una eficiencia eléctrica superior.

La tecnología moderna es base fundamental en el crecimiento de la sociedad actual, en este campo la electrónica de potencia a llegado a formar parte importante dada la amplia utilidad de productos de alta potencia, que incluyen control de variables físicas como temperatura, presión, nivel, etc., también se ve su uso en el control de iluminación, maquinas eléctricas, fuentes de tensión y de corriente entre muchas otras aplicaciones.

Los sistemas electrónicos de potencia presentan una estructura básica similar en su aplicación compuesta por cinco bloques tal como se indica en la figura 1.1. El circuito de control es el cerebro que gobierna el comportamiento del sistema que se desea controlar y puede ser un PC, un microcontrolador, un DSP[1], una FPGA[2] o un circuito analógico o digital simple.

[1] *Digital Signal Processing*

[2] *Field Programmable Gate Array*

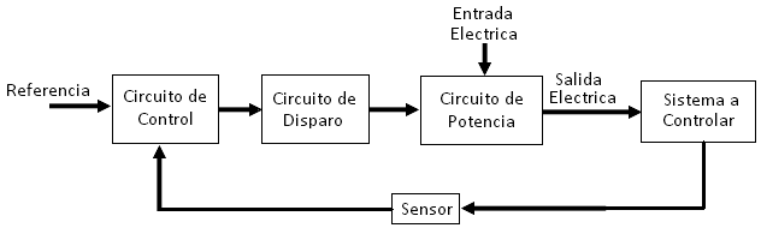


Figura 1-1 Estructura básica de un sistema electrónico de potencia

El circuito de disparo es el encargado de acoplar las señales entregadas por el circuito de control con el circuito de potencia activando o bloqueando los semiconductores que conforman el circuito de potencia controlando así, el flujo de energía eléctrica hacia el sistema a controlar. En el bloque del sensor se encuentra el circuito que permite medir y acoplar la señal de potencia para realimentar el circuito de control.

1.2 Semiconductores de potencia

Luego del desarrollo del primer tiristor rectificador controlado de silicio (SCR), ha habido grandes avances en los dispositivos semiconductores de potencia ampliando su campo de acción dado que en un principio su uso era exclusivo del sector industrial, en la actualidad se encuentran disponibles una gran variedad de estos dispositivos de forma comercial con prestaciones de desempeño cada vez más eficientes.

Dentro de la variedad de dispositivos semiconductores de potencia comerciales se encuentran varios tipos de dispositivos entre los que se tienen:

- Los diodos de potencia.
- Los tiristores.
- Los transistores bipolares de juntura de potencia (BJT).
- MOSFET de potencia.
- Transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT).
- Transistores de inducción estáticos (SIT).

Los tiristores se subdividen en ocho tipos distintos:

- Tiristor de conmutación forzada.
- Tiristor conmutado por línea.
- Tiristor desactivado por compuerta (GTO).
- Tiristor de conducción inversa (RCT).
- Tiristor de inducción estático (SITH).
- Tiristor desactivado con asistencia de compuerta (GATT).
- Rectificador controlado de silicio fotoactivado (LASCR).
- Tiristores controlados por MOS (MCT).

Un tiristor es un dispositivo de tres terminales: ánodo, cátodo y una compuerta. La activación del tiristor es decir cuando este entra en conducción se da en el instante en que aparece una corriente en la compuerta con dirección al ánodo, eso siempre que la diferencia de potencial entre ánodo y el cátodo sea mayor a cero.

En los sistemas de conversión y distribución de energía eléctrica es importante considerar los semiconductores de potencia disponibles y sus características. La elección del dispositivo depéndala de la aplicación, algunos parámetros básicos de elección son: el nivel de tensión, la corriente máxima, la potencia que soporta y la frecuencia de conmutación. Además, se tienen algunas otras propiedades que afectan la elección del dispositivo como es la caída de tensión en conducción que representa las perdidas en conducción, los tiempos de conmutación que representan las perdidas por conmutación, la potencia requerida para el control del semiconductor (disparo y bloqueo) que determina la facilidad del control del dispositivo, el coeficiente de temperatura de la resistencia en conducción del dispositivo que determina la facilidad de conexión en paralelo para manejar grandes corrientes y también es importante considerar el costo del dispositivo. Una caracterización general de algunos dispositivos de potencia se indica en la Tabla 1.1.

DISPOSITIVO	MANEJO DE POTENCIA	VELOCIDAD DE COMUNTACION
BJT	MEDIA	MEDIA
MOSFET	BAJA	RAPIDA
TIRISTOR	ALTA	LENTA
IGBT	MEDIA	MEDIA

Tabla 1.1 Características de algunos dispositivos de potencia.

1.3 Circuitos básicos de la electrónica de potencia

Para el control de la potencia eléctrica o para el acondicionamiento de la misma, se hace necesario convertir las diferentes formas de energía eléctrica, las características que presentan los semiconductores de potencia permiten dicha conversión. La tarea de conversión es realizada por circuitos llamados convertidores que parten de las características de conmutación que presentan los dispositivos de potencia que los conforman. Los siguientes convertidores se utilizan para ilustrar los principios básicos; la acción de conmutación de los dispositivos es generalizada para el tratamiento en estos circuitos, es decir se tendrá en cuenta los estados de conducción y no conducción de los semiconductores dado que la selección de los dispositivos dependerá de los rangos de voltaje, corriente, potencia y velocidad del convertidor. Los circuitos electrónicos convertidores de potencia se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Rectificadores.** Circuito compuesto por diodos que convierte una señal *AC* a una señal con nivel de *DC* fijo. Este tipo de convertidor tiene aplicaciones en la alimentación de equipos electrónicos, en el control de motores de *C.C.*, transporte de energía en *C.C.* y alta tensión.

- **Convertidores AC-DC.** Este es un circuito convertidor (monofásico o trifásico) con tiristores donde el valor medio de la salida es controlado por el ángulo en el que se disparan los tiristores. Este tipo de circuito se conoce también como rectificadores controlados. Estos convertidores se utilizan generar niveles de *DC* variables.

- **Convertidores AC-AC.** Estos convertidores son utilizados para obtener voltajes de *AC* variables a partir de una señal *AC* fija. Circuitos con estas características son conocidos como controladores de voltaje *AC.* Dentro de

lagunas aplicaciones se tienen la variación de velocidad en motores de inducción, en el control de sistemas de iluminación y control de temperatura en hornos industriales.

- **Convertidores DC-DC.** Circuito que permite obtener un nivel de DC variable a partir de una señal DC fija, este tipo de circuitos son conocidos también como pulsadores o reguladores conmutados. En ocasiones son llamados *troceadores o choppers* y son comúnmente usados en vehículos eléctricos y en fuentes de alimentación a partir de baterías.

- **Convertidores DC-AC.** Son mayormente conocidos como inversores (los cuales pueden ser monofásicos o trifásicos), estos circuitos permiten obtener una señal de alterna de frecuencia y amplitud variable a partir de una señal de tensión o corriente continua. Están basados en semiconductores de potencia que conmutan según una señal de control PWM que produce un comportamiento oscilatorio en la tensión de salida.

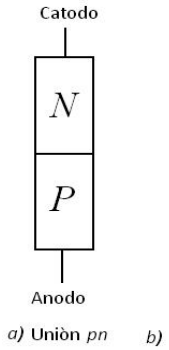
- **Interruptores estáticos.** Circuitos de potencia operados como interruptores estáticos o contactares, estos circuitos pueden ser disparados por señales de AC o DC permitiendo manejar niveles de potencia media.

2 *Circuitos con diodos de potencia*

2.1 Diodos de potencia

Los diodos semiconductores de potencia tienen un papel fundamental en los circuitos de electrónica de potencia. En la mayoría de aplicaciones trabaja como un interruptor ideal, cabe decir que los diodos de potencia son similares a los diodos de señales de unión *pn*, sin embargo los diodos de potencia son capaces de soportar niveles de tensión y corriente mucho más elevados que los diodos de uso general pero con una velocidad de respuesta menor.

Un diodo de potencia es un dispositivo de unión *pn* de dos terminales (ánodo - cátodo) como se muestra en la Figura 2-1, cuando la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo es mayor que el valor de umbral se dice que el diodo esta en polarización directa y el diodo conduce. Un diodo en conducción tiene una caída de tensión directa relativamente pequeña a través de sí mismo; el valor del voltaje de polarización depende del material semiconductor y de la temperatura de la unión *pn*. Cuando la diferencia de potencial entre el ánodo y cátodo es menor a cero se dice que el diodo esta en polarización inversa. La característica *v-i* mostrada en la Figura 2-2 puede ser expresada mediante la ecuación *Schockley de diodo* dada por (2.1).



a) Unión *pn* *b)* Símbolo y unión

Figura 2-1 *pn* del diodo de potencia

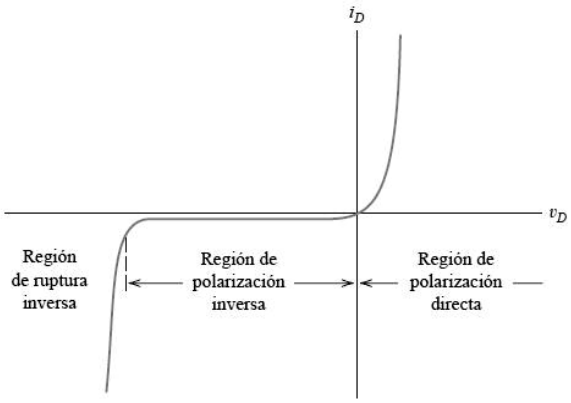


Figura 2-2 Curva característica v-i del diodo

$$I_D = I_s\left(e^{V_D/nV_T} - 1\right) \tag{2.1}$$

Donde I_D = Corriente a través del diodo,
V_D = Voltaje del diodo,
I_S = Corriente de fuga o de saturación inversa (10^{-6} a 10^{-15} A)
n = coeficiente de emisión ($n = 1$, para los diodos de germanio y para los diodos de silicio $n = 2$)
V_T = es una constante y es llamada voltaje térmico la cual está dada por la expresión:

$$V_T = \frac{kT}{q} \tag{2.2}$$

Donde ⟶ q = carga del electrón ($1.602 \times 10^{-19}\ C$),
T = temperatura absoluta en *Kelvins* ($273 + {}^0C$),
k = Constante de *Boltzmann* ($1.38 \times 10^{-23}\ J/K$)

A una temperatura de unión *pn* de 25^oC, la ecuación (2.2) daría que $V_T \approx 25.8mV$. También, a una temperatura especificada la corriente de fuga I_S es constante para cada tipo de diodo. Por otro lado la curva característica del diodo indicada por la Figura 2-2 se divide en tres regiones:

Región de polarización directa: es la zona donde el $V_D > 0$, la corriente del diodo en esta zona es muy pequeña si el voltaje del mismo es menor a un voltaje de umbral o voltaje de activación que por lo general de de $0.7\ V$ (esto para los diodos de silicio). El diodo conduce totalmente si el voltaje V_D es mayor al voltaje de activación con lo que la corriente I_D crese permitiendo el manejo de niveles de corriente elevados.

Región de polarización inversa: zona en la cual $V_D < 0$, indicando que el diodo no conduce puesto que la corriente decae fuertemente a un I_S constante de valor menor a cero.

Región de ruptura: el diodo entra en esta zona cuando el voltaje inverso aplicado al mismo es alto, por lo general mayor a $1000V$. La magnitud de ese voltaje inverso es conocida como V_{BR} y la corriente inversa aumenta rápidamente ante un pequeño cambio más allá de V_{BR}. La operación en la zona de ruptura no será destructiva siempre que el dispositivo sea capaz de soportar los niveles de potencia que se disiparan, estos niveles son especificados por cada fabricante.

2.2 Tipos de diodos de potencia

Un aspecto importante a considerar en estos dispositivos semiconductores es el hecho de que en su accionar de conmutación los portadores minoritarios requieren un cierto tiempo para recombinarse con cargas opuestas y neutralizarse. Este tiempo es conocido como *tiempo de recuperación inversa* del diodo, de igual manera al aplicar un voltaje directo al diodo se lo obliga a conducir corriente en la dirección directa necesitándose un tiempo para ello conocido como *tiempo de recuperación directa*, antes del cual los portadores mayoritarios de toda la unión puedan contribuir al flujo de corriente.

Estos tiempos de recuperación tienen efecto en la velocidad de conmutación y en la velocidad de elevación de la corriente directa. La velocidad de respuesta de los diodos y