



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGÓN

**“APLICACION DEL CHOPPER EN EL
FRENADO DEL SISTEMA DE
TRANSPORTE COLECTIVO (METRO)”.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICO

PRESENTAN

ALEJANDRO CORTES BLANCAS

ROMAN DOROTEO ANGELES SILVA

ASESOR :

ING. ABEL VERDE CRUZ

SAN JUAN DE ARAGON

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

ALEJANDRO CORTES BLANCAS
P R E S E N T E.

En contestación a la solicitud de fecha 29 de septiembre del año en curso, presentada por Roman Doroteo Angeles Silva y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. ABEL VERDE CRUZ pueda dirigirles el trabajo de tesis denominado "APLICACIÓN DEL CHOPPER EN EL FRENADO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (METRO)", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 10 de octubre de 2003
LA DIRECTORA

L. Turcott

ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



GB

- C p Secretaría Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- C p Asesor de Tesis.

LTG/AIB



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

ROMAN DOROTEO ANGELES SILVA
PRESENTE.

En contestación a la solicitud de fecha 29 de septiembre del año en curso, presentada por Alejandro Cortes Blancas y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. ABEL VERDE CRUZ pueda dirigirles el trabajo de tesis denominado "APLICACIÓN DEL CHOPPER EN EL FRENADO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (METRO)", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 10 de octubre de 2008
LA DIRECTORA


ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ





- C p Secretaría Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- C p Asesor de Tesis.

LTG/AIR 

A MIS PADRES:

**Enriqueta Blancas de Cortes.
Gregorio Cortes Duarte.**


A mis hermanos.

A mis amigos y compañeros

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Alejandro Cortes
Blancas

FECHA: 29-7-04

FIRMA: 

DEDICATORIAS:

PRIMERAMENTE DARLE GRACIAS INFINITAS A DIOS POR PERMITIRNOS LLEGAR A ESTOS MOMENTOS TAN FELICES E IMPORTANTES EN MI VIDA Y PORQUE SIEMPRE A ESTADO CONMIGO Y CON MI FAMILIA Y PODER COMPARTIR ESTOS GRANDES MOMENTOS CON ELLOS Y MIS AMIGOS, A MIS PADRES ROBERTO Y PAULINA POR SU GRAN APOYO DURANTE TODOS ESTOS AÑOS DE ESTUDIOS Y QUE SIEMPRE ME ESTUVIERON MOTIVANDO PARA QUE FUERA ALGUIEN EN LA VIDA, A MI HERMANA LUISA POR SU APOYO A MI SOBRINA LUISA PAULINA POR DARNOS ALEGRÍA EN ESTA CASA, A MI NOVIA Y FUTURA ESPOSA MAGALLI A LA CUAL AMO CON TODO MI CORAZÓN Y TAMBIÉN DEDICO ESTE TRABAJO POR SU GRAN MOTIVACIÓN RECIBIDA DURANTE TODO ESTE TIEMPO. A MI COMPAÑERO DE TESIS Y GRAN AMIGO ALEJANDRO CORTES POR ANIMARME Y APOYARME EN LA INVESTIGACIÓN DE ESTA TESIS. A MIS AMIGOS, HÉCTOR CARRERA, JUAN CHACON, EDGAR RIVERA, ALVARO RANGEL, ARTURO CORREA Y FAMILIA, ARTURO ANAYA, ENRIQUE DE LOS SANTOS, ADRIAN MARIN, ANTONIO GRANADOS, GUSTAVO MARES Y FAMILIA, NOE CAMARGO Y FAMILIA, AL CUATE RAFA, JOSÉ LUIS SALAS, JUAN CARLOS, JULIO.

UNA DEDICATORIA ESPECIAL AL MAT. AGUSTÍN GUTIERREZ RENTERIA POR APOYARN A MI FAMILIA EN MUCHOS ASPECTOS Y TAMBIÉN DARMÉ LA OPORTUNIDAD DE DESARROLLARME DENTRO DEL PLANO LABORAL. A MI TÍO BANIS POR SER LA PERSONA POR QUIEN YO ME DECIDÍ A ESTUDIAR LA CARRERA DE INGENIERIA SABIENDO LO DIFÍCIL QUE ES LA MISMA Y PORQUE EL FUE QUIEN SIEMPRE ME MOTIVO ACADÉMICAMENTE A LOGRAR TODOS MIS OBJETIVOS. A MIS ABUELITOS MARIA DE LA LUZ ROCHA Y PEDRO SILVA LES DEDICO MUY CARIÑOSAMENTE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN, A CAROLINA SILVERIO, ROMÁN ÁNGELES MAQUEDA, VICENTE SILVERIO, ELODIA CAMPOS, FACUNDA BLANCAS, A MI "TÍO" LALO, UNA DEDICATORIA DOBLEMENTE ESPECIAL Y LLENA DE CARIÑO PARA ELLOS QUE DIOS LOS TENGA EN SU SANTA GLORIA, AL TÍO PEPE Y A TODOS AQUELLOS QUE CONFIRARON EN MI Y SIEMPRE ME APOYARON LES DOY LAS GRACIAS

AGRADECIMIENTOS:

AL INGENIERO RAÚL BARRÓN, A NUESTRO ASESOR DE TESIS EL INGENIERO ABEL VERDE CRUZ POR APOYARNOS, DIRIGIR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN Y DARNOS LAS FACILIDADES, A LOS INGENIEROS PABLO LUNA, JOSÉ JUAN RAMÓN MEJIA, ANTONIO VILLANUEVA, JOSÉ LUIS ESTRADA GARCIA POR APOYARNOS EN LA REVISIÓN DE ESTE TRABAJOY DARNOS SU VALIOSO VOTO APROBATORIO.

A LOS INGENIEROS DE LA DGCOST, FÉLIX SEGURA, CERINO SÁNCHEZ, IGNACIO QUIENES NOS APOYARON CON EL MATERIAL DE INVESTIGACIÓN DE EL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (METRO).

A LOS INGENIEROS DE LATERMINAL TICOMAN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO POR SU GRAN APOYO Y FACILIDAD DEL MATERIAL DE INVESTIGACIÓN DEL SISTEMA CHOPPER REFERENTE AL FRENADO ELÉCTRICO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO (METRO).

ÍNDICE GENERAL

Objetivo.....	5
Justificación.....	5
Introducción.....	8

1. Capítulo 1 CONCEPTO GENERAL.

1.1 Aplicación de accionamientos en función de la velocidad y el par.....	27
1.2 Evaluación de la potencia del frenado eléctrico en función de la velocidad y el par...28	
1.3 Conceptos básico de descripción de cargas	29
1.4 Como evaluar el par y el frenado eléctrico.....	29
1.5 Resumen y conclusiones	31

2. Capítulo 2 SOLUCIONES DEL FRENADO ELECTRICO EN ACCIONAMIENTOS.

2.1 Frenado de flujo del motor	32
2.2 Chopper de frenado y resistencia de frenado	34
2.2.1 El almacenamiento de energía en el convertidor de frecuencia	34
2.2.2 Principio del chopper de frenado	35
2.3 Configuración antiparalela de los puentes de tiristores	36
2.4 Configuración con puente IGBT	37
2.4.1 Principios generales de las unidades de regeneración IGBT.....	37
2.4.2 Regeneración IGBT: objetivos de regulación.....	38
2.4.3 Control directo del par en forma de control directo de la potencia	39
2.4.4 Dimensionado de una unidad de regeneración IGBT	40
2.5 CC común	41

Capítulo 3 EVALUAR EL COSTE DEL CICLO DE VIDA DE DISTINTOS FRENADOS ELÉCTRICOS.

3.1 Cómo calcular el coste directo de la energía	42
3.2 Cómo evaluar el coste de la inversión	42
3.2.1 Frenado eléctrico por tiristores o IGBT.....	42
3.3 Cómo calcular el coste del ciclo de vida	43

Capítulo 4. MATERIAL RODANTE.

4.1 Parámetros específicos.....	46
4.2 Resistencias al avance.....	47
4.3 El motor.....	49
4.4 Concepto de una motriz.....	51
4.5 El control en material rodante.....	52

Capítulo 5. APLICACIÓN DEL CHOPPER EN EL SISTEMA DE FRENADO ELECTRICO

5.1 Que es un Chopper?.....	55
5.2 Diagrama de funcionamiento de un chopper elemental.....	55
5.3 El tiristor de conducción inversa.....	58
5.4 Circuito completo de un chopper de una sola fase.....	59
5.5 Circuito de conmutación.....	61
5.6 Funcionamiento del chopper en frenado.....	64
5.7 Frenado dinámico.....	65
5.8 Oscilograma del funcionamiento del chopper.....	65
5.9 Ventajas del sistema chopper.....	66

Capítulo 6. SISTEMA CHOPPER

6.1 Características del sistema chopper.....	67
6.2 Prueba de combinación.....	68
6.3 Pruebas a efectuar al chopper y sus componentes.....	68
6.4 Características del chopper para el metro de la Cd. de México.....	71

Conclusiones.....	73
--------------------------	-----------

Bibliografía.....	75
--------------------------	-----------

Objetivo.

- Conocer el funcionamiento del chopper en el accionamiento del frenado del Sistema de Transporte Colectivo (Metro).
- Conocer el tiempo de vida del chopper en el Sistema de Transporte Colectivo (Metro).

Justificación.

El siguiente estudio referente al frenado en el Sistema de Transporte Colectivo de ciudad de México (STC) es un tema interesante debido a la función primordial que como todo transporte público necesita un frenado seguro utilizando a la energía eléctrica como medio de accionamiento, dando así una excelente seguridad a la ciudadanía que diariamente utiliza este medio de transporte. El estudio que llevaremos a cabo son a las dos primeras unidades de tren con destino al Metro de México, fabricadas por CAF, Bombardier, ADtranz en su factoría el 80% es del extranjero ya que viene de Francia y España. Las unidades realizaron las pruebas en las instalaciones del Metro mexicano, adonde llegaron en los meses de mayo y junio pasado.

La fabricación de 15 unidades de nueve coches cada una, con una composición de dos coches motores con cabina (M) situados en los extremos, tres remolques (R) , uno de ellos (PR) dotado de pilotaje automático y situado en el centro de la composición y cuatro coches motores intermedios sin cabina (N). La composición del tren es: M-R-N-N-PR-N-N-R-M. Todos los coches se apoyan sobre los bogies; motores, en el caso de los M y los N, y portantes, en el de los coches R y PR. El equipo eléctrico es Melco y era propiedad de la compañía mexicana, que llegó a un acuerdo con la compañía española para utilizar parte del material que tenía en almacenaje para la construcción de este material.

Con este material, ya que es de tipo neumático. La velocidad máxima que pueden alcanzar estos vehículos es de 80 km/h. Cada tren tiene una longitud de 147,35 m y una anchura de 2,5 m. La altura del piso sobre carril es de 1,2 m y la atención de alimentación es de 750 V. Los vehículos son de ancho nacional. Las cabinas de conducción están diseñadas para ser conducidas por agente único desde un puesto de conducción central. Una gran luna anti-impacto proporciona al maquinista visibilidad y protección. En la parte superior exterior de los testeros de cabina existen indicadores de número de tren y del destino. La cabina cuenta con radioteléfono que permite al conductor del tren establecer contacto con el puesto de mando y también va dotada de un sistema de megafonía que hace posible la comunicación entre ambas cabinas y la del conductor con los viajeros, así como el enlace con el sistema de radioteléfono.

La cajas tienen estructura autoportante de construcción en acero soldado. Los testeros extremos de la composición son de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Cada coche cuenta con cuatro partes deslizantes por costado para el acceso de viajeros, el suelo es de caucho antideslizante. La iluminación interior del vehículo es fluorescente y se haya situada en dos bandas laterales a lo largo del techo. Las dimensiones de las cajas son diferentes, los coches motores con cabina miden 16,844 m y tienen capacidad para 163 viajeros, de los que 38 son plazas sentadas y 125 de pie. Los coches R y N aumentan el número de plazas a 172, con el mismo número de asientos. La capacidad total de una unidad es de 1530 personas. Los coches cuentan con un sistema de ventilación que consiste en siete ventiladores instalados en el techo, que toman aire del exterior por medio de unas rejillas situadas encima de las ventanas y filtros. En la parte inferior de las ventanas se sitúan las rejillas para la expulsión del aire viciado.

La producción de aire en los coches remolques se realiza por un grupo autocompresor de 1000 l/m de capacidad. El aire pasa por un secador antes de alimentar el sistema. Por lo que se refiere al bogie, su bastidor está suspendido de los ejes mediante bulones de interposición con elementos elásticos de fijación. La suspensión secundaria está constituida por muelles helicoidales recubiertos de caucho, sobre los que se apoya la caja a través de resbaladeras plásticas. El guiado de las ruedas se realiza por cuatro ruedas situadas en la proximidad de las cuatro esquinas del bogie. El motor es de corriente continua serie con AVF, cuatro polos, autoventilado de 128 kW en régimen unihorario. La electrónica de potencia del motor es chopper con tiristores, freno regenerativo y reostático, refrigerado por resistencias situadas en el carro con las letras PR el cual sirve para eliminar el exceso de energía, convirtiendo la energía en calor cuando frena y cuando llega al final del andén es ayudado por unas balatas de madera que hacen el trabajo final de frenado.

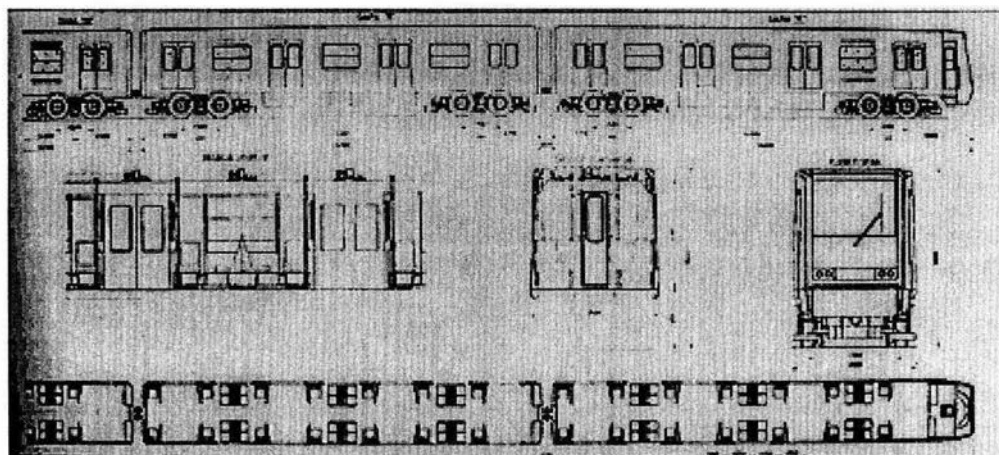
El frenado se efectúa por medio de ocho zapatas de freno sobre las ruedas metálicas de seguridad, accionadas por dos cilindros de freno. La alimentación de aire a estos se realiza por una válvula analógica que recibe señal de freno, en forma de señal eléctrica, desde el control y la transforma en salida de aire comprimido a los cilindros. La señal para el registrador de velocidad es captada en un eje, permanentemente desenfrenado, del coche PR. La batería es de Ni-Cd y va montada en los coches R con una capacidad de 70 A-H. Dadas las dimensiones del tren, no se ha previsto la utilización de unidades acopladas, sin embargo, en los extremos llevan enganches automáticos, que en situación normal permanecen ocultos, pero que hacen posible el acoplamiento mecánico, eléctrico y neumático entre las unidades en caso de avería, posibilitando la actuación de una de ellas como tren de socorro.



Características

Separación de ejes de pistas de rodadura	1,993 m
Altura máxima	3,6 m
Número de puertas por costado	4
Dimensiones del paso libre de puertas:	

Anchura	1,2 m
Altura	1,9 m
Distancia entre centro de ejes de bogie	1,54 m
Diámetro de rueda portadora	0,953 m
Diámetro de rueda guia	0,544 m
Diámetro de rueda de seguridad	0,880 m
Deceleración freno servicio con $\frac{1}{4}$ de carga	1,8 m/s
Deceleración freno urgencia con 6 v/m ²	22 m/s
Retención freno eléctrico desde 75 km/h y $\frac{1}{4}$ de carga	20,9 m/s ²



INTRODUCCION

Cada vez son más los dispositivos y sistemas que en una o varias de sus etapas son accionados por energía eléctrica. Los accionamientos consisten, en general, en procesos que transforman la energía eléctrica en otro tipo, pero con diferentes características. Los encargados de realizar dichos procesos son los Sistemas de Potencia.

Las aplicaciones de la electrónica estuvieron limitadas durante mucho tiempo a las técnicas de alta frecuencia (emisores, receptores, etc.). En la evolución de la electrónica industrial, las posibilidades estaban limitadas por la falta de fiabilidad de los elementos electrónicos entonces disponibles (tubos amplificadores, tiratrones, resistencias, condensadores). Esta fiabilidad era insuficiente para responder a las altas exigencias que se requerían en las nuevas aplicaciones del campo industrial.

Gracias al descubrimiento de los dispositivos semiconductores (transistores, tiristores, etc.) en la década de los 60, que respondían a las exigencias industriales (alta fiabilidad, dimensiones reducidas, insensibilidad a las vibraciones mecánicas, etc.), la electrónica industrial hizo progresos increíbles, permitiendo la realización de procesos cada vez más complejos, destinados a la automatización de procesos industriales.

En general, cualquier conversión de energía eléctrica se puede realizar por procedimientos electromecánicos o por procedimientos electrónicos. Los convertidores electrónicos disponen de las siguientes ventajas frente a los electromecánicos:

1. Mayor flexibilidad y más posibilidades de control.
2. Mayor estabilidad y mayor rapidez de respuesta, gracias a las características eléctricas.
3. Menor mantenimiento al no disponer de partes mecánicas.
4. Mayor vida media y mayor fiabilidad.
5. No producción del arco eléctrico.

Como inconvenientes se pueden destacar.

1. Menor robustez eléctrica, al disponer de menor capacidad para soportar sobretensiones y sobrecorrientes.
2. Mayor costo para algunas de sus aplicaciones.

La mayor flexibilidad y control de los dispositivos electrónicos, hace que se apliquen para resolver procesos cada vez más complejos. Un equipo electrónico de potencia consta fundamentalmente de dos partes, tal con se simboliza en la siguiente figura:

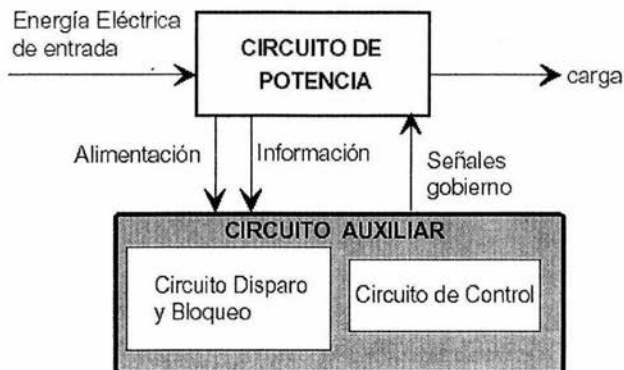


Figura 1.1.- Diagrama de bloques de un Sistema de Potencia.

1. Un circuito de Potencia, compuesto de semiconductores de potencia y elementos pasivos, que liga la fuente primaria de alimentación con la carga.
2. Un circuito de mando, que elabora la información proporcionada por el circuito de potencia y genera unas señales de excitación que determinan la conducción de los semiconductores controlados con una fase y secuencia conveniente.

Antes de pasar al estudio de la electrónica de potencia, interesa resaltar su principal característica, mostrar sus particularidades y situar el campo de aplicación.

En la electrónica de señal se varía la caída de tensión que un componente activo crea en un circuito habitualmente alimentado en continua. Esta variación permite, a partir de una información de entrada, obtener otra salida modificada o amplificada. Lo que interesa es la relación entre las señales de entrada y salida, examinando posteriormente la potencia suministrada por la fuente auxiliar que requiere para su funcionamiento. La función de base es la amplificación y la principal característica es la ganancia.

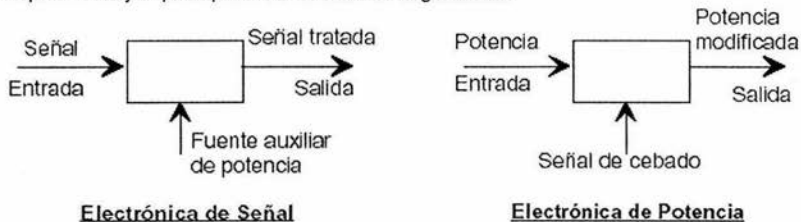


Figura 1.2.- Característica fundamental de un Sistema electrónico de Señal y de Potencia.

En la electrónica de potencia, el concepto principal es el rendimiento. El elemento de base no puede trabajar en régimen de amplificación pues las pérdidas serían elevadas, es necesario trabajar en régimen de conmutación, siendo el componente de base el semiconductor quien trabaja como interruptor. Este componente trabajando en conmutación deberá cumplir las siguientes características:

- Tener dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción).
- Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con pequeña potencia de control.

-Ser capaz de soportar altas tensiones cuando esta bloqueado y grandes intensidades, con pequeñas caídas de tensión entre sus extremos, cuando esta en conducción.

-Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

Así podemos definir la electrónica de potencia de la siguiente manera.

Electrónica de Potencia es la parte de la electrónica encargada del estudio de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica.

Por tanto la electrónica de potencia se ha introducido de lleno en la industria en aplicaciones tales como las fuentes de alimentación, cargadores de baterías, control de temperatura, variadores de velocidad de motores, etc. Es la electrónica industrial quien estudia la adaptación de sistemas electrónicos de potencia a procesos industriales.

Siendo un sistema electrónico de potencia aquel circuito electrónico que se encarga de controlar un proceso industrial, donde interviene un transvase y procesamiento de energía eléctrica entre la entrada y la carga, estando formado por varios convertidores, transductores y sistemas de control; los cuales siguiendo hoy en día evolucionando y creciendo constantemente.

El campo de la Electrónica de Potencia puede dividirse en grandes disciplinas o bloques temáticos

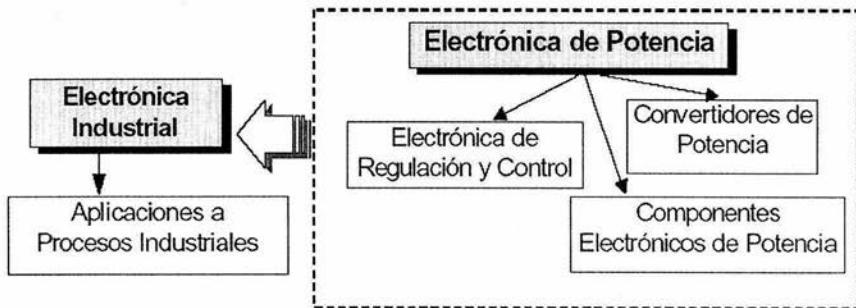


Figura 1.3.- Bloques temáticos que comprende la Electrónica de Potencia

Nosotros trataremos el estudio de los convertidores de potencia y la apropiada selección de las señales de gobierno que deben proporcionar el circuito de mando.

Clasificación de los Sistemas de Potencia.

Los sistemas electrónicos de potencia consisten en uno o más convertidores de potencia, que gobiernan la transferencia de energía. El convertidor es el módulo básico en un sistema de potencia. En general, un convertidor controla y moldea la magnitud eléctrica de entrada V_i , frecuencia f_i y número de fase m_i , en una magnitud eléctrica de salida V_o , frecuencia f_o , y número de fases m_o . La potencia puede fluir de forma reversible, intercambiándose los papeles entre la entrada y la salida.

Es un hecho que la Electricidad de Potencia es una disciplina emergente dentro de la Electrónica. Su utilización se extiende de forma amplia en sectores tales como el residencial, la industria, sector aerospacial o militar. Recientemente el papel de la electrónica de potencia ha venido ganando con un espacial significado en relación a la conservación de la energía y el control del medio ambiente. La realidad es que la demanda de energía eléctrica crece con relación directa a la mejora de la calidad de vida.

La concepción de esta asignatura esta basada en la descripción de los principales sistemas que se encargan de procesar la energía eléctrica. Dado que el desarrollo de esta disciplina es constante, debido fundamentalmente a que está ligada al crecimiento del campo de aplicación y a la mejora de las prestaciones de los semiconductores de potencia, nuestro objetivo es presentar las estructuras de los convertidores estáticos, sus características y sus campos de ampliación. De esta forma se pretende ser capaz de determinar la manera de transformar la "presentación" de la energía eléctrica y por lo tanto, de seleccionar y diseñar la estructura de potencia más conveniente para cada caso. De manera que se realice, mediante el citado sistema de potencia, la conversión energética de la manera más eficaz posible.

De manera general se puede abordar el estudio de los distintos convertidores en función de los cuatro tipos de conversión posibles:

- 1.-Conversión alterna-continua.
- 2.-Conversión alterna-alterna.
- 3.-Conversión continua-alterna.
- 4.-Conversión continua-continua.

Desde el punto de vista real, dado que el funcionamiento del sistema encargado de transformar el tipo de presentación de la energía eléctrica viene condicionado por el tipo de energía disponible en su entrada, hemos adoptado como criterio para la estructuración del programa de la asignatura:

Clasificar los convertidores estáticos de energía en función del tipo de energía eléctrica que los alimenta, tal y como se muestra en la siguiente figura:

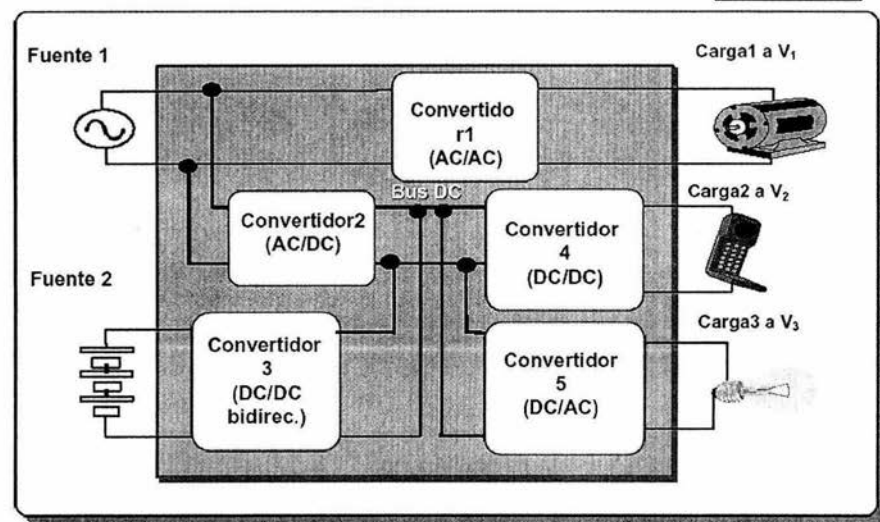
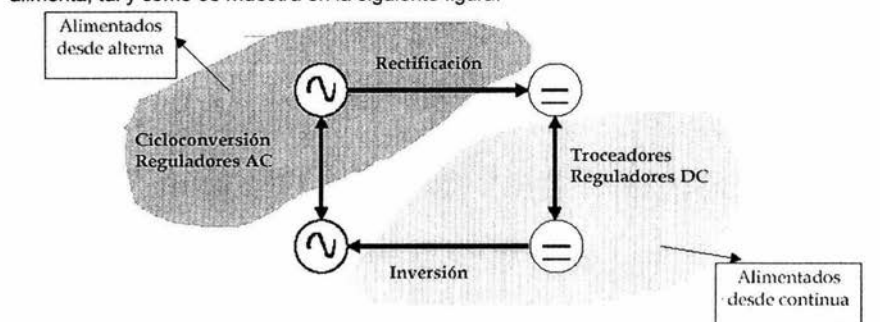


Figura 1.4.- Clasificación y ejemplo de los convertidores estáticos de energía eléctrica.

Existen muchos tipos de clasificaciones, las cuales incluyen como características determinantes:

- 1.-El tipo de semiconductor utilizado.
- 2.-El modo de conmutación.
- 3.-El tipo de aplicación.

Ahora, atendiendo al tipo de conmutación se obtiene la siguiente clasificación de convertidores de potencia:

Conmutación natural: Cuando la fuente de tensión primaria, presente a uno de los lados del convertidor, facilita el paso a corte de los semiconductores. Además dichos semiconductores pasan a conducción en fase con la frecuencia de la tensión de entrada. (Rectificadores, Reguladores de corriente alterna y Cicloconvertidores).

Conmutación forzada: Cuando los conmutadores controlables son llevados a corte y a conducción a frecuencias mayores que la frecuencia de la red. (Troceadores, Inversores y Onduladores autónomos).

De las clasificaciones anteriores se pueden extraer las características básicas de cada uno de los convertidores mencionados:

- a).- Rectificador no controlado: Transforma la corriente alterna de voltaje constante en corriente continua de voltaje constante. Formado por diodos, constituyen montajes irreversibles.
- b).- Rectificador controlado: Transforma la corriente alterna de voltaje constante en corriente continua de voltaje variable. Formado por tiristores. El montaje puede ser reversible, denominándose inversor no autónomo.
- c).- Reguladores de AC: Transforman la corriente alterna de voltaje constante en corriente alterna de voltaje variable y de la misma frecuencia
- d).- Cicloconvertidores: Reguladores de alterna o convertidores directos alterna/alterna de distinta frecuencia.
- e).- Ondulador autónomo o Inversor: Transforman una corriente continua en corriente alterna de frecuencia fija o variable.
- f).- Troceador o "chopper": Transforma corriente continua de voltaje constante en corriente continua de voltaje variable.

1.3.-Campos de Aplicación.

En general los sistemas de potencia se utilizan para accionar cualquier dispositivo que necesite una entrada de energía eléctrica distinta a la que suministra la fuente de alimentación primaria. Veamos a continuación algunas de las aplicaciones industriales de cada uno de los convertidores:

Rectificadores:

- Alimentación de todo tipo de sistemas electrónicos, donde se necesite energía eléctrica en forma de corriente continua.
- Control de motores de continua utilizados en procesos industriales: Máquinas herramienta, carretillas elevadoras y transportadoras, trenes de laminación y papeleras.
- Transporte de energía eléctrica en c.c. y alta tensión.
- Procesos electroquímicos.
- Cargadores de baterías.

Reguladores de alterna:

- Calentamiento por inducción. - Control de iluminación.
- Control de velocidad de motores de inducción.
- Equipos para procesos de electro deposición.

Cambiadores de frecuencia:

- Enlace entre dos sistemas energéticos de corriente alterna no sincronizados.
- Alimentación de aeronaves o grupos electrógenos móviles.

Inversores:

- Accionadores de motores de corriente alterna en todo tipo de aplicaciones industriales.
- Convertidores corriente continua en alterna para fuentes no convencionales, tales como la fotovoltaica o eólica
- Calentamiento por inducción.
- SAI

Troceadores:

- Alimentación y control de motores de continua.
- Alimentación de equipos electrónicos a partir de baterías o fuentes autónomas de corriente continúa.

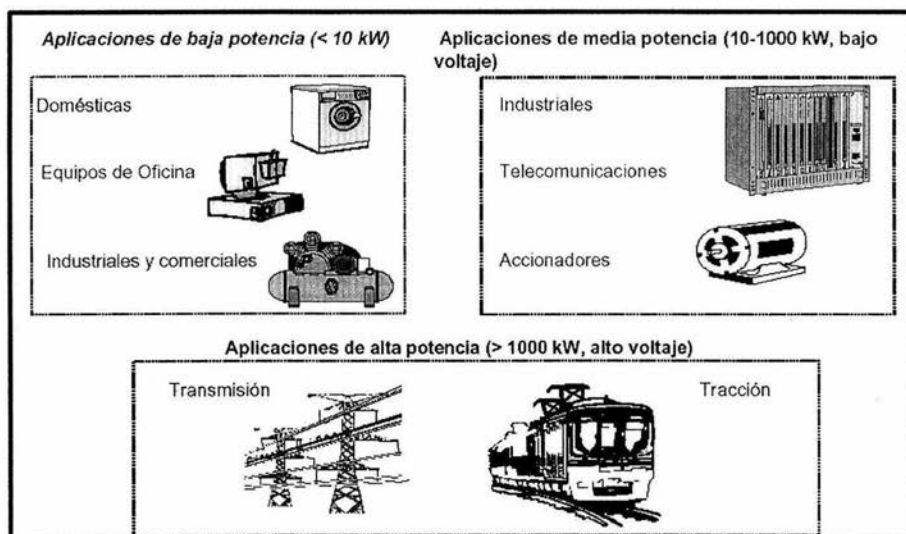


Figura 1.5.- Aplicaciones de los dispositivos de potencia.

Diferentes visiones de la Electrónica de Potencia

Visión Histórica.

Veamos un resumen de los hitos históricos que han marcado la evolución de la electrónica. Ciertamente hay un enorme espectro de ellos pero todos tienen un factor común: todos los equipos, sistemas, etc., procesan señales eléctricas que pueden ser analógicas o digitales, de baja o alta frecuencia etc., pero siempre señales eléctricas. Según comentábamos en páginas anteriores, el concepto de Electrónica distinguía dos ramas: La primera estudiaba el procesamiento de señales eléctricas y los dispositivos asociados y la segunda estaba dedicada al estudio del procesamiento de la potencia eléctrica y los dispositivos asociados (concepto de Electrónica del primer número de la revista "Radiactividad y Electrónica", era la primera vez en la historia en la que la palabra Electrónica daba título a una revista). La electrónica de potencia representa alrededor de un 15% de la totalidad del mercado electrónico y un 35% del consumo de energía eléctrica en EE.UU. es procesada mediante circuitos electrónicos de potencia y un 25% en la RFA. La Electrónica de potencia se desarrolla fundamentalmente a partir del nacimiento del tiristor. A partir de esa fecha los conceptos electrotécnicos se convierten en electrónicos.

Se desarrollan entre los años 1965 y 1980 gran cantidad de convertidores para el procesamiento de la potencia eléctrica basados en este dispositivo. Cabe agrupar los desarrollos en este sentido en convertidores AC/DC (rectificadores controlados), convertidores DC/AC y AC/AC (inversores), y convertidores DC/DC (choppers de potencia).

A partir de los años 1980 se produce un fuerte incremento de la penetración en el mercado de equipos de potencia debido fundamentalmente a la incorporación por parte de estos de otros nuevos elementos de potencia como el transistor, MOSFET, IGBT, que permiten mayores frecuencias de conmutación y consecuentemente la reducción del tamaño de los equipos. El tiristor sigue ocupando a pesar de todo un lugar preferente para las altas potencias (mayores de 500 KW).

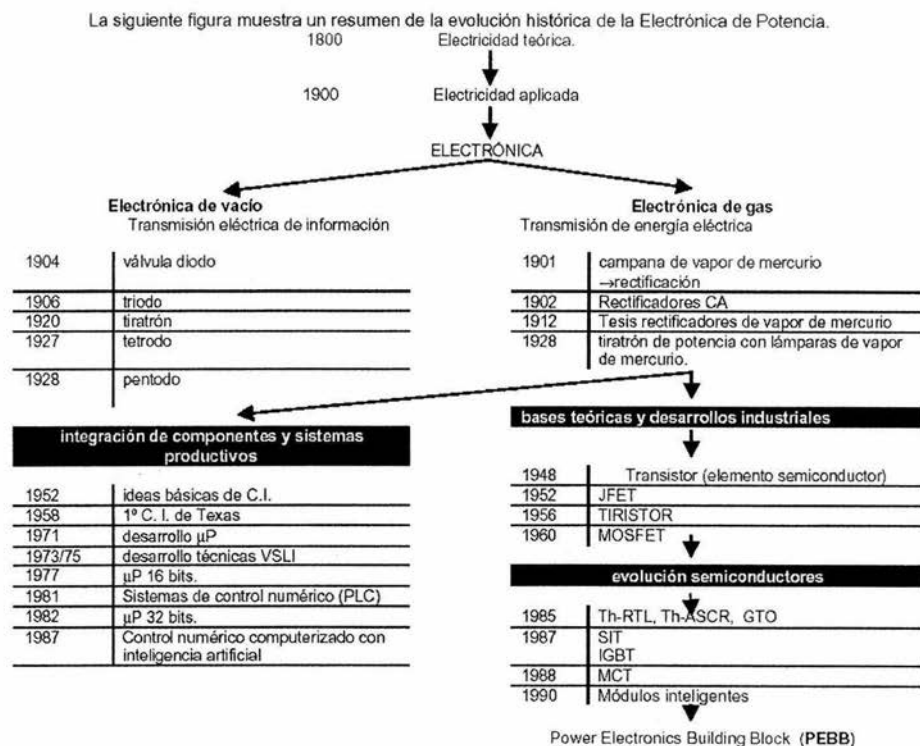


Figura 1.6.- Síntesis histórica de los dispositivos semiconductores para tratamiento de señales y para el procesamiento de la potencia eléctrica

Visión Actual.

La industria de electrónica ha jugado un importante papel en el desarrollo industrial desde la II Guerra Mundial. Los sistemas electrónicos se utilizan en un amplio abanico de aplicaciones. Desde las telecomunicaciones y el procesamiento de información en medicina a los sistemas de transporte, en realidad tienen el potencial de impactar en cualquier área de la industrial mundial y de la actividad social.

En las puertas del siglo veintiuno, las tecnologías asociadas con la manipulación y conservación de las fuentes energéticas son de vital importancia, para asegurar un estándar de vida confortable. La electrónica de potencia se refiere, generalmente, a la utilización eficaz de la energía eléctrica. La industria de electrónica de potencia ofrece una importante oportunidad de integrar las tecnologías para la conservación de la energía con el progreso de nuestro entorno, tanto en los procesos de fabricación como en los de aplicación de los productos electrónicos de potencia.

La variación de la velocidad en los motores eléctricos puede ser lograda sin una pérdida apreciable de eficiencia mediante la utilización de un inversor electrónico de potencia de frecuencia variable. Esta tecnología es emergente actualmente ante la necesidad de proporcionar potencia y control a los motores en los futuros coches eléctricos. Sistemas de control de velocidad variable son la razón del ahorro energético y deben jugar un importante papel en la manipulación en la demanda de energía, de diversos sistemas industriales. La llave que posibilita dicha tecnología es la utilización del transistor bipolar de puerta aislada ó IGBT. Aunque el control de motores es una aplicación importante, el impacto de la electrónica de potencia puede verse en el día a día de la sociedad. Algunas de las principales aplicaciones de la electrónica de potencia son: las fuentes de alimentación, procesos electro-químicos, control de calor y de iluminación, conversión foto-voltaica, aplicaciones médicas, etc.

El crecimiento de la microelectrónica en las últimas tres décadas ha sido un fenómeno a destacar. Hoy en día, el mercado comercial para los circuitos integrados con una muy alta escala de integración (VLSIC's) es mayor de 1000 millones de dólares, y constituye más del 80% del total de la venta de semiconductores. Las emergentes aplicaciones en comunicación y en procesamiento de potencia van a revolucionar los medios de transporte, las comunicaciones, el procesamiento de la información, el acondicionamiento de potencia y las industrias de computación. Para restringir la disipación de potencia, estos chips deberán trabajar con tensiones de alimentación muy reducidas, en el rango de 1V. La electrónica de potencia, debe jugar un importante papel en la consecución de la próxima generación de convertidores de muy baja potencia y muy alto rendimiento que acompañaran a las tecnologías emergentes de computación, comunicaciones y procesamiento de la potencia.

Ante la expectativa creada en la actualidad, dada la necesidad de avance tecnológico, la electrónica de potencia junto con los rápidos sistemas de control proporcionan una oportunidad de crear un sistema flexible que pueda responder al amplio espectro de aplicaciones en los sistemas de potencia. Los sistemas electrónicos de potencia pueden utilizarse para regular tensión, adecuar las exigencias de potencia para controlar cargas, alimentar motores, así como para muchas más aplicaciones actuales y futuras. Para conseguir este objetivo, se necesitan desarrollos futuros en componentes de conmutación, circuitos y sistemas de control. En la siguiente figura se muestran las principales tecnologías emergentes y sus aplicaciones.

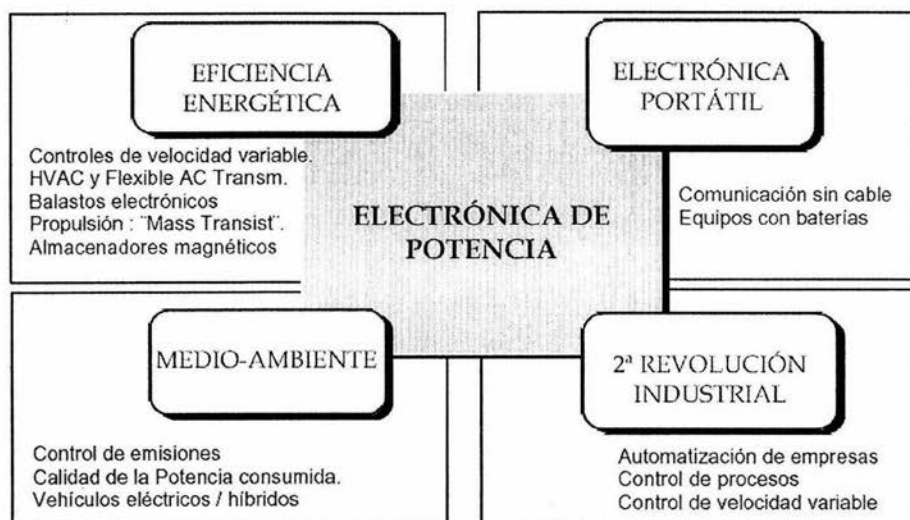


Figura 1.7.- Tecnologías y aplicaciones emergentes, donde interviene la electrónica de potencia.

A continuación expondremos algunos de los criterios más relevantes de varios autores especializados en la disciplina de la Electrónica de Potencia. Ello permitirá contrastar diferentes criterios que sobre esta materia se tiene en la actualidad con objeto de identificar más el concepto de Electrónica de Potencia.

Muhammad H. Rashid en su libro "Power Electronics Circuits, Devices and Applications" (Prentice Hall 1993) considera que la Electrónica de Potencia combina potencia, electrónica y control. El Control se ocupa de las características estáticas y dinámicas de los sistemas en lazo cerrado. La Potencia se encarga de los sistemas de potencia móviles y estáticos para la generación, transmisión y distribución de la potencia eléctrica. Por último la Electrónica trata con los componentes de estado sólido y circuitos para el tratamiento de señales con el objetivo de obtener el control necesario. Por tanto **Electrónica de Potencia se puede definir como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y conversión de la potencia eléctrica.**

Ned Mohan, Tore M. Undeland y William P. Robbins en su libro "Power Electronics. Converters, Applications and Design" (John Wiley & Sons, 1995) definen la tarea de la Electrónica de Potencia al procesamiento y control de la energía eléctrica suministrando voltajes y corrientes en la manera más óptima para ser utilizada por diferentes cargas. Con esta visión, se consigue dar cuenta de los diferentes procesos a los que puede verse sometida la energía eléctrica en función de las exigencias de las diferentes cargas que necesiten de dicha energía para realizar un trabajo.

Joseph Vithayathil en su libro "Power Electronics. Principles and Applications", (McGraw-Hill 1995) define a la Electrónica de Potencia como la tecnología que liga la potencia eléctrica con la electrónica.

Bimal K. Bose en la introducción del texto "Power Electronics and Variable Frequency Drives"(IEEE Press 1996) menciona como la **Electrónica de Potencia combina la conversión y el control de la potencia eléctrica para diversas aplicaciones**, tales como fuentes de alimentación reguladas AC y DC, control de iluminación y calefacción, soldadura eléctrica, procesos electroquímicos, calentamiento por inducción, control de máquinas DC y AC, etc.

La evolución en Electrónica de Potencia a través de los años, ha desembocado en el concepto actual de la disciplina Electrónica de Potencia como la síntesis de múltiples disciplinas tecnológicas, tal como aparece en la siguiente figura.

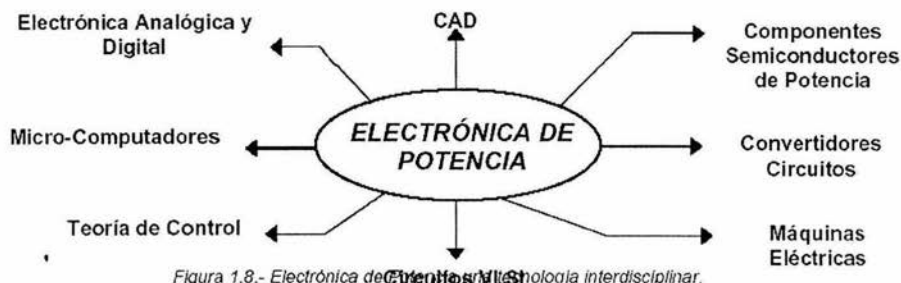


Figura 1.8.- Electrónica de Potencia y Tecnología Interdisciplinar.

Visión Interdisciplinar

Veamos a continuación cual es la relación de la Electrónica de Potencia con las principales áreas que forman la Electrónica. Para ello realizaremos esta visión interdisciplinar empezando por definir los distintos niveles estructurales que comprende la Electrónica.

El estudio de la Electrónica pretende alcanzar, como objetivo final, los conocimientos necesarios para poder realizar e interpretar sistemas electrónicos. Estos últimos deberán realizar unas funciones específicas en un proceso determinado. Para alcanzar dicho objetivo, es decir, realizar e interpretar un sistema, la Electrónica se subdivide en niveles estructurales o bloques fundamentales que se sustentan cada uno de ellos sobre el anterior, dichos niveles se muestran en la siguiente figura.

Componentes de base en la Electrónica de Potencia.

Los componentes semiconductores de potencia que vamos a caracterizar se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su grado de **controlabilidad**:

§ **Diodos** : Estado de ON y OFF controlables por el circuito de potencia.

§ **Tiristores**: Fijados a ON por una señal de control pero deben conmutar a OFF mediante el circuito de potencia.

§ **Conmutadores Controlables**: Conmutados a ON y a OFF mediante señales de control.(BJT, MOSFET, GTO, IGBT's)

Veamos las principales características de cada uno de estos conmutadores de estado sólido.

DIODO:

Es el elemento semiconductor formado por una sola unión PN. La figura siguiente muestra el símbolo y la característica estática i-v de dicho componente.

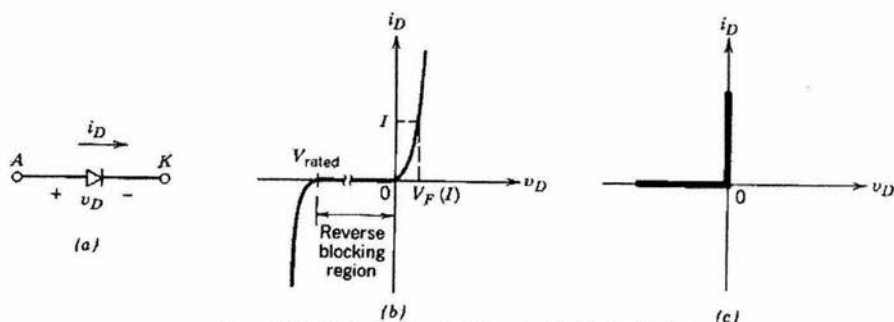


Figura 1.10.- Símbolo y característica principal de los diodos.

Son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular corriente en sentido contrario al de conducción. El único procedimiento de control consiste en invertir la tensión ánodo cátodo, no disponiendo de ningún terminal de control. En régimen transitorio cabe destacar dos fenómenos:

Recuperación Inversa: El paso de conducción a bloqueo no se efectúa instantáneamente. Pues cuando el diodo conduce una corriente directa I , la zona central de la unión está saturada de portadores mayoritarios, y aunque un circuito externo fuerce la anulación de la corriente aplicándole una tensión inversa, cuando la corriente pasa por cero aún existe una cantidad de portadores que cambian su sentido de movimiento y permiten la conducción de una corriente inversa durante un tiempo de recuperación inverso (t_{rr}), tal como se muestra en la figura 1.11.

Los parámetros definidos en el proceso de corte dependen de la corriente directa, del di/dt y de la tensión inversa aplicada. El tiempo de recuperación de un diodo normal es del orden de $10\mu s$, siendo el de los rápidos de 0.5 a $2\mu s$.

Recuperación Directa: Es otro fenómeno de retardo de menor importancia que el anterior, cuando el diodo pasa de bloqueo a conducción, y cuyo efecto se muestra en la siguiente figura.

En el proceso de paso a conducción la respuesta del diodo es inicialmente de bloqueo a la corriente. Siendo esta respuesta quien provoca una sobretensión V_{FP} , ocasionada por la modulación de la conductividad del diodo durante la inyección de portadores minoritarios. Así el diodo se asemeja a una resistencia donde su valor decrece con el tiempo. Esta resistencia equivalente está ligada a la concentración de portadores minoritarios inyectados. Por tanto V_{FP} depende de la anchura y resistividad de la zona central del diodo.

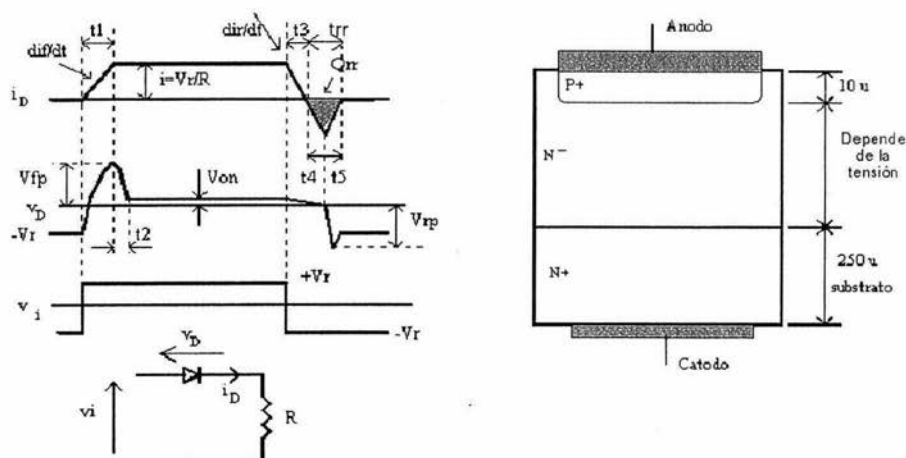


Figura 1.11.- Característica de conmutación de un diodo con carga resistiva

Dependiendo de las aplicaciones, existen varios tipos de diodos:

1. *Diodos Schottky*. Se utilizan cuando se necesita una caída de tensión directa muy pequeña (0.3 V típicos) para circuitos con tensiones de salida pequeñas. Tienen limitada su capacidad de bloquear tensión a 50 - 100 V.
2. *Diodos de Recuperación rápida*. Son adecuados en circuitos de frecuencia elevada en combinación de conmutadores controlables, donde se necesitan tiempos de recuperación pequeños. Para unos niveles de potencia de varios cientos de voltios y varios cientos de amperios, estos diodos poseen un trr de pocos microsegundos.
3. *Diodos de frecuencia de Línea*. La tensión en el estado de ON de estos diodos es la más pequeña posible, y como consecuencia tienen un trr grande, el cual es únicamente aceptable en aplicaciones de la frecuencia de línea. Estos diodos son capaces de bloquear varios kilovoltios y conducir varios kiloamperios. Pudiéndose conectar en serie y/o paralelo para satisfacer cualquier rango de tensión o de corriente.

TIRISTORES.

Dentro de la denominación general de tiristores se consideran todos aquellos componentes semiconductores con dos estados estables cuyo funcionamiento se basa en la realimentación regenerativa de una estructura PNP. Existen varios tipos, de los cuales el más empleado es el *rectificador controlado de silicio (SRC)*, aplicándole el nombre genérico de tiristor.

Dispone de dos terminales principales, *ánodo* y *cátodo*, y uno auxiliar de disparo o *puerta*. En la figura siguiente se muestra el símbolo y la característica I-V estática de dicho componente. La corriente principal circula del ánodo al cátodo. En su estado de OFF, puede bloquear una tensión directa y no conducir corriente. Así, si no hay señal aplicada a la puerta, permanecerá en bloqueo independientemente del signo de la tensión Vak. El tiristor debe ser disparado a ON aplicando un pulso de corriente positiva en el terminal de puerta, durante una pequeño instante, posibilitando que pase al estado de bloqueo directo. La caída de tensión directa en el estado de ON es de pocos voltios (1-3V).

Una vez empieza a conducir, es fijado al estado de ON, aunque la corriente de puerta desaparezca, no pudiendo ser cortado por pulso de puerta. Solo cuando la corriente del ánodo tiende a ser negativa, o inferior a un valor umbral, por la influencia del circuito de potencia, se cortará el tiristor.

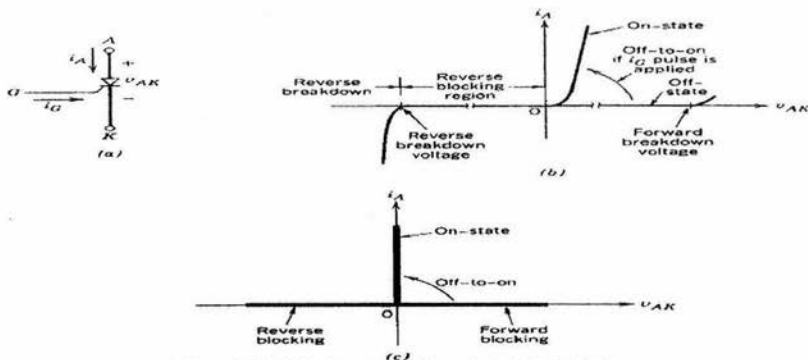
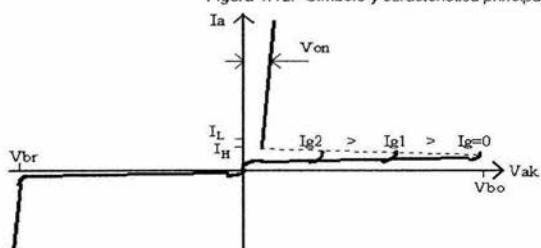


Figura 1.12.- Símbolo y característica principal de los tiristores.



Si un tiristor está polarizado en directa, la inyección de una corriente de puerta al aplicar un voltaje positivo entre G y K activará al tiristor. Conforme aumenta la I_{gate} , se reduce el voltaje de bloqueo directo, tal como se muestra en esta figura.

Figura 1.13.- Característica I-V de un tiristor en función de la corriente de puerta.

En régimen estático, dependiendo de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo podemos distinguir tres regiones de funcionamiento:

1. $V_{ak} < 0$ @ zona de bloqueo inverso. Dicha condición corresponde al estado de no conducción en inversa, comportándose como un diodo.
2. $V_{ak} > 0$ sin disparo @ zona de bloqueo directo. el tiristor se comporta como un circuito abierto hasta alcanzar la tensión de ruptura directa.
3. $V_{ak} > 0$ con disparo @ zona de conducción Se comportará como un cortocircuito, si una vez ha ocurrido el disparo, por el SCR circula una corriente superior a la corriente de enclavamiento. Una vez en conducción, se mantendrá si el valor de la corriente ánodo cátodo es superior a la corriente de mantenimiento.

En régimen transitorio cabe destacar dos fenómenos:

Transitorio a conducción: La evolución temporal de las señales se muestra en la figura siguiente, donde se observa que desde el momento en que se aplica el impulso de puerta hasta que la intensidad del ánodo empieza a subir, transcurre un tiempo denominado de retardo a la excitación ($t_d(on)$). Después la intensidad sube hasta su valor final en un tiempo t_r . La suma de los tiempos t_r y t_s se denomina tiempo de disparo t_d .

Durante el $t_d(on)$, el tiristor permanece en el estado de bloqueo. Sin embargo la corriente de puerta está inyectando portadores mayoritarios en la unión p cercana al terminal de puerta hasta que aumenta la concentración, momento en que empieza a fluir la corriente de ánodo. Llegando a la corriente I_o después del intervalo t_r .

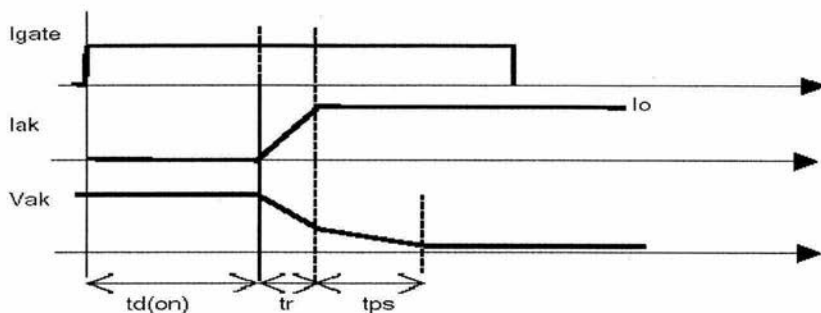


Figura 1.14.- Curvas características del proceso de puesta a conducción.

Transitorio a corte: Si el circuito externo fuerza una reducción muy brusca de la intensidad del ánodo e intenta la conducción en sentido inverso, los portadores de las uniones no pueden reajustarse, por tanto hay un tiempo de retraso por almacenamiento donde se comporta como un cortocircuito conduciendo en sentido contrario al estar polarizado positivamente, produciendo un pico de corriente IRRM, tal como se muestra en la siguiente figura. Las restantes cargas se recombinan por difusión. Cuando ha disminuido la concentración, la puerta recupera su capacidad de gobierno, pudiendo aplicar tensión directa sin riesgo de cebado. A este tiempo se le denomina tiempo de recuperación de puerta tgr. La duración del proceso de corte es $t_{off} \equiv t_g = t_{tr} + t_{gr}$. t_g suele ser del orden de 5us para los tiristores rápidos y 50us para los de red.

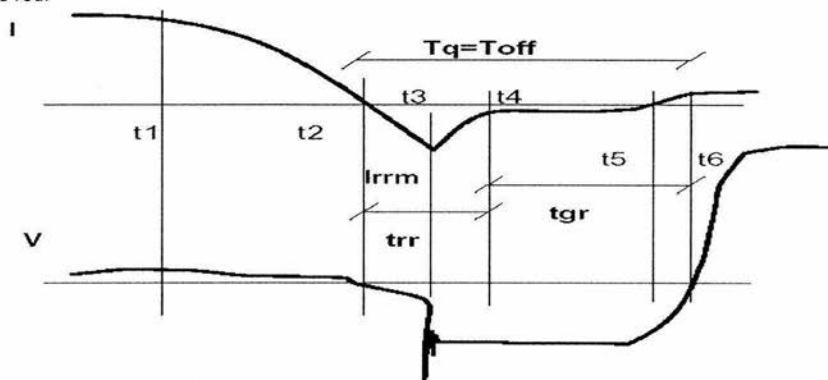


Figura 1.15.- Curvas características del proceso de corte del tiristor.

De esta forma t_q es el menor tiempo que debe transcurrir entre que se invierte la intensidad por el ánodo y el instante en que aplicamos tensión ánodo-cátodo positiva sin que entre en conducción. El tiempo t_q depende de varios factores:

- Aumenta con la Temperatura.
- Disminuye con la tensión inversa aplicada.
- Aumenta con la intensidad directa del estado de conducción.

Dependiendo de la aplicación, existen diversos tipos. Además de parámetros de tensión y capacidad de corriente, el tiempo de turn-off (t_q), la caída directa de tensión, el di/dt en el turn-off y el dv/dt en el turn-off son características determinantes ante la elección de uno u otro tipo.

Conmutadores Controlables

En esta categoría se incluyen diversos dispositivos semiconductores de potencia, incluyendo BJTs, MOSFETs, GTOs e IGBTs, los cuales pueden ser conmutados a conducción y a corte mediante señales de control.

Un conmutador ideal controlado tiene las siguientes características:

- § Bloquea cualquier tensión directa o inversa sin que circule a través suyo ninguna corriente.
- § Conduce cualquier corriente con cero voltios de caída entre sus terminales.
- § Conmuta de conducción a corte o viceversa instantáneamente cuando es disparado.
- § No consume potencia para su control.

Sin embargo los componentes reales no disponen de todas esas características: bloquean voltajes finitos, disipan potencia, conmutan en tiempos finitos y no son capaces de bloquear voltajes inversos (dependiendo del dispositivo). Estas limitaciones llevan al conmutador real a su destrucción si no se utiliza correctamente. Para considerar la disipación de potencia en un semiconductor, consideremos el circuito de la figura siguiente:

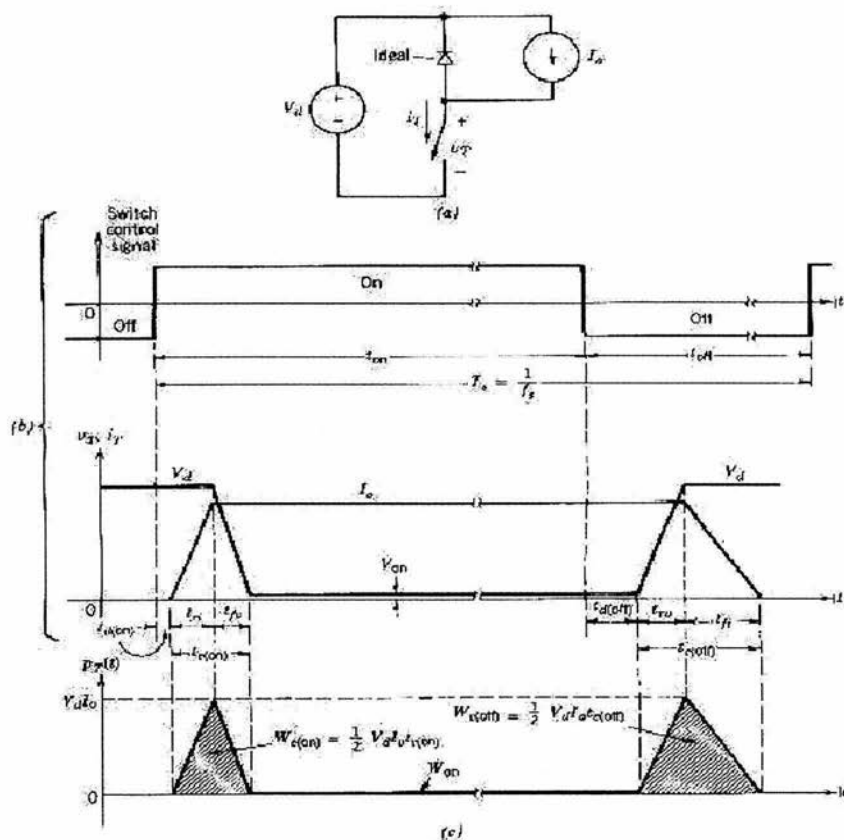


Figura 1.16.- Curvas características del proceso de conmutación en un conmutador real.

Las características deseables en un conmutador controlable se pueden resumir en los siguientes apartados:

1. Pequeña corriente de fugas en el estado de OFF.
2. Pequeña tensión en el estado de ON para minimizar las pérdidas por conducción.
3. Cortos tiempos de turn-on y turn-off. Esto posibilitará su utilización a frecuencias elevadas.
4. Gran capacidad de bloquear tensión directa e inversa.
5. Gran capacidad de conducir corrientes elevadas. Así no se necesitarán paralelizar componentes.
6. Coeficiente de temperatura positivo en la resistencia del estado de conducción. Esto asegura que al paralizar componentes, estos compartan la corriente.
7. Pequeña potencia para el control.

8. Capacidad para resistir tensión y corriente simultáneamente durante las transiciones de los estados. Así se eliminará la utilización de redes de ayuda a la conmutación (snubber).
9. Grandes di/dt y dv/dt . Esto minimizará la necesidad de utilizar redes externas de protección.
- Veamos a continuación de forma muy breve la característica V-I en estado estacionario para los conmutadores controlables más usuales:

Bipolar Junction Transistor (BJT):

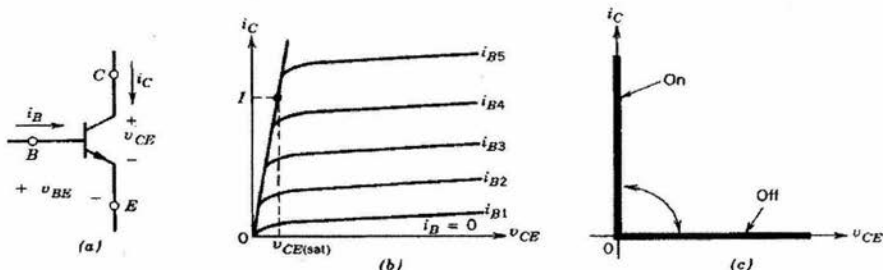


Figura 1.17.- Símbolo y característica V-I de los transistores bipolares

La figura anterior muestra el símbolo y característica estática de un transistor bipolar NPN. Tal como se muestra en su característica V-I, una corriente de base suficientemente grande $I_B > I_C / h_{fe}$ (dep. de la I_C colector) llevará al componente a la plena conducción. En el estado de conducción la tensión $V_{ce(sat)}$ está normalmente entre 1-2V.

En un transistor bipolar existen tres regiones de operación: de corte, activa y de saturación. En la región de corte el transistor está desactivado o la corriente de base no es suficiente para activarlo teniendo ambas uniones polarización inversa. En la región activa, el transistor actúa como un amplificador, donde la corriente del colector queda amplificada mediante la ganancia y el voltaje V_{ce} disminuye con la corriente de base: la unión CB tiene polarización inversa y la BE directa. En la región de saturación el transistor actúa como interruptor teniendo una corriente de base lo suficientemente grande para disminuir la V_{ce} : ambas uniones están polarizadas directamente. La característica de transferencia se muestra en la siguiente figura:

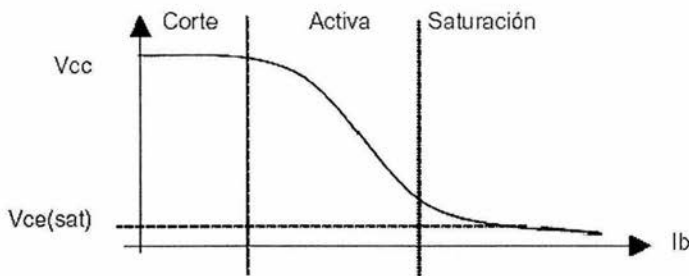


Figura 1.18.- Características de transferencia en un transistor bipolar.

Manejan menores voltajes y corrientes que el SCR, pero son más rápidos. Fáciles de controlar por el terminal de base, aunque el circuito de control consume más energía que el de los SCR. Su principal ventaja es la baja caída de tensión en saturación. Como inconvenientes destacaremos su poca ganancia con v_i grandes, el tiempo de almacenamiento y el fenómeno de avalanche secundaria.

Gate-Turn-Off Thyristors (GTOs):

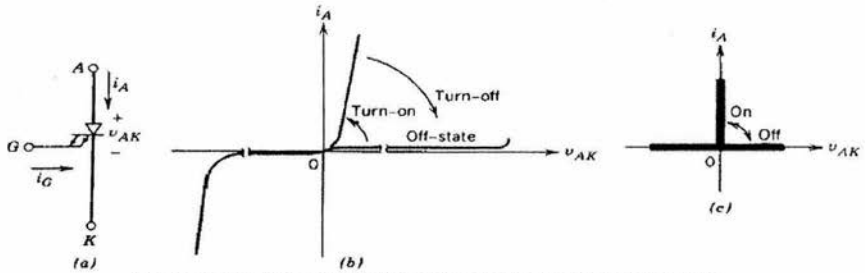


Figura 1.19.- Símbolo y característica V-I de los tiristores controlados a corte.

Funcionamiento muy similar al SCR pero incorporando la capacidad de bloquearse de forma controlada mediante una señal de corriente negativa por puerta. Mayor rapidez frente a los SCR, soportando tensiones y corrientes cercanas a las soportadas por los SCR. Su principal inconveniente es su baja ganancia de corriente durante el apagado, lo cual obliga a manejar corrientes elevadas en la puerta, complicando el circuito de disparo.

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors (MOSFET):

El control del MOSFET se realiza por tensión, teniendo que soportar solamente un pico de corriente para cargar y descargar la capacidad de puerta. Como ventajas destacan su alta impedancia de entrada, velocidad de conmutación, ausencia de ruptura secundaria, buena estabilidad térmica y facilidad de paralizarlos. En la siguiente figura se muestra el símbolo, característica estática V-I y característica ideal de un MOSFET de canal N.

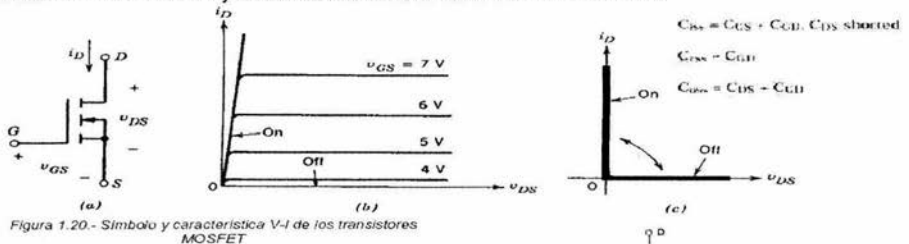


Figura 1.20.- Símbolo y característica V-I de los transistores MOSFET

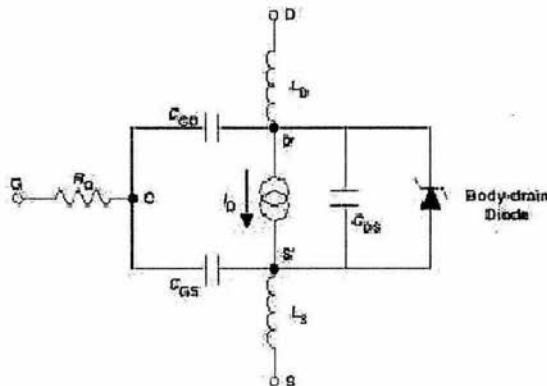


Figura 1.21.- Circuito equivalente de un MOSFET

Veamos a continuación el circuito equivalente, donde se indican los componentes que tienen un mayor papel en el proceso de conmutación.

La capacidad Gate-to-drain, CGD, se comporta como una función no lineal con la tensión, siendo uno de los parámetros más importantes al representar un lazo de realimentación entre la salida y la entrada del circuito. CGD se suele llamar Capacidad de Miller debido a que causa que la capacidad de entrada dinámica sea mayor que la suma de las capacidades estáticas. Turnon delay, $t_d(\text{on})$, es el tiempo que se tarda en cargar a la capacidad de entrada del componente antes de que la corriente por del drenador comience. Similarmente, turn-off delay, $t_d(\text{off})$, es el tiempo que necesita para descargar dicha capacidad.

Comparación entre Bipolares y MOSFETs:

BJT	MOSFET
<ul style="list-style-type: none"> ▪ CORRIENTE BIPOLAR. Portadores minoritarios determinan la resistencia de conducción. Efectos de almacenamiento. Coeficiente de temperatura negativo 2ª ruptura Pequeña resistencia de conducción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CORRIENTE UNIPOLAR No hay efectos de almacenamiento. Coeficiente de temperatura positivo No hay 2ª ruptura. $R_{DS(\text{ON})}$ grande especialmente en MOS de alta tensión.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ CONMUTADOR GUIADO POR CORRIENTE. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CONMUTADOR GUIADO POR TENSION.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ APROVECHAMIENTO OPTIMO DEL Si. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MAL APROVECHAMIENTO DEL Si.

Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs):

En la siguiente figura se muestra el símbolo y la característica V-I de funcionamiento de un IGBT:

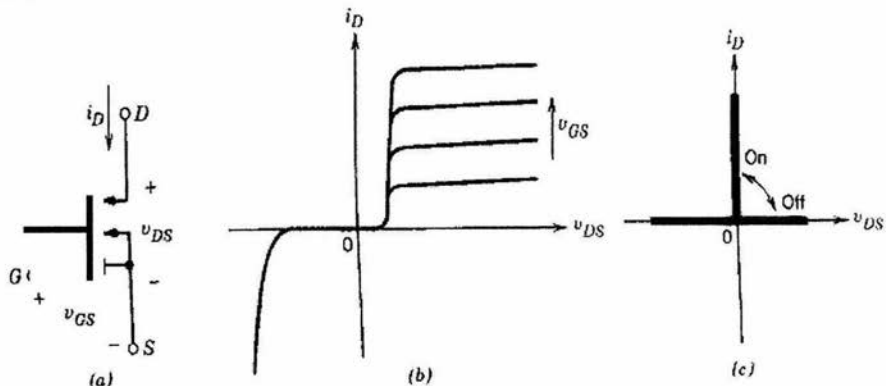


Figura 1.22.- Símbolo y característica V-I de los transistores IGBT

El IGBT combina las ventajas de los MOSFETs y de los BJTs, aprovechando la facilidad del disparo del MOSFET al controlarlo por tensión y el tipo de conducción del bipolar, con capacidad de conducir elevadas corrientes con poca caída de tensión. El IGBT tiene una alta

impedancia de entrada, como el Mosfet, y bajas pérdidas de conducción en estado activo como el Bipolar. Pero no presenta ningún problema de ruptura secundaria como los BJT.

El IGBT es inherentemente más rápido que el BJT. Sin embargo, la velocidad de conmutación del IGBT es inferior a la de los MOSFETs. Veamos a continuación una gráfica, donde se compara la caída directa de tensión respecto a la corriente entre un Mosfet y un IGBT de similares características:

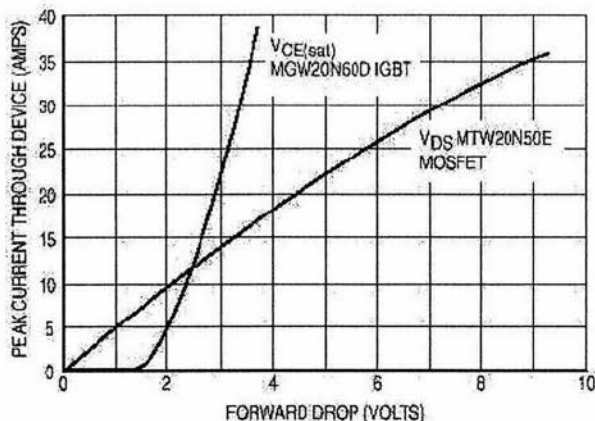


Figura 1.23.- Comparación de la caída de tensión directa en un MOSFET y un IGBT.

Characteristic	TMOS	IGBT	Bipolar
Current Rating	20 A	20 A	20 A
Voltage Rating	500 V	500 V	500 V*
$R_{(on)}$ @ $T_J = 25^\circ\text{C}$	0.2 Ω	0.24 Ω	0.18 Ω
$R_{(on)}$ @ $T_J = 150^\circ\text{C}$	0.6 Ω	0.23 Ω	0.24 Ω **
Fall Time (Typical)	40 ns	200 ns	200 ns

* Indicates V_{CE0} Rating

** BJT $T_J = 100^\circ\text{C}$

Ventajas del IGBT comparado con el MOSFET y con el Transistor Bipolar respecto de la Resistencia de ON (Over Junction Temperature) y del Fall Times (Resistance Values at 10 Amps of Current) Destacamos que los componentes de la tabla anterior son de niveles de V/I comparables, sin embargo el transistor Bipolar necesita 1.2 veces más área de Silicio que el IGBT, y el MOSFET necesita 2.2 veces más área de Si que el IGBT para conseguir los mismos niveles de V/I, lo cual incide en el coste del semiconductor. Para corrientes elevadas y temperaturas altas, el IGBT ofrece una baja caída de tensión directa con unos tiempos de conmutación similares al Bipolar sin complicaciones en el circuito de disparo.

Mos-Controlled Thyristors (MCT):

Su símbolo y característica estática se muestra a continuación.

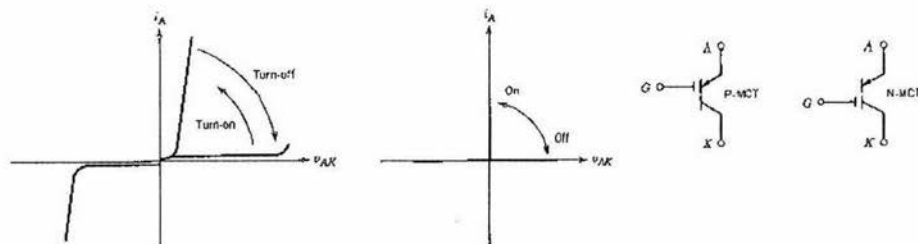
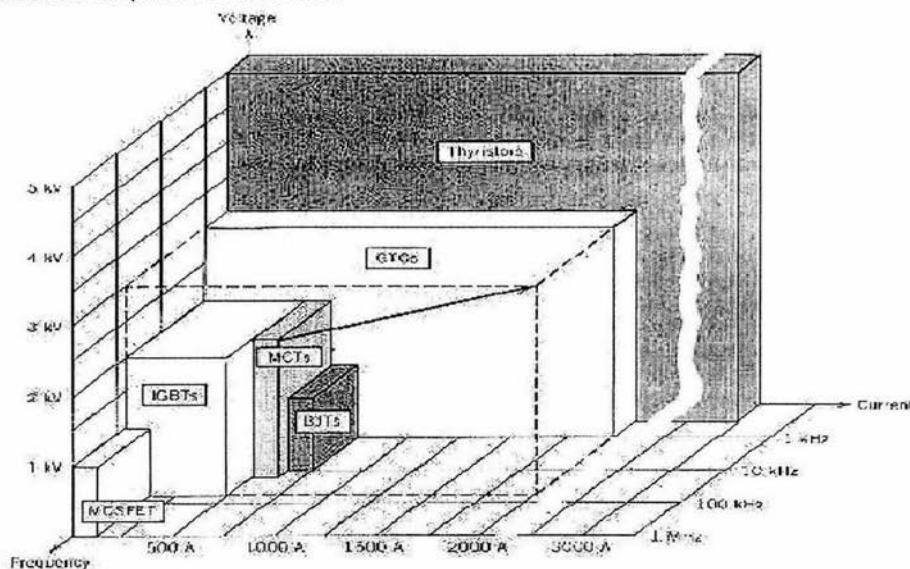


Figura 1.24.- Símbolo y característica V-I de los transistores MCT.

De la característica se observa que el MCT tiene muchas de las propiedades del GTO, incluyendo su baja caída de tensión en su estado de ON para corrientes relativamente grandes, junto a su característica de latch (el MCT permanece en ON incluso si la señal de puerta desaparece). El MCT es un dispositivo controlado por tensión, y dispone de dos ventajas principales respecto al GTO:

Circuito de disparo más simple al no necesitar corrientes negativas grandes para el turn-off y mayor velocidad en las conmutaciones. Además dispone de una caída de tensión en ON menor que el IGBT.

Finalmente veamos un gráfico que compara las capacidades de tensión, corriente y frecuencia de dichos componentes controlables.



Capítulo 1 – Conceptos generales.

1.1 Aplicaciones de accionamientos en función de la velocidad y el par.

Las aplicaciones de accionamientos se pueden dividir en tres categorías principales en función de la velocidad y el par. La aplicación de accionamientos de CA más habitual es en un cuadrante, en la que la velocidad y el par siempre tienen la misma dirección: el flujo de la potencia (velocidad multiplicada por el par) va del inversor al proceso. En estas aplicaciones, que suelen ser de bombas y ventiladores, el par de la carga tiene un comportamiento cuadrático, por lo que se las suele llamar aplicaciones a par variable. Algunas aplicaciones en un cuadrante como las extrusoras o las cintas transportadoras son aplicaciones a par constante (el par de la carga no tiene por qué cambiar al cambiar la velocidad). La segunda categoría son las aplicaciones en dos cuadrantes, en las que, sin que cambie la dirección de rotación, puede cambiar la dirección del par (el flujo de potencia puede ir del accionamiento al motor o viceversa). Un accionamiento en un cuadrante puede serlo en dos, por ejemplo, al decelerar un ventilador más rápido que de forma natural con las pérdidas mecánicas. En muchas industrias, un paro de emergencia puede precisar de un funcionamiento en dos cuadrantes aunque el proceso sea en un cuadrante.

La tercera categoría son las aplicaciones en cuatro cuadrantes en las que puede cambiar libremente la dirección de la velocidad y el par. Las más típicas son ascensores, cabrestantes y grúas, si bien muchos procesos de corte, plegado, tejeduría y bancos de pruebas de motores pueden necesitar que la velocidad y el par cambien repetidamente.

También cabe mencionar procesos en un cuadrante en los que el flujo de potencia va principalmente de la maquinaria al inversor, como una bobinadora o una cinta transportadora descendente.

Por lo general, desde un punto de vista de ahorro de energía, un motor de CA con un inversor es mejor que los métodos de control mecánico como el estrangulamiento. Sin embargo, se presta menos atención al hecho de que muchos procesos pueden contar con un flujo de la potencia del proceso al accionamiento, aunque no se ha estudiado cómo utilizar esta energía de frenado de la forma más económica.

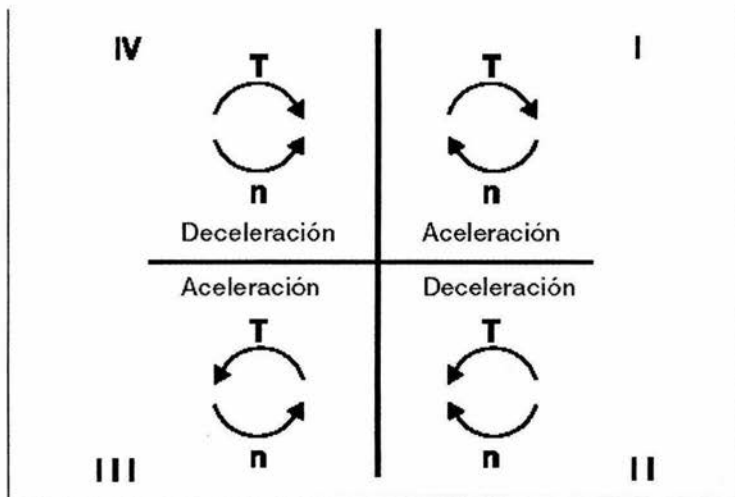


Figura 1.1 Mapa de las aplicaciones de accionamientos en función de la velocidad y el par.

1.2 Evaluación de la potencia de frenado eléctrico.

La evaluación de la necesidad de frenado empieza por la mecánica. Normalmente se tiene que frenar el sistema mecánico en un tiempo concreto, o existen subciclos del proceso en los que el motor funciona en el generador a velocidad constante o ligeramente variable.

Es importante destacar que los dispositivos empleados en el frenado eléctrico se dimensionan en función de la potencia de frenado. La potencia mecánica de frenado depende del par y la velocidad de frenado, fórmula (2.1). Cuando mayor sea la velocidad, mayor será la potencia. Esta potencia se transmite a una tensión e intensidad determinadas. Cuanto mayor sea la tensión, menos intensidad se necesita para una misma potencia, fórmula (2.2). La intensidad es el componente principal que define el coste en accionamientos de CA de baja tensión.

En la fórmula (2.2) podemos observar la expresión $\cos\phi$.

Esta expresión define la intensidad del motor empleada para magnetizar el motor. La intensidad de magnetización no crea ningún par y, por tanto, se ignora.

Por otra parte, esta intensidad de magnetización del motor no se toma de la fuente de alimentación de CA que alimenta al convertidor (la intensidad al inversor es menor que la intensidad al motor). Ello significa que, en la sección de alimentación, $\cos\phi$ suele ser aproximadamente 1,0. Cabe destacar en la fórmula (2.2) que se ha supuesto que no se produce ninguna pérdida cuando la potencia de CC se convierte en potencia de CA. En esta conversión se producen algunas pérdidas que se pueden ignorar en este contexto.

$$P_{\text{mecánica}} = T \cdot \omega = T \cdot \frac{n}{60} \cdot 2\pi \quad (2.1)$$

$$P_{\text{eléctrica}} = U_{\text{CC}} \cdot I_{\text{CC}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{CA}} \cdot I_{\text{CA}} \cdot \cos\phi \quad (2.2)$$

1.3 Conceptos básicos de descripción de cargas.

Las cargas se suelen clasificar en cargas a par constante o a par cuadrático. Una carga a par cuadrático significa que el par de la carga es proporcional al cuadrado de la velocidad.

También significa que la potencia es la velocidad elevada al cubo. En las aplicaciones a par constante, la potencia es directamente proporcional a la velocidad.

1.4 Cómo evaluar el par y la potencia de frenado.

En caso de funcionamiento en régimen permanente (α aceleración angular) = cero) el par del motor tiene que hacer que el par de rozamiento corresponda proporcionalmente a la velocidad angular y al par de la carga a esa velocidad angular.

El par y la potencia de frenado necesarios en función del tiempo varía mucho en estos dos tipos distintos de carga.

Estudiemos primero el caso en que la carga es a *par constante* y el sistema de accionamiento no puede generar el par de frenado (accionamiento con funcionamiento en un cuadrante).

Para calcular el tiempo de frenado necesario se puede aplicar la siguiente ecuación. Hay que fijarse en que la fórmula (2.7) destaca que el par necesario para la aceleración (o deceleración) inercial, el par de rozamiento y carga está en dirección opuesta al par del motor.

En la práctica es difícil definir exactamente el efecto del rozamiento. Al asumir que el rozamiento es igual a cero, el margen de error en el tiempo calculado es inexistente.

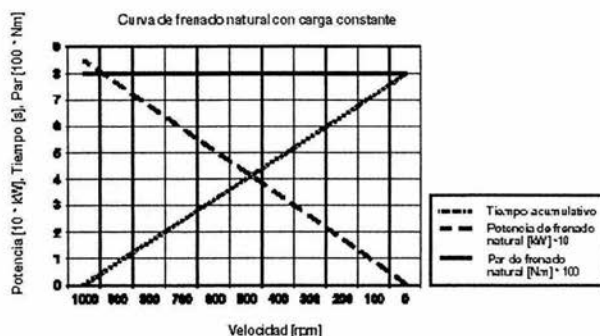


Figura 2.1 Tiempo de frenado acumulativo, potencia y par de frenado en función de la velocidad.

$$T_{\text{Carga}} \text{ (s)} = J * \alpha = J * \frac{(\omega_{\text{Inicio}} - \omega_{\text{Final}})}{t} = J * \frac{(\pi_{\text{Inicio}} - \pi_{\text{Final}}) * 2 \pi}{t * 60} \quad (2.9) \quad \text{nado}$$

Para despejar t se deriva la fórmula:

$$t = J * \frac{(\pi_{\text{Inicio}} - \pi_{\text{Final}}) * 2 \pi}{60 * T_{\text{Carga}} \text{ (s)}} \quad (2.10)$$

Suponiendo que la inercia de la carga sea de 60 kgm² y que el par de la carga sea de 800 Nm en todo el rango de velocidades, con una carga a 1000 rpm y el par del motor puesto a cero, la carga pasa a velocidad cero en el tiempo:

$$t = J * \frac{(n_{\text{Motor}} - n_{\text{Rnl}}) * 2 \pi}{60 * T_{\text{Carga}}} = 60 * \frac{(1000 - 0) * 2 \pi}{60 * 800} = 7,85 \text{ s} \quad (2.11)$$

Esto es así en las aplicaciones en las que el par de la carga es constante al empezar el frenado. Cuando desaparece el par de la carga (por ejemplo, al romperse una cinta transportadora) aunque no cambie la energía cinética de la mecánica, el par de la carga que deceleraría la mecánica no está activo. En tal caso, si el motor no está frenando, la velocidad sólo disminuirá como resultado del rozamiento mecánico.

Supongamos ahora que tenemos la misma inercia y el mismo par de la carga a 1000 rpm, pero que el par de la carga cambia de forma cuadrática. Si el par del motor se fuerza a cero, el par de la carga disminuye en proporción cuadrática a la velocidad. Si el tiempo de frenado acumulativo se presenta en función de la velocidad, vemos que el tiempo de frenado natural a la velocidad más baja (de 200 rpm a 100 rpm) aumenta de forma considerable en comparación con el cambio de velocidad de 1000 rpm a 900 rpm.

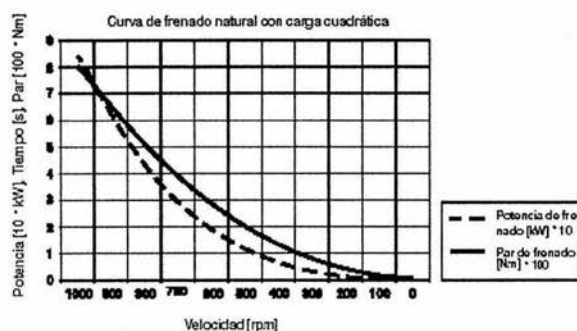


Figura 2.2 Curva de frenado natural para un par y una potencia de frenado en función de la velocidad de un ventilador de 90 Kw.

Se puede trazar fácilmente una curva de frenado natural partiendo de la potencia y la velocidad en el punto nominal.



Figura 2.3 Tiempo de frenado acumulativo de un ventilador de 90 Kw.

Ahora pensemos en un caso en el que se exige que el sistema mecánico frene en un tiempo determinado a partir de una velocidad concreta.

El ventilador de 90 Kw. tiene una inercia de 60 kgm². El punto de funcionamiento nominal del ventilador es 1000 rpm. El ventilador se tiene que parar en 20 segundos. El efecto de frenado natural provocado por las características de la carga es el máximo al principio del frenado. La

energía máxima de la inercia se puede calcular con la fórmula (2.12). La potencia media de frenado se puede calcular dividiendo esta energía de frenado por el tiempo. Este valor es, por supuesto, muy conservador debido a que no se tienen en cuenta las características de carga del ventilador.

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left(\frac{n}{60} \cdot 2 \pi \right)^2 = P \cdot t \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left(\frac{n}{60} \cdot 2 \pi \right)^2 \cdot \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} \cdot 60 \cdot \left(\frac{1000}{60} \cdot 2 \pi \right)^2 \cdot \frac{1}{20} = 16,4 \text{ kW} \quad (2.13)$$

Cuando se dimensiona el chopper de frenado para este valor de 16,4 Kw. y la capacidad de frenado del motor a una velocidad mayor es muy superior a 16,4 Kw., el accionamiento debe incorporar una función de supervisión para obtener la máxima potencia de regeneración, función disponible en algunos accionamientos.

Si se desea optimizar el dimensionado del chopper de frenado para un tiempo de frenado concreto se puede empezar observando la figura (2.3). La velocidad pasa rápidamente de 1000 a 500 rpm sin frenado adicional. El efecto de frenado natural es el máximo al principio del frenado, lo que indica claramente que no hace falta empezar a frenar el motor con esta potencia de 16 Kw. Tal como puede verse en la figura (2.3), la velocidad pasa de 1000 rpm a 500 rpm sin frenado adicional en menos de 10 segundos. En este punto temporal el par de la carga sólo es el 25% del nominal y la energía cinética que conserva el ventilador también es sólo el 25% de la energía a 1000 rpm. Si se repite a 500 rpm el cálculo realizado a 1000 rpm, puede verse que la potencia de frenado para una deceleración de 500 rpm a 0 rpm es aproximadamente igual a 8 Kw. Tal como se ha dicho en cálculos anteriores, este valor también es conservador porque no se tiene en cuenta la curva de frenado natural provocada por las características de la carga.

En resumen, se consigue sin problemas un tiempo de deceleración de 20 segundos de 1000 rpm a 0 rpm con un chopper y una resistencia de frenado dimensionados para 8,2 Kw. Fijando el límite de la potencia regenerativa del accionamiento a 8,2 Kw. se fija el nivel de la potencia de frenado a un nivel adecuado.

1.5. Resumen y conclusiones.

Existen dos tipos básicos de carga: a par constante y a par cuadrático.

Aplicación a par constante:

La característica del par de la carga no depende de la velocidad. El par de la carga es aproximadamente el mismo en todo el rango completo de velocidades.

La potencia aumenta linealmente a medida que aumenta la velocidad y viceversa.

Aplicaciones a par constante típicas: grúas y cintas transportadoras.

Aplicación a par cuadrático:

El par de la carga es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Cuando aumenta la velocidad, la potencia es igual a la velocidad al cubo.

Aplicaciones a par cuadrático típicas: ventiladores y bombas.

Evaluación de la potencia de frenado:

Las características de carga cuadrática significan una deceleración natural rápida entre el 50-100% de las velocidades nominales, lo que debe utilizarse al dimensionar la potencia de frenado necesaria.

El par de la carga cuadrático significa que a velocidades bajas la deceleración natural se debe principalmente al rozamiento.

La característica del par de la carga constante es una deceleración natural constante.

La potencia de frenado depende del par y la velocidad al punto de funcionamiento concreto. Dimensionar el chopper de frenado basándose en la potencia máxima de frenado suele provocar un sobredimensionado.

La potencia de frenado no depende de la intensidad (par) nominal del motor ni de la potencia tal cual.

Si desaparece el par de la carga cuando empieza el frenado el efecto de frenado natural es reducido, lo que influye en el dimensionado del chopper de frenado.

Capítulo 2 – Soluciones de frenado eléctrico en accionamientos.

2.1 Frenado de flujo de motor.

Los accionamientos de CA modernos constan de un rectificador de entrada que convierte la tensión de CA en tensión de CC que se almacena en condensadores de CC. El inversor convierte a su vez la tensión de CC en tensión de CA alimentando al motor de CA a la frecuencia deseada. La potencia de proceso necesaria fluye a través del rectificador, de las barras de CC y el inversor hacia el motor. La cantidad de energía almacenada en los condensadores de CC es muy pequeña en comparación con la potencia necesaria, es decir, el

rectificador tiene que dar constantemente la potencia que necesita el motor más las pérdidas del sistema de accionamiento.

El frenado de flujo es un método que se basa en las pérdidas del motor. Cuando se necesita frenado en el sistema de accionamiento, aumenta el flujo del motor y, asimismo, el componente de intensidad de magnetización empleado en el motor. Se puede controlar fácilmente el flujo mediante el principio de control directo del par (si se desea más información sobre el DTC véase la Guía técnica nº 1). Con el DTC se controla directamente el inversor para obtener el par y el flujo del motor deseados. Durante el frenado de flujo el motor está bajo control DTC, lo que asegura que se pueda frenar según la rampa de velocidad especificada. Este concepto es muy distinto al freno por inyección de CC que suele utilizarse en accionamientos. En el método por inyección de CC se inyecta intensidad de CC al motor para que se pierda el control del flujo del motor durante el frenado.

El método de frenado de flujo con DTC permite que el motor pase rápidamente de frenar a actuar como motor cuando se necesite.

En el frenado de flujo el aumento de la intensidad significa un aumento de las pérdidas en el motor. La potencia de frenado también aumenta aunque no aumente la potencia de frenado aplicada al convertidor de frecuencia. El aumento de la intensidad genera un aumento de las pérdidas en las resistencias del motor. Cuando mayor sea la resistencia, mayor será la disipación de la energía de frenado en el motor.

Normalmente, en motores de baja potencia (menos de 5 Kw.) la resistencia del motor es relativamente grande en relación con la intensidad nominal del motor. Cuanto mayor sea la potencia o la tensión del motor, menor será la resistencia del motor en relación con la intensidad del motor.

Dicho de otro modo, el frenado de flujo alcanza su máxima eficacia en un motor de baja potencia.

Soluciones de frenado eléctrico en accionamientos

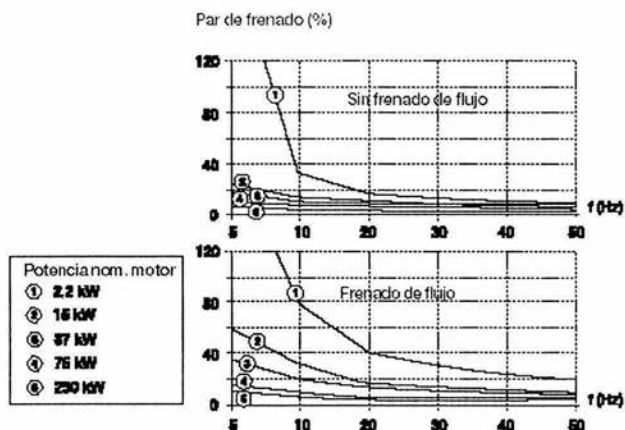


Figura 3.1 Porcentaje de par de frenado del motor del par nominal en función de la frecuencia de salida.

Principales ventajas del frenado de flujo:

- Con el método de control DTC no se necesitan componentes ni costes adicionales.
- El motor se controla durante el frenado, a diferencia del freno por inyección de CC que se suele usar en convertidores.

Principales desventajas del frenado de flujo:

- Mayor tensión térmica en el motor si se repite el frenado durante periodos breves.
- La potencia de frenado está limitada por las características del motor, como por ejemplo la resistencia.
- El frenado de flujo es útil principalmente en motores de baja potencia.

2.2 Chopper de frenado y resistencia de frenado

2.2.1 El almacenamiento de energía en el convertidor de frecuencia.

En los accionamientos estándar el rectificador suele ser un rectificador de diodos de 6 pulsos o 12 pulsos que sólo puede suministrar alimentación desde la red de CA a las barras de CC, pero no al revés. Si cambia el flujo de la potencia como ocurre en las aplicaciones en dos o cuatro cuadrantes, la potencia suministrada por el proceso carga los condensadores de CC siguiendo la fórmula (3.1) y empieza a aumentar la tensión de bus de CC. La capacitancia C es un valor relativamente bajo en un accionamiento de CA que produce un rápido aumento de la tensión, tensión que sólo pueden soportar los componentes de un convertidor de frecuencia hasta un nivel determinado.

Soluciones de frenado eléctrico en accionamientos:

$$W = P * t = \frac{C * U_{cc}^2}{2} \quad (3.1)$$

$$U_{cc} = \sqrt{\frac{2 * W}{C}} = \sqrt{\frac{2 * P * t}{C}} \quad (3.2)$$

Se puede impedir un aumento excesivo de la tensión de bus de CC de dos formas: el inversor impide el flujo de potencia del proceso al convertidor de frecuencia. Ello se consigue limitando el par de frenado para mantener una tensión de bus de CC constante. Esta operación se denomina control de sobretensión y es una prestación estándar de la mayoría de accionamientos modernos. Sin embargo, ello significa que el perfil de frenado de la maquinaria no se realiza según la rampa de velocidad especificada por el usuario.

La capacidad de almacenamiento de energía del inversor suele ser muy poca. Por ejemplo, en un accionamiento de 90 Kw. la capacitancia suele ser de 5 mF. Si el accionamiento recibe alimentación de 400 V CA, las barras de CC tienen $1,35 * 400 = 565$ V CC. Suponiendo que los condensadores puedan soportar un máximo de 735 V CC, el tiempo en que se puede alimentar una potencia nominal de 90 Kw. Al condensador de CC puede calcularse del siguiente modo:

$$t = \frac{C * U_{cc}^2}{2 * P} = \frac{5 * 10^{-6} * (735^2 - 565^2)}{2 * 90 * 10^3} = 6 \text{ ms} \quad (3.3)$$

Este rango de valores se aplica por lo general a todos los accionamientos de CA de baja tensión modernos con independencia de su potencia nominal. En la práctica ello significa que el regulador de sobre tensión y su regulador 'bestia de carga' del par del motor de CA tiene que

ser muy rápido. También la activación de la regeneración o del chopper de frenado tiene que ser muy rápida cuando se usa al configurar el accionamiento.

2.2.2 Principio de frenado del chopper.

La otra posibilidad de limitar la tensión de bus de CC consiste en dirigir la energía de frenado hacia una resistencia a través de un chopper de frenado. El chopper de frenado es un conmutador eléctrico que conecta la tensión de bus de CC a una resistencia en la que la energía de frenado se transforma en calor. Los choppers de frenado se activan automáticamente cuando la tensión de bus de CC actual supera un nivel determinado según la tensión nominal del inversor.

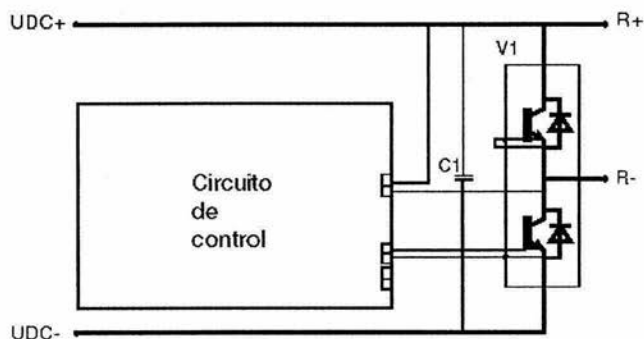


Figura 3.2 Ejemplo de diagrama de circuitos del chopper de frenado. UDC significa los terminales de las barras de CC y R los terminales de las resistencias.

Principales ventajas de la solución con el chopper y la resistencia de frenado:

- Construcción eléctrica sencilla y tecnología bien conocida.
- Inversión básica baja en el chopper y la resistencia.
- El chopper funciona aunque se pierda la alimentación de CA. Puede resultar necesario el frenado ante un fallo momentáneo de la red principal, como por ejemplo en ascensores u otras aplicaciones de alta seguridad.

Principales desventajas del chopper y la resistencia de frenado:

- Se pierde la energía de frenado si no se puede utilizar el aire calentado.
- El chopper y las resistencias necesitan más espacio.
- Puede necesitarse una mayor inversión en el sistema de recuperación de la refrigeración y calefacción.
- Los choppers de frenado se suelen dimensionar para un ciclo concreto, por ejemplo, 100% potencia 1/10 minutos, para tiempos de frenado más largos se necesita un dimensionado más exacto del chopper de frenado.
- Mayor riesgo de incendios debido al calentamiento de las resistencias y a la posible presencia de polvo y componentes químicos en el ambiente.
- La mayor tensión de bus de CC durante el frenado causa un mayor esfuerzo eléctrico al aislamiento del motor.

Cuándo se debe aplicar un chopper de frenado:

-El ciclo de frenado se necesita sólo de vez en cuando.

-La cantidad de energía de frenado en relación con la energía de actuación como motor es extremadamente pequeña.

-El frenado se necesita durante un fallo momentáneo de la red principal.

Cuando hay que plantearse otras soluciones distintas a un chopper y una resistencia de frenado:

-Frenado continuo o repetido a intervalos regulares.

-La cantidad total de energía de frenado es elevado en relación con la energía de motor necesaria.

-La potencia de frenado instantáneo es alta, por ejemplo, varios centenares de kw durante varios minutos.

-El aire ambiente incorpora cantidades importantes de polvo u otros componentes potencialmente combustibles, explosivos o metálicos.

2.3 Configuración antiparalela de los puentes de tiristores.

En un convertidor de frecuencia, los puentes rectificadores de diodos se pueden sustituir por los dos rectificadores controlados por tiristores en antifase. Esta configuración permite cambiar el puente rectificador según el flujo de potencia que se necesite en el proceso.

Los principales componentes de la unidad de alimentación por tiristores son dos puentes de tiristores de 6 pulsos. El puente directo convierte la alimentación trifásica de CA en CC. Suministra alimentación a los convertidores (inversores) mediante el circuito intermedio. El puente inverso convierte la CC en CA cuando se necesita desviar el poder de frenado del motor sobrante a la red de alimentación.

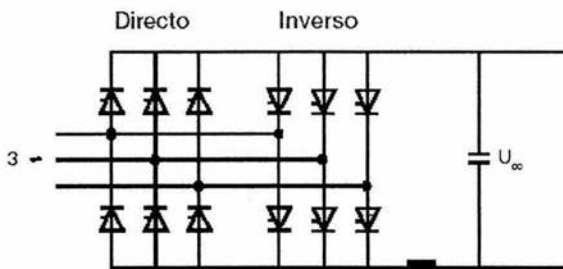


Figura 3.3 Diagrama lineal de una unidad de alimentación por tiristores antiparalela.

Sólo funciona uno de los puentes mientras el otro está bloqueado. El ángulo de disparo del tiristor se controla constantemente para mantener la tensión del circuito intermedio al nivel deseado. La selección del puente directo/inverso y el control de la tensión del circuito intermedio se basan en la determinación de la intensidad de alimentación, la tensión de alimentación y la tensión del circuito intermedio.

La reactancia de CC filtra las crestas de intensidad del circuito intermedio.

Principales ventajas del puente de tiristores antiparalelo:

-Solución bien conocida.

-Inversión menor a la necesaria con una solución IGBT.

-La tensión de CC se puede regular a un valor inferior que la red, lo que en algunas aplicaciones especiales puede ser ventajoso.

Principales desventajas del puente de tiristores antiparalelo:

-La tensión de bus de CC siempre es inferior a la tensión de alimentación de CA para mantener un margen de conmutación. De este modo, la tensión alimentada al motor es más baja que la CA de entrada. Sin embargo, esto se puede solucionar utilizando un autotransformador elevador en la alimentación.

-Si la CA de alimentación desaparece se corre el riesgo de que se fundan los fusibles debido al fallo de conmutación de los tiristores.

-La distorsión armónica total es más alta que en las unidades IGBT regenerativas.

-La distorsión de la intensidad fluye a través de otras impedancias de la red y puede provocar una distorsión de la tensión no deseada en otros dispositivos alimentados desde el punto donde existe la distorsión de tensión.

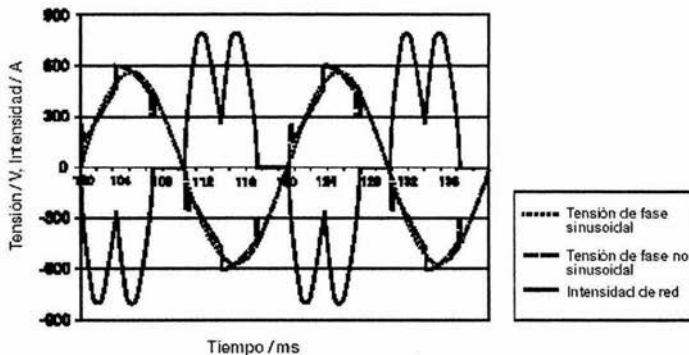


Figura 3.4. Ejemplo de ondas de tensión de intensidad y tensión de un puente antiparalelo durante el frenado.

2.4 Configuración con puente IGBT.

2.4.1 Principios generales de las unidades regeneración IGBT.

La regeneración IGBT se basa en los mismos principios que la transmisión de energía en una red de distribución de energía. En una red de distribución de energía se conectan entre sí varios generadores y puntos de carga. Se puede suponer que en el punto de conexión la red de distribución de energía es un generador síncrono de gran tamaño con una frecuencia fija. El puente IGBT de entrada del accionamiento (más tarde la unidad convertidora) se puede considerar otro sistema de tensión de CA conectado a través de una reactancia al generador. El principio de la transmisión de energía entre dos sistemas de CA con una tensión U y conectados entre sí se puede calcular con la fórmula (3.4).

$$P = \frac{U_{\text{Linea}} * U_{\text{Rec}}}{X} \sin \delta \quad (3.4)$$

La fórmula indica que para transmitir la energía entre estos dos sistemas tiene que existir una diferencia de fase en el ángulo entre las tensiones de los dos sistemas de CA. Para controlar el flujo de la energía entre los dos sistemas se tiene que controlar el ángulo.

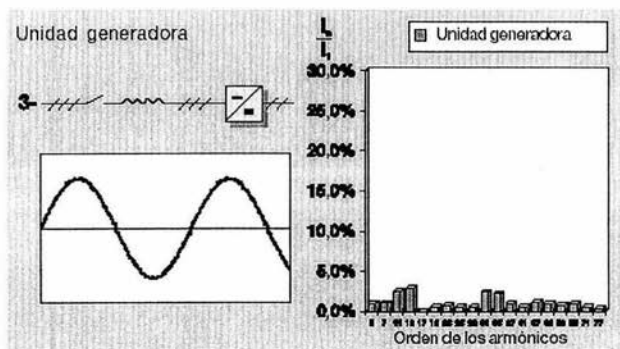


Figura 3.5. Onda de tensión de la intensidad de red y armónicos típicos de una unidad generadora IGBT.

2.4.2 Regeneración IGBT: Objetivos de regulación.

En las unidades de regeneración IGBT existen tres objetivos de regulación generales. El primero consiste en mantener estable la tensión de bus de CC con independencia del valor absoluto y la dirección del flujo de la potencia. Así se asegura que los inversores que alimentan motores de CA puedan funcionar óptimamente independientemente del punto de funcionamiento gracias a una tensión de bus de CC estable.

La tensión de bus de CC es estable cuando el flujo de potencia hacia las barras de CC es igual al de salida de éstas.

Esta regulación del flujo de potencia se consigue regulando el ángulo de potencia entre los dos sistemas de CA.

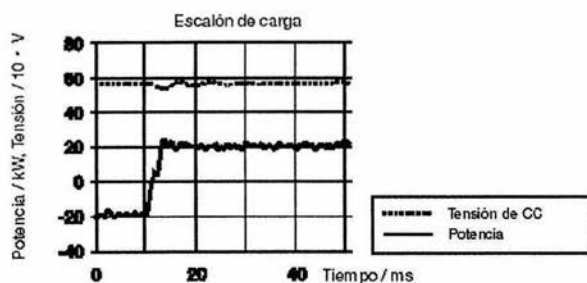


Figura 3.6. Cambio rápido de funcionamiento regenerativo a motor. La tensión de bus de CC es muy estable durante esta transición.

El segundo objetivo de regulación consiste en minimizar la intensidad de alimentación necesaria (funcionar a $\cos \delta = 1,0$), lo que se consigue regulando la tensión de salida de la unidad convertidora. En algunas aplicaciones se desea que la unidad convertidora IGBT también funcione a modo de carga inductiva o capacitativa.

El tercer objetivo de regulación es minimizar el contenido de armónicos de la intensidad de alimentación. Los principales criterios de diseño en este caso son el valor de la reactancia y que el método de regulación sea adecuado.

2.4.3 Control directo del par en forma de control directo de la potencia.

El control directo del par (DTC) es una forma de regular un motor de CA alimentado por un inversor. El principio del control activa y desactiva los conmutadores IGBT directamente a partir de la diferencia entre el par actual del motor de CA y el par de referencia del usuario.

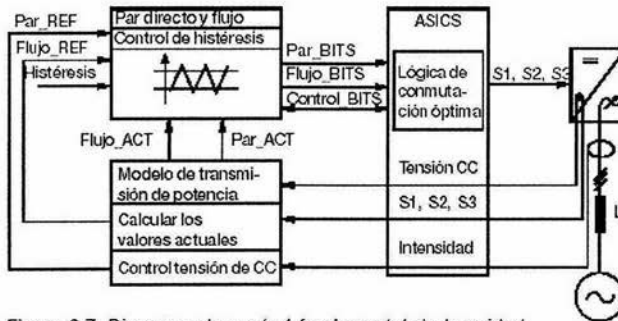


Figura 3.7. Diagrama de control fundamental de la unidad regenerativa IGBT con DTC.

El método de control DTC con la tecnología IGBT contribuye a que se generen pocos armónicos. Por ello, la unidad de alimentación IGBT puede sustituir a las configuraciones de alimentación de 12 pulsos o 18 pulsos en un cuadrante que se suelen utilizar para reducir los armónicos en la sección de alimentación. Una unidad de alimentación IGBT también es una solución, por tanto, en aquellos casos en los que el mayor problema son los armónicos y no cómo canalizar la energía de frenado.

Principales ventajas de una unidad de regeneración IGBT:

- Pocos armónicos en la alimentación tanto en actuación como motor como en regeneración.
- Dinámica alta durante los cambios rápidos de flujo en la sección de carga.
- Posibilidad de aumentar la tensión de CC más que la alimentación de CA de entrada, lo que puede usarse para compensar una red débil o aumentar la capacidad de par máximo del motor en la frecuencia de inicio de debilitamiento del campo.
- Compensación total de las caídas de tensión del sistema gracias a la posibilidad de sobrepasar de la tensión.
- Posibilidad de regular el factor de potencia.
- Funcionamiento con cortes de la red con sincronización automática a la rejilla.
- La tensión de bus de CC tiene aproximadamente el mismo valor durante la monitorización que durante el frenado. Sin esfuerzos de tensión adicionales ni aislamiento del bobinado del motor durante el frenado.

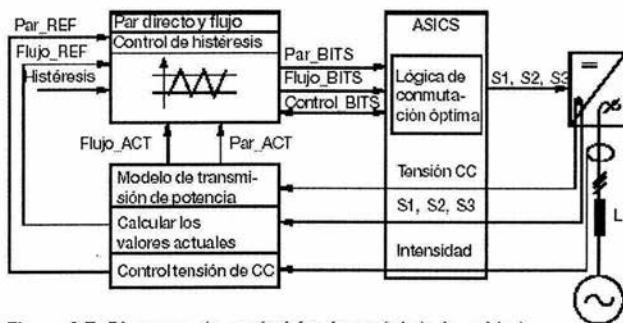


Figura 3.7. Diagrama de control fundamental de la unidad regenerativa IGBT con DTC.

Principales desventajas de una unidad de regeneración IGBT:

- Mayor coste de compra.
- No se dispone de la capacidad de frenado durante fallos momentáneos de la red principal.
- Armónicos de la tensión de alta frecuencia debido a la elevada frecuencia de conmutación. Estos componentes de la tensión de varios kilohertzios pueden excitar a los pequeños condensadores que se utilicen en otros dispositivos eléctricos. Con un diseño y disposición adecuados de los transformadores de alimentación de los distintos dispositivos se evitan estos fenómenos.

Cuándo se debe utilizar una unidad de regeneración IGBT:

- El frenado es continuo o se repite con regularidad.
- El poder de frenado es muy alto.
- Cuando se ahorra espacio es comparación con la solución a base de resistencias de frenado.
- Cuando los límites de los armónicos de red son cruciales.

2.4.4 Dimensionado de una unidad de regeneración IGBT.

Para dimensionar la unidad IGBT se parte de la potencia necesaria. Supongamos que la potencia en el eje necesaria durante la actuación como motor es de 130 kW y que la potencia de frenado, de 100 kW. Para dimensionar la unidad de alimentación IGBT se selecciona el valor máximo de potencia de actuación como motor o de frenado, que en este caso es de 130 kW. La tensión del motor es de 400 V. El valor mínimo para la red de alimentación es de 370 V.

En este caso se puede usar el sobrepar de tensión: se aumenta la tensión de bus de CC hasta una tensión de CA de 400 V. Sin embargo, la intensidad de alimentación necesaria se calcula partiendo del nivel 370. Suponiendo que existen pérdidas del 5% del sistema en el motor y el accionamiento, la potencia total necesaria de la rejilla es de 136 kW. La intensidad de alimentación se puede calcular con la fórmula (3.6):

$$I_{ext} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{ext}} = \frac{136,5 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 370 \text{ V}} = 213 \text{ A} \quad (3.6)$$

La unidad de regeneración IGBT se selecciona partiendo únicamente de la intensidad calculada.

2.5 CC común.

Cuando en un proceso hay varios accionamientos y un motor necesita capacidad de frenado mientras los demás funcionan como motor, la solución con barras de CC comunes es muy eficaz para reaprovechar la energía mecánica. Un sistema de accionamiento con barras de CC comunes consta de un rectificador de alimentación aparte que convierte CA en CC, e inversores que alimentan a motores de CA conectados a las barras de CC comunes (las barras de CC son el canal que desplaza la energía de frenado de un motor en beneficio de los demás motores). En la fig. (3.9) se indica la configuración básica de las barras de CC comunes.

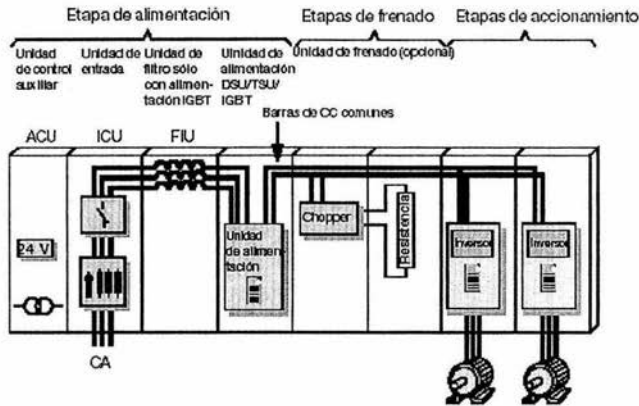


Figura 3.9. Configuraciín básica de las barras de CC comunes.

Principales ventajas de las barras de CC comunes:

- Flujo de potencia fácil de equilibrar entre accionamientos.
- Bajas pérdidas del sistema al convertir la energía de frenado gracias a las barras de CC comunes.
- Aunque la potencia de frenado instantáneo sea mayor que la potencia de actuaciín como motor, no se tienen que dimensionar el chopper y la resistencia de frenado para obtener una plena potencia de frenado.
- Si se necesita la potencia de frenado durante periodos prolongados se pueden usar varios rectificadores.

Principales desventajas de la soluciín con barras de CC comunes con un rectificador en un cuadrante:

- La potencia instantánea de actuaciín como motor tiene que ser mayor que o igual a la potencia de frenado.
- Se necesitan el chopper y la resistencia de frenado si la potencia de frenado instantáneo es mayor que la potencia de actuaciín como motor.
- Si hay pocos motores, el coste adicional de un inversor dedicado que desconecte el dispositivo de las barras de CC aumenta el coste de la inversiín.

Cuándo utilizar la soluciín con barras de CC comunes con un rectificador en un cuadrante:

- El número de accionamientos es alto.

-La potencia de actuación como motor siempre es más alta que la potencia de frenado o sólo se necesita una potencia de frenado baja para el chopper de frenado.

Capítulo 3 – Evaluar el coste del ciclo de vida de distintos frenados eléctricos.

Cada vez es más importante evaluar el coste del ciclo de vida total al invertir en productos para ahorrar energía. El accionamiento de CA se emplea para regular la velocidad y el par. Esta función básica de los accionamientos de CA significa ahorros en el consumo de energía en comparación con otros métodos de control. En las aplicaciones de bombas y ventiladores apenas se necesita el frenado. Sin embargo, los accionamientos de CA modernos se utilizan cada vez más en aplicaciones que necesitan frenado.

Antes hemos citado diversos criterios técnicos. A continuación se analizan los factores económicos de las distintas opciones de frenado eléctrico.

3.1 Como calcular el coste directo de la energía.

El coste directo de la energía se puede calcular partiendo, por ejemplo, del precio de la energía y del tiempo y la potencia de frenado calculados por día. Si bien el precio de la energía varía según los países, se puede aplicar un precio aproximado de 0,05 euros por kilovatio-hora.

1 Euro ~ 1 USD. El coste anual de la energía se puede calcular con la fórmula:

$$\text{Coste} = \text{Ciclo Frenado (h/día)} * \text{Potencia media frenado (kW)} * \\ \text{Precio Energía (Euros/kWh)} * 365$$

Por ejemplo, un accionamiento de 100 kW funciona 8000 horas al año y frena con una potencia media de 50 kW durante 5 minutos cada hora, es decir, 667 horas al año. El coste directo anual de la energía de frenado es de 1668 Euros.

3.2 Como evaluar el coste de inversión.

Las inversiones necesarias para los distintos métodos de frenados varían. Deben evaluarse los siguientes componentes del coste de la inversión.

Chopper de frenado:

-El coste de la inversión adicional que representan el chopper y la resistencia de frenado más el coste del espacio adicional que se necesita para estos componentes.

-El coste de la inversión en ventilación adicional necesaria para el chopper de frenado.

3.2.1 Frenado eléctrico por tiristores o IGBT:

Coste adicional de la inversión en el frenado regenerativo IGBT o por tiristores en comparación con el mismo accionamiento sin frenado eléctrico.

Barras de CC comunes:

-Coste adicional de la inversión en el chopper y la resistencia de frenado, incluyendo el espacio necesario para estos componentes en una solución con barras de CC comunes.

-Diferencia del coste de la inversión entre la solución con barras de CC comunes y un único accionamiento.

3.3 Como calcular el coste de ciclo de vida.

El cálculo del coste del ciclo de vida apoya la decisión puramente económica al realizar una inversión. El precio de la energía y de los accionamientos varía según el país, la compañía eléctrica, el tamaño de la empresa, los tipos de interés, el tiempo durante el que se utiliza la inversión y la situación macroeconómica global. Los valores absolutos de los precios indicados en los siguientes ejemplos se usan únicamente para ilustrar los principios del cálculo.

Caso 1 - Frenado de vez en cuando.

Imaginemos la siguiente aplicación:

La potencia continua de actuación como motor es de 200 kW a una velocidad de eje de 1500 rpm. En caso de que se emita un comando de paro de emergencia, la rampa tiene que disminuir en 10 segundos. Partiendo de la experiencia en el proceso, cada mes se activa un paro de emergencia.

La inercia J del sistema de accionamiento es de 122 kgm². Cuando se activa el paro de emergencia se puede pasar por alto el par de la carga.

Cálculo del par de frenado necesario para el motor:

$$T = J * \frac{(\omega_{\text{Inicio}} - \omega_{\text{Final}})}{t} = J * \frac{(n_{\text{Inicio}} - n_{\text{Final}}) * 2 \pi}{t * 60} =$$
$$122 * \frac{(1500 - 0) * 2 \pi}{10 * 60} = 1915 \text{ Nm}$$

El par típico de un motor de 200 kW y 1500 rpm es de unos 1200 Nm. Un motor de CA normal regulado instantáneamente por un inversor puede funcionar a un par igual a un 200% del valor nominal. Para obtener pares más altos se necesita una intensidad de motor proporcionalmente más alta.

La potencia de frenado es la máxima al principio del ciclo de frenado.

$$P_{Fr, \text{max}} = T * \omega = 1915 * \frac{1500}{60} * 2 \pi \approx 300 \text{ kW}$$

El chopper y la resistencia de frenado tienen que soportar instantáneamente la intensidad para una potencia de 300 kW.

A continuación se calcula la potencia media de frenado.

$$W_{\text{in}} = \frac{1}{2} * J * \omega^2 = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi\right)^2 = P * t$$

$$P = \frac{1}{2} * J * \left(\frac{n}{60} * 2 \pi\right)^2 * \frac{1}{t} =$$

$$\frac{1}{2} * 122 * \left(\frac{1500}{60} * 2 \pi\right)^2 * \frac{1}{10} = 150,3 \text{ kW}$$

Coste de la resistencia de frenado:

El chopper de frenado necesario debe soportar una potencia máxima de frenado de 300 kW. Si el accionamiento tiene una función de limitación de potencia se puede dimensionar la resistencia de frenado según los 150,3 kW. El coste adicional del chopper y la resistencia de frenado es de 4000 Euros.

La resistencia de frenado necesita 0,4 m2 de espacio adicional. El coste del espacio es de 500 Euros/m2.

Debido a la reducida energía total de calefacción y al uso del frenado en caso de emergencia, el coste de la refrigeración adicional se considera desdeñable.

El coste total adicional de la inversión se compone de:

- Chopper y resistencia de frenado en armario, 4000 Euros.
- Espacio de 0,4 m2 * 500 Euros/m2, 200 Euros.

El coste total de la energía perdida durante un frenado es:

$$\text{Coste} = \frac{10}{3600} (\text{h}) * \frac{300}{2} (\text{kW}) * 0,5 (\text{Euros/kWh}) = 0,02 \text{ Euros}$$

En este caso el coste de la energía de frenado es desdeñable.

Coste del accionamiento en cuatro cuadrantes:

El coste adicional de la inversión en un frenado eléctrico con puente de tiristores antiparalelo comparado con un accionamiento con chopper de frenado es de 7000 Euros.

Tal como cabía esperar, el ahorro de energía no puede usarse como argumento para justificar la inversión adicional.

Caso 2 - Aplicación en grúas.

Imaginemos la siguiente aplicación:

Grúa con una potencia de elevación de 100 kW. La grúa necesita plena potencia tanto en el motor como en el generador. El tiempo de funcionamiento de la elevación más largo puede ser de 3 minutos. El tiempo medio en servicio de la grúa durante un año es del 20%.

Coste del frenado por resistencia:

El chopper y la resistencia de frenado tienen que dimensionarse para un frenado continuo de 100 kW debido al tiempo máximo de frenado de 3 minutos. Normalmente, el dimensionado del chopper de frenado máximo se realiza para un tiempo de frenado de 1 minuto cada 10 minutos.

- Chopper y resistencia de frenado en armario: 7800 Euros.

La construcción mecánica de la grúa permite tener el chopper de frenado en armarios. No se necesita más espacio.

Se supone que el 50% del tiempo de servicio la grúa funciona en el lado del generador, un promedio de 2,4 h/día. El coste total de la energía desperdiciada es:

$$\text{Coste} = 2,4 \text{ (h/día)} \cdot 100 \text{ (kW)} \cdot 0,05 \text{ (Euros/kWh)} \cdot 365 = 4380 \text{ Euros}$$

Coste del accionamiento en cuatro cuadrantes:

Para grúas se recomienda el accionamiento IGBT en cuatro cuadrantes.

El coste adicional de la inversión en el frenado eléctrico con un puente de entrada IGBT en comparación con el accionamiento con chopper de frenado es de 4000 Euros.

El cálculo de la amortización directa indica que con una inversión adicional de 4000 Euros se obtiene el mismo ahorro de energía durante el primer año de uso.

Caso 3 - Aplicación en una centrífuga

Imaginemos la siguiente aplicación:

Centrífuga de azúcar con motor de 6 polos y una potencia nominal de 160 kW. El motor necesita todo el par durante un período de 30 segundos para acelerar el cesto cargado hasta una velocidad máxima de 1100 rpm, la centrífuga separa la solución de la carga durante 30 segundos a alta velocidad. Una vez se seca la carga el motor decelera la centrífuga tan rápido como le es posible para permitir su descarga y recarga.

En un ciclo por lotes los tiempos de carga, separación y descarga son fijos, con lo que la única oportunidad de aumentar la producción consiste en aumentar las velocidades de aceleración y deceleración.

CAPITULO 4 - MATERIAL RODANTE

4.1 Parámetros específicos.

La ley de coulomb enuncia que una rueda sometida a un par motor, no se deslizará en tanto que el esfuerzo "F" permanezca inferior a una fracción de peso propia de la rueda. Esto se puede expresar matemáticamente con la siguiente expresión:

$$|F| < fP$$

Donde:

|F| : El valor absoluto del esfuerzo.

f : Coeficiente de adherencia.

P: Peso

La expresión ha demostrado que "f" disminuye con la velocidad en la práctica se ha generalizado el empleo de valores medios para el coeficiente f.

Así se tienen como ejemplo los siguientes factores:

f = 0.15 para un rapamiento hierro con hierro.

f = 0.6 para un automóvil.

f = 0.3 para un material metro sobre neumáticos

La adherencia está determinada por el esfuerzo máximo admisible al contacto rueda-plano de rodamiento. Refiriéndonos a una rueda sometida a su peso y acoplada a un motor generando el esfuerzo f.

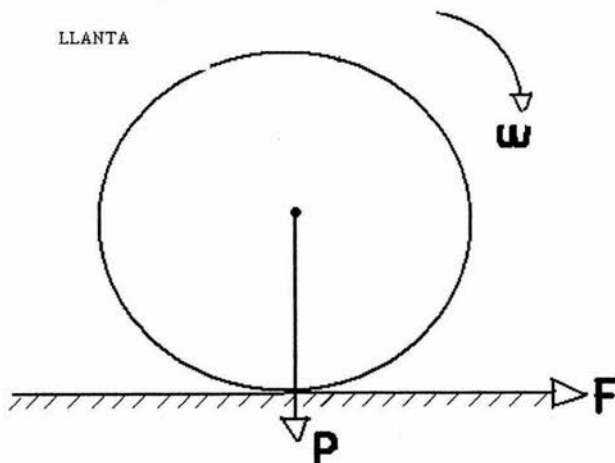


FIGURA 4.1

De acuerdo al principio de la dinámica de los cuerpos se tiene que :

$$F = m\delta \dots \dots \dots 4.1$$

Donde:

M: masa de la rueda.

δ : aceleración inducida.

ω : velocidad angular.

Sabiendo que F tiene un esfuerzo máximo fP y por otra parte P = mg (g aceleración de la gravedad) es posible igualar ambas expresiones de tal forma que:

$$F = fP = (P/g) \delta \rightarrow \delta = fg \dots \dots \dots 4.2$$

Esto da como resultado que la aceleración máxima inducida depende del material en cuestión así por ejemplo la aceleración máxima para materiales hierro-hierro y neumático- hierro son:

$\delta_{max} = 1.5 \text{ m/seg}^2$ para un material rodante hierro-hierro
 $\delta_{max} = 3.0 \text{ m/seg}^2$ para un material rodante neumático-hierro.

Ejemplo:

Se tienen 3 motrices (carros con motores, ver tema 4.4) con una masa de 84 toneladas y 2 remolques de 40 toneladas de masa. Calcular el esfuerzo F que se tiene que producir por el par motor, para un material sobre neumáticos.

Solución:

Para un material sobre neumáticos.

$$\delta = 3 \text{ m/seg}^2$$

$$F = m\delta \rightarrow F = (84000+40000)(3) \text{ kg m/seg}^2$$

$$F = 372000 \text{ [N]}$$

4.2 RESISTENCIAS AL AVANCE.

Los esfuerzos que se oponen a la marcha de un tren se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Resistencia por el mismo rodamiento.
- Resistencia por fricción con el aire.
- Resistencia de las curvas.
- Resistencia a la gravedad.

-Resistencia por el mismo rodamiento.

Como su nombre lo indica estas resistencias son las que se oponen al rodamiento como es la resistencia de los ejes del motor a los engranes.

Para cuestiones prácticas se emplea un método que consiste en englobar todas las resistencias en una constante α donde:

$\alpha = 0.116 \text{ [N/kg]}$ para material hierro-hierro.
 $\alpha = 0.0475 \text{ [N/kg]}$ para material sobre neumáticos.

La masa a considerar será la masa estática del material.

-Resistencia por fricción con el aire.

Esta resistencia es efectiva desde que existe un desplazamiento de un cuerpo en contacto con el aire.

Para el calculo de esta resistencia en velocidades menores a 100 km/h se tiene que para un material el cual se desplaza en túnel se emplea la siguiente expresión:

$$R_f = \beta V^2 \dots \dots \dots 4.3$$

Donde: R_f = Resistencia de fricción [kgf]

V = Velocidad [km/h]

β = constante de resistencia de fricción [kgf / (km/h)²]

$\beta = 0.17 \text{ kgf / (km/h)}^2$ para una formación de 5 carros y por cada carro adicional el valor se β incrementa en 0.02.

Ejemplo:

Se tiene un tren sobre neumáticos que se desplaza en túnel, con una masa estática de 138 toneladas compuesta de 5 carros, y con una velocidad de 50 km/h. Se requiere conocer la resistencia total.

Solución:

$R_t = \text{Resistencia por rodamiento} + \text{Resistencia por fricción al aire.}$

$$R_t = am + \beta V^2$$

$$R_t = (0.116)(138000)(1/9.81) + (0.17)(50)^2$$

$$R_t = 2056.80 \text{ kgf}$$

$$\text{Unidades (N/kg)(Kg)(1/9.81)(kgf/N) + (kgf/(km/h)^2)(km/h)^2}$$

Simplificando nos queda kgf.

Para un material rodante hierro-hierro que se desplaza al aire libre la resistencia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R = (1.3\sqrt{10/me + 0.01 v}) mt + CV^2 \dots\dots\dots 4.4$$

Donde: $mt =$ masa del tren en toneladas.

$me =$ masa del eje en toneladas.

$V =$ velocidad km/h.

$C =$ es calculado dentro de cada caso en particular.

$$C = 0.035 (s + p L/100) + 0.0021 N \dots\dots\dots 4.5$$

Donde: $s =$ superficie frontal del tren. $[m^2]$
 $p =$ perímetro de la parte frontal del tren $[m]$.
 $L =$ longitud del tren $[m]$.
 $N =$ número de pantógrafos.

Para desplazamiento por túnel la formula 4.4 es valida; pero considerando que el valor para C es 2C.

-Resistencia de las curvas.

Las curvas introducen una resistencia debido a que los ejes son rígidos y una rueda se desliza por efecto de la otra.

Para un material hierro-hierro esta resistencia esta dada:

$$R = 80/l [N/Ton] \dots\dots\dots 4.6$$

Donde: $l =$ radio de la curva $[m]$.

-Resistencia a la gravedad

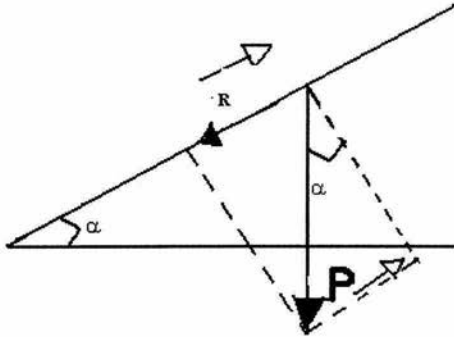


FIGURA 4.2

Esta resistencia se encuentra cuando se presentan tramos con pendientes y se determina de acuerdo a la figura 4.2 con la expresión siguiente:

$$R = P \operatorname{sen} \alpha \dots\dots\dots 4.7$$

Donde: R= Resistencia [kgp]
 P= Peso [kgf]
 α = ángulo de la pendiente.

4.3 EL MOTOR.

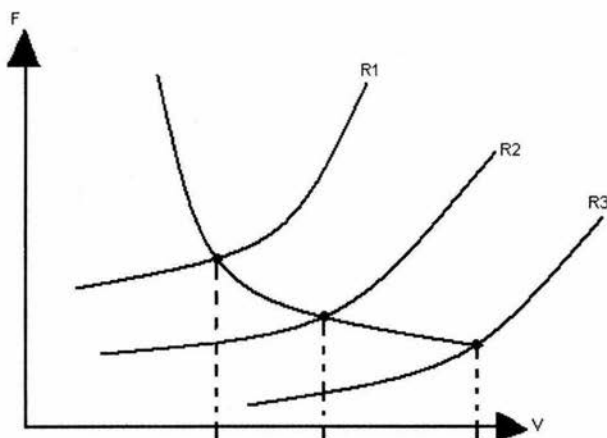
El tipo de motor utilizado para la tracción del tren será en serie y tendrá que reunir las siguientes características:

- Gran robustez.
- Para una demanda de corriente el par que se ejerce debe ser menor al que se ejercen otros tipos de motores.

El motor debe asegurar:

- El arranque del tren.
- La regulación de la velocidad.
- Eventualmente permitir el frenado eléctrico.

Estudiaremos la curva par-velocidad que se muestra en la grafica 4.1. Los puntos de intersección nos indican la velocidad de desplazamiento.



GRAFICA 4.1 PAR- VELOCIDAD.

Lo que nos muestra esta grafica es que a cada tipo de esfuerzo de resistencia la velocidad toma un valor diferente, lo que implica que el par y la velocidad están sujetos a las condiciones de la línea, para lo cual es necesario tener el motor y su arreglo de circuito necesario para absorber las condiciones del terreno.

Modos de arreglo campo inductor-tensión.

1.-Acción sobre el campo inductor.

La fuerza contraelectromotriz "E" generada por motor a la velocidad V es proporcional al flujo ϕ .

$$E = K_v \phi$$

Si se mantiene E constante, implica que si disminuye el flujo aumenta la velocidad. En la practica se disminuye el flujo inductor en el devanado, en un motor en serie dentro del caso de un material JH la corriente es inducida por la resistencia de valores decrecientes y para un material.

Heacheur se hace mediante una derivación. En los dos casos, se define una tasa de derivación que expresa el porcentaje de flujo retirado.

2.-Acción sobre la tensión.

Se mantiene $\phi = \text{constante}$ lo que da lugar a que varíe E. En la practica la variación de E para un motor en serie dentro del caso de material JH. Se hará mediante resistencias de valores decrecientes y para el caso de un material Heacheur por regulación directa de la tensión.

3.-Acción sobre el acoplamiento de algunos motores.

Los carros motrices cuentan con dos conjuntos formados por motores o motor, soporte del motor, ejes y conexiones; llamándose a cada conjunto boggie.

Cada boggie tiene al menos un motor llamándose en este caso monomotor o si cuenta con dos motores se llamara bimotor. Si la motriz dispone de 2 motores por boggie, podemos realizar algunos acoplamientos como son:

4 motores en serie, 2 motores en serie sobre 2 en paralelo, 4 motores en paralelo. Globalmente, en el acoplamiento en serie, cada motor requiere la mitad de la tensión que el arreglo en paralelo.

Para la demanda de las bajas velocidades, el arreglo de tensión será utilizado tal que permita el funcionamiento de flujo máximo (para par máximo) y suministrar el esfuerzo mas importante a la motriz. Para las velocidades más elevadas donde los motores ya son alimentados por toda la tensión disponible, dando como consecuencia la disminución de campo que permita mantener un esfuerzo acelerador para las velocidades sugeridas a la velocidad nominal del motor.

Ejemplo de características de un motor utilizado.

Características		Régimen continuo Campo máximo	Régimen unihorario
Tensión	360 v	360 v	360 v
Intensidad	305 A	340 A	315 A
Velocidad	1035 rpm	1740 rpm	1030 rpm
Potencia	96 kw	104 kw	99 kw

Velocidad máxima en servicio.....3000 rpm.

Resistencia a 110°C.

-Bobina de campo en serie.....0.0805Ω

-Bobina de campo en conmutación.....0.0201Ω

-Inducido.....0.0608Ω

Este motor posee cuatro polos principales y cuatro polos de conmutación, el aislamiento de las bobinas es de clase H y tiene una masa total de 700 kg.

4.4 CONCEPTO DE UNA MOTRIZ.

La función esencial de una motriz es la de traccionar el conjunto de cargas que le son impuestas además de ejecutar esta función con la flexibilidad necesaria y respetando una marcha impuesta por la demanda de la línea, como es; el intervalo entre trenes, tiempo de carga y descarga en estaciones de los pasajeros.

La motriz esta compuesta por:

-El motor.

-Los equipos de control.

-El reductor.

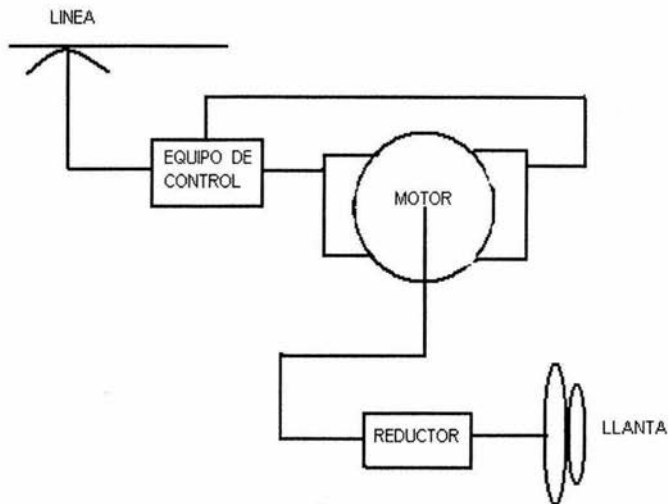


DIAGRAMA DE UNA MOTRIZ
FIGURA 4.3

-Reductor.

El reductor es el que asegura la transmisión de la potencia mecánica disponible sobre el árbol del motor con el mínimo de pérdidas y reduce la velocidad de rotación del motor para que sea compatible con las velocidades lineales de las llantas. Este integrante cuenta con indicadores precisos que dan un rendimiento en el rango de velocidades que varían de 0.32 a 0.95 y la relación de transmisión en general se encuentra entre 5 a 6 para un material de rodamiento hierro-hierro y de 9 a 11 para un material a rodamiento sobre neumáticos.

-Equipo de control.

Este se puede agrupar en:

- Las funciones que aseguran la configuración eléctrica de los motores.
- Las regulaciones que aseguran el buen funcionamiento de motor, los resultados dinámicos, tales como la aceleración, la limitación de "Jerk" (derivada de la aceleración con respecto al tiempo).
- Las protecciones que pueden estar incluidas dentro de las regulaciones y que supervisan a ciertos parámetros del circuito de tracción para que no sean sobrepasados (supervisión de la tensión en línea, corriente en los motores, rodamiento, etc.).

4.5 EL CONTROL EN MATERIAL RODANTE.

Las funciones de control son efectuadas por los equipos de control de acuerdo al tipo de sistema. Existen dos sistemas usados y son:

- JH (Jeumont Heimam).
- Hecheur.

-Tipo de sistema JH.

Este sistema utiliza un modo de arreglo de tensión y campo, donde el control de velocidad es efectuado por un dispositivo de eliminación de resistencias, permitiendo que la velocidad del motor no varí instantáneamente, evitando así que exista un incremento brusco en la corriente y se tenga una discontinuidad, logrando que se tenga un esfuerzo medio constante en la llanta

con una aceleración constantes y una velocidad aproximadamente lineal. El incremento de la velocidad es ejecutado por desconexión de resistencias para cada etapa del programa.

-Tipo de sistema Heacheur.

Este sistema utiliza un arreglo directo a la tensión de los motores, mediante un equipo electrónico de tiristores llamado Heacheur, con el cual se controla la velocidad. La variación de la tensión en corriente continua se hace mediante la interrupción del generador por medio de un interruptor, para evitar que la corriente se anule a cada apertura se cuenta con un conjunto de bobina y diodo que asegura la continuidad eléctrica.

-Los equipos de control de frenado.

El material rodante utiliza dos tipos de frenado que son:

1.-Mecánico por fricción.

2.-Eléctrico: reostatico y recuperación.

Mecánico por fricción.

Este es efectuado mediante la fricción de las zapatas sobre la banda de la rueda o bien el frotamiento de zapatas sobre un disco.

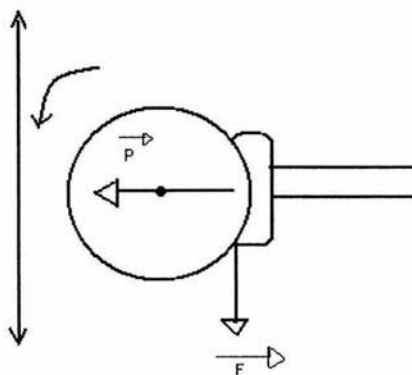


FIGURA 4.4

P: Esfuerzo que aplica la zapata.

F: Esfuerzo tangencial proporcional a P.

$F = \delta P$ donde δ : Coeficiente de proporcionalidad.

y δ es característico para el tipo de control JH o Heacheur.

Eléctrico.

-frenado reostatico.

Para el tipo de sistema JH los motores en el frenado funcionan como generadores, donde la energía mecánica de la motriz es disipada en calor mediante la regulación de un reóstato, dando así un esfuerzo constante ajustado a la carga.

Para el tipo de sistema Heacheur la generación en el frenado es transmitida sobre un conjunto cuya resistencia aparente varía conjuntamente al suministro cíclico del Heacheur, la variación impondrá un esfuerzo constante a la motriz.

-Frenado por recuperación.

Para el tipo de sistema JH, en posición de frenado parte de la energía de la motriz es reenviada a la fuente mediante un dispositivo de conversión, debido a que el circuito de tracción impone el despacho sobre la línea.

En el sistema Heacheur por medio de la corriente de excitación. Se logra una tensión mayor en los motores que en la línea, con lo cual logra disminuir la velocidad u recircular energía en la línea.

-Los auxiliares.

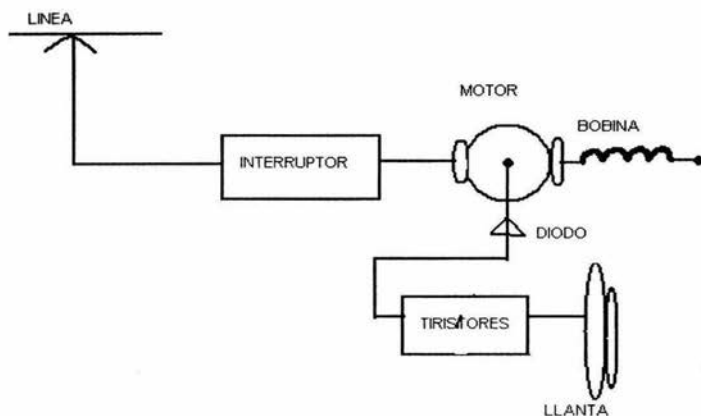
Aire comprimido para en freno mecánico y cierre de puertas.

Base de tensión.

Calefacción de los carros.

Estos auxiliares son generalmente compuestos de un grupo motor compresor para suministro de aire y de un grupo motor alternador para el suministro de base de tensión.

En la línea, los auxiliares constituyen una carga de fondo relativamente pequeña en compensación con la demanda de corriente de tracción.



CAPITULO 5 - APLICACIÓN DEL CHOPPER EN EL SISTEMA DE FRENADO ELECTRICICO.

5.1 ¿QUE ES UN CHOPPER?

Es un equipo a base de semiconductores de potencia. Su función puede compararse a la de un transformador de corriente directa. Es decir, transforma un voltaje de corriente constante (voltaje de línea) a un voltaje de corriente directa, pero de valor ajustable. (Este último se aplica a los motores de tracción).

Durante el arranque, el voltaje en los motores se va adaptando a su fuerza contraelectromotriz, de tal manera que la corriente durante el proceso permanece constante.

Esto significa para los motores un par acelerativo constantes y para el tren un incremento lineal de la velocidad.

Además, controlando el voltaje de los motores a determinados valores, se puede obtener la velocidad de equilibrio deseada.

5.2 Diagrama de funcionamiento de un chopper elemental.

Se encuentra representado en la figura 2. Cuando el tiristor conduce, circula una corriente I_{on} a través del motor y el tiristor MTH, durante un tiempo αT . α es la relación de conducción del tiristor y sus valores son mayores que cero y menores que la unidad. Cuando el tiristor deja de conducir o se conmuta, entonces, la corriente se desvía por el diodo FWD, (loff) durante un tiempo $(1-\alpha)T$. En este último tiempo el motor deja de recibir voltaje de la línea.

El voltaje promedio que se alimenta a la carga será:

$$V_{pc} = E_s \cdot \alpha T / T = \alpha E_s \dots\dots\dots 1$$

La conducción del tiristor y la conmutación se realizan continuamente, a una frecuencia constante de 219 HZ. Es decir a un periodo T de 4.56 milisegundos. (Para el metro de México). El tiempo de conducción T_{on} es ajustable, modulando el ancho del pulso de conducción. Ver figura 1.

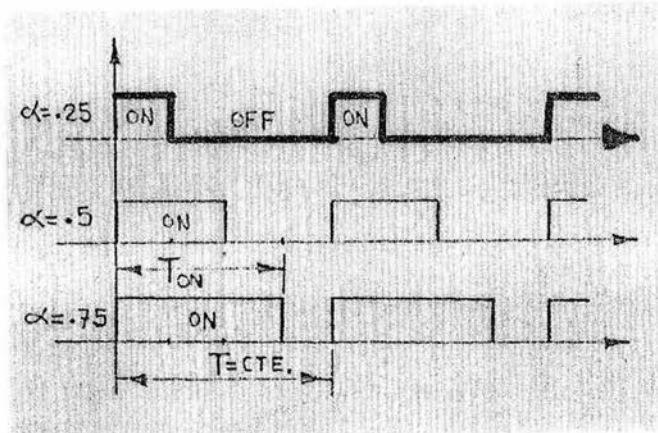


Figura1

De esta manera la relación $\alpha = T_{on}/T$, variara entre cero y la unidad, y por lo tanto el voltaje en la carga (αE_s), es susceptible de ser ajustado.

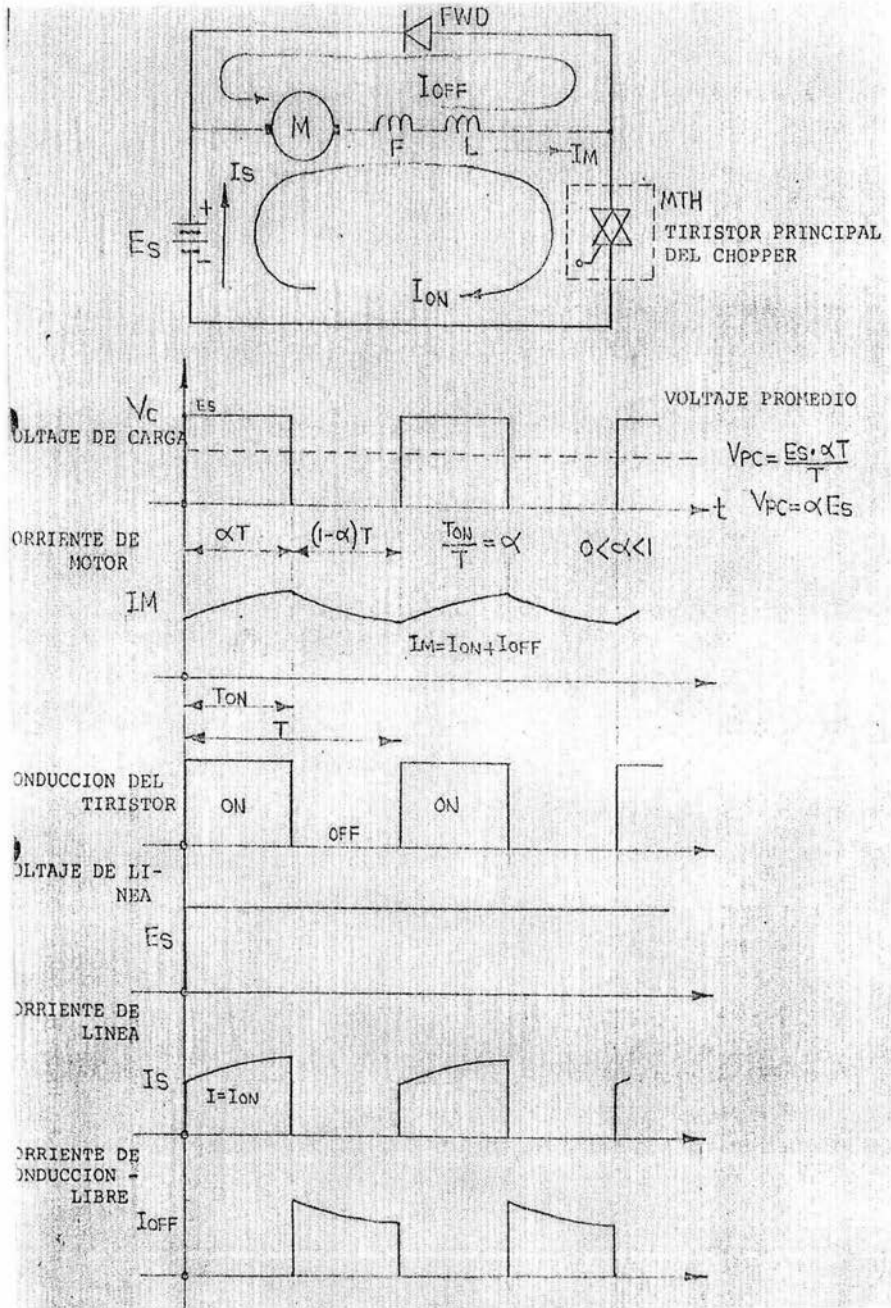


Figura2

Durante el tiempo de conducción, la corriente la suministra la línea y, la forma de onda aumenta en forma exponencial debido a la inductancia L . Durante el tiempo en el cual el tiristor no conduce, la corriente que anteriormente circulaba por el tiristor, se desvía por el diodo de

conducción libre. La energía electromagnética almacenada en L provoca una corriente de forma exponencial decreciente, que también pasa por el motor.

La corriente en el motor esta constituida por las dos componentes anteriores:

$$I_M = I_{on} + I_{off}$$

La corriente suministrada por la línea (I_s), es discontinua y, la de los motores es continua debido al efecto del circuito de conducción libre.

5.3 El tiristor de conducción inversa.

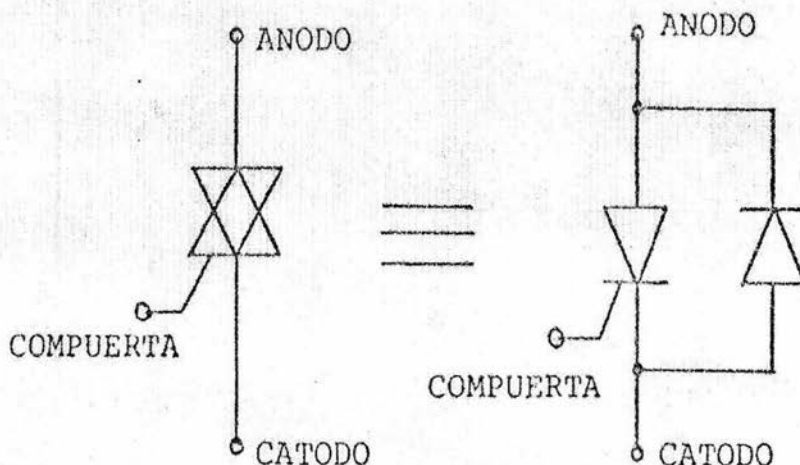


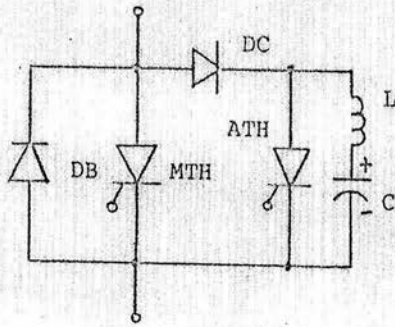
Figura 3

TIRISTOR DE CONDUCCION INVERSA.

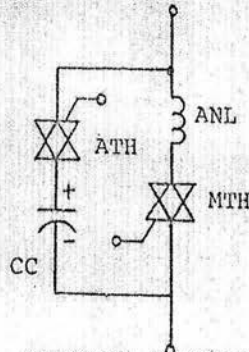
EQUIVALENTE ELECTRICO.

El tiristor de conducción inversa conduce de ánodo a cátodo al aplicarle a su compuerta un pulso positivo con respecto al cátodo, en esto es semejante a un SCR convencional, pero además tiene una habilidad de conducir de cátodo a ánodo. El circuito equivalente representado en la figura 3, nos indica que el tiristor de conducción inversa es eléctricamente igual a un tristor convencional que tiene conectado en paralelo un diodo inverso.

Como este arreglo es utilizado en un chopper, utilizando el tiristor de conducción inversa se eliminan componentes y, por consecuencia se reduce al tamaño y costo de los circuitos de potencia. Ver figura 4.



CIRCUITO TÍPICO DE CONMUTACION CON TIRISTORES Y DIODOS CONVENCIONALES.



CIRCUITO MINIMIZADO DE CONMUTACION, USANDO TIRISTORES BIDIRECCIONALES.

Figura4

Una vez que un tiristor conduce, seguirá en este estado aunque desaparezca el pulso de compuerta, es decir que ya no obedece al control de la compuerta. Para que deje de conducir el tiristor, se requiere de un circuito auxiliar de conmutación que se mostrara mas adelante.

5.4 Circuito completo de un chopper de una sola fase.

En la figura 5 se representa un diagrama completo, de un chopper de una sola fase.

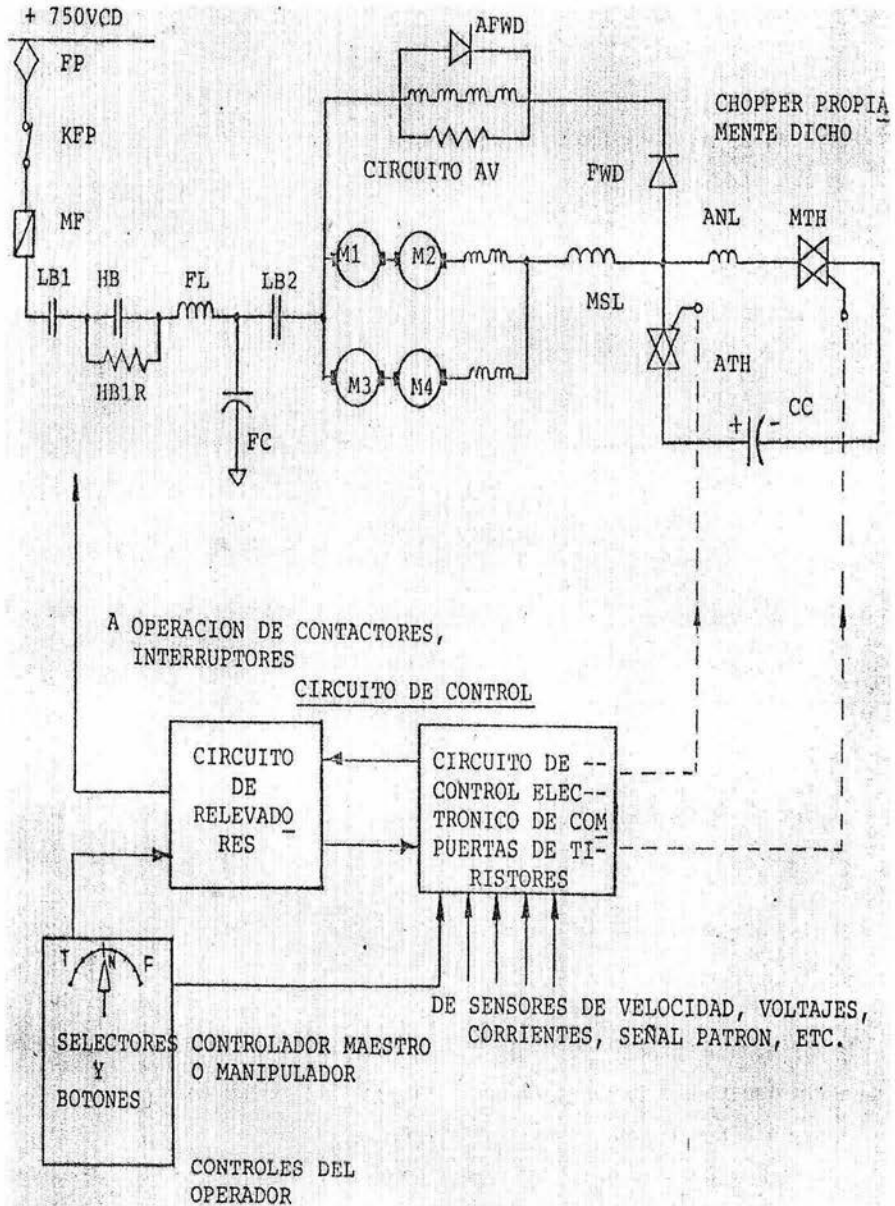


Figura 5

El chopper para el Metro de México, consta de dos fases. Pero por simplificación se ha tomado el ejemplo con una sola fase.

El voltaje de línea es de 750 VCD., este se alimenta a través de escobillas "FP" hacia el equipo chopper.

Un tren consta de varios carros motrices y, cada uno de estos carros motrices lleva colocado en su parte inferior un equipo chopper. Un chopper controla a 4 motores de tracción. El diagrama de la figura 5, nos muestra los principales componentes del circuito de potencia del chopper: En primer termino tenemos un switch manual "KFP" para desconexión de la línea, fusible principal "MF", un interruptor de línea "LB1", interruptor rápido "HB" con apertura por sobre corriente, filtro de entrada formado por el reactor "FL" y el condensador "FC", interruptor de línea "LB2".

Por simplificación no se muestra en contactor que cambia el circuito de fuerza, de la configuración de tracción a la de frenado. Tampoco se muestra el contactor para inversión de sentido de marcha, adelante-atrás, que actúa sobre las armaduras de los motores. La conexión de los motores es de los grupos de dos motores en serie y luego emparalelados entre si.

El reactor MSL sirve para aislamiento de la corriente, hacia la derecha tenemos el chopper propiamente dicho, se compone básicamente de un tiristor principal MTH, un tiristor auxiliar ATH, un reactor de ánodo y un condensador de conmutación.

En la parte superior del diagrama tenemos el diodo de conducción libre FWD y el circuito de variación automática de campo "AVF".

Los motores de tracción, son motores de C.D. tipo serie, pero su campo se encuentra separado en dos partes una parte va conectada en serie con la armadura, y la otra parte el lazo de conducción libre.

La corriente "IAVF" que circula en el lazo de conducción libre, varía de máximo a cero conforme aumenta la relación de conducción α del chopper. Es decir que a mayor tiempo de conducción, el tiempo de apagado del chopper es menor, por consecuencia la corriente IAVF tendera automáticamente a cero. El debilitamiento del campo de los motores se efectúa automáticamente, de manera indirecta. Y, proporcionalmente al voltaje en los motores.

5.5 circuito de conmutación.

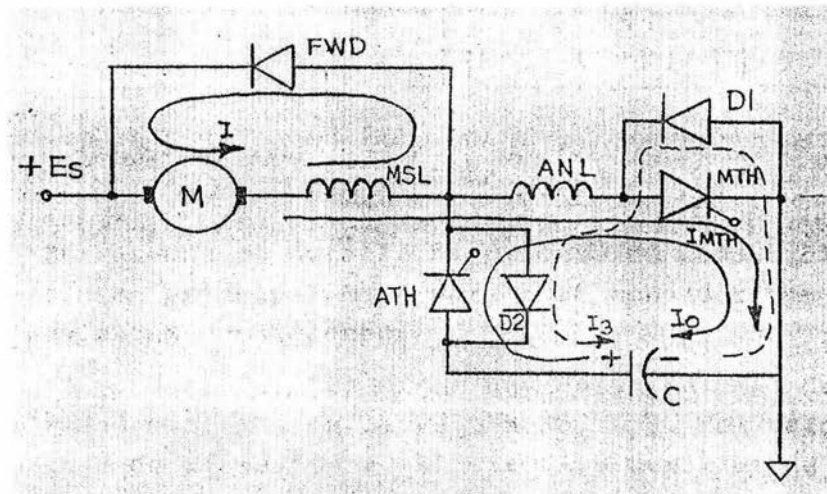


Figura 6

Recuerdese que, durante el tiempo de conducción, la corriente circula de la fuente hacia los motores, reactor MSL y tiristor principal MTH. Al dejar de conducir el chopper, la corriente se

desvía por el diodo FWD, formando un lazo de circulación libre. Posteriormente el chopper entra en conducción y, el proceso se repetirá indefinidamente.

El pulso de conducción del tiristor principal, llega a una frecuencia constante. (219 Hz/ fase para el Metro de México).

El tiempo de conducción (T_{on}) del tiristor principal es variable, dentro de un periodo constante (T). lo que significa que se modula el tiempo de conducción. Esto se muestra en la figura 7. La posición y frecuencia del pulso "OFF" es constante, pero variando la posición relativa del pulso de "ON" con respecto al pulso de "OFF" nos determinara un tiempo de conducción variable.

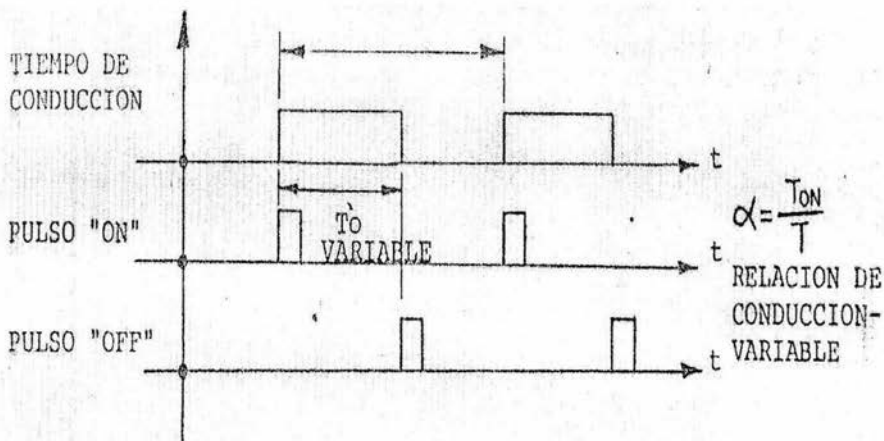


Figura 7

Entraremos en detalle al proceso de conmutación del tiristor principal MTH, para esto consideramos las siguientes condiciones:

1.-El condensador "C" tiene una carga inicial de la polaridad mostrada en la figura 6 y, del valor del voltaje de línea "Es". El circuito auxiliar de carga del condensador no se muestra en la figura.

2.-El circuito ya funcionaba con anterioridad, es decir que hay una corriente inicial "I" circulando por el diodo FWD y el reactor principal MSL. (Tiempo de apagado del chopper).

Las curvas de los parámetros principales que intervienen en la conmutación, se muestran en la figura 8.

La corriente inicial I que circula en el lazo de conducción libre trata de disminuir exponencialmente al llegar el pulso de "ON" a la compuerta del tiristor principal MTH este conduce y, la corriente crece exponencialmente (intervalo de tiempo t_1).

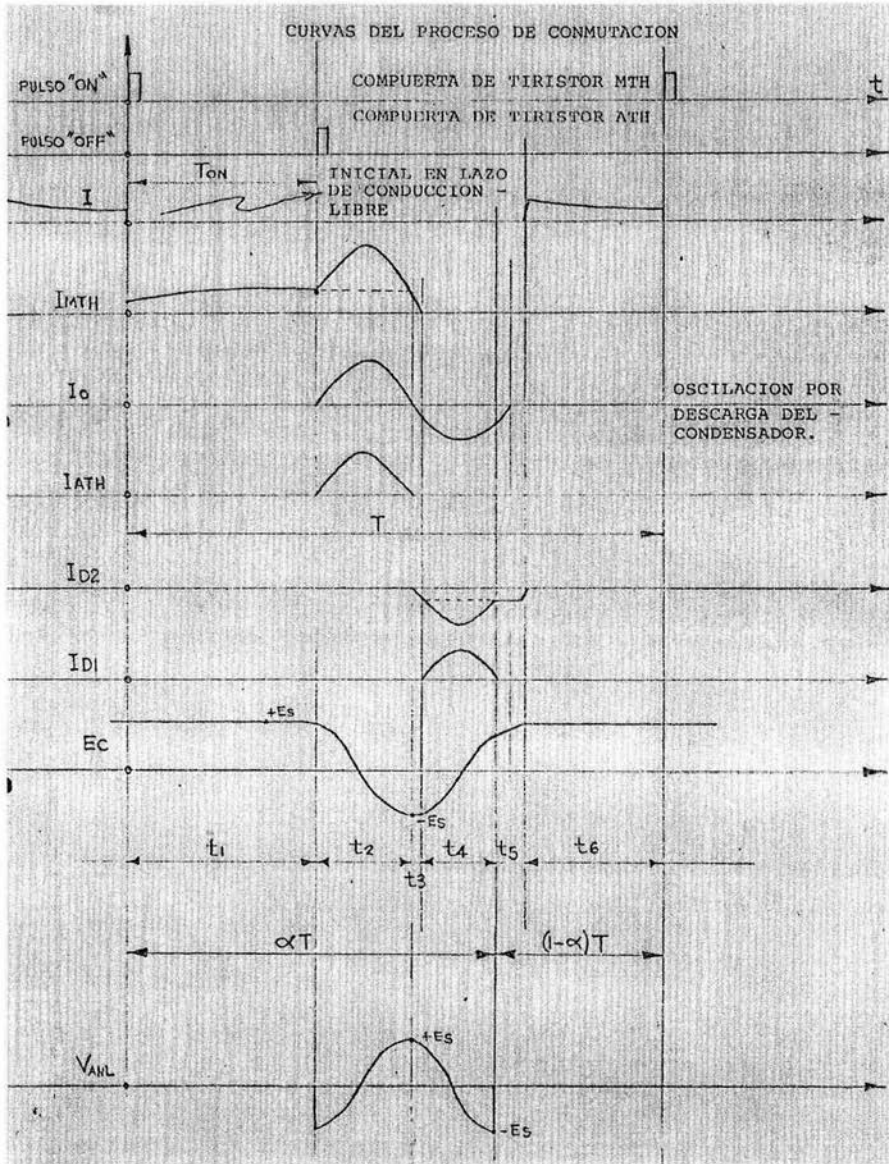


Figura 8

Al final del intervalo de tiempo t_1 , llega el pulso de "APAGADO" a la compuerta del tiristor auxiliar ATH, este conduce y descarga el condensador.

Esta descarga provoca una corriente oscilatoria " I_o ", que circula a través de ATH, ANL y MTH, sumándose a la corriente que inicialmente circulaba por el tiristor MTH, esto ocurre en el primer semiciclo de la oscilación (Intervalo de tiempo t_2).

Al final de tiempo t_2 , el condensador queda cargado negativamente y, la corriente de oscilación " I_o " se invierte. Ahora la corriente " I_o " circula por MTH, ANL y D2 en sentido inverso al inicial. (Intervalo de tiempo t_3).

En el intervalo t4 la corriente (I3 en la figura 6) circula también en sentido inverso pero por el diodo D1, ANL y D2; el condensador se descarga y trata de volver a cargarse positivamente. Al final del tiempo t4 el tiristor principal MTH ha quedado conmutado.

Durante el intervalo de tiempo t5, la corriente continúa fluyendo por el motor, por MSL y el diodo D2. Esto contribuye a la carga más rápida del condensador C.

Al final del tiempo t5, el tiristor ATH se conmuta una vez que el condensador llega a una carga de valor igual al de la fuente (Es).

En este momento el circuito queda preparado para el siguiente proceso de conmutación y la corriente (I) circula por el circuito de conducción libre (motor, MSL y FWD).

5.6 Funcionamiento del chopper en frenado.

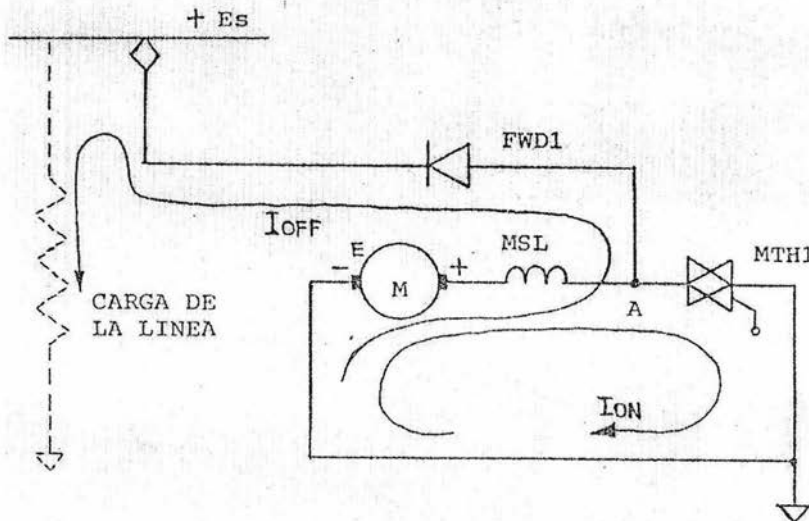


Figura 9

En la figura 9, se muestra la configuración del circuito de potencia durante el frenado regenerativo. Durante el periodo de conducción del chopper, como los motores trabajan como generadores, provocan una circulación de corriente a través de los motores, MSL y MTH1. La corriente crecerá en forma exponencial en este periodo y se almacena energía en el reactor MSL.

Al conmutarse el tiristor MTH1, la corriente se desvía por el diodo FWD1 regresando a la línea de alimentación.

El voltaje del punto (A) será:

$$V_a = E - RI + L \, di/dt$$

Este voltaje V_a llega a ser mayor que el de la línea ocurriendo así la regeneración hacia la línea, para contribuir a la demanda de otras cargas de la línea, pueden ser otros trenes sobre la vía.

El termino $(E - R I)$ deberá ser inferior al voltaje de la línea, solo el aumento instantáneo $L di/dt$ debido a la conmutación del tiristor MTH1 permitirá que el voltaje del punto A sea mayor que el de la línea.

5.7 Frenado dinámico.

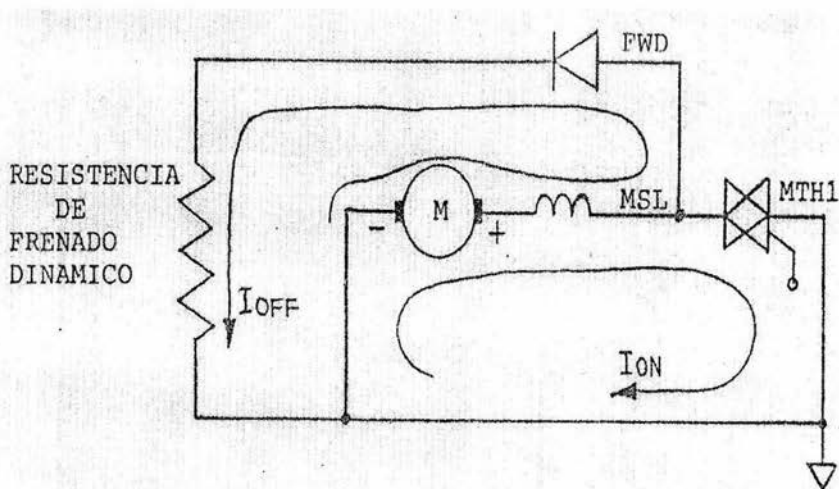


Figura 10

En la figura 10, se muestra la condición de un frenado dinámico. Cuando no hay carga en la línea que pueda absorber la energía se disipa mediante una resistencia.

Además si el frenado comandado no es suficiente, el tren cuenta con un frenado neumático.

5.8 Oscilograma del funcionamiento del chopper.

Las curvas de operación se muestran en la figura 11 en ellas se representa el voltaje de la línea E_c , el voltaje de motores E_m , la corriente de la línea I_s , la corriente de motores I_m , la corriente de fase del chopper I , la velocidad S , la corriente del circuito variación de campo I_{AVF} , la señal de frenado neumático EMD , y las ordenes de tracción y frenado.

Inicialmente el manipulador (switch control maestro) esta en posición neutral "N". Se coloca luego en la posición de tracción T2 y la corriente de motores aumenta a 515 amperes, esta regulada constante durante un momento, el voltaje de los motores y la velocidad se incrementa simultáneamente. El voltaje tiene un límite en la posición T2 del manipulador, en ese momento la corriente de motores baja y el motor seguirá según su curva característica para este voltaje de 380 V.

Entonces vemos que la corriente de motores disminuye.

La corriente I_{AVF} al inicio es alta, pero automáticamente el campo se debilita al aumentar la relación de conducción.

Posteriormente el manipulador se pasa a neutral y luego a una posición de frenado F3 con una fuerza constante, y la velocidad disminuye desde 1910 RPM (38 KM/H) hasta el paro.

En 6 KM/H termina el frenado regenerativo.

Oscilograma,

5.9 Ventajas del sistema chopper.

- A) Como todos sus componentes son estáticos hay una reducción en gastos de mantenimiento. Además el mantenimiento se simplifica.
- B) El chopper no usa las resistencias tradicionales de arranque y frenado para los motores de tracción, lo que significa un ahorro en energía eléctrica, antes disipada en forma de calor. Durante el frenado regenera energía hacia la línea, pudiéndose aprovechar esta en otra forma o ser consumida por otros trenes.
- C) El arranque y frenado se efectúa con suavidad, porque se limita la aceleración a un valor tal, que no produzca incomodidad a los pasajeros. La corriente se controla a valores constantes y los cambios de corriente no son repentinos, sino siguen una curvatura, dada por la señal patrón.
- D) Las partes móviles o mecánicas minimizadas, aseguran una confiabilidad y un mayor tiempo de vida.

Capítulo 6 - SISTEMA CHOPPER.

6.1 Características del sistema chopper.

El control chopper se compone de dos grandes unidades: la caja del chopper y la caja de interruptores.

Dentro de la caja del chopper se encuentran las siguientes secciones:

- 1.-Celdas de tiristores bidireccionales.
- 2.- Circuito de compuertas de tiristores.
- 3.-Reactores de conmutación.
- 4.-Sección de tarjetas electrónicas impresas, conteniendo circuitos integrados.

Las secciones anteriores efectúan la función de regulación. Los tiristores conducen y se apagan o conmutan a una frecuencia constante de 219 ciclos/seg., por cada fase.

Variando el tiempo de conducción de los tiristores con respecto al tiempo de apagado dentro de un ciclo constante, se varía la corriente promedio en los motores de tracción.

Esta corriente durante el arranque se controla a un valor constante, lo que significa fuerza de tracción, constante para el tren y se traduce en una aceleración constante e incremento lineal de velocidad.

La aceleración se limita a $1.4 \text{ M/seg}^2 = 5.04 \text{ km/Hr/seg.}$, para confort de los pasajeros.

Durante el frenado se mantiene una fuerza de frenado constante. Se emplea el frenado regenerativo, es decir se regresa potencia a la línea de alimentación, de ser necesario se agrega frenado neumático.

Características generales:

Un chopper controla 4 motores de tracción de capacidad de 138 kw cada uno.

Potencia continua del chopper = 512 kilowatts.

Voltaje de operación = 750 volts de C.D.

Corriente máxima durante aceleración = 1300 Ampers.

Frecuencia del chopper = 438 Hertz/2 fases.

Velocidad del tren = 80 Km/Hr.

6.2 Prueba de combinación.

En esta prueba se verifica el comportamiento dinámico del equipo chopper, con carga.

Se comprueba además la característica de operación de los reguladores de corriente y de voltaje, tanto en la etapa de motorización como en la regenerativa (tracción-frenado) se utiliza una subestación rectificadora de alta potencia para suministrar la potencia requerida por el chopper.

Para dar carga mecánica a los motores, se cuenta con volantes de inercia equivalentes a un carro de tren durante la regeneración de corriente hacia la línea, se usa una resistencia líquida para consumir la potencia regenerada por el sistema y que es consumida por otros trenes.

6.3 Pruebas a efectuar al chopper y sus componentes.

- 1.- Pruebas de aislamiento.
- 2.- Prueba dieléctrica.
- 3.- Ajuste de transformadores de potencial C.D.
- 4.- Ajuste de transformadores de corriente C.D.
- 5.- Mediciones de corriente de compuerta de tiristores.
- 6.- Mediciones de voltaje en tiristores y diodos.
- 7.- Medición de corriente en tiristores.
- 8.- Prueba de fugas de aire.
- 9.- Operación y ajustes de relevadores.
- 10.-Prueba de alambrado y secuencia.
- 11.-Prueba de interruptores rápidos con carga.
- 12.-Prueba de combinación de todos los conjuntos del sistema de chopper, simulando la operación del carro, sobre la vía.
- 13.-Mediciones de nivel de ruido.
- 14.-Pruebas de elevación de temperatura.

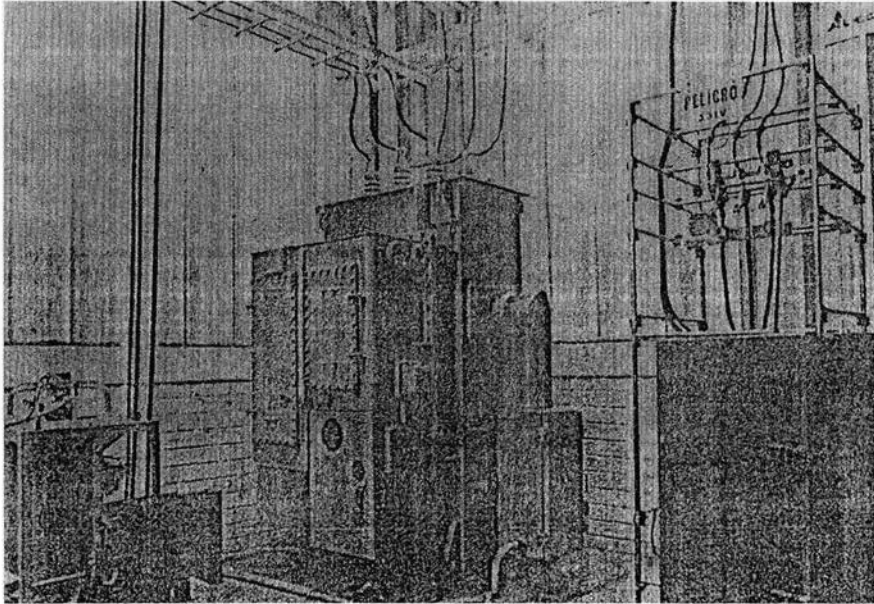
Características del equipo.

- 1.-Subestación rectificadora.

Características:

Transformador con cambiador de tap's bajo carga.

550	KVA.
3300/772	V
96/411	AMP



Características de equipo.

2.-Equipo de simulación de carga.

Características:

4 motores * 128 KW = 512 KW

360 V

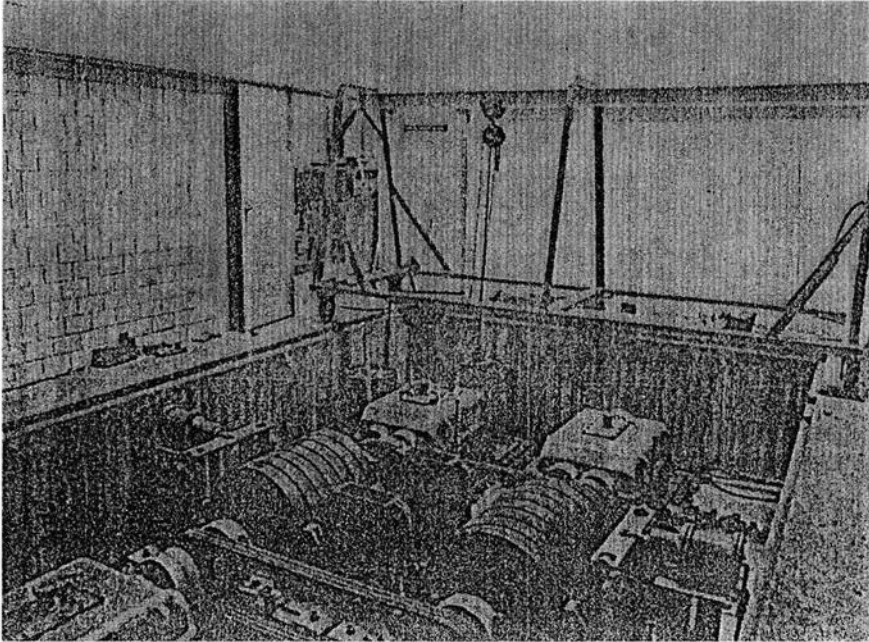
Reductores.

4080/2000 R.P.M.

2 volantes de inercia.

2000 R.P.M.

$GD^2 = 78.5 \text{ KGM}^2$



Características de equipo.

3.-Resistencia líquida.

Características:

550	KW.
1000	VCD.
500	A.

Programa de pruebas.

1.-Arranque en tracción T1 hasta 700 RPM., en este punto no entra el frenado regenerativo por ser muy baja velocidad, debiendo de ser utilizado el frenado neumático.

2.-Arranque en tracción T3 hasta 2000 RPM., frenado F3 hasta parar.

3.-Arranque en tracción T3 hasta 2500 RPM., frenado F3 hasta parar.

Motivo de la pruebas 1,2 y 3:

Verificación del regulador de voltaje (AVR) tracción y del regulador de corriente (ACR) en frenado. A diferentes límites de voltaje.

4.-Arranque en diferentes puntos de tracción, T1→T2→T3,hasta 2000 RPM.,y luego frenado F1→F2→F3.

Motivo de la prueba:

Verificación del regulador de voltaje en tracción y del regulador de voltaje en frenado, pero con condiciones variables. Transición de un estado a otro en forma incremental.

5.-Arranque en diferentes puntos de tracción, T3→T2→T1, hasta 1600 RPM.,y luego frenado F3→F2→F1.

Motivo de la prueba:

Verificación de los reguladores de voltaje y corriente, durante tracción y frenado, con condiciones variables. Transición de un estado a otro en forma decreciente..

6.-Arranque en tracción T2 hasta 2000 RPM., frenado F2, supresión de la señal de permiso de frenado regenerativo en 1800 RPM.

Motivo de la prueba:

Verificar el funcionamiento del frenado dinámico y el regulador de corriente durante la transición de frenado regenerativo a frenado dinámico.

7.-Arranque en tracción T2 hasta 2000 RPM, frenado F2, apertura de la carga de la línea en 1500 RPM.

Motivo de la prueba:

Verificación del detector estático de sobrevoltaje en frenado y el cambio de frenado regenerativo a frenado dinámico o, dependiendo de las condiciones de la línea, verificar la operación del relevador de protección de sobrevoltaje.

6.4 Características del chopper para el metro de México.

TREN.

Composición del tren: consta de 9 carros, 6 motorizados y 3 remolques.

Potencia/carro = 4 motores * 128 KW = 512 KW

Potencia del tren = 3072 KW (continua).

Velocidad máxima = 80 KM/h.

Aceleración máxima = 1.4 M/seg² (T), 1.33 M/seg² (F).

Numero de motores = 24.

Numero de chopper/tren = 6.

Frenado: Regenerativo, dinámico y neumático.

MOTORES DE TRACCION.

Potencia = 128 KW (continuos), 138 KW por una hora.

Tipo = Motor de C.D.

Voltaje = 360 V.

Corriente = 395 ACD, continuos.

Velocidad máxima = 4054 RPM.,35% campo de operación.

LINEA DE ALIMENTACION.

Voltaje = 750 VCD nominal (900 V - 600 V.).

CHOPPER.

Numero de fases = 2.

Frecuencia total = 438 Hz.

Tiristores principales = 2 en paralelo/fase, (FR-600AX-50).

Tiristores auxiliares = = 2 en paralelo/fase, (FR-600AW-50).

Enfriamiento = Ventilación forzada (aire, 50 M³/min.).

SISTEMA DE CONTROL.

1.-Regulador de corriente (ACR) para tracción y frenado.

2.-Regulador de voltaje (AVR) para tracción y frenado.

3.-Limitadores.

A) Limitador de aceleración durante tracción, a 1.4 M/seg²., máximo valor para confort de los usuarios.

B) Limitador de corriente durante tracción, por bajo valor del voltaje de línea.

C) Limite de corriente cuando hay patinaje en las ruedas, durante tracción o frenado.

D) Limite del sobrevoltaje en la línea durante el frenado regenerativo.

E) Limite del voltaje de motores durante el frenado regenerativo.

DETECTORES.

A) CD, Detector de sobrecorriente en las fases del chopper.

B) EMOVD, Detector de sobrevoltaje en motores.

C) OVD, Detector de sobrevoltaje en la línea durante frenado regenerativo.

D) IMOCD, Detector de sobrecorriente de motores.

E) IPHOISOCD, Detector de sobrecorriente de la línea.

F) ISDFD, Detector diferencial de sobrecorriente de la línea.

G) PSGD, Detector de la señal patrón.

H) IPHUCD, Detector de caída de corriente de las fases del chopper.

I) SLPD, Detector de patinaje en las ruedas.

J) IMDFD, Detector diferencial de corriente de motores.

K) ACLVD, Detector de bajo voltaje de C.A.

CONCLUSIONES:

La aplicación del chopper en el frenado del sistema de transporte colectivo metro es uno de los temas y estudios mas interesantes para lo cual fue realizado este trabajo, ya que la ingeniería eléctrica es un campo muy amplio que nos permite conocer elementos que requieren de un estudio minucioso y así poder obtener muchas más aplicaciones dentro del mismo campo de la ingeniería eléctrica.

El chopper siendo un semiconductor de potencia su función puede compararse a la de un transformador de corriente directa; es decir, transforma un voltaje de corriente constante como sucede en el caso del voltaje utilizado dentro de la línea del metro a un voltaje de corriente directa, pero es de un valor ajustable a las necesidades del sistema de frenado y que es utilizado para los equipos de tracción del metro.

El uso de los dispositivos semiconductores responden a las exigencias tan grandes en cuestión de seguridad, la electrónica de potencia nos permite por medio del estudio antes realizado que la aplicación de los semiconductores es de suma importancia en nuestra vida cotidiana, ya que nos permiten la realización de procesos complejos destinados a la automatización de procesos eléctricos-electrónicos.

En general cualquier conversión de energía eléctrica se puede realizar por procedimientos electromecánicos o por procedimientos electrónicos. Los dispositivos electrónicos encargados de realizar algunas conversiones poseen muchas ventajas comparados con los dispositivos electromecánicos utilizados dentro de la Ingeniería.

Poseen mayor flexibilidad y mayores rangos de control en sus distintas aplicaciones, mayor estabilidad y una mejor respuesta gracias a sus características eléctricas, necesitan muy poco mantenimiento como se observo dentro del estudio realizado ya que no disponen de partes mecánicas únicamente ocurren desgastes en las conexiones eléctricas del choppers debido a los falsos contactos que ocurren durante la operación del mismo.

Estos semiconductores tienen la ventaja de un mayor tiempo de vida debido a los materiales con los que han sido construidos, es así que el tiempo aproximado de vida del chopper en el sistema de transporte colectivo de la ciudad de México es aproximadamente de 18 años por lo cual también son equipos con un alto valor de fiabilidad en el frenado del metro. Algunos inconvenientes en los equipos de electrónica de potencia es que son equipos no muy robustos que se disponen a soportar grandes sobrecorrientes y sobretensiones.

La función principal del chopper es como alimentador de los motores de tracción, frenado del mismo y como generador de recuperación de energía, y como ya se había comentado al principio, que cuando se almacena mucha energía se manda a un banco de resistencias para que se disipe esta energía en forma de calor.

En cuanto al mantenimiento que se le da a las partes eléctricas y electrónica es mínima, su principal falla se encuentra en las terminales de conexión ya que en dichas terminales se producen falsos contactos por lo cual se crea un calentamiento en la tabla que contiene los tiristores (chopper), por lo tanto el mantenimiento que se le da solo es preventivo, se reemplazan las fuentes de alimentación para las distintas partes de la lógica de control ya que cuenta con diferentes tarjetas con las cuales opera el chopper, estas fuentes son de 15 V positivos y 15 V negativos y una de 5 V para diferentes relevadores de control.

Y su vida promedio del chopper en condiciones de uso constante hablando de 365 días del año y un horario de trabajo de aproximadamente 20 diarias, el modelo de chopper del que estamos hablando lleva cerca de 25 años y hasta la fecha.

Este chopper es de origen japonés de marca Mitsubishi que llegó en 1979 y hasta la fecha se puede decir que entre el 75 – 80 % del material rodante cuenta con este tipo de equipo por eficiente y tener un bajo costo en mantenimiento y en sus refacciones por ser un diseño sencillo y por contar con componentes fáciles de adquirir.

Este equipo se encuentra en los carros que tienen motores como son los que tienen una letra M que es un carro con motores y cabina, el otro es el identificado con la letra N que es un carro con motores y sin cabina.

Este tipo de material rodante solo entra a los talleres cuando se les da limpieza, cambio de llantas o una falla que le impida seguir en servicio, otra cosa por comentar es que el tren entra para un mantenimiento mayor el cual consiste en desmontar todo, desde bogie que es donde está montada la carrocería, se revisan todas las partes

BIBLIOGRAFÍAS.

1.-*Muhammad H. Rashid* en su libro "Power Electronics Circuits, Devices and Applications" (Prentice Hall 1993) considera que la Electrónica de Potencia combina potencia, electrónica y control. El Control se ocupa de las características estáticas y dinámicas de los sistemas en lazo cerrado. La Potencia se encarga de los sistemas de potencia móviles y estáticos para la generación, transmisión y distribución de la potencia eléctrica. Por último la Electrónica trata con los componentes de estado sólido y circuitos para el tratamiento de señales con el objetivo de obtener el control necesario. Por tanto **Electrónica de Potencia se puede definir como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y conversión de la potencia eléctrica.**

2.-*Bimal K. Bose* en la introducción del texto "Power Electronics and Variable Frequency Drives" (IEEE Press 1996) menciona como **la Electrónica de Potencia combina la conversión y el control de la potencia eléctrica para diversas aplicaciones**, tales como fuentes de alimentación reguladas AC y DC, control de iluminación y calefacción, soldadura eléctrica, procesos electroquímicos, calentamiento por inducción, control de máquinas DC y AC, etc.

3.-*Apuntes sobre los Sistemas de Potencia de la Universidad de Valencia*. En donde se clasifican los sistemas de potencia, sus campos de aplicación, visión de los sistemas de potencia y los componentes de la base de la electrónica.

4.-*Manual del sistema de frenado (chopper) del sistema de transporte colectivo*. En el cual se define ampliamente el sistema de frenado chopper, así como, especificaciones técnicas para el funcionamiento óptimo de este sistema ya que está diseñado para la Ciudad de México.

5.-*Apuntes de mantenimiento y cálculos para el sistema de tracción*. En el cual nos explica las diferentes constantes que existen para el cálculo del material rodante (tren), así como para el tipo de fuerza que se utiliza para mover el tren y para frenar una vez que se llega al andén.