

Ecodiseño de dispositivos electrónicos

UNIDAD 10: Ingeniería de energía eléctrica

Autor: Andrej Sarjaš

10.1. Ingeniería de energía eléctrica	2
10.2. Funcionamiento en modo interruptor	4
10.3. Cambiar los elementos del convertidor	13
10.4. Conversores de conmutación.....	22

Resumen del capítulo:

- Principios de conversión de potencia
- Elementos de conmutación en ingeniería energética
- Convertidores



10.1. Ingeniería de energía eléctrica

La ingeniería de energía eléctrica es parte de la conversión de ingeniería eléctrica y el ahorro de energía eléctrica. Todos los dispositivos electrónicos funcionan con diferentes fuentes. Estas fuentes pueden ser autónomas y portátiles o estacionarias. Las fuentes autónomas son todos los sistemas de batería y dispositivos que alimentan dispositivos portátiles y autónomos. En general, los sistemas de batería son solo una forma de ahorrar la energía que suministramos desde sistemas estacionarios, como la red eléctrica. Las fuentes de energía completamente autónomas son sistemas que no dependen de la energía de las redes eléctricas y hacen la conversión de energía no eléctrica en eléctrica en el lugar específico. Tales fuentes son diferentes celdas solares, plantas de energía, etc.

En este punto, podemos preguntarnos que es la conversión y el control de la energía eléctrica. La energía es necesaria para todos los esfuerzos humanos. La capacidad y la fiabilidad de la electrónica moderna deben aceptarse como nuevos desafíos para el uso eficiente de la energía. Es crucial pensar como los circuitos electrónicos destinados a control y corriente de energía eléctrica. Estos circuitos administran potenciales que son significativamente más altos que el precio de cada dispositivo. Los rectificadores son probablemente los ejemplos más conocidos de circuitos que se incluyen en esta definición. Convertidor es un término usado para cierto tipo de circuitos y sistemas que convierten energía. Los convertidores se clasifican según el tipo de entrada y la energía eléctrica de salida. Conocemos los convertidores AC-DC, DC-DC, DC-AC y estos se usan con mayor frecuencia como unidades de suministro de energía de dispositivos electrónicos. Como se ve en la imagen 1, la ingeniería de energía eléctrica presenta el punto medio donde se unen los sistemas de energía, la electrónica clásica y la dirección asistida. Esta energía se genera a partir de la ingeniería de energía eléctrica que es el dominio clave de la ingeniería eléctrica. Cada circuito para transmisión y conversión de energía debe considerar estos problemas desde ambas perspectivas, como control y como conversión de energía. Los principales temas de la ingeniería de energía eléctrica son la investigación de elementos semiconductores, el uso de dispositivos magnéticos para el ahorro de energía, métodos de gestión que forman parte de los sistemas de energía modernos. En cada estudio de energía eléctrica, la importancia de la electrónica debe ser presentada desde la perspectiva de la electrónica de frecuencia digital, analógica y de radio que refleja métodos característicos y desafíos únicos.

Las aplicaciones de la ingeniería eléctrica se extienden exponencialmente. No es posible construir ordenadores, teléfonos móviles, automóviles, aviones, procesos industriales y muchos otros productos cotidianos sin ingeniería eléctrica. Los sistemas de energía alternativa, como los generadores eólicos, la energía solar, las pilas de combustible y otros requieren ingeniería eléctrica para su funcionamiento. La tecnología



avanzada, como vehículos eléctricos e híbridos, ordenadores portátiles, hornos microondas, pantallas planas, iluminación LED y cientos de otras innovaciones que no podrían ejecutarse hasta que los avances en energía eléctrica permitieron su producción. Aunque nadie puede predecir el futuro, está claro que la ingeniería eléctrica estará en el centro de las innovaciones energéticas principales.

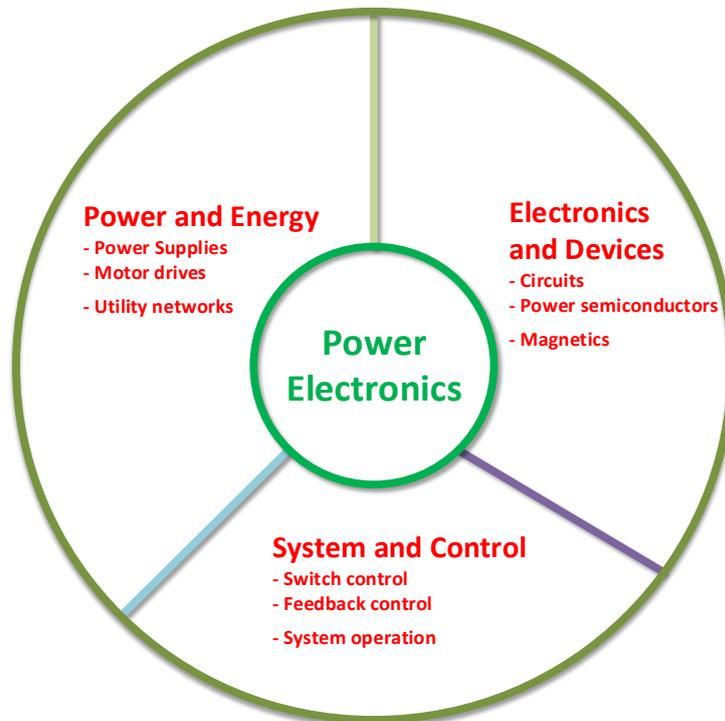


IMAGEN 1: TEMAS DE INGENIERÍA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La historia de la ingeniería de energía eléctrica está estrechamente relacionada con las mejoras de los componentes electrónicos que proporcionan funcionamiento con mayores poderes. Desde 1990, los componentes y dispositivos se volvieron tan sofisticados que comenzó la transición de dispositivos físicos a aplicaciones de programas. Esta transición se basó en dos factores clave:

- Para casi todas las aplicaciones existen semiconductores avanzados con potencias adecuadas que son ampliamente accesibles.
- La tendencia principal para la miniaturización de componentes aumenta con la cantidad de dispositivos y productos eléctricos.

Aunque los dispositivos todavía están mejorando, su desarrollo sigue aplicaciones y dispositivos innovadores.



Todos los circuitos electrónicos regulan la corriente de energía eléctrica y la carga. Los componentes en el circuito necesitan dirigirse a las corrientes eléctricas no interferir con ellas. El sistema general de conversión de potencia se presenta en la imagen 2. El convertidor de potencia de función, visto en el centro de la imagen 2, es el control de la corriente de energía entre la fuente y la carga. En nuestro caso, la conversión de potencia se ejecutará con el circuito electrónico.

Debido a que hay un convertidor de potencia entre la fuente de energía y la carga, toda la energía usada del convertidor se distribuye a todos los componentes dentro del convertidor. Aquí está el desafío clave. Para construir un convertidor, es necesario usar componentes sin o con bajas pérdidas. Es favorable que la eficiencia del convertidor sea cercana al 100%.



IMAGEN 2: CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Imagen 2

Un convertidor de potencia que está conectado a la fuente y la carga también influye en la fiabilidad del sistema. Si la fuente de energía es completamente confiable, el convertidor no confiable puede influir en la carga. El convertidor no confiable está en carga visto como una fuente de alimentación no confiable. El convertidor de potencia no confiable también causa falta de confiabilidad en el sistema completo. Si echamos un vistazo a esto desde la perspectiva de la fuente, podemos decir que los hogares europeos experimentan un promedio de fallas en la red eléctrica solo unos minutos al año. La energía está disponible el 99,9% del tiempo. El convertidor de energía debe ser confiable porque solo esto puede evitar la degradación del sistema. La ejecución ideal del convertidor no debe causar ningún problema en la vida útil del dispositivo. La alta confiabilidad puede ser un desafío de ingeniería más difícil que la alta eficiencia del convertidor. Desde la perspectiva del diseño ecológico de los dispositivos eléctricos, los convertidores de energía son una de las bases para un funcionamiento confiable y la eficiencia del dispositivo. La eficiencia del convertidor influye en el ciclo de vida del dispositivo, que es una metodología importante para evaluar la eficiencia ecológica del dispositivo.

10.2. Funcionamiento en modo interruptor

El funcionamiento de los convertidores de conmutación se basa en interruptores de baja pérdida de que son requisitos externos para la ingeniería de energía eléctrica.



En el caso ideal, cuando el interruptor está encendido, tiene una caída de voltaje cero y transmitirá energía completa a la carga sin pérdidas adicionales. Si el interruptor está apagado, tiene resistencia ilimitada, lo que significa que ninguna corriente pasara por el interruptor. El poder del interruptor es un producto de voltaje, lo que significa que el producto deseado de ambos valores es igual a cero. Si la potencia es igual a cero, no tenemos ningún uso de energía en el elemento interruptor en el tiempo dado. El interruptor, por lo tanto, regula la corriente de energía sin pérdida, donde la confiabilidad del interruptor es crucial. Los interruptores mecánicos domésticos realizan quizás incluso más de 100000 interruptores en una década de uso. Desafortunadamente, los interruptores mecánicos que forman parte del circuito de suministro de energía cambian incluso más de 100000 veces en un segundo. Incluso los mejores interruptores mecánicos no resistirán más de un millón de ciclos. Debido a esto, utilizaremos interruptores de semiconductores de potencias seleccionadas en los convertidores.

El concepto de sistema de conversión se presenta en la imagen 3. El sistema de conversión consta de cuatro unidades separadas, que:

- Fuente de energía.
- Circuito de potencia del convertidor.
- Unidad de gestión del convertidor.
- Carga.

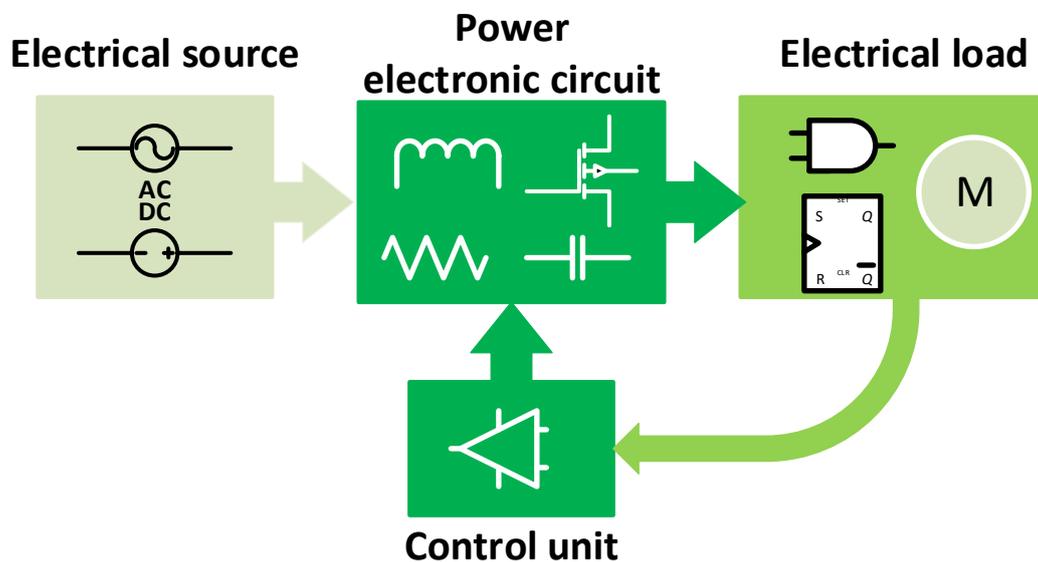


IMAGEN 3: SISTEMAS DE CONVERSIÓN



Una de las fuentes de energía en dispositivos electrónicos puede ser voltaje de red, batería y otras fuentes alternativas. Los circuitos de potencia difieren según el tipo de convertidor que se diferencia según la tensión de entrada y salida, como se ve en la imagen 4.

Conocemos los convertidores que convierten la corriente alterna en un sentido (corriente alterna de CA-CC a corriente continua). El tipo de convertidor AD-DC se usa a menudo en circuitos electrónicos que funcionan con la red eléctrica y requieren una corriente unidireccional para el funcionamiento (circuitos lógicos, circuitos analógicos, unidireccionales, microcontroladores, sistemas informáticos, etc.). El convertidor AC-DC también se conoce como un rectificador.

Otro tipo son los convertidores DC-DC (corriente directa a corriente continua). Estos se utilizan para aumentar o disminuir la corriente unidireccional. Los circuitos electrónicos y los elementos incorporados para su funcionamiento necesitan diferentes potenciales de tensión. Con el uso de convertidores DC-DC, integramos potenciales de voltaje en circuitos electrónicos (los potenciales de voltaje más comunes son 12V, 3,3V, 5V).

El último tipo de convertidor son los convertidores CC-CA (corriente continua a corriente alterna). Estos también se conocen como inversores de potencia y se utilizan para la conversión de un solo sentido a corriente alterna. A menudo se utilizan en motores eléctricos alternativos con velocidad ajustable y conversión de energía de fuentes alternativas, como la planta de energía.

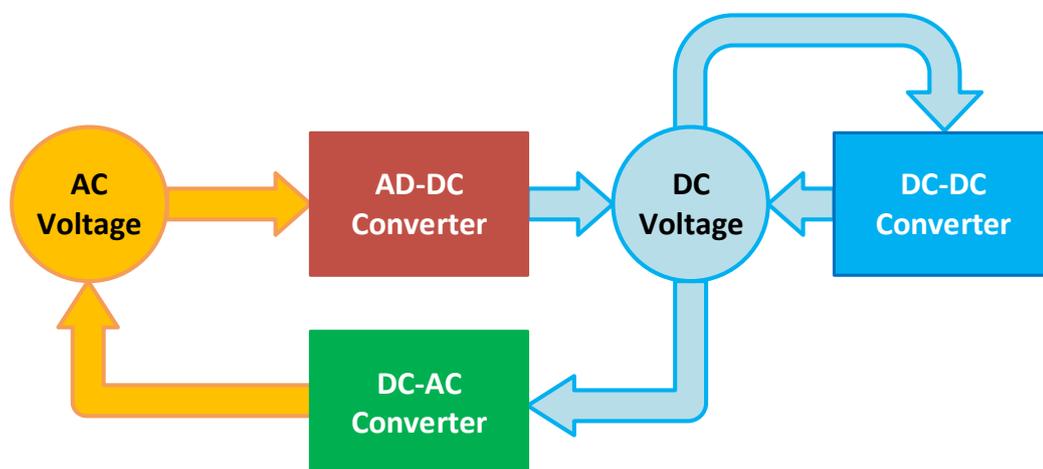


IMAGEN 4: TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN

La unidad de control del convertidor puede ser en forma de circuito analógico o con un microcontrolador. La unidad de control es responsable del control de los interruptores de semiconductores, dependiendo de la salida del convertidor deseada. Esto puede ser el nivel del voltaje, el desplazamiento de fase o la frecuencia de la señal periódica. El tipo de carga está condicionando el funcionamiento del convertidor y su



control. Por ejemplo, sabemos que la carga inductiva o capacidad causa bordes de voltaje o corriente y cargas de ohmios simples que no tienen una apariencia transitive distintiva. A menudo vemos cargas mixtas que tiene Resistencia, inductividad, pero también capacitancia. Todos los elementos del convertidor están diseñados para tener unas bajas pérdidas de energía como sea posible.

Los dispositivos de conmutación se eligen por sus capacidades y transferencia de energía deseada que se establece como un producto de corriente y voltaje. Esto está en oposición a otras aplicaciones electrónicas en las cuales generalmente declaramos pérdida de potencia. Por ejemplo, un receptor estéreo típico ejecuta la conversión de la tensión de entrada a la salida de audio. La mayoría de los amplificadores de audio no usan técnicas de ingeniería de energía eléctrica donde los componentes de semiconductores servirían como interruptores. El amplificador comercial de 100W generalmente está diseñado con transistores que son lo suficientemente grandes como para transferir 10W de potencia. Los dispositivos semiconductores se utilizan principalmente para la reconstrucción de la señal de audio, pero no para la manipulación de las corrientes de energía que causan pérdidas significativas. El amplificador para home theaters funciona con una eficiencia inferior al 10%. A diferencia de este tipo de amplificadores, hay otros que usan técnicas de ingeniería eléctrica para la conversión de energía. El sistema de cine en casa que usa amplificadores de conmutación puede alcanzar incluso el 90% de eficiencia energética y tener pequeñas dimensiones. A menudo, este tipo de amplificadores no necesitan elementos de refrigeración adicionales y están integrados en un solo chip. Los amplificadores pueden incorporarse directamente en los altavoces.

Los convertidores de interruptor pueden alcanzar alta potencia y son mecánicamente relativamente pequeños. Echemos un vistazo a dos ejemplos:

El interruptor NTP30N20 es un transistor de óxido metálico con corriente permitida de 30 A y voltaje de 200 V. El interruptor de potencia de disipación máxima permitida es de 200W con el sistema de refrigeración adecuado (refrigeración o ventilador) o 2,5W sin refrigeración. En la teoría de la ingeniería de energía eléctrica, la potencia nominal es de $30\text{ A} \times 200\text{ V} = 6\text{ kW}$ de energía desde la fuente hasta el consumidor. NTP30N20 funciona en modo de conmutación, lo que significa que está completamente abierto o cerrado. La disipación de potencia es relativamente baja y ocurre principalmente en el tiempo de conmutación.

Muchos fabricantes usan NTP30N20 para administrar diferentes electrodomésticos, como refrigeradores, aires acondicionados y otras herramientas industriales. Como se mencionó anteriormente, la energía transferida a través del interruptor es significativamente más alta que el nivel de potencia nominal en el interruptor mismo. El interruptor es adecuado para la transferencia de energía de hasta 6kW y energía propia de un máximo de 200W. La relación de potencia es 30: 1, que es



relativamente alta, pero no inusual en el contexto de la ingeniería eléctrica. Si comparamos el ejemplo dado de un amplificador de audio que no funciona en el modo de conmutación, se debe garantizar que la energía transferida sea casi igual o incluso mayor que la potencia de disipación propia del transistor.

Podemos echar un vistazo a otro ejemplo; IRGPS60B120KD es un transistor bipolar con puertas aisladas (transistor bipolar con puerta aislada IGBT) que se desarrolló especialmente para la ingeniería de energía eléctrica y que funciona en modo de conmutación. Sus valores nominales son 1200V y 120A. Su potencia transferida es igual a 144kW, que es suficiente para controlar un automóvil eléctrico o híbrido. Es interesante observar que su propia disipación es de solo 500W, lo que significa que su relación con la potencia transferida es de 288: 1.

Las aplicaciones de energía nos llevan a preguntas y desafíos interesantes. En convertidores donde la parte principal son interruptores semiconductores de baja pérdida, a menudo manipulan con capacidades de potencia de disipación de 30 veces. Esto significa que solo tenemos aproximadamente un 3% de pérdida. Un pequeño error en el diseño puede causar pérdidas inesperadas de calor o un pequeño cambio en la disposición del elemento puede reducir drásticamente la eficiencia del convertidor. Por ejemplo, si la pérdida es del 4% en lugar del 3%, la tensión en el dispositivo es un 33% más alta, lo que conduce a un fallo o error del dispositivo. El diseño de convertidores de potencia se puede resumir con tres desafíos principales:

- El primer desafío es la fiabilidad de los circuitos electrónicos de potencia. Tenemos que cumplir estrictamente con el voltaje nominal, las corrientes y la potencia entregada por el dispositivo. El poder siempre tiene que estar dentro de los límites. Esto es especialmente importante cuando se administran altas potencias.
- El segundo desafío es la simplicidad del circuito. En los circuitos electrónicos, se sabe que cuantos más elementos contienen, mayor es la posibilidad de error o falla del sistema completo. Los circuitos de ingeniería de energía eléctrica generalmente tienen muchos componentes, especialmente las ramas principales de energía. Para lograr la eficiencia del convertidor, es muy importante queelijamos los componentes principales de manera razonable. Esto significa que las estrategias de gestión sofisticadas se implementan con circuitos electrónicos simples.
- El tercer desafío es la integración. Una de las maneras de evitar el compromiso entre confiabilidad y complejidad es la integración de componentes y funciones más grandes en un solo sustrato. Por ejemplo, el microprocesador puede contener millones de puertas. Todas las interconexiones y señales se ejecutan dentro del chip, y la confiabilidad depende de un solo componente. Una tendencia importante en la



ingeniería de energía eléctrica es el desarrollo de módulos integrados. Los fabricantes están buscando maneras de integrar tantos componentes importantes en un módulo como sea posible. La miniaturización de componentes también crea nuevos desafíos. Muchos elementos semiconductores contienen pequeños alambres de unión que pueden ser sensibles a los daños por calor o vibración. Las geometrías más pequeñas también pueden aumentar las perturbaciones electromagnéticas entre los componentes internos.

Dos tendencias principales están acelerando el desarrollo de la ingeniería eléctrica. Por un lado, tenemos un microprocesador de alta capacidad, chips de memoria y otros circuitos digitales avanzados que aumentan la capacidad del convertidor a muy bajo voltaje. Aquí podemos destacar la fuente de alimentación de potentes procesadores, donde los requisitos actuales son de 100 A a solo 1V. En dichos sistemas, también tenemos requisitos de carga y tiempo variables en micro o nanosegundos. Contrariamente, tenemos muchos dispositivos portátiles que funcionan con diferentes tipos de baterías recargables. Las fuentes de alimentación para estos dispositivos deben ser eficientes y de bajo costo. Actualmente, las fuentes de alimentación y los cargadores en estos dispositivos tienen pérdidas relativamente altas y baja eficiencia. Debido a esto, los requisitos y esfuerzos de hoy se orientan hacia mejoras de eficiencia y un menor consumo de energía. Los estándares de eficiencia, como el programa EnergyStar, establecen requisitos rigurosos para un amplio espectro de fuentes de alimentación de bajo voltaje.

En el pasado, los proveedores de energía lineal se fabricaban con transformadores y rectificadores que convertían el voltaje de CA en CC. A finales de la década de 1960, el uso de fuentes de un solo sentido en la industria de las aerolíneas y el espacio condujo al desarrollo de convertidores de conmutación de ingeniería de energía. En un convertidor de conmutación bien diseñado, la fuente de tensión alterna de la red se rectifica sin transformación directa, como en los convertidores lineales. El alto voltaje unidireccional dado es un convertidor con un convertidor CC-CC al nivel de voltaje prescrito. La computadora personal a menudo requiere varios niveles de suministro de energía (3.3V, 5V, 12V) y 1V para el procesador. Solo los convertidores de conmutación pueden proporcionar varios niveles de voltaje.

Una comparación muy interesante es la de convertidores analógicos y conmutadores. Los convertidores de conmutación se consideran dispositivos con alta eficiencia, dimensiones más pequeñas y alta potencia en comparación con los convertidores lineales. Tampoco necesitan un complejo sistema de refrigeración. Pero estos dispositivos son más complejos que lineales y causan un voltaje de salida corrugado, lo que impide el uso de ciertas aplicaciones precisas. Actualmente, los convertidores lineales se utilizan con mayor frecuencia para potencias más bajas como



estabilizadores de diferentes componentes electrónicos. Aquí hay algunas características de ambos grupos.

- **Fuentes de alimentación CC lineales:** se usaron ampliamente hasta finales de los años setenta. Con el avance tecnológico de las fuentes de alimentación conmutadas, las fuentes de alimentación lineales son hoy menos populares, pero aún se usan en aplicaciones que requieren un voltaje de salida estable y no corrugado. Las fuentes de alimentación lineales utilizan un transformador grande para la transformación de alta tensión de CA a baja tensión de CA. Los siguientes pasos después de la transformación son circuitos rectificadores y diferentes filtros que crean voltaje de CC de onda baja. Bajo voltaje unidireccional se regula a un nivel dado con estabilizadores de tensión. Las aplicaciones típicas de los sistemas de suministro de energía lineal son:
 - a) Tecnología de audio, mezcladores de estudio.
 - b) Amplificadores de bajo ruido.
 - c) Procesamiento de señales.
 - d) Recolección de datos con convertidores ADC.
 - e) Gestión de circuito cerrado.
 - f) Equipo de laboratorio preciso.

- **Conmutación de fuentes de alimentación de CC:** se introdujeron por primera vez a finales de la década de 1970 y hoy en día son el tipo más popular de fuentes de alimentación de CC en el mercado debido a la excepcional eficiencia energética. El rectificador conmutador ajusta el voltaje de salida con la modulación de ancho de pulso PWM. La técnica PWM crea perturbaciones de alta frecuencia, pero permite que la tensión eléctrica se produzca con una potencia muy alta. Con un buen diseño, la tensión de conmutación tiene una gran regulación de perturbaciones y carga de línea. Las aplicaciones típicas para fuentes de alimentación de CC conmutadas son:
 - a) Aplicaciones de alto voltaje y actuales.
 - b) Dispositivos móviles y de comunicación.
 - c) Carga de la batería para diferentes dispositivos y vehículos.
 - d) Motores unidireccionales



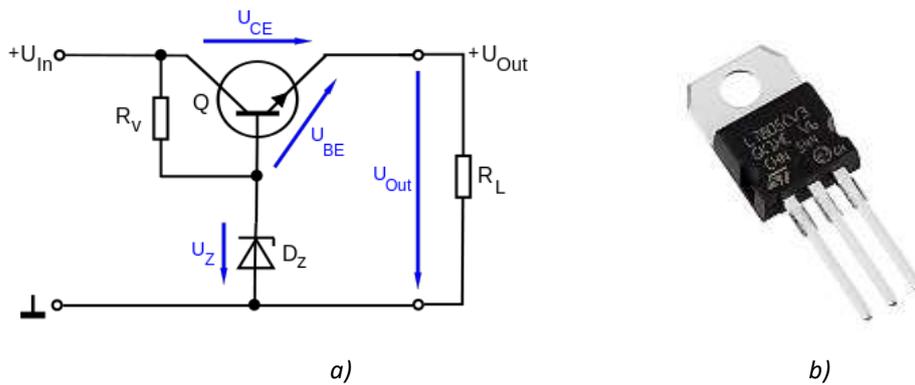


IMAGEN 5: A) ESQUEMA DEL CONVERTIDOR DE VOLTAJE LINEAL, B) PRODUCIR UN CONVERTIDOR DE 5 V EN TO-220 HOUSING.

Como se ve en la imagen 5, el diodo Zener estabiliza el voltaje de salida, lo que significa que el exceso de voltaje se gasta en la resistencia R_v .

Esta es la razón principal del sobrecalentamiento del convertidor que a menudo necesita una refrigeración adecuada para un funcionamiento confiable a altas corrientes y un voltaje de entrada más alto. Por ejemplo, si queremos estabilizar la fuente de alimentación de 5V con un suministro de batería de 12V, la diferencia de voltaje de 7V se gastará en la resistencia R_v . El diagrama de cableado del regulador de voltaje se presenta en la imagen 6.

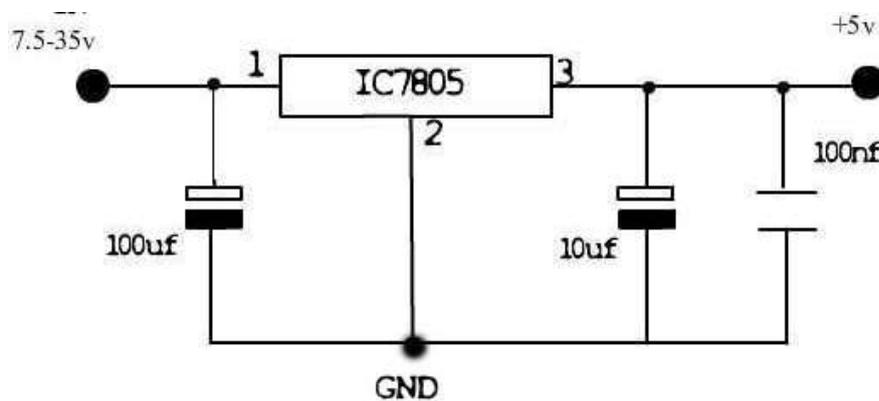
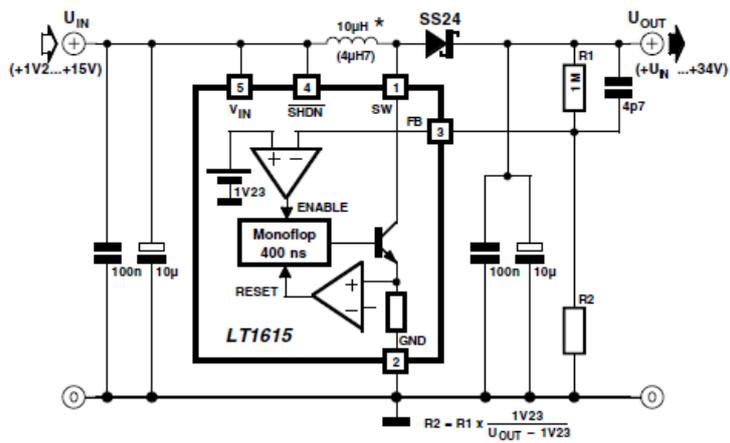


IMAGEN 6: DIAGRAMA DE CABLEADO DEL REGULADOR DE VOLTAJE.





a)



b)

IMAGEN 7: A) CONMUTACIÓN DEL CONVERTIDOR CC-CC, B) APARIENCIA FÍSICA DEL CONVERTIDOR CC-CC.



10.3. Cambiar los elementos del convertidor

Los interruptores electrónicos que son capaces de administrar altas tensiones y corrientes en el rango de alta frecuencia son los elementos más importantes en el diseño de sistemas para la conversión de energía. Entonces, ¿qué interruptor es ideal? El interruptor electrónico ideal puede ser un dispositivo con tres conectores, como se ve en la imagen 8.

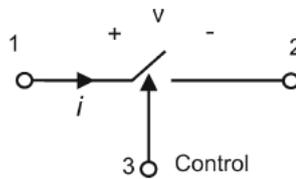


IMAGEN 8: INTERRUPTOR IDEAL.

Podemos ver la entrada, salida y control de abrazadera. El conector de control controla el interruptor en los modos abierto / cerrado (ENCENDIDO / APAGADO). El cambio ideal significa que en el modo abierto no hay resistencia y en el modo cerrado hay resistencia infinita. Este interruptor cambia la condición al instante, por lo que el tiempo necesario para pasar de ON a OFF u OFF a ON es cero. Los interruptores reales tienen limitaciones en todas las características que se han mencionado en el interruptor ideal. Por ejemplo, cuando el interruptor está encendido, tenemos una caída de voltaje, lo que significa que tiene una cierta resistencia. Cuando está apagado, se puede filtrar algo de corriente, lo que significa que no tiene resistencia infinita. El tiempo de cambio tampoco es infinitamente rápido. Como consecuencia de determinadas características de conmutación no ideales, el voltaje y la corriente siempre están presentes en el interruptor y, en consecuencia, hay dos tipos de pérdidas. El primer tipo de pérdidas ocurre entre los modos ON y OFF y se conocen como pérdidas de conmutación. El segundo tipo son consecuencias de la propia resistencia del interruptor que ocurre durante la apertura o el cierre. Estas pérdidas son pérdidas de transferencia y fuga.

El concepto del interruptor ideal es importante para la evaluación del circuito. Las suposiciones sobre la caída de voltaje cero, la fuga de corriente y las ocurrencias de conmutación facilitan la simulación y el modelado en diferentes comportamientos de conmutación del convertidor. Dependiendo de las características del interruptor ideal hay tres clases de interruptores de potencia:



Interruptor no controlado: el interruptor no tiene conector de control. El modo de conmutación está determinado por un voltaje externo o por las condiciones del circuito de corriente en que se encuentra el conmutador. Un ejemplo de dicho conmutador es un diodo.

Interruptor semicontrolado: en este caso, el diseñador del circuito tiene un control limitado sobre el interruptor. Por ejemplo, el interruptor se puede encender con el conector de control, pero cuando está cerrado, no se puede desbloquear con la señal de control. El interruptor se puede apagar dependiendo del estado del circuito actual o con una electrónica de control adicional que fuerza al interruptor a apagarse. Un ejemplo de este interruptor es el tiristor.

Interruptor completamente controlado: el interruptor puede encenderse o apagarse a través del conector de control. Ejemplos de este interruptor son el transistor bipolar BJT, el transistor MOSFET y el transistor IGBT.

10.3.1 Interruptor no controlado

El diodo también se conoce como un rectificador y es un interruptor no controlado. Es un elemento con dos conectores, visto en la imagen 9. Los conectores son el ánodo (A) y el cátodo (K). En el caso ideal, la corriente de diodo (i_d) es unidireccional, lo que significa que la corriente solo va del ánodo al cátodo.



IMAGEN 9: SÍMBOLO DE DIODO SEMICONDUCTOR Y ESTRUCTURA SEMICONDUCTOR.

El voltaje del diodo V_d se mide como el voltaje entre el ánodo y el cátodo. Las características del diodo U-I se presentan en la imagen 10. En el primer cuadrante, el diodo está en modo abierto, lo que significa que es conductor. En el diodo, tenemos una pequeña caída de voltaje que depende del tipo de semiconductor que se usa en el diodo. La caída de tensión en el diodo de silicio es 0.7V y en el diodo de germanio aproximadamente 0.3V. La corriente del diodo está cambiando exponencialmente con el voltaje del diodo. En el tercer cuadrante, el diodo está cerrado, lo que significa que no hay una fuga mínima de corriente o corriente. Las características ideales del diodo se muestran en la imagen 10 b).



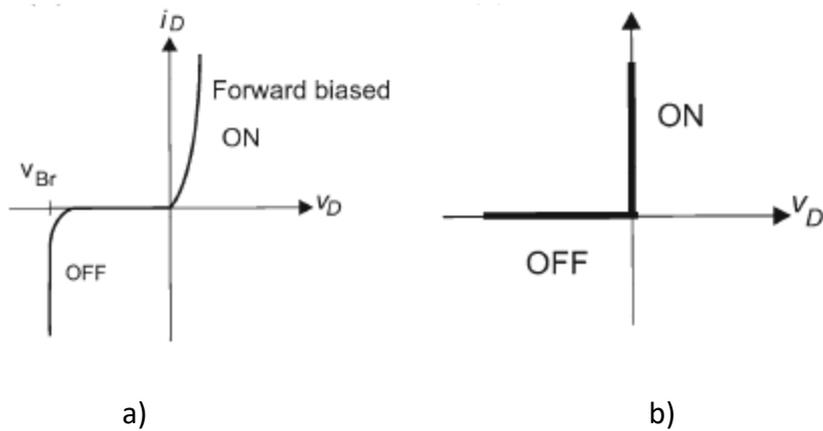


IMAGEN 10: U-I CARACTERÍSTICA DEL DIODO: A) REAL, B) IDEAL.

10.3.2 Interruptor semicontrolado

Tiristor o SCR es un interruptor de semiconductor que se puede abrir con la compuerta de la abrazadera de control. Cuando el interruptor está encendido, no se puede apagar a través de la abrazadera de control y el tiristor funciona de forma similar a un diodo. Esto significa que el tiristor está clasificado como un interruptor a medio controlar. La imagen 11 presenta un símbolo de tiristor. Aunque hay ciertas similitudes entre el tiristor y el diodo, el tiristor funciona de manera diferente. La corriente del tiristor se está ejecutando desde el ánodo hasta el cátodo, y el voltaje del tiristor UAK es positivo, que se presenta en la característica U-I en la imagen 12 a).

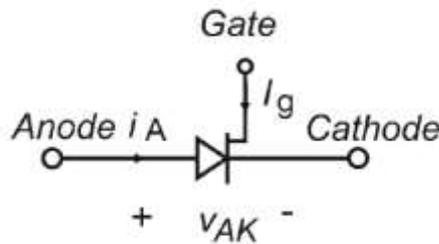


IMAGEN 11: SÍMBOLO DE TIRISTOR.

Imagen 11

En el cuadrante uno es visible que el conector de control del tiristor no conduce sin corriente. En caso de que la corriente pase por el conector de control, el tiristor comienza a conducir y tiene una característica muy similar a la de un diodo ordinario. En el cuadrante tres, el tiristor no conduce, lo que significa que está cerrado. Tiristor aquí tiene una característica similar a un diodo. Aunque la característica del tiristor es similar, podemos ver en las características del interruptor que el tiristor transfiere un voltaje más alto cuando está cerrado. El alto voltaje cerrado es importante para diferentes sistemas de potencia, como los convertidores AC-AC.



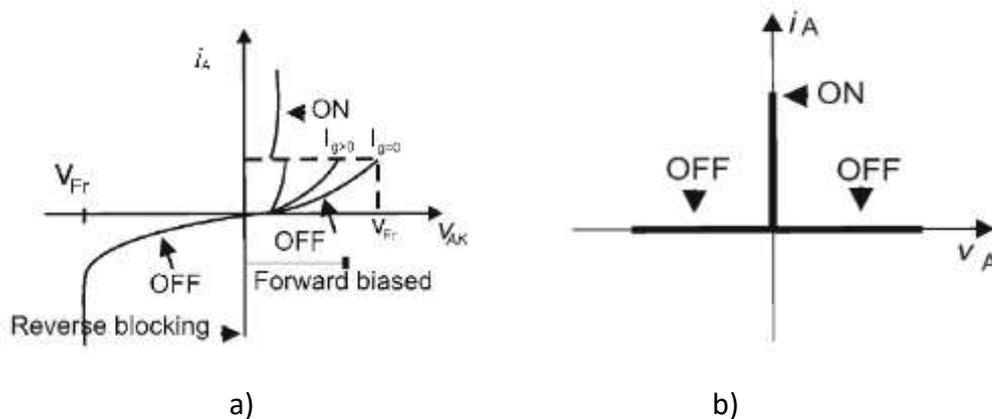


IMAGEN 12: U-I CARACTERÍSTICA DEL TIRISTOR: A) REAL, B) IDEAL.

De la característica del tiristor en la imagen 12, podemos ver que la corriente solo va en una dirección. También conocemos un elemento similar que también es un interruptor de semiconductor, con la diferencia de que la corriente va en ambas direcciones. Este elemento es triac, visto en la imagen 13. Consiste en dos tiristores que están conectados en sentido inverso. La característica U-I del triac se presenta en la imagen 14. Con el conector de control, podemos controlar la conmutación simétrica en el semiperíodo positivo y negativo de la señal de entrada. Triac se usa principalmente para transferir potencias más bajas, como el control del motor monofásico, el sistema de regulación, etc.

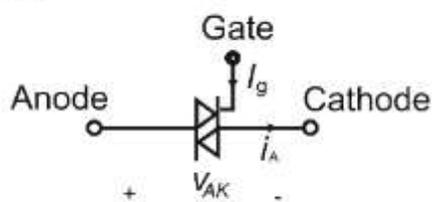


IMAGEN 13: SÍMBOLO TRIAC.



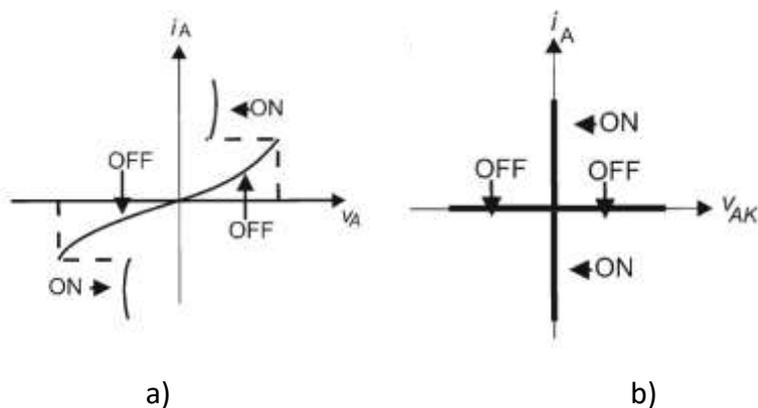


IMAGE 14: U-I CARACTERÍSTICAS DEL TRIAC: A) REAL, B) IDEAL.N

10.3.3 Interruptores completamente controlados

En los interruptores totalmente controlados, los modos abierto / cerrado se pueden activar a través del conector de control. La breve descripción de cada dispositivo se proporciona en los siguientes puntos.

El transistor bipolar-BJT (transistor de unión bipolar) es un interruptor completamente controlado, donde usamos la base (B) para abrir el interruptor, como se ve en la imagen 14 a). En el transistor NPN, utilizamos una tensión de base positiva para abrir el transistor. La corriente en él va desde el colector (C) al emisor E) y en la dirección inversa, el transistor no es conductor. En el tipo PNP, la apertura del transistor se controla con voltaje de base negativo donde la corriente va del emisor al colector.

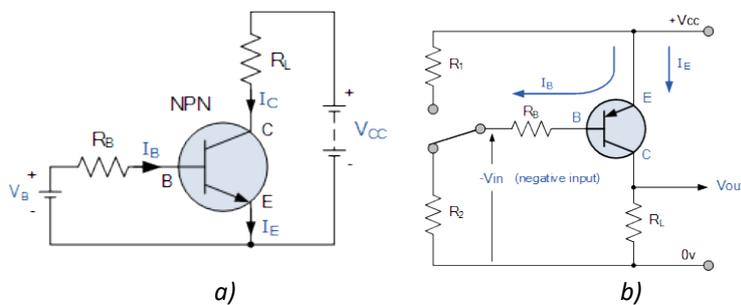


IMAGEN 14: SÍMBOLO DEL TRANSISTOR: A) TIPO NPN, B) TIPO PNP.



La estructura del transistor interno se presenta en la imagen 15.

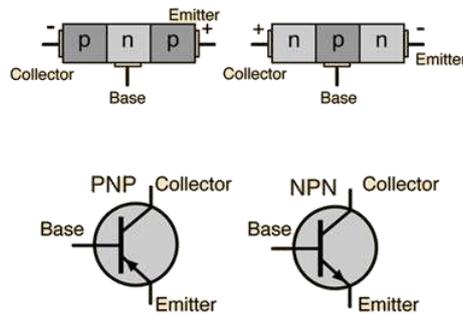


IMAGEN 15: ESTRUCTURA DEL TRANSISTOR

Imagen 15

De la característica estática del transistor NPN en la imagen 16 a) es visible que el elemento tiene tres campos de operación. En dos funciona como un interruptor y en el tercero funciona como un amplificador lineal. El interruptor se cierra cuando el valor de la corriente de base $I_B = 0$ y se abre cuando la tensión entre el colector y el emisor V_{CE} es menor que V_{CEsat} . Si miramos la característica ideal en la imagen 15 b), significa que en modo abierto el transistor entre C y E pierde la corriente $I_C > 0$ en $V_{CE} = 0$. Para la transferencia de altas potencias, generalmente se usa transistor IGBT en lugar del transistor.

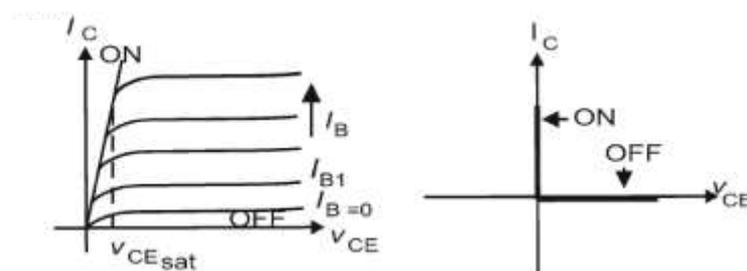


IMAGEN 16: CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL TRANSISTOR: A) REAL, B) IDEAL.

Transistor MOSFET El MOSFET (transistor de efecto de campo de semiconductor de óxido de metal) recibió su nombre del principio de funcionamiento, como se ve en la imagen 17. De forma similar como un transistor, tiene tres conectores (G), (D) y (S).



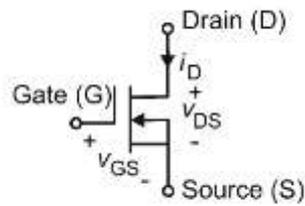


IMAGEN 17: SÍMBOLO DEL TRANSISTOR DEL MOSFET.

La apertura del canal se controla mediante un conector (G), que utiliza un campo eléctrico entre el sustrato polarizado inverso para su funcionamiento. El campo eléctrico se puede gestionar con voltaje V_{GS} , que causa la apertura del canal entre el conector (D) y (S). Debido a una fina capa de dióxido de silicio SiO_2 entre el canal y las compuertas, tiene una alta resistencia de entrada. Debido a esto y al R_{DS} de muy baja resistencia durante la conducción, es un elemento adecuado para la ingeniería de energía eléctrica y la operación de conmutación. La apertura del canal de conducción con campo eléctrico permite la transferencia de altas corrientes. También es importante tener en cuenta que el transistor bipolar es un elemento controlado por corriente con corriente I_B . Los transistores MOSFET son elementos controlados por voltaje con voltaje V_{GS} . El MOSFET característico estático es muy similar a un transistor bipolar, como se ve en la imagen 18.

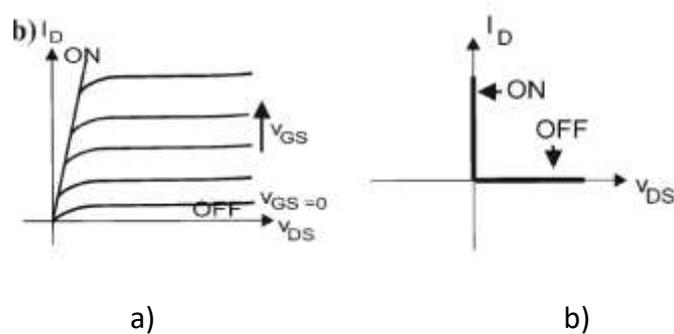


IMAGEN 18: CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL MOSFET: A) REAL, B) IDEAL.

A continuación se presenta la estructura del transistor MOSFET.



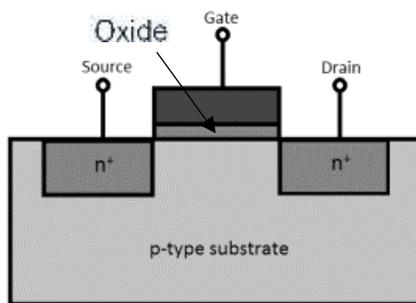


IMAGEN 19: ESTRUCTURA DEL TRANSISTOR DEL MOSFET.

Si comparamos las imágenes 15 y 16, podemos ver que la estructura del MOSFET es significativamente diferente que el transistor BJT. En MOSFET creamos un canal de conducción suministrando voltaje VGD entre (G) y (D). El voltaje VGD crea un campo eléctrico que crea un canal n + conductor entre dos sustratos n + incorporados dentro del sustrato p. Cuanto mayor sea el voltaje, más ancho será el canal, lo que significa que la resistencia del canal es menor. En funcionamiento estático, utilizamos modos totalmente abiertos o cerrados.

La desventaja de MOSFET es una gran sensibilidad de voltaje en las puertas de entrada (G), que es el resultado de una gran resistencia de entrada. Debido a esto, es importante tener cuidado con el tamaño de voltaje VGD. Algunos MOSFET tienen diodos de seguridad integrados por esta razón. La desventaja del MOSFET es también una capacidad relativamente alta, que limita el uso a altas frecuencias. Por esta razón, ha habido otras versiones que usan dos (G) conectores. De esta manera, reducimos mecánicamente la superficie compuesta. Las buenas características del MOSFET son dimensiones muy pequeñas para grandes potencias, alta velocidad de conmutación, resistente a cargas térmicas. La Tabla 1 presenta la diferencia entre el transistor bipolar y MOSFET.

<i>Property</i>	<i>BJT</i>	<i>MOSFET</i>
<i>Input resistance</i>	low	high
<i>Control</i>	Current (need power)	Voltage (no power)
<i>Switching 'ON' time</i>	50-500ns	5-500ns
<i>Switching 'OFF' time</i>	400-2400ns	5-500ns
<i>Frequency</i>	80MHz	1.5GHz
<i>Conduction resistance</i>	0.3Ω	0.01-1Ω
<i>Overload sensitivity</i>	bad	good
<i>Thermal stability</i>	Need	No need

TABLA 1: COMPARACIÓN ENTRE EL TRANSISTOR BIPOLAR Y MOSFET.



El transistor IGBT es híbrido entre BJT y el transistor MOSFET. IGBT contiene buenas características de MOSFET, como conmutación rápida y baja resistencia de conducción del transistor BJT. IGBT es una conexión Darlington, hecha de transistor MOSFET y BJT, como se ve en la imagen 20 a). MOSFET controla la corriente base en el transistor BJT.

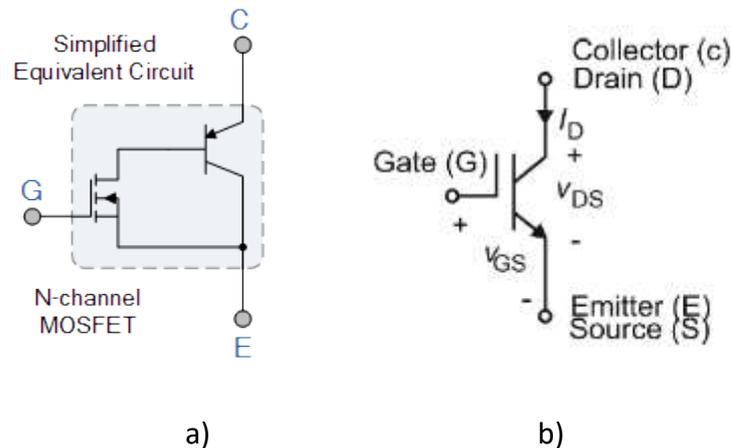


IMAGEN 20: TRANSISTOR IGBT.

El símbolo del transistor IGBT consiste en un transistor MOSFET y BJT. El conector de control (G) y el canal de conducción (marcado con (C) y (D)) se pueden ver en la imagen 20 b). La característica estática se presenta en la imagen 21.

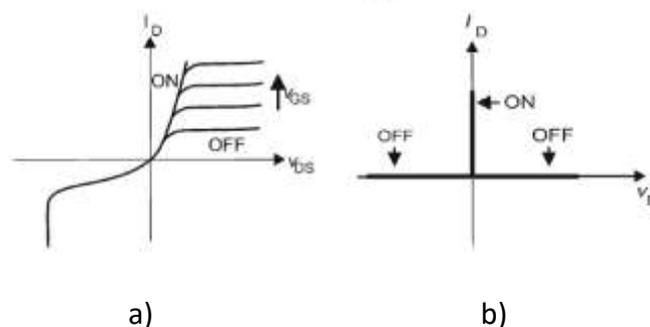


IMAGEN 21: CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL TRANSISTOR IGBT: A) REAL, B) IDEAL.

El transistor IGBT es adecuado para conmutar a potencias superiores. En comparación con MOSFET, el voltaje de control V_{GS} es algo mayor, pero las capacidades de corriente son significativamente más altas que en MOSFET. La Tabla 2 presenta una comparación entre transistores de potencia.



Property	BJT	MOSFET	IGBT
Voltage rating	High<1kV	High <1kV	Very High >1kV
Current rating	High<500A	Low<200A	High>500A
Input drive	h_{FE} 20-200	3-10V	4-8V
Input impedance	Low	High	High
Output impedance	Low	Medium	Low
Switching speed	Slow	Fast	Medium
Cost	Low	Medium	High

TABLA 2: COMPARACIÓN DE TRANSISTORES BJT, MOSFET E IGBT.

De los datos anteriores, podemos ver que el transistor BJT rara vez se utiliza para los convertidores de potencia porque la potencia es fácil de sustituir por el transistor MOSFET. A corrientes y voltaje muy altos, solo es posible usar transistores IGBT.

10.4. Conversores de conmutación

En este capítulo, solo presentaremos convertidores de conmutación. Estos proporcionan una alta eficiencia y, por lo tanto, son desde la perspectiva del diseño ecológico adecuados para integrarse en la mayoría de los dispositivos electrónicos modernos.

10.4.1 Convertidores de conmutación AC-DC – rectificadores

Los convertidores de CA-CC son circuitos de potencia que convierten la tensión alterna en unidireccional. Los convertidores AD-DC son parte de la mayoría de los dispositivos electrónicos. La razón de esto es su eficiencia y rendimiento, ambos muy importantes. Existen varios principios y otros enfoques para los convertidores de CA-CC. La ventaja del rectificador AC-DC en comparación con el ordinario es una mayor eficiencia y dimensiones más pequeñas con las mismas potencias. Para propósitos de diseño ecológico, presentaremos el principio para el convertidor de conmutación que es ampliamente utilizado debido al alto rendimiento en diferentes dispositivos electrónicos, tales como receptores de televisión, computadoras personales, dispositivos de audio, etc. La imagen 22 presenta el esquema de rectificador de conmutación.



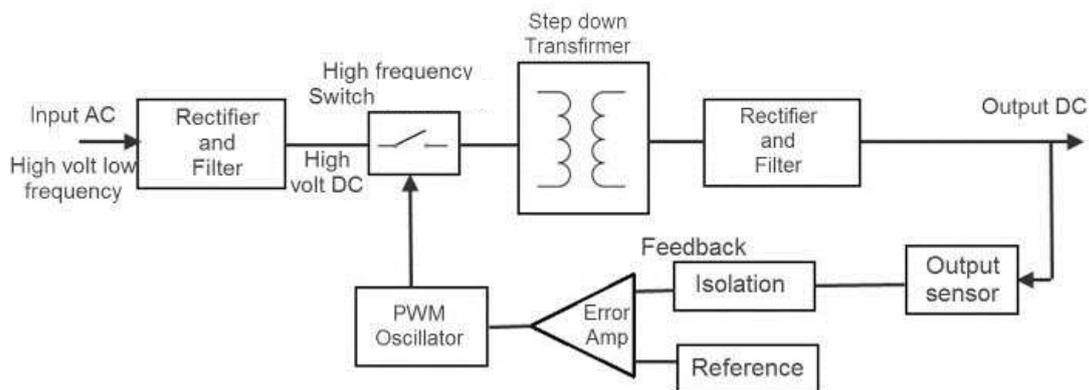


IMAGEN 22: CONVERTIDOR DE CONMUTACIÓN AC-DC.

El convertidor de CA-CC en el primer bloque dirige instantáneamente la tensión de entrada alterna con rectificador de diodo de media onda o de onda completa. Muchos convertidores de CA-CC en la primera fase contienen diferentes filtros para eliminar el ruido y los bordes de la red. En la segunda fase, el voltaje pasa a través del interruptor de alta frecuencia que se controla según la tensión de salida deseada. La frecuencia de conmutación suele oscilar entre 10 y 100 kHz, según el tipo de convertidor. Desde el interruptor, obtenemos un tren de pulsos que tiene la misma frecuencia que el interruptor. El tren de pulsos se lleva al transformador, donde se baja la tensión. El transformador usado contiene menos capas en el nivel primario y secundario, lo que reduce drásticamente el tamaño del transformador y la cantidad de materiales usados. En la salida del transformador, podemos usar un filtro de baja permeabilidad para suavizar la tensión o convertidor de CC-CC. Dependiendo de la tensión de salida unidireccional deseada, controlamos la velocidad de conmutación.

La Imagen 23 presenta el convertidor clásico AC-DC con transformador de entrada. La dimensión del transformador depende de la potencia y de la relación de transformación de tensión alterna. En comparación con el transformador en el convertidor AC-DC del interruptor, la relación de dimensiones puede ser de 1:10 a favor del convertidor AC-DC del interruptor.



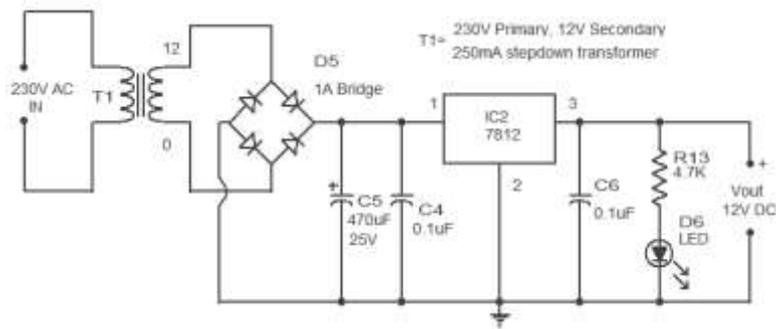


IMAGEN 23: CONVERTIDOR CLÁSICO AC-DC

10.4.2 Convertidores de conmutación DC-DC

Los convertidores CC-CC se utilizan para suministrar consumidores de un solo sentido que se pueden encontrar en muchos dispositivos electrónicos. Los convertidores proporcionan la regulación del voltaje de una vía en ciertos consumidores. También se usan para la separación galvánica de un circuito determinado. Conocemos cuatro tipos de convertidores DC-DC:

- **Convertidor reductor (convertidor buck)**
- **Convertidor elevador (convertidor elevador)**
- **Convertidor reductor y elevador (convertidor Buck-Boost)**
- **convertidor de ukuk**

La reducción del convertidor, como su nombre lo indica, reduce el voltaje de entrada de CC. El esquema del convertidor reductor se presenta en la imagen 24.

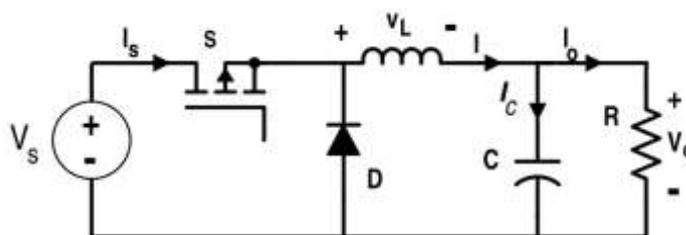


IMAGEN 24: CONVERTIR STEP-DOWN.

El principio de funcionamiento del convertidor es simple; controlamos el interruptor dirigiendo la tensión de entrada al circuito LC. Cuando el interruptor está cerrado, la corriente va al circuito LC y alimenta la carga. En caso de que el interruptor no esté cerrado, el diodo mismo cierra el circuito secundario que es la consecuencia de la propia inducción en la bobina. El interruptor generalmente se controla mediante señal PWM. El circuito LC es un tamiz de baja frecuencia que suaviza las corrugaciones de la



tensión de salida debido a la conmutación. Para el interruptor controlado dependiendo de la potencia, podemos usar transistor BJT, MOSFET o IGBT. Según si el interruptor está abierto o cerrado, obtenemos un valor promedio en la salida del convertidor que es menor que V_{IN} . Con el diseño adecuado y la elección de elementos, podemos diseñar un convertidor DC-DC altamente eficiente y confiable. Muchos fabricantes ofrecen un convertidor DC-DC en un circuito integrado. La forma integrada significa que los elementos convertidores de teclas están todos en un chip. Dependiendo de nuestras necesidades, debemos elegir la bobina, el voltaje de salida de referencia y el condensador.

El **convertidor elevador** se usa para consumidores unidireccionales que necesitan un voltaje más alto que el que está conectado. El esquema del convertidor incremental se presenta en la imagen 25.

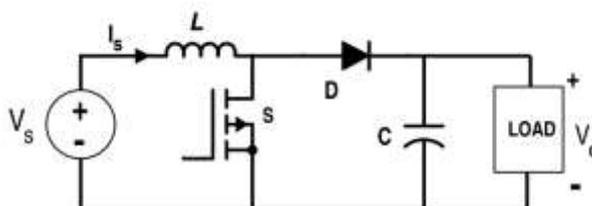


IMAGEN 25: CONVERTIDOR DE STEP-UP.

El principio de funcionamiento se basa en la propia inducción de la bobina de entrada. Con la conmutación rápida, los interruptores causan bordes de voltaje en la bobina L . En caso de que el interruptor se concluya, la corriente pasa a través de la bobina de regreso a la fuente de alimentación. En esta fase, causamos la propia inducción de la bobina, lo que significa que ahorramos energía en L . Cuando el interruptor no se cierra debido a la propia inducción, la bobina redirige la energía guardada a través del diodo a un condensador que actúa como almacenamiento de energía en el círculo secundario y el suavizador de el voltaje de salida. El tamaño de los bordes de voltaje depende de la velocidad de conmutación. Cuanto más rápido sea el interruptor, mayor será el límite de voltaje en la bobina L . En este caso, también controlamos el interruptor con señal PWM donde la velocidad de conmutación está controlada por la tensión de salida. El convertidor elevador se puede encontrar en forma integrada, de forma similar a un convertidor reductor.

Conversor reductor / progresivo. Dependiendo del conector común en un circuito electrónico, a menudo aparece la necesidad de voltaje negativo en la salida del convertidor. Para estos casos, se usa step-down / up, visto en la imagen 26.



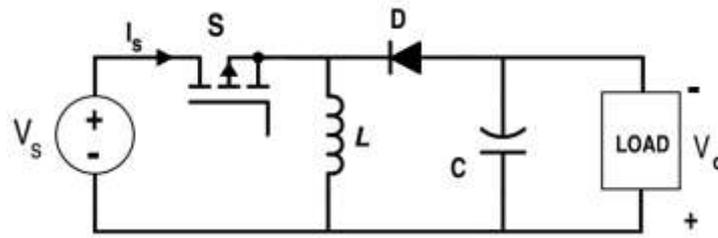


IMAGEN 26: CONVERTIDOR STEP-DOWN / UP.

El convertidor reductor / ascendente consta de un convertidor en cascada para reducir y aumentar. El esquema presentado muestra la realización de ambos convertidores con medio conjunto de elementos. El convertidor puede generar un voltaje más bajo o más alto dependiendo del potencial conectado. Los principios de funcionamiento son los siguientes: cuando el interruptor está cerrado, la corriente pasa a través de la bobina L. Cuando el interruptor está abierto debido a la propia inducción de la bobina L y del diodo polarizado negativamente, la corriente va en la dirección inversa. En el condensador C obtenemos voltaje negativo, dependiendo del voltaje conectado. La relación entre la salida y la tensión de entrada se da con el ciclo de servicio de la señal PWM ($V_0 / V_s = D (1 / (1-D))$). La señal PWM puede tener en el ejemplo dado +. Esto puede tener un valor entre 0 y 1 (0-100%).

El **convertidor de Ćuk** fue nombrado después de Slobodan Ćuk, que ha sido el primero en desarrollar dicho circuito, como se ve en la imagen 27. El convertidor de Ćuk es básicamente un convertidor reductor / ascendente que puede generar un voltaje negativo en la salida. La principal diferencia es que el condensador y no la bobina es responsable de la transferencia de energía, en comparación con los ejemplos anteriores. Para el convertidor de Ćuk es típico que la energía se transmita en ambos modos de conmutación (ON y OFF). En el convertidor clásico, la energía solo se transmite cuando el interruptor está en un estado abierto o cerrado.

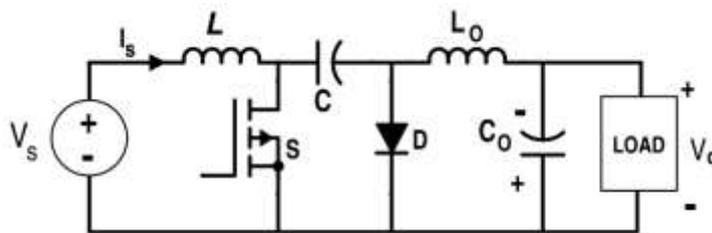


IMAGEN 27: CONVERTIDOR DE ĆUK.

10.4.3 Convertidores de conmutación DC-AC: inversores



Los convertidores de CC-CA son circuitos de ingeniería de energía eléctrica que convierten la salida de la fuente de voltaje de una vía, como las baterías, las células solares o las pilas de combustible en alterna de voltaje CA. Los inversores se utilizan a menudo para la propulsión de motores eléctricos o generadores de tensión. Los inversores son clave en sistemas de alimentación ininterrumpida UPS. Los inversores a menudo se pueden clasificar en función de su potencia de salida y número de fases (monofásica o trifásica) y según el tipo de conversión (media onda o onda completa). En los convertidores CC-CA, conocemos muchos tipos y modos de conversión, por lo que solo presentaremos un convertidor monofásico con un circuito puente, como se ve en la imagen 28.

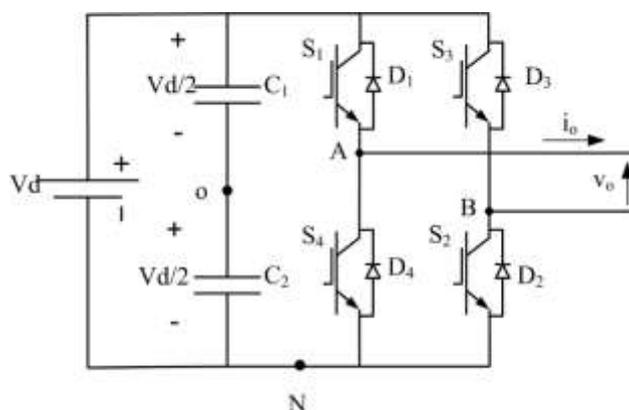


IMAGEN 28: CIRCUITO DE INVERSOR DE CIRCUITO DE PUENTE MONOFÁSICO.

El principio de funcionamiento del circuito se basa en el control electrónico de los interruptores S1-S4. Los interruptores se cambian diagonalmente S1S2 y S3S4, donde debemos tener cuidado de no cerrar S1S4 o S3S2. Con este cambio, podemos causar un cambio de dirección de la corriente de salida i_0 . Para el control del interruptor se utiliza la modulación PWM, con la cual podemos obtener un voltaje alterno relativamente suave.

