



14
Zej
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**TRANSMISION DE ENERGIA
ELECTRICA EN CORRIENTE
CONTINUA Y ALTA TENSION**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
PRESENTAN:**

**OMAR ENRIQUE ALVARADO RANGEL
RAMON ARRIOLA RAMIREZ
JAVIER LOPEZ LEON
LUISEL JONATAN TORRES CORTES**



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 está 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.

INDICE

<u>INTRODUCCION</u>	I
<u>CAPITULO I</u>	
Ventajas de la Transmisión de Energía Eléctrica en Corriente Directa y Alta Tensión	I
<u>CAPITULO II</u>	
Posibilidades de Transmisión de Energía Eléctri ca en Corriente Continua en México	20
<u>CAPITULO III</u>	
Análisis del Funcionamiento de los Convertidores (C.A.-C.D.-C.A.)	28
<u>CAPITULO IV</u>	
Líneas de Transmisión de Energía Eléctrica en C.D. y Alta Tensión	56
<u>CAPITULO V</u>	
Control del Sistema de Corriente Continua	74
<u>CAPITULO VI</u>	
Protección de los Convertidores y del Sistema de C.D.	95
<u>CONCLUSIONES</u>	119
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	121
<u>APENDICE A</u>	123

INTRODUCCION

Aunque las técnicas de transmisión de energía eléctrica por medio de corriente continua no son muy conocidas en el mundo, existe un creciente interés por estos sistemas. Las ventajas, tanto técnicas como económicas, que ofrecen los sistemas de C.D. sobre los tradicionales sistemas de C.A. y el avance tecnológico en el campo de los semiconductores, han originado que muchos países adopten a la corriente directa como una solución al problema de transmisión de energía eléctrica.

Una línea de corriente continua normalmente requiere bajos niveles de aislamiento, no porta en absoluto la usual potencia reactiva y solo utiliza dos o quizás un conductor en lugar de tres como en el caso de C.A. Las pérdidas por efecto corona son menores para corriente continua que para corriente alterna, además, en un sistema de C.D. no se presentan problemas de estabilidad.

Al combinar las ventajas de los sistemas de C.D. con las ventajas de los sistemas de C.A. (ventajas tales como la elevación de voltaje en los transformadores y la continuidad de potencia en los sistemas trifásicos balanceados) se aumenta enormemente la eficiencia de un sistema de potencia. Para lograr esto, es necesario, por lo tanto, rectificar el voltaje que proporciona una planta generadora, transmitir la energía en corriente continua y recuperar el voltaje alternante en una estación inversora al extremo de la línea de transmisión.

En los siguientes capítulos se analizarán cada una de las etapas que intervienen en la transmisión de energía eléctrica en C.D

y alta tensión, se justificarán las ventajas de los sistemas de C.D sobre los de C.A. y se discutirán las posibilidades que tiene Méxi-co de transmitir la energía eléctrica en corriente continua.

VENTAJAS DE LA TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA EN CORRIENTE DIRECTA Y ALTA TENSION

1.1 Desarrollo de los sistemas de corriente directa

Originalmente el suministro de energía eléctrica se hizo mediante corriente continua en baja tensión utilizando el generador de corriente directa desarrollado por Gramme en 1870, siendo gran parte de la carga del generador, lámparas incandescentes y algunos motores de corriente continua.

El aumento en la carga de este sistema originó problemas de regulación de voltaje, lo cual limitaba, por razones económicas, la distancia a que podía transmitirse ya que se hacía necesario instalar cable más grueso. Por otra parte, la posibilidad de elevar el voltaje en el sistema para reducir las pérdidas y aumentar la distancia de transmisión, según tesis presentada por Marcel Deprez en 1881 a la Academia de Ciencias de París, resultaba una imposibilidad puesto que en el conmutador del generador se rompería la rigidez dieléctrica del aislamiento de las delgas, no solo por la intensidad del voltaje sino también por la cercanía entre las mismas, ocasionando problemas por sobrecalentamiento en el generador.

Estos inconvenientes en la transmisión de energía eléctrica en corriente continua, junto con la aparición de los primeros sistemas de corriente alterna y sus evidentes ventajas sobre la corriente

te continua, originaron la discontinuación de los sistemas de C.D.

Únicamente en los últimos años, la corriente continua, para los fines de transmisión de energía, vuelve a considerarse económica. Esto se debe a las dificultades crecientes de usar corriente alterna en grandes sistemas de redes interconectadas y a la gran evolución experimentada por los equipos rectificadores e inversores de alta tensión, basados originalmente en la válvula de arco de mercurio controlada por rejilla, y actualmente por los rectificadores controlados de silicio (SCR).

El interés por los sistemas de corriente directa y alta tensión ha crecido enormemente durante los pasados 20 años, debido a que ofrece nuevas e interesantes posibilidades en el terreno de la transmisión de grandes bloques de potencia. Buena prueba de esto es el aumento en todo el mundo de sistemas de C.D. y alta tensión, los cuales se encuentran en países como Canadá, Japón, Inglaterra, así como en el África del Sur, Brasil y Paraguay (países no tan desarrollados como los primeros, FIGURA 1.1).

1.2 Ventajas técnicas de los sistemas de C.D.A.T.

Las ventajas de un sistema de corriente continua y alta tensión con respecto a uno de corriente alterna se hacen bastante evidentes al comparar éstos sistemas sobre la base de los factores que limitan la transmisión por C.A.

a.-) Tensión

Dos factores que limitan la tensión de funcionamiento de una línea aérea de C.A. son :

- Pérdidas por efecto corona e interferencias con las ondas de-

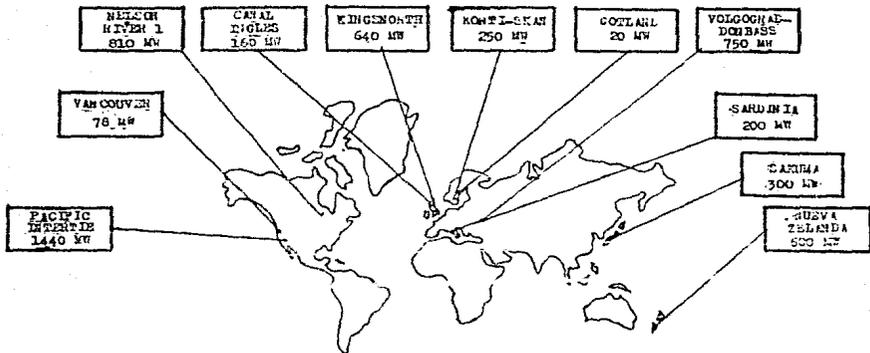
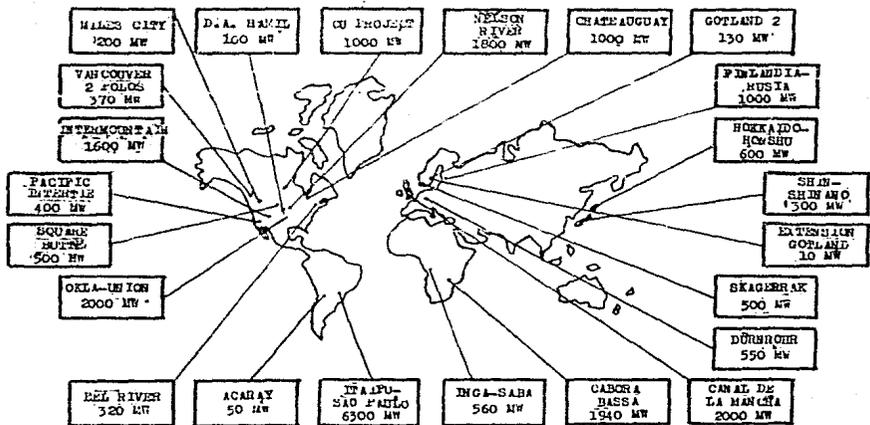


FIGURA 1.1

SISTEMAS DE C.D.A.T. EXISTENTES EN LA DECADA DE LOS 60'S Y LOS AC-
TUALES HASTA 1986



radio.

- Sobretensiones debidas a maniobras y rayos.

A continuación se analizan cada uno de estos factores:

- Pérdidas por efecto corona y radiointerferencias

El gradiente de potencial en la superficie de un conductor en el aire ocasiona descargas si dicho gradiente excede de un valor crítico, estas descargas se producen por la ionización del aire que rodea al conductor y que se manifiesta por una crepitación y por una luminosidad azulada que puede percibirse en la obscuridad, los iones libres del aire acelerados por el intenso campo eléctrico producen la ionización de moléculas neutras por choque, de tal manera que las pérdidas por efecto corona son de dos clases: 1) pérdidas de energía necesaria para la ionización, 2) pérdidas de energía necesaria para desplazar las cargas; esta última clase de pérdidas es mucho mayor en corriente alterna que en corriente continua debido a que los iones repelidos por el conductor al momento de tener una polaridad igual, son atraídos al cambiar la polaridad del conductor con lo que se reinerza la carga y la intensidad del campo en la superficie del conductor, lo que causa que la ionización por choque se reinicie antes de que el voltaje haya vuelto a alcanzar el valor crítico.

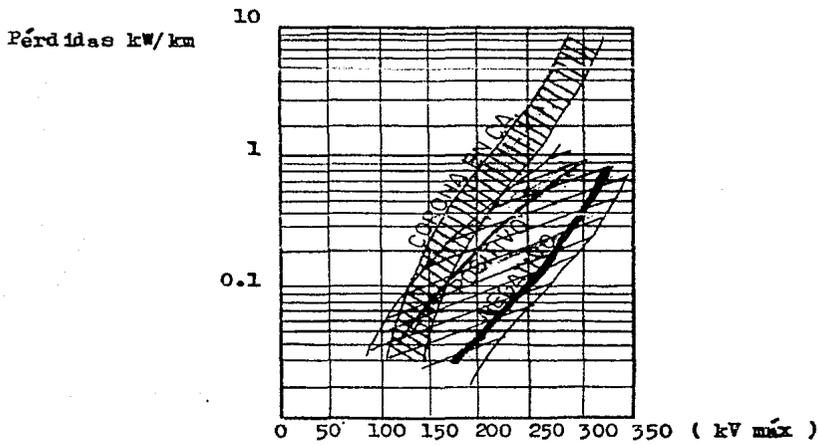
Las descargas originadas por el efecto corona también ocasionan interferencias con las comunicaciones.

Se puede demostrar que el gradiente de potencial en la superficie de un conductor está dado con gran aproximación, por:

$$E = \frac{V}{r \ln(D/r)} \quad (\text{kV/m})$$

Quando E se hace aproximadamente igual a 2.1×10^3 kV/m, el

aire en condiciones normales (ambiente no contaminado), se hace conductor y comienza la descarga por efecto corona. Este valor de descarga varía considerablemente, dependiendo del estado de la superficie del conductor; por ejemplo, en atmósfera viciada y húmeda puede bajar al 70% del valor indicado. En la figura 1.2 se muestra una gráfica de las pérdidas por efecto corona en relación con la tensión de cresta medidas en una línea aérea de C.A. y alta tensión típica. En la misma gráfica se muestran las pérdidas obtenidas al transmitir corriente continua por la misma línea a la misma tensión. Se observa que las pérdidas por efecto corona son mayores para la transmisión en C.A. que las obtenidas en C.D., teniendo el polo negativo un mayor margen de variación de pérdidas que el polo positivo, aunque, en general, las radiointerferencias reales causadas por el polo negativo son menores que las causadas por el positivo.



- Nivel de Aislamiento

El nivel de aislamiento necesario en una línea de transmisión de alta tensión está determinado por la magnitud de las sobretensiones transitorias que puedan ocurrir. Estas sobretensiones pueden originarse internamente por maniobras de conexión, resonancia, etc., o bien pueden ser inducidas del exterior, debido a causas atmosféricas. Normalmente, esta última causa es la más severa.

Para resistir estas tensiones transitorias, el aislamiento debe ser suficiente, pero, evidentemente es antieconómico prevenirse contra todas las contingencias. En consecuencia, el equipo se diseña para soportar tensiones hasta un cierto valor llamado Nivel de Aislamiento Básico (BIL), y se emplean descargadores o pararrayos para proteger el aislamiento normal contra tensiones anormales. Debido a que el equipo de la subestación es el más difícil de aislar, el aparellaje de protección contra sobretensiones se dispone con este equipo y las líneas aéreas se construyen de tal modo que el contornamiento de los aisladores no produce efectos perjudiciales.

Para aumentar la tensión de transmisión por C.M.A. no es necesario incrementar en la misma proporción el nivel de aislamiento básico. Esto es debido a que el contornamiento por causas atmosféricas es prácticamente independiente de la tensión de funcionamiento.

Sin embargo, los ensayos normalizados con ondas de tensión de impulso, no definen el aislamiento requerido para una línea o una subestación, pero los hechos han demostrado que los niveles de aislamiento de una línea de corriente continua y alta tensión son menores que los requeridos por una línea de corriente alterna. Un

simple cálculo demostrará que, para una misma potencia transmitida y un mismo porcentaje de pérdidas, la afirmación anterior es cierta y válida:

Considerando los diagramas de la figura 1.3, en donde se tienen dos conductores en el caso de corriente continua y tres en el caso de corriente alterna, la potencia del sistema de C.A. suponiendo que el factor de potencia es igual a 1, está dada por la siguiente expresión:

$$P = 3V_a I_a$$

La potencia del sistema de corriente continua es:

$$P = VI$$

Las pérdidas en corriente alterna y en corriente continua son, respectivamente:

$$P = 3I_a^2 R$$

$$P = 2I^2 R$$

Como las pérdidas son iguales en los dos casos, se tiene:

$$3I_a^2 R = 2I^2 R$$

$$I = \sqrt{3/2} I_a$$

Igualando las ecuaciones de las potencias y sustituyendo el valor de I en la expresión de la potencia para corriente continua:

$$3V_a I_a = \sqrt{3/2} I_a V ; \quad V = \sqrt{6} V_a$$

Suponiendo que el nivel de aislamiento para la línea de transmisión es proporcional al valor de cresta de la tensión a tierra:

$$\frac{\text{Nivel de aislamiento C.D.}}{\text{Nivel de aislamiento C.A.}} = \frac{V/2}{\sqrt{2} V_a} = \frac{\sqrt{6}/2 (V_a)}{\sqrt{2} V_a} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.87$$

Esto significa que el sistema de corriente continua, para —

TRANSMISION EN CORRIENTE ALTERNA

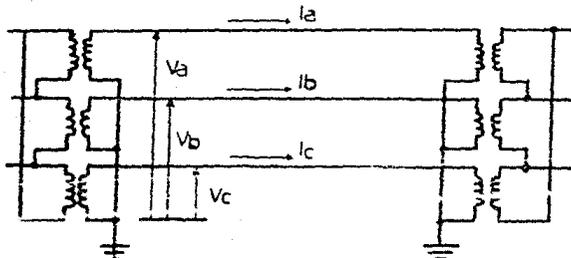
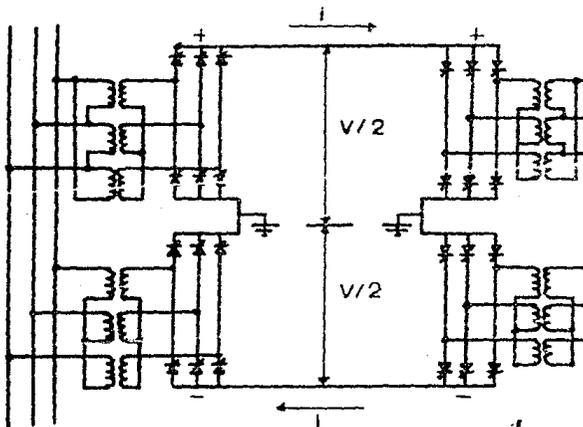


FIGURA 1.3



TRANSMISION EN CORRIENTE CONTINUA

transmitir la misma potencia, a la misma distancia, con las mismas pérdidas y el mismo calibre de conductores que el sistema de corriente alterna, requiere únicamente dos conductores, en vez de

tres, o sea el 67%, y una tensión a tierra cuya magnitud es el 87% del valor de cresta de la tensión del sistema de corriente alterna- y, por lo tanto, su nivel de aislamiento necesita ser únicamente el 87% del sistema de corriente alterna. Además es evidente que el número de aisladores y las dimensiones de las estructuras de soporte se reducen para el caso de corriente continua.

b.-) Longitud de una línea aérea de transmisión.

Los dos aspectos principales que limitan la distancia a la que se puede transmitir energía eléctrica por C.A., son:

- Regulación de tensión en el extremo receptor
- Estabilidad del sistema

Los conductores de la línea deben también tener una sección- tal, que las pérdidas I^2R no sean inadmisibles, pero se ha comproba do que la elección del conductor depende principalmente de la ten- sión de funcionamiento, la cual, a su vez, está determinada por la- longitud de la línea y el costo óptimo.

- Regulación de tensión en el extremo receptor

Si una línea de transmisión se conecta a una fuente de ali- mentación de impedancia interna Z , como se muestra en la figura 1.4 pueden aplicarse las siguientes ecuaciones:

$$V_s = E_o - Z I_s \quad \dots\dots (1)$$

$$V_s = A V_r + B I_r \quad \dots\dots (2)$$

$$I_s = C V_r + D I_r \quad \dots\dots (3)$$

donde:

E_o = f.e.m. generada

Z = impedancia del generador

además

$$AD - BC = 1$$

siendo las constantes iguales a:

$$A = \cosh(\sqrt{ZY})$$

$$B = (Z/Y) \sinh(\sqrt{ZY})$$

$$C = (Y/Z) \sinh(\sqrt{ZY})$$

$$l = \text{longitud de la línea}$$

En general, para una tensión V_s constante al principio de la línea, V_r variará con I_r de acuerdo con la ecuación (2), la diferencia entre V_r y V_s aumentará al crecer la longitud de la línea, es decir, la constante B.

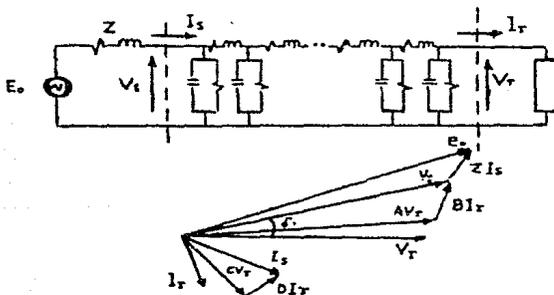


FIGURA 1.4

Puesto que las ecuaciones anteriores dependen tanto de la admitancia capacitiva como de la reactancia inductiva, es claro que al desaparecer la frecuencia, todos estos factores dejan de ser inconveniente. Sin embargo, es necesario reconocer que la corriente continua no siempre es la única alternativa, puesto que, a menudo, -

una frecuencia más baja - por ejemplo, 25 ó 16 2/3 Hz - puede reducir también los efectos de regulación de tensión. Sin embargo, es muy improbable que el costo de convertidores para la frecuencia reducida sea menor que el de convertidores para un esquema equivalente de corriente continua, habiendo posibilidad de tener un ahorro adicional en el equipo de transmisión reduciendo la frecuencia a cero.

- Estabilidad del sistema

El límite de estabilidad en régimen estacionario entre dos sistemas de C.A. se obtiene aproximadamente cuando una línea de interconexión transmite una potencia $P_{m\acute{a}x}$, dada cuando $\delta = 90^\circ$ en la siguiente expresión:

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \text{ sen } \delta$$

donde X es la reactancia serie de la línea (despreciando la resistencia óhmica) y δ es el ángulo entre los vectores V_s y V_r , como en la figura 1.4.

Fuero que ambos sistemas tienen operando máquinas rotativas debe dejarse un considerable margen para que los vectores V_s y V_r se muevan uno con relación al otro, sin que sea superada la $P_{m\acute{a}x}$. Este margen es necesario para tener en cuenta cualquier brusco de condiciones en un sistema respecto del otro.

La práctica usual es limitar δ a aproximadamente 30° bajo condiciones de régimen permanente, lo que permite un margen de 60° como mínimo para la oscilación de los vectores V_s y V_r antes de establecerse otra condición de régimen estacionario.

Si la potencia transmitida requerida para mantener la estabi

lidad fuese mayor que $P_{m\acute{a}x}$, los dos sistemas perderían sincronismo produciendo grandes fluctuaciones de potencia. En general, la magnitud de la inestabilidad depende de las dimensiones relativas de los dos sistemas, de su capacidad de cortocircuito y del grado de riesgo que se corre por efectos de resonancia, debidos a la aparición de perturbaciones posteriores, aparte de la que provocó la fluctuación.

La naturaleza asíncrona de los sistemas de corriente continua, nuevamente ofrece la ventaja de eliminar el inconveniente de la estabilidad, puesto que no existe desfasamiento entre los voltajes de recepción y transmisión. Además, no existe reactancia inductiva en la línea, haciendo que la potencia que puede transmitir una línea de corriente continua no tenga restricción alguna (salvo las impuestas por los equipos conversores).

c.-) Transmisión en C.A. por cable

Es bien sabido que, debido a la gran capacitancia por unidad de longitud de cualquier tipo de cable, la intensidad de la corriente capacitiva puede alcanzar valores muy altos, incluso para distancias relativamente cortas.

La longitud de cable que produce una corriente capacitiva igual a la capacidad de conducción del cable, se llama longitud crítica; para el caso de un cable de 220 kV es del orden de 45 km.

En cambio con corriente continua no existe esta limitación. Esta es la razón por la que la mayor parte de las instalaciones con corriente continua a alta tensión que se han realizado consisten en aplicaciones con cables submarinos de alta tensión, con tensiones -

que llegan a 500 kV entre líneas (\pm 250 kV a tierra).

1.3 Ventajas económicas de los sistemas de C.D.A.T.

En la transmisión de corriente continua y alta tensión se presenta la necesidad de utilizar unidades convertoras, las cuales se ocupan en la rectificación de la onda senoidal y en conseguir una señal alternante en la parte receptora. Estas estaciones convertoras tienen costos de instalación considerablemente más altos que los de una subestación normal de corriente alterna.

Por otra parte, los costos que representan la instalación de una línea de corriente continua - tanto para línea aérea como subterránea - son menores que los que corresponden a una línea de C.A., para un mismo nivel de potencia transmitida. De tal forma que los altos costos de las estaciones convertoras pueden ser compensados por el ahorro que se tiene en los costos de instalación de la línea de transmisión, siempre y cuando la longitud de la misma sea mayor al punto en el cual se tienen costos iguales para los sistemas de C.A. y C.D. (ver figura 1.5), a esta distancia (Break-even distance) comienza a ser más económica la transmisión por corriente continua. Esta distancia varía de acuerdo a las características individuales de los distintos proyectos, pero en general es del orden de 700-800 km.

Para el caso de las líneas subterráneas y submarinas, esta distancia se reduce a aproximadamente 30-50 km, debido a que los costos se incrementan enormemente tanto para la transmisión en corriente continua, como para corriente alterna.

Aunque los costos de una línea de alto voltaje para transmi-

sión de energía eléctrica se han incrementado rápidamente, el equipo eléctrico para transformación, switcheo, compensación de reactivos y conversión ha sido más resistente a la inflación gracias al continuo desarrollo de tal equipo.

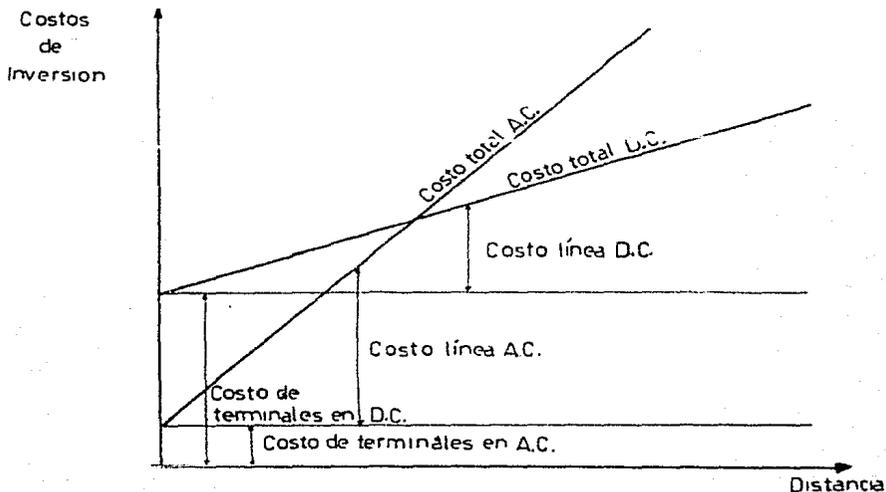


FIGURA 1.5

La figura 1.6 muestra el incremento que han sufrido los costos de las líneas de transmisión y las estaciones conversoras en los pasados años. Como puede observarse, el incremento en los costos de las estaciones conversoras es mucho más pequeño que el de las líneas de transmisión y esto, por supuesto, influye considerablemente en la competitividad de los sistemas de corriente continua con respecto a los sistemas de corriente alterna.

Indice de inflación

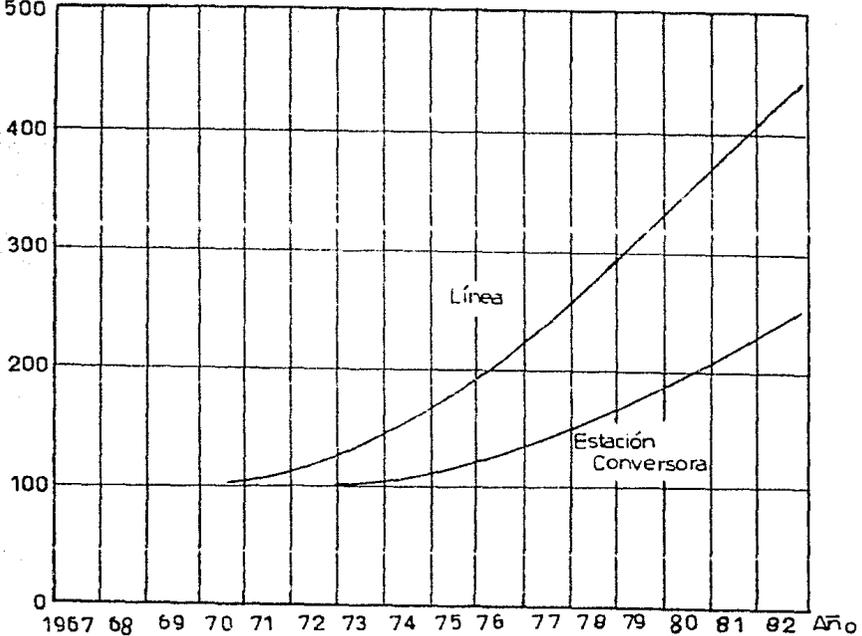


FIGURA 1.6

1.4 Características de los sistemas de C.D.A.T.

a.-) Modos de transmisión: Contrario a lo que pudiera pensarse, en corriente continua no es necesario disponer de dos conductores para poder realizar la transmisión de energía eléctrica de un punto a otro, simplemente se aterriza cada una de las terminales de las unidades convertoras y se realiza la transmisión de potencia a-

través de un solo conductor usando la tierra como camino de retorno de la corriente, a este tipo de transmisión se le conoce como "transmisión monopolar" (ver figura 1.7.a). Si se le agrega a este circuito otro conductor de tal forma que opere a una polaridad opuesta a la original, se tiene una "transmisión bipolar" (ver - figura 1.7.b) con lo que se consigue doblar el voltaje de transmisión y la potencia.

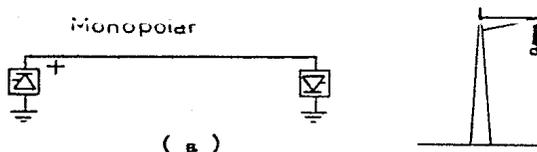
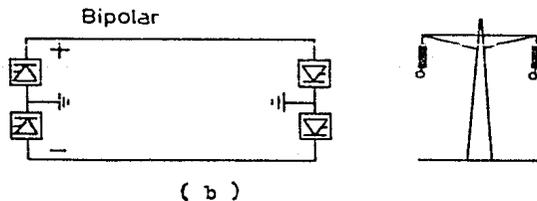


FIGURA 1.7 MODOS DE TRANSMISIÓN EN C. D.

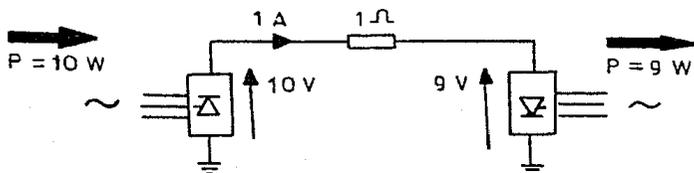


b.-) Transmisión de potencia: Es fácil entender que un sistema de corriente continua ofrece posibilidades únicas de controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión en forma rápida y estable si se considera el siguiente ejemplo: Si se establece que el voltaje de la unidad rectificadora de la figura 1.8.a es ± 10 V- y la resistencia óhmica de la línea de transmisión es 1 ohm, enton-

ces, al momento de cerrar el circuito se tendrá una caída de voltaje en la línea. Se supone ahora que se controla el voltaje de la estación rectificadora para que continúe en 10 V. Si el voltaje en la estación inversora es 9 V, entonces la caída de voltaje en la línea es 1 V y, Puesto que la resistencia óhmica de la misma es 1 ohm, la corriente que circula es 1 A, y la potencia que recibe la estación inversora es 9 W, 1 W se pierde en la línea. Si el voltaje en el extremo transmisor se incrementa de 10 V a 11 V, la diferencia de voltaje entre las dos estaciones convertoras será de 2 V y la corriente 2 A. Consecuentemente, la potencia que recibe la estación inversora se incrementa a 18 W (2 A x 9 V = 18 W), la potencia recibida se ha duplicado. Similarmente, si el voltaje en la estación rectificadora se reduce a 9 V, la corriente resulta ser cero.

Se observa entonces, que un cambio en el voltaje de la estación rectificadora de $\pm 10\%$ ocasiona cambios de corriente de $\pm 100\%$ afectando directamente a la potencia transmitida estos cambios.

(a)



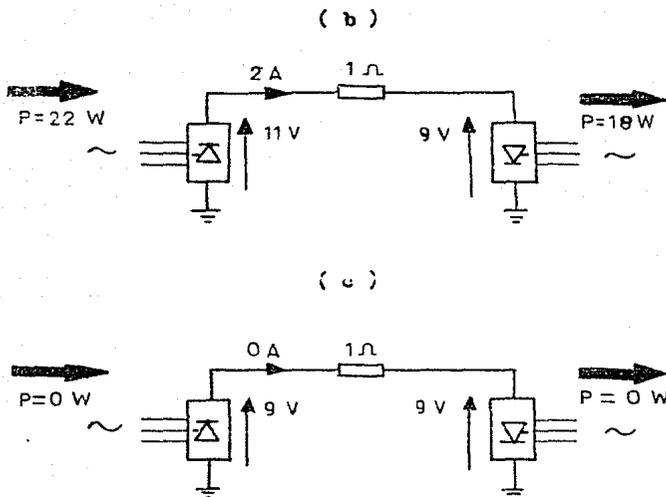


FIGURA 1.8

c.-) Otras características:

- La naturaleza asíncrona de los sistemas de corriente continua hacen ideal para el intercambio de potencia entre sistemas de diferente frecuencia. El convertidor de frecuencia Sakuma en Japón, - transmite potencia (300 MW) entre dos sistemas con frecuencias de 50 Hz y 60 Hz respectivamente, es un ejemplo de enlace asíncrono.

Sin embargo, esta característica de los sistemas de corriente continua también encuentra aplicación en el enlace de dos sistemas con la misma frecuencia nominal en donde la aplicación de la corriente alterna causaría problemas de estabilidad o de control -

de frecuencia. Un ejemplo de este tipo de enlace es el que opera en entre Inglaterra y Francia (Cross Channel).

- La rapidez con que actúa el control de potencia de un sistema de corriente continua encuentra aplicaciones en la estabilización de sistemas de C.A. interconectados, o enlaces de corriente alterna que operan en paralelo con líneas de corriente continua.

- Los niveles de cortocircuito en sistemas de corriente alterna pueden ser reducidos usando corriente continua, pues, por un control adecuado, el enlace de corriente continua no alimentará corriente a una avería.

Puesto que el objetivo de este capítulo es describir las ventajas y características de los sistemas de corriente continua, en capítulos subsecuentes se analizarán más a fondo estos temas.

POSIBILIDADES DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA EN CORRIENTE CONTI
NUA EN MEXICO

2.1 Introducción

A partir de reportes recientes provenientes de países en vías de desarrollo incluyendo México, se ha observado que, en muchos de los casos, el uso de sistemas de corriente continua en la transmisión de energía eléctrica se ha contemplado solamente a futuro. En estudios donde se ha incluido a los sistemas de C.D., se han descartado en etapas muy tempranas del mismo sobre la base de sus limitaciones técnicas y los compromisos de importar tecnología extranjera. Considérese el caso de un sistema en desarrollo planeado a 15 años, donde se consideró el uso de la corriente continua la cual fue descartada en la primera etapa por considerarse más apropiada la C.A., pero, aun cuando se discutió la planeación de la tercera y cuarta etapas (donde se hablaba de potencias de 5000 MW, distancias de 800-1000 km y voltajes de 760 kV), las alternativas de corriente continua no se consideraron en absoluto.

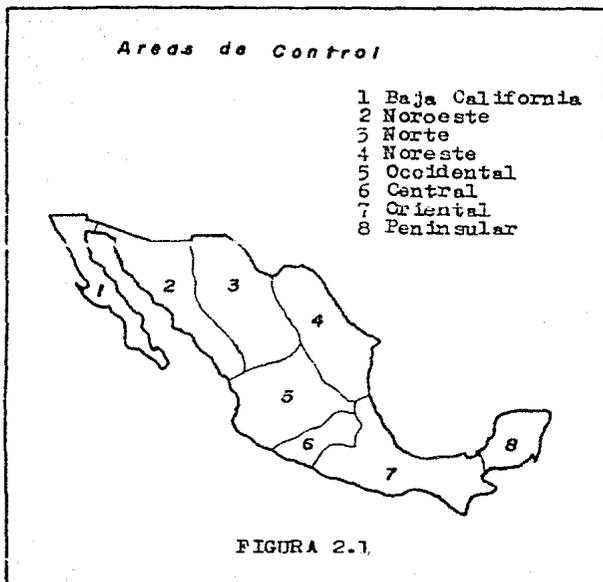
Se desprende de estos reportes, que los ingenieros en planeación de países en vías de desarrollo se encuentran renuentes a incluir la transmisión en C.D. en sus estudios de desarrollo. La razón de esto es que muchos de ellos comparten la opinión de que la transmisión en corriente continua requiere una tecnología sofisticada y costosa, lo cual limita su aplicación además de requerir la importación

de una gran cantidad de dispositivos extranjeros y, por lo tanto, inadecuada para las posibilidades de estos países.

En el caso de la República Mexicana, las necesidades planteadas por las interconexiones cada vez más potentes y más distantes - con el fin de satisfacer la demanda creciente de energía eléctrica, hacen imperativo que los sistemas de corriente continua sean tomados en cuenta para la planeación de los sistemas de transmisión, - Puesto que las características del Sistema Eléctrico Nacional lo hacen ideal para la utilización de corriente continua, por ejemplo: El sistema eléctrico nacional está dividido en 6 áreas de control - distribuidas a lo largo del territorio nacional (ver figura 2.1), sin embargo, es en el área central donde se encuentra el 37% de la carga total del país, debido a lo cual, la necesidad de realizar interconexiones ha aumentado. En este caso, la corriente continua resulta ser más eficiente que la corriente alterna, puesto que las interconexiones en C.A. necesitan una alta capacidad de conexiones, - refuerzos en cada sistema y modificaciones en el control de frecuencia que resultan ser muy caras. Además, el concepto " break-even - distance " (distancia a partir de la cual es más barata la transmisión en C.D. que en C.A.) no tiene importancia. Añádase a esto, el hecho de que el área Peninsular y de Baja California son sistemas - aislados porque no se encuentran interconectados.

2.2 Consideraciones en el uso de sistemas de C.D.A.T. en México

A pesar de que el método usual de comparación directa de costos de un sistema de corriente continua con su alternativa equivalente de C.A. es comercialmente prudente, conlleva a adoptar con



clusiones erróneas. Por ejemplo, mientras que ciertas técnicas tales como el Método del Valor Presente toman en cuenta los aspectos financieros de un proyecto, sus evaluaciones serán válidas únicamente si las alternativas son técnicamente comparables en todos los aspectos. Las genuinas alternativas económicas son posibles solo cuando los estudios de los esquemas propuestos toman en cuenta tanto los aspectos económicos como los técnicos (calidad de abastecimiento, operación-económica, su influencia sobre futuros proyectos, etc.).

4

Considérese el estudio de costos realizado en 1975 por la empresa " Power Technologies, Inc. " para la Comisión Federal de Electricidad (ver Apéndice A), con el fin de evaluar varios esquemas de transmisión en la expansión de la zona sureste (área oriental). Aunque se toman en cuenta los aspectos financieros de los distintos esquemas que se plantean (incluyendo uno de C.D.) aplicando el método del valor presente, se basa por alto aspectos importantísimos tales como: la optimización del costo de la línea de corriente continua a partir del concepto " break-even distance "; la tasa de crecimiento anual de la carga conectada (que está alrededor del 11-15% - en zonas urbanas e industrializadas); etc. El pasar por alto estos aspectos ocasiona a menudo que las líneas de transmisión sean sobrecargadas por encima de sus límites térmicos además de que los sistemas no tienen una operación económica adecuada.

Por otra parte, no es correcto asumir que en el caso de un esquema de corriente continua, todo el equipo de las estaciones convertidoras necesita ser importado del extranjero. En México, la industria eléctrica se encuentra lo suficientemente desarrollada como para proveer del 30 al 50% del equipo requerido por este tipo de estaciones (equipo como: interruptores, transformadores, capacitores y reactores para los filtros, equipo auxiliar, etc.).

2.3 Niveles de precios de las estaciones convertidoras

En la figura 2.2 se muestra una estación convertidora bipolar con convertidores de 12 pulsos y con una compensación de potencia reactiva del 50% de la potencia transmitida por cada polo, de la

DIAGRAMA CIRCITAL DE UNA ESTACION BIPOLAR CON UNIDADES CONVERSORAS
DE 12 PULSOS POR POLO

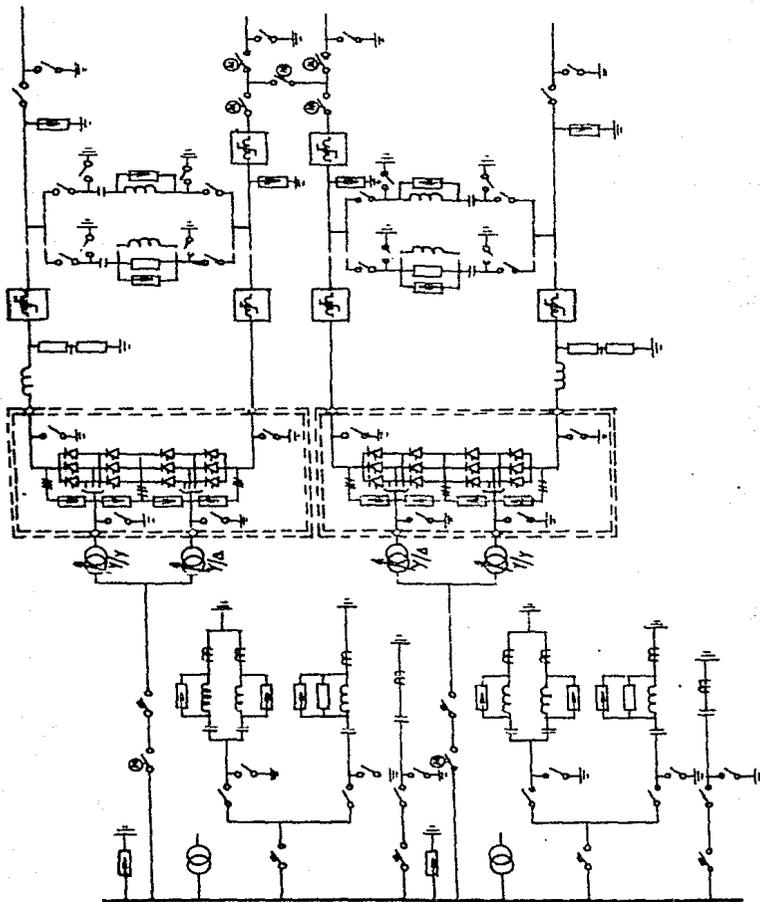


FIGURA 2.2

cual, $1/3$ es aprovechada por bancos en paralelo, $1/3$ es utilizada por filtros pasa-altas y el restante en filtros pasa-bandas para la 11ava y 13ava armónicas. El voltaje de C.A. es 230 kV y en la figura 2.3 se ha graficado el precio de la estación convertora en función de la potencia transmitida. En la figura 2.4 se muestra el voltaje de C.D. óptimo para cada potencia (el voltaje óptimo de operación de una línea de C.D. es el voltaje que corresponde a los mínimos costos.).

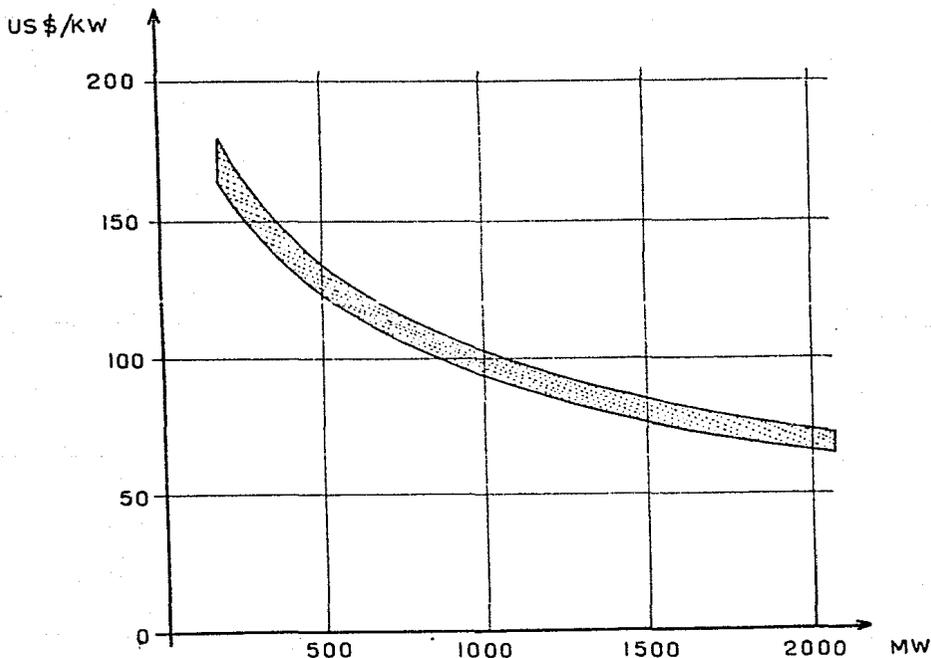


FIGURA 2.3

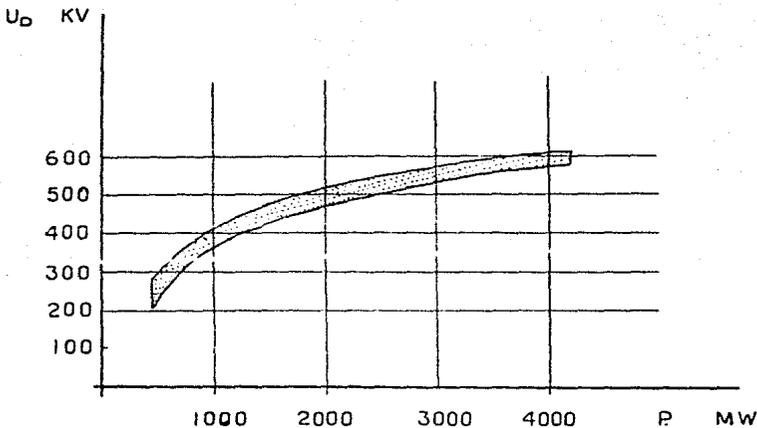


FIGURA 2.4

En estos precios se ha incluido:

- Todo el equipo de alto y bajo voltaje que se encuentra dentro de las líneas punteadas de la figura 2.3.
- El aspecto ingenieril que define la ejecución de la transmisión - así como los proyectos requeridos para definir y especificar las piezas del equipo en las estaciones convertoras.
- La obra civil, la instalación y conexión del equipo incluyendo cables.

Puesto que la curva de precios se ha graficado para las condiciones suecas, es necesario ajustarla por medio de afectar estos precios por un factor de 8-10% más para obtener las condiciones america

nas en primera instancia y, posteriormente agregar los costos de flete y derechos de importación para el caso de México.

2.4 Beneficios que se pueden derivar del uso de sistemas de C.D.A.T en México

Se ha estimado que será necesario construir 17,000 km de redes de transmisión en México, con el fin de satisfacer la demanda a fines de siglo, siendo las torres de transmisión un considerable porcentaje de los costos totales de transmisión. Según cálculos conservadores, la inversión que se habrá hecho en ellas hasta el año 2000, a precios de 1981, ascenderá a 15,000 millones de pesos. Debido a esto, la corriente continua se presenta como una opción a seguir, puesto que, como ya se mencionó, una transmisión en corriente continua requiere un menor número de aisladores y dimensiones reducidas de las estructuras de soporte en comparación con la corriente alterna.

El despacho de carga y una operación económica más eficiente se facilitan con un sistema de corriente continua debido a su naturaleza asíncrona. Además, los sistemas de corriente continua han demostrado adaptarse bien a los requerimientos cambiantes de carga en los países en desarrollo.

Por estas razones, los ingenieros en planeación de sistemas mexicanos deben considerar en futuros proyectos, los sistemas de corriente continua y llevarlos a la práctica cuando las características y requerimientos del proyecto así lo determinen.

ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS CONVERTIDORES (C.A.-C.D.-C.A.)**3.1 Introducción**

El convertidor conectado en puente es la unidad básica de una estación de transmisión por corriente continua y alta tensión. Se le podría describir como el corazón del sistema completo y, aunque en las estaciones conversoras utilizadas en el pasado la disposición en puente no era preferida; debido a sus especiales propiedades la conexión en puente es eminentemente apropiada para transmisión en corriente continua y alta tensión. A continuación se presenta una breve discusión de los diferentes tipos de conexión de los tiristores y una justificación de la utilización de la conexión puente en las estaciones conversoras de C.D.A.T.

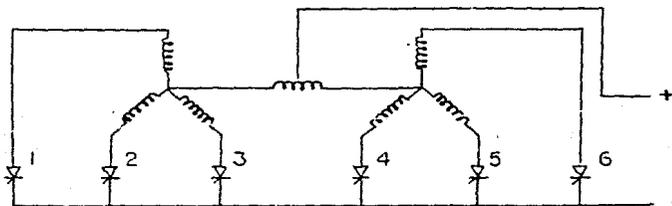
3.2 Discusión de los diferentes tipos de conexión de los tiristores

En las aplicaciones de baja y media tensión de las válvulas rectificadoras de mercurio, un tipo predilecto de conexión es la doble estrella trifásica con transformador interfase (figura 3.1.a). Esta puede considerarse como dos rectificadores trifásicos de media onda conectados en paralelo. La finalidad de la reactancia conectada entre los dos neutros es la de asegurar un reparto adecuado de la corriente entre los dos conjuntos de arrollamientos trifásicos. Normalmente estos dos devanados están defasados 60° uno con otro de tal manera que el conjunto proporciona en total seis pulsos en un pe

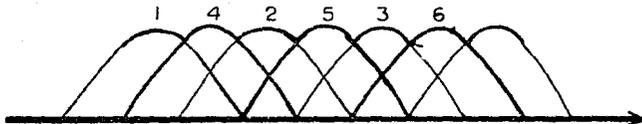
ríodo.

Para el caso de la conexión en puente trifásico (figura 3.1 b), puede observarse que se trata en realidad de dos rectificadores trifásicos de media onda conectados en serie en el lado de c.c. La tensión de salida se muestra en la misma figura, donde para la misma tensión que en la conexión anterior se produce una tensión de c.c. - doble en la salida.

Hasta ahora , los circuitos convertidores han sido sintetizados a partir de la conexión trifásica de media onda; pero, evidentemente otra posibilidad es la de obtener rectificación monofásica de onda completa en cada fase. Conectando tres rectificadores de onda completa en serie puede obtenerse una elevada tensión de salida, lo que es deseable desde el punto de vista de la transmisión por corriente continua. Esta conexión se muestra en la figura 3.1.c al igual que la tensión de salida.



(a)



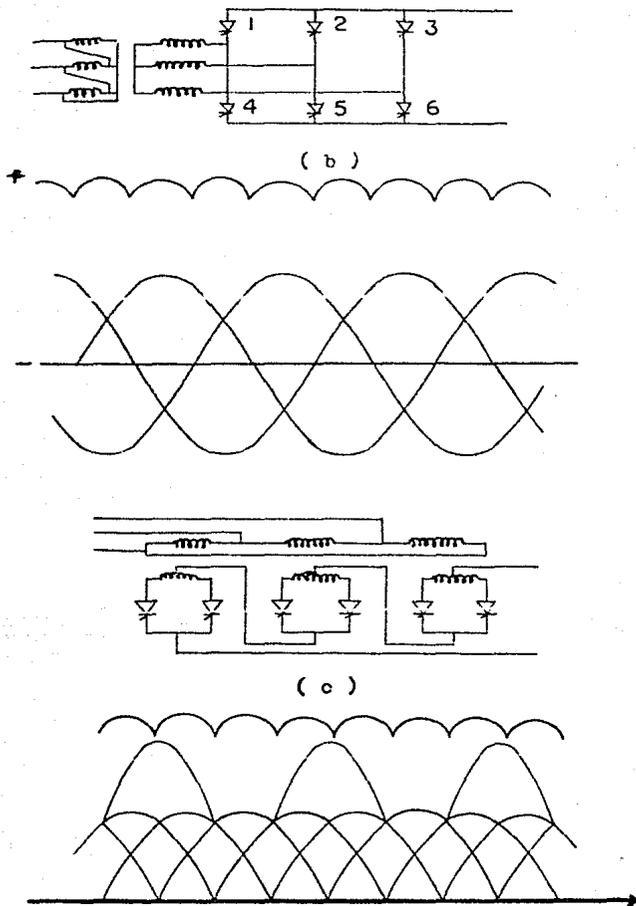


FIGURA 3.1

ESQUEMAS DE ARREGLOS DE TIRISTORES PARA C.D.A.T.

En la siguiente tabla se proporciona una comparación de las tres conexiones mencionadas que, entre otras, podrían ser usadas en los convertidores para transmisión por corriente continua. Cada disposición tiene una entrada trifásica y una tensión de salida que con tiene un 4.04% de ondulación a seis veces la frecuencia fundamental de la alimentación.

Parámetros	Conexión		
	Doble estrella con transformador interfasado	Fuente trifásico	Triple monofásico en cascada
Tensión inversa de pico en los tiristores	2.09V _o	1.045V _o	1.045V _o
Corriente de pico en el tiristor	0.5 I _o	I _o	I _o
Corriente media en el tiristor	0.167I _o	0.33I _o	0.5I _o
Tensión eficaz neutra en el secundario del transformador	0.855V _o	0.427V _o	0.37V _o
Capacidad nominal del primario del transformador	1.047V _o I _o	1.047V _o I _o	1.11V _o I _o
Capacidad nominal del secundario del transformador	1.481V _o I _o	1.047V _o I _o	1.57V _o I _o
Capacidad nominal total del transformador	1.261V _o I _o	1.047V _o I _o	1.34V _o I _o

En la tabla anterior se puede ver que, con el circuito en doble estrella, la tensión inversa que debe soportar cada tiristor es el doble en comparación con los otros dos circuitos, pero, en cambio la corriente máxima es la mitad. Puesto que para la transmisión por-

c.c.a.t. la limitación está en la tensión, y no tanto en la corriente, se deduce que la conexión en doble estrella no utiliza los tiristores o las válvulas tan bien como la conexión en puente y en cascada. Además ese circuito necesita de un transformador mayor que el circuito en puente.

La disposición en cascada, por otra parte, hace buen uso de los tiristores, ya que cada uno de ellos conduce corriente durante 180° en lugar de solamente 120° como los otros circuitos. Para llevar a cabo esto se necesita un transformador 28% más grande que el necesario para el circuito en puente. Además, la conexión en puente puede obtenerse de un devanado normal en estrella o delta con tres conexiones, mientras que la conexión en cascada requiere seis conexiones en C.A. y tres conexiones en C.D. de tres devanados diferentes.

Por estas razones, todos los convertidores de C.D.A.T. existentes o en proyecto, se basan en la conexión Puente, ya que ningún otro circuito es tan económico y simple en su construcción y funcionamiento. Cada conjunto de seis tiristores, conectados en puente a un secundario de transformador trifásico diferente se llama "grupo"

3.2 Análisis del convertidor

- Consideraciones fundamentales

La figura 3.2 muestra un circuito en puente conectado por medio de un transformador estrella-estrella a unas barras de potencia infinita a, b, c. La inductancia L_c representa la reactancia por fase del transformador referida al primario, más cualquier reactancia del sistema de C.A.

Se han hecho las suposiciones normales en los análisis de e -

quijos de conversión para alta tensión:

- 1) La autoinducción de alisado de c.c., L_d , tiene una inductancia in finita y ninguna resistencia.
- 2) Se desprecia la resistencia del transformador y del sistema de co rriente alterna.
- 3) Se desprecia la caída de tensión a través de las válvulas cuando conducen y la corriente inversa a través de una válvula cuando no conduce.

Es necesario mencionar las características de las válvulas, las cuales son importantes debido a que el funcionamiento de los conversores se fundamenta en éstas:

- 1) La válvula solo puede conducir corriente en una dirección, y el flujo de corriente sera de ánodo hacia cátodo. En la dirección opuesta la válvula bloquea la corriente. También, si se aplica un voltaje a la válvula de tal manera que el cátodo sea más positivo que el ánodo la corriente que fluye a través de la válvula se bloqueará.
- 2) La válvula comenzará a conducir corriente si se cumplen las si guientes condiciones:
 - El voltaje aplicado a la válvula sea positivo (el ánodo debe ser más positivo que el cátodo).
 - Un pulso eléctrico se aplique en la compuerta de la válvula.

Tan pronto como la válvula comience a conducir, la magnitud de la co rriente está determinada por los circuitos externos a la válvula.

Cabe mencionar que, al hablar de válvulas se debe entender co mo un arreglo de circuitos puente conectados en serie y en paralelo-

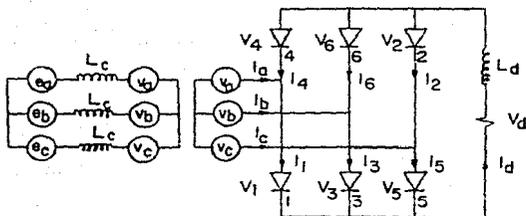


FIGURA 3.2
CIRCUITO PUENTE

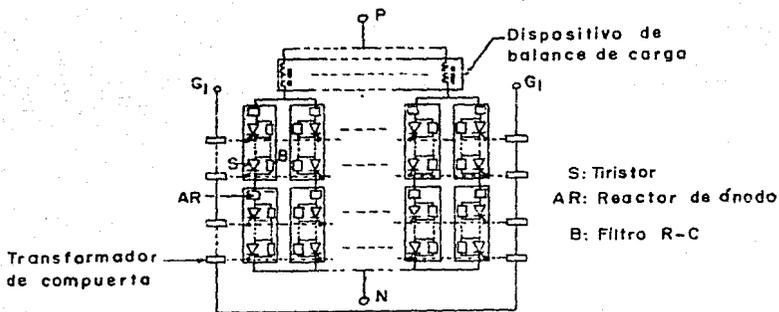


FIGURA 3.3

VALVULA TIPICA USADA EN LA CONVERSION DE ENERGIA DE C.A.-C.D.
CON TENSION NOMINAL DE 10 kV Y CAPACIDAD DE CARGA DE 30 kA.

de tal manera que el conjunto proporcione la potencia que se estableció en un principio. La válvula que se ilustra en la figura 3.3 utiliza 196 tiristores colocados en arreglos tipo puente y éstos, a su vez, en 8 conexiones tipo serie y 24 tipo paralelo. Los tiristores más recientes manejan voltajes entre 3-4 kV y corrientes de 3000 A.

- Operación como rectificador

Las figuras 3.4 a 3.8 ilustran las diferentes formas de onda que se obtienen para distintos ángulos de disparo de los tiristores. Un incremento en el voltaje de c.d. se debe realizar por medio de incrementar el período de conducción de los tiristores.

Suponiendo una relación de transformación de 1:1, se selecciona un intervalo de 60° (puesto que se tiene 6 tiristores que se distribuyen en 360°), entonces el voltaje promedio que se tiene a la salida del conversor es:

$$E_o = \frac{E_m}{\pi/3} \int_{\pi/6+u}^{\pi/2+u} (\text{sen } \omega t - \text{sen}(\omega t - 120^\circ)) d(\omega t)$$

donde E_m es el valor máximo de la fem sinusoidal.

$$E_o = \frac{3E_m}{\pi} \left(-\cos \omega t + \cos(\omega t - 120^\circ) \right)_{\pi/6+u}^{\pi/2+u}$$

$$E_o = \frac{3E_m}{\pi} \left(-\cos(u - 90^\circ) + \cos(u - 30^\circ) + \cos(u + 30^\circ) - \cos(u - 90^\circ) \right)$$

$$E_o = \frac{3E_m}{\pi} \left(-2\cos u \cos 90^\circ - 2\cos u \cos 30^\circ \right)$$

$$E_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \cos u$$

Por lo tanto, el valor promedio del voltaje de salida está en función del ángulo de disparo. A continuación se presenta una tabla-

$$u = 30^\circ$$

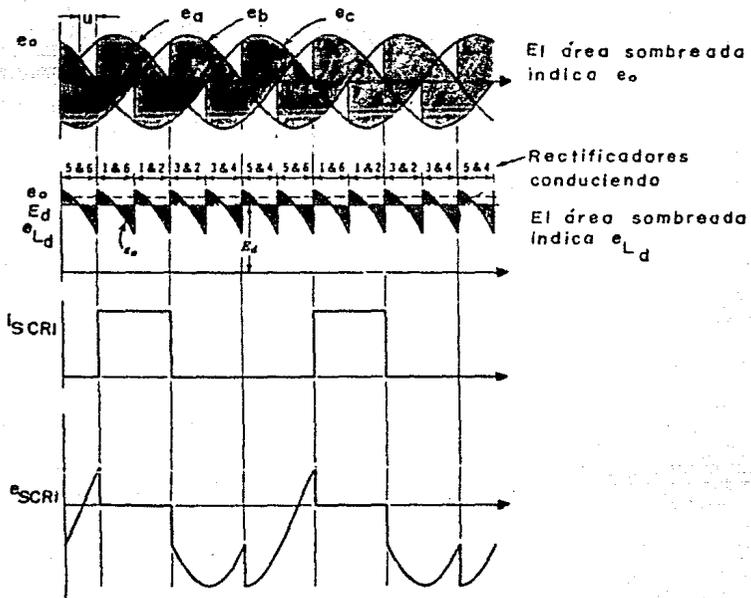


FIGURA 3.4

$$U = 60^\circ$$

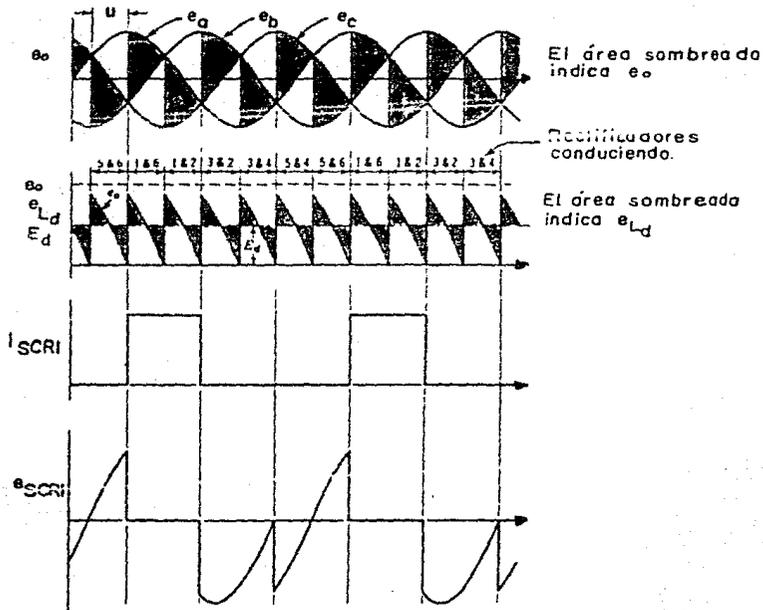


FIGURA 3.5

$$u = 90^\circ$$

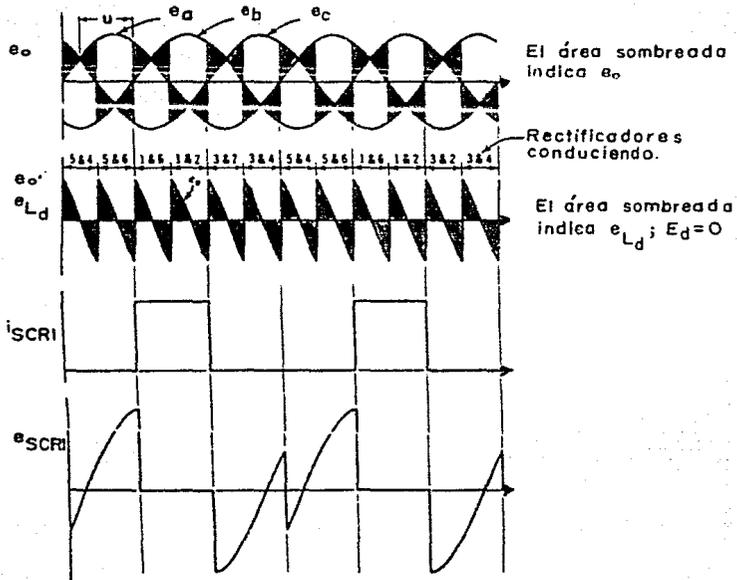


FIGURA 3.6

$$U = 120^\circ$$

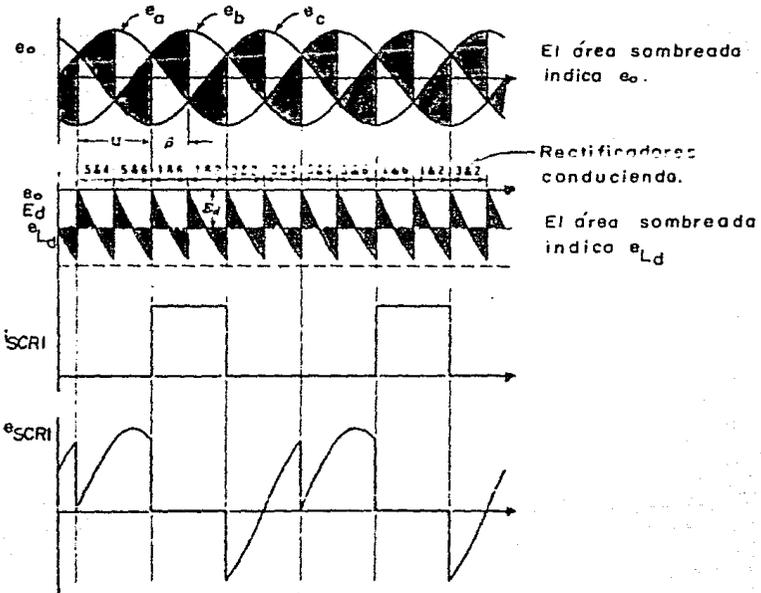


FIGURA 3.7

$$u = 150^\circ$$

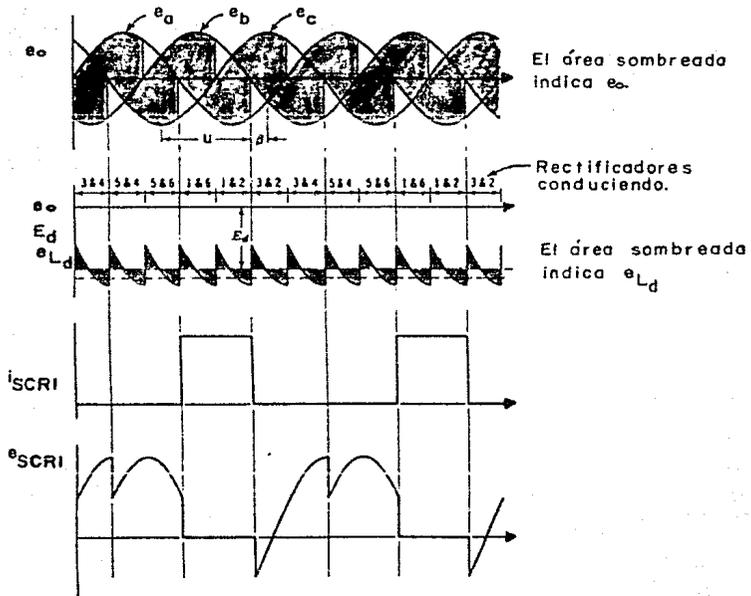


FIGURA 3.8

del voltaje promedio para distintos valores de " u " (ángulo de disparo):

u (grados)	Eo
0	1.65 Em
30	1.43 Em
60	0.83 Em
90	0
120	-0.83 Em
150	-1.43 Em
180	-1.65 Em

Si se definen los siguientes parámetros:

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m$$

V_{sm} o I_{sm} , los valores nominales de tensión e intensidad del secundario del transformador. Entonces:

La reactancia por fase del transformador en por unidad es:

$$X_c = x_p = \frac{I_{sm}}{V_{sm}} X_c$$

Además:

$$I_{dn} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{sm}$$

Definidos estos parámetros, se obtiene la característica universal de operación de los tiristores mostrada en la figura 3.9, en la cual se ha introducido un ángulo de retardo α en el caso de la operación como rectificador. La característica para funcionamiento como inversor es simétrica de la anterior respecto al eje horizontal, en este caso, el ángulo de retardo α es reemplazado por γ y se añade otra familia de curvas representando las características de ϕ (ángulo de extinción) constante. Esta figura sirve solo para válvulas controladas con impulsos en la compuerta que duren más de 30° . Si los impulsos son más cortos que 30° y el ángulo de disparo está ajustado a 0° , cuando el ángulo de retardo inherente a la válvula se aproxima a 30° ,

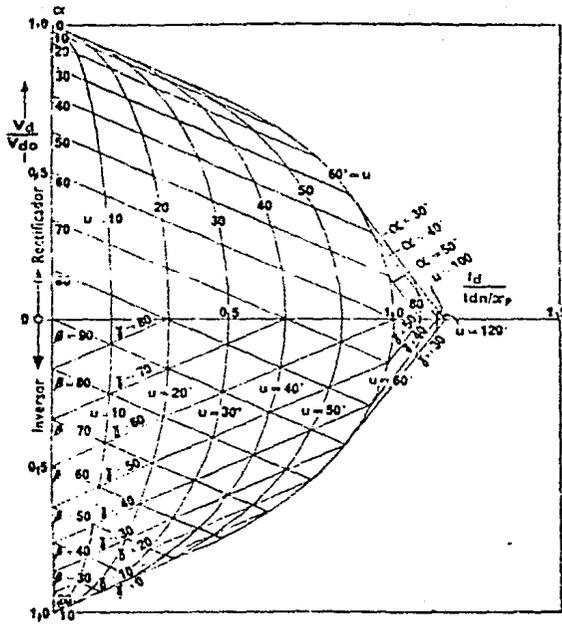


FIGURA 3.9
 CARACTERÍSTICA UNIVERSAL

el funcionamiento se hará inestable.

El diagrama universal se puede dividir en regiones, correspondiendo a las diversas formas de funcionamiento del convertidor. Esto se muestra en la figura 3.10. El diagrama se divide por las líneas de $\alpha = 0^\circ$, $u = 60^\circ$ y $\alpha = 30^\circ$, correspondiendo a los ciclos de dos-tres-válvulas, tres válvulas y tres-cuatro válvulas operando.

El margen normal de funcionamiento de los convertidores de corriente continua y alta tensión está en la región de dos-tres válvulas. Por ejemplo, en el caso de un convertidor con $x_p = 0.15$, la región normal de funcionamiento queda limitada por la parte de la derecha por la línea vertical de puntos que pasa por $(I_d/I_{dn})_{xp} = 0.15$.

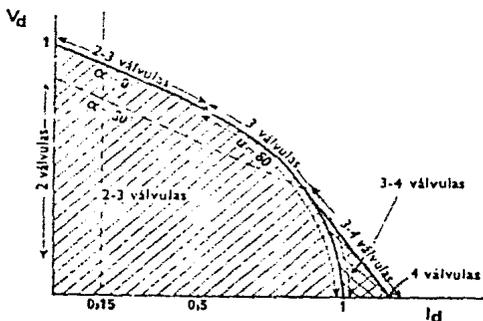


FIGURA 3.10

- Operación como inversor

En la figura 3.11 se examina solamente el funcionamiento de las válvulas 2, 4 y 6 del puente para tres ángulos de retardo de encendido diferentes. Como se supone una inductancia de alisado infinita para valores de α mayores de 30° , las áreas de tensión negativa contribuyen a la tensión media rectificadora, de manera que para $\alpha = 90^\circ$, $V_d = 0$. Esto también lo pone de manifiesto la expresión $V_d = V_{do} \cos \alpha$. Si α se aumenta más allá de 90° , teóricamente la tensión rectificadora se hace negativa. En la práctica, la tensión es cero, puesto que la corriente no puede pasar a través de las válvulas desde el cátodo

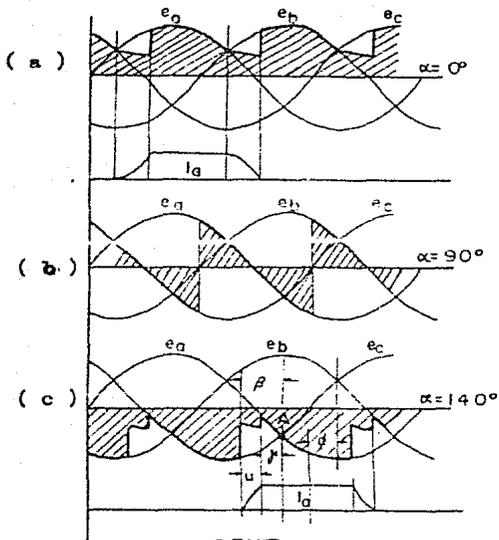


FIGURA 3.11

todo hacia el ánodo. Si ahora, la carga pasiva del rectificador se reemplaza por una fuente de tensión de c.c. mayor que la tensión negativa teórica del convertidor y de tal polaridad que produjera una circulación de corriente desde el ánodo hacia el cátodo a través de las válvulas, tendrá lugar el funcionamiento como inversor. La corriente circulará en contra de la tensión del inversor y se transferirá potencia desde el lado de C.D. al de C.A. Esto se ilustra en la figura 3.11.c., el rectángulo de corriente de la fase a, está practi-

camente en fase con la parte negativa de la tensión ea. Es importante destacar que la extensión sobre la que se puede obtener inversión está limitada por el punto A, al otro lado de A no se puede conseguir que la corriente conmute de la válvula 2 a la 4 puesto que la tensión de la fase a se hace menos positiva que la de la fase b.

3.3 Filtros y carga reactiva en los convertidores de C.D.A.T.

En el lado de C.A. de un gran convertidor para transmisión de corriente continua y alta tensión, normalmente es necesario proveer filtros para reducir las corrientes y tensiones de armónicas en el sistema de C.A. que podrían producir interferencias con otros equipos o con circuitos de comunicaciones. Tales filtros son de un considerable tamaño y constituyen una parte apreciable del costo de la instalación, sin embargo, pueden también suministrar una gran parte de los VA's reactivos en adelanto requeridos por los convertidores. Por otro lado, la magnitud de estos VA's depende en gran manera de la presencia y situación de los filtros de C.A.

Igualmente, a menudo se necesitan filtros en el lado de C.D. del convertidor para reducción de interferencias, aunque su costo (aun incluyendo grandes reactancias) es muy inferior al de los filtros de C.A. Los circuitos amortiguadores para el control de los valores transitorios de tensión en las válvulas son de costo más bajo; pero esto y el efecto que tienen en el comportamiento de la válvula justifican un diseño cuidadoso, especialmente en vista de las formas de onda, decididamente no sinusoidales, que deben afrontar.

- Diferencia entre filtros y circuitos amortiguadores

Filtro: usado para reducir la amplitud de una o más corrientes

tes o tensiones de cierta frecuencia. Generalmente consiste en uno o más circuitos sintonizados L-C con un factor de calidad (Q) razonablemente alto, digamos 20 o más; pero puede también comprender, por ejemplo, un filtro pasabajas que no esté rigurosamente sintonizado.

Circuito Amortiguador: usado para reducir, sea el valor de cresta, o, la velocidad de crecimiento de una corriente o tensión transitoria. Generalmente consiste en un circuito R-C o R-L, algunas veces en un circuito RLC, pero con una Q baja (la unidad o menos).

Desde el punto de vista de proyecto, existe una clara diferencia, que consiste en que un filtro se diseña a partir de consideraciones sinusoidales en régimen estacionario, obtenidas por análisis de series de Fourier, mientras que un circuito amortiguador se proyecta para funcionamiento en régimen transitorio, utilizando la teoría de la transformada de Laplace, o ensayos sobre modelos.

- Necesidad de suministrar reactivos a la unidad inversora

El equipo inversor requiere que la corriente esté adelantada con respecto al voltaje, lo que significa que es necesario suministrar potencia reactiva del lado de corriente alterna del inversor.

Por otra parte, las armónicas reducen en forma apreciable el factor de potencia de una estación convertora, si la componente de la onda fundamental es sustancialmente menor que la unidad.

Para la corrección del factor de potencia se puede utilizar, ya sea compensadores estáticos o bien, compensadores síncronos. De lo anterior se desprende que:

1) Casi siempre será necesario un banco de filtrado a base de condensadores estáticos. Si su tamaño depende únicamente del filtrado re -

querido, su potencia deberá ser, aproximadamente, del 20 al 30% de la nominal del convertidor. Debe evitarse el conexionado en secciones para modificar la potencia.

2) En una estación inversora se puede necesitar, adicionalmente, un compensador síncrono. Como criterio para decidir su instalación se puede tomar la reducción de la tensión de la terminal de C.A. debida al bloqueo repentino de la estación. Si en unos 0.5 s la tensión de C.A. desciende por debajo de la mínima necesaria para el funcionamiento del inversor, aproximadamente un 30%, deberá preverse un compensador síncrono.

Debe advertirse que, a menudo, en una red de C.A. es útil disponer de potencia reactiva en adelanto, por lo que la compensación reactiva total instalada puede exceder a la requerida por el convertidor; lo contrario puede suceder en un sistema de C.A. de impedancia baja, donde puede suministrarse localmente sólo una parte de la potencia reactiva necesaria para el convertidor, tomando el resto del sistema de C.A.

- Filtros de C.A.

El convertidor en puente trifásico utilizado en transmisión por C.D.A.T. se supone que convierte la C.A. pura en C.D. pura; pero en la práctica, genera corrientes y tensiones armónicas, tanto en el lado de C.A. como en el de C.D. Estas armónicas, normalmente no interfieren en el funcionamiento del convertidor, pero se pueden transmitir por las líneas de C.A. y C.D., produciendo:

- a) Corrientes de armónicas excesivas en máquinas síncronas.
- b) Sobretensiones en puntos de las redes.

- c) Interferencias en los elementos de protección.
 d) Interferencias en las líneas de telecomunicación adyacentes.

Estos defectos perturbadores no se limitan necesariamente, a puntos cercanos a las estaciones convertidoras. Los dos medios más importantes para aminorar tales efectos son la conexión de grupos convertidores en pares para un funcionamiento con doce pulsos y la utilización de filtros.

Con impedancias nulas en la alimentación de C.A. y en el transformador, y con ondas de tensión simétricas, las intensidades de C.A. son pulsos rectangulares, como se muestra en la figura 3.12, con una componente fundamental de

$$I_s = 0.78 I_d$$

y armónicas de órdenes 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ... cuyas amplitudes son $I_s/5$, $I_s/7$, $I_s/11$, ...

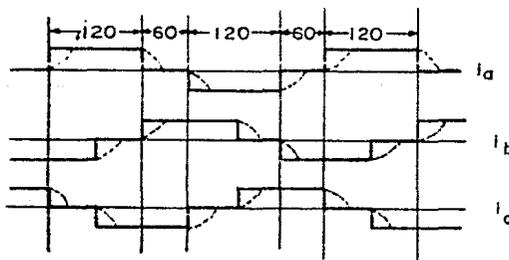


FIGURA 3.12

Para el caso práctico, en el que el sistema de C.A. puede representarse por una tensión de la frecuencia fundamental y una reactancia pura por fase, la onda de intensidad tendrá la forma indicada

de puntos en la figura 3.12. Las amplitudes de las armónicas son ahora menores que en el caso anterior y dependen del ángulo de encendido del convertidor y de la reactancia de conmutación. Las corrientes de armónicas son de secuencia positiva o negativa y pueden pasar a través de los transformadores, cualquiera que sea su tipo de arreglo de conexiones.

Con el fin de eliminar estas componentes de frecuencia fundamental, existen diferentes métodos para reducir armónicas:

a) Aumento del número de pulsos

Si dos grupos similares de válvulas se conectan en paralelo en el lado del primario del transformador y en serie en el lado de C.D., y si los transformadores tienen un defasamiento de 30° , se consigue un funcionamiento de 12 pulsos, es decir, la onda de tensión presentará 12 ondulaciones por cada ciclo de frecuencia fundamental. En el lado de C.A., las intensidades de las armónicas de órdenes 11, 13, 23, 25, ... estarán en fase en los convertidores, y su amplitud se duplicará, mientras que las corrientes de órdenes 5, 7, 17, 19, .. estarán en oposición, contrarrestándose. A causa de pequeñas diferencias de los circuitos, algunas de las últimas permanecerán, permitiendo en los cálculos la aplicación de algún factor apropiado (por ejemplo 0.1).

b) Condensador síncrono

A veces puede necesitarse para la corrección del factor de potencia, de un condensador síncrono conectado en paralelo, que, en principio se puede utilizar para reducir las corrientes armónicas en el sistema de C.A. En la práctica, es demasiado caro reducir su reactancia de pérdidas (efectiva para las armónicas) lo suficiente para

que sea realmente útil.

c) Filtro de armónicas

Los filtros son circuitos de dos terminales tipo serie o paralelo o combinaciones de ambos. La figura 3.13 muestra algunos de los tipos posibles.

El filtro tipo paralelo (shunt) normal, sintonizado a una sola frecuencia (pasabanda), presenta una baja impedancia a una sola frecuencia, estando definida la agudeza de la resonancia por

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

donde $\omega = 2\pi \times$ frecuencia resonante.

Los filtros de sintonía doble o triple tienen, respectivamente, dos o tres frecuencias resonantes, comportándose de forma similar a dos o tres filtros simples en paralelo.

El filtro tipo serie es inverso al filtro shunt, de tal manera que los tipo resonante presentan una impedancia elevada a una o más frecuencias resonantes. Todos los filtros serie tienen una impedancia inductiva baja a frecuencias bajas.

- Filtros de C.D.

Un convertidor en puente trifásico, operando simétricamente, genera en sus terminales de C.D. tensiones armónicas de órdenes 6, 12, 18, ... Cuando dos puentes están conectados en serie para funcionamiento de 12 impulsos, se duplican las tensiones totales de armónicas correspondientes a los órdenes 12, 24, ... mientras que las de orden 6, 18, 30, ... se contrarrestan y desaparecen; en la práctica, puede suponerse una reducción por un factor de 0.1 en previsión de inexactitudes de los componentes, ángulos de encendido, etc.

Tipo	Shunt	Serie
Simple sin tonia		
Doble sin tonia Para-banda		
Triple sin tonia Para-banda		
Simple sin tonia modificado		
Pasabajas orden 1		
Pasabajas orden 2		
Pasabajas orden 3		

FIGURA 3-13

En el lado de D.C. de un convertidor, normalmente se utiliza una reactancia serie de elevado valor. Su misión principal es, no de alisar, sino para limitar la rapidez del aumento de corriente en el convertidor, caso de una falla en la línea de corriente continua, de tal forma que, el sistema de control de las compuertas tenga tiempo de actuar para reducir la corriente; no obstante, la reactancia de -

corriente continua contribuye considerablemente a reducir las corrientes y tensiones de armónicas en la línea de C.D.

El efecto más acentuado tiene lugar cuando la estación convertidora alimenta directamente un cable largo de C.D.; la frecuencia de resonancia entre la reactancia de c.c. y la capacitancia del cable será relativamente baja, del orden de 50 Hz o menor, y habrá una considerable atenuación de las armónicas principales de órdenes 6, 12, 18, ... En general, no es preciso un posterior filtrado en este caso.

Si la estación convertidora alimenta directamente una línea aérea de c.c. relativamente larga, aun si ésta está conectada también a un cable distante, puede ocurrir la resonancia a una de las armónicas superiores, produciendo excesiva corriente o tensión de armónicas en algún punto de la línea, no necesariamente próximo a la estación. Las líneas de c.c. llegan a tener una resonancia tal que, para una cierta frecuencia armónica, la línea se comporta como una impedancia muy baja, entonces la corriente armónica queda limitada por la reactancia de c.c., probablemente a un valor aceptable.

Un filtro resonante de una sola sintonía normal, conectado en paralelo con una línea de c.c. puede calcularse de forma muy similar a un filtro de C.A. Para un valor dado del condensador y una frecuencia determinada, la reactancia queda establecida y el valor de Q . Los valores nominales de los componentes son considerablemente distintos de los de los filtros de C.A., pues la corriente armónica se reduce a un pequeño valor por la reactancia de c.c.; en consecuencia, el costo del condensador depende casi por completo de su capacidad y de la tensión de corriente continua.

La figura 3.14 muestra una disposición mejorada la cual es equivalente en impedancia total a una combinación de condensador y filtro resonante en paralelo. El costo predominante es, otra vez, el del condensador C_3 , cuyos valores nominales son función, principalmente, de los valores en c.c. La tensión de impulso a través del condensador C_4 y de la reactancia L_4 , es menor que la de la línea de corriente continua, debido a la división de tensión. El costo de C_4 , L_4 y R_4 es pequeño, ya que no tienen componentes de c.c. y sólo valores bajos de c.a. Este circuito tiene la valiosa propiedad de presentar una capacitancia shunt relativamente grande ante sobretensiones transitorias procedentes de la línea de c.c. como consecuencia de rayos, reduciendo, tanto la pendiente del frente de onda, como la amplitud de los impulsos más cortos. Se consideran adecuados los valores de C_4 del orden de $0,5 \mu F$.

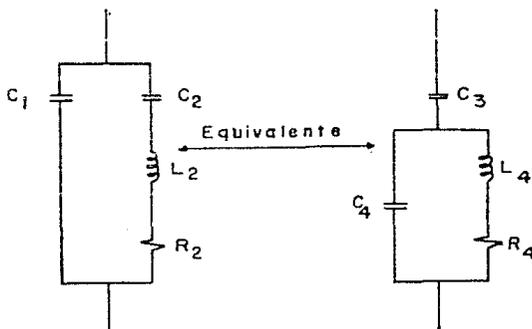


FIGURA 3.14

- Amortiguamiento de la línea de corriente continua

Un sistema constituido por dos estaciones conversoras con reacciones de c.c. y cables, constituye un circuito oscilante que tiene una frecuencia natural del orden de 10-50 Hz, con pequeña amortiguación natural. Una conexión brusca del rectificador a la plena tensión debida a una falla del sistema de control, causará un aumento transitorio de la tensión de la línea al doble de su valor nominal o más. - Esto no es deseable para el cable y puede hacer funcionar a los separadores ajustados a 1.5-2 veces la tensión nominal. Un sistema incluyendo líneas aéreas de c.c. es más complicado, pero, similarmente, - tiene sobretensiones.

La elevación de la tensión puede ser reducida utilizando circuitos amortiguadores de la línea de c.c., de los que se ilustran dos tipos en la figura 3.15. El costo de estos circuitos amortiguadores es mínimo con amortiguamiento a través de la reactancia de c.c. sólo en el caso de utilizarse con cable, pero para otras disposiciones, el costo es considerable.

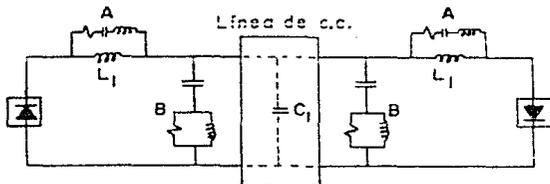


FIGURA 3.15

En general se observa que con un aumento progresivo de la tensión de c.c. por encima de unos 20-60 μ s después de la conexión se -

Puede evitar todo aumento de la tensión sin necesidad de prever circu-
itos amortiguadores adicionales. Es tan fácil disponer esto en los
sistemas de control de forma que al menos se necesitan dos fallas pa
ra que se produzca el aumento rápido de tensión, que puede aceptarse
el riesgo de ruptura de los descargadores, con el resultado de que -
normalmente no está justificado el gasto de añadir amortiguamiento -
de la línea de c.c.

 LINEAS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA EN C.D. Y ALTA TENSION

 4.1 Consideraciones de Diseño en las líneas C.D.A.T.

El diseño de una línea de transmisión de energía eléctrica, sea en corriente continua o alterna, es de vital importancia para la eficiencia y economía de un proyecto de transmisión de potencia.

Todos los requerimientos de una línea tales como: número de circuitos, aislamiento, capacidad de transmisión, etc. tienen que compararse con los costos en que se incurre. Se ha estimado que los costos de una línea de corriente continua de \pm 500 kV se distribuyen de la siguiente manera:

Conductores (incluyendo cable de tierra y accesorios)	31 %
Aislamientos y Accesorios	5 %
Torres, Tirantes, Cimientos	15 %
Instalación (incluyendo transporte y supervisión)	45 %
Administración Central	<u>6 %</u>
	100 %

Se observa de los datos anteriores que el costo de los conductores y de las torres constituyen una gran parte del costo total de la línea, por lo tanto, un dimensionado óptimo es de vital importancia para conseguir la mejor economía.

4.2 Conductores

En los estudios realizados por los especialistas de la empresa ASEA, se ha encontrado que la densidad óptima de corriente para un sistema de C.D. es del orden de 0.9 A/mm^2 . Este valor se ha corroborado con los datos recabados de las líneas en operación, sin embargo, puede cambiar de acuerdo a la evaluación de costos en cada proyecto.

4.3 Aspectos generales del efecto corona

Los experimentos han demostrado que el voltaje crítico es el mismo tanto para el polo positivo como para el polo negativo de las líneas con conductores lisos y de un diámetro pequeño, sin embargo, en las líneas de transmisión de energía eléctrica se tienen conductores con superficies rugosas que favorecen el fenómeno avalancha en el conductor de polaridad negativa, por lo tanto, el voltaje crítico en este conductor es pequeño comparado con el del polo positivo, mientras que las pérdidas por efecto corona son mayores que en el polo positivo. (ver figura 1.2). La explicación a este fenómeno es el hecho de que la ionización de la zona cercana a la superficie del conductor aunada a la aparición de esfuerzos eléctricos debidos a la superficie no lisa del retorno de corriente, favorecen una alta movilidad de los electrones libres los cuales también chocan contra otro y así sucesivamente.

Resultados experimentales muestran que en el rango de 200-500 kV, las pérdidas en el polo negativo de una línea de transmisión son tres veces más grandes que las del polo positivo de la línea. En el rango de 800-1000 kV las pérdidas por efecto corona se pueden consi-

derar iguales para ambos polos.

En un sistema con dos conductores, teniendo uno de ellos una polaridad opuesta al otro, se presenta un fenómeno llamado "efecto bipolar". Los iones positivos generados en el conductor de polaridad positiva son arrojados al polo negativo, mientras que los iones negativos son expulsados en la dirección opuesta. Las colisiones de los iones positivos con los iones negativos generan una recombinación en el punto medio del espacio entre los conductores. El entorpeamiento entre los conductores se llena con cargas mixtas, las cuales deforman el campo eléctrico y destruyen el efecto pantalla de los iones que son expulsados del conductor, con el resultado de un incremento de las pérdidas, que comparadas con las que se obtienen con una línea monopolar, son mucho mayores.

Una comparación de las pérdidas de una línea de corriente continua monopolar con diferentes tipos de conductores, muestra que el agrupamiento de conductores no tiene el mismo efecto sobre las pérdidas por efecto corona como en el caso de C.A.

La existencia de cargas en el espacio alrededor de los conductores de C.L. es la explicación a este fenómeno. El efecto "escudo" de las cargas en el espacio es tan importante en este caso, que la reducción del gradiente nominal en la superficie, ocasionada por un agrupamiento de conductores, no tiene prácticamente ningún efecto en las pérdidas por efecto corona.

En el caso de las líneas homopolares (la línea de transmisión consta de dos conductores con el mismo potencial y retorno por tierra), la presencia de un nuevo conductor reduce el gradiente no-

minal del primer conductor y por consiguiente, las pérdidas se reducen.

En un sistema bipolar, donde se tienen dos conductores con polaridad opuesta, las condiciones son diferentes. La presencia de un nuevo conductor incrementa el gradiente nominal del primer conductor como ya se explicó, y las pérdidas se incrementarán por un factor que depende del espaciamiento entre los conductores.

La línea bipolar tiene un comportamiento similar al de una línea de C.A. Un cambio en el número de conductores con un cierto voltaje, minimizan las pérdidas por efecto corona.

La variación de las pérdidas de potencia con conductores espaciados a una cierta distancia y voltaje constante es aproximadamente proporcional al inverso de la distancia.

Las condiciones del clima, tales como niebla, lluvia, nieve, vientos, temperatura y presión del aire influyen bastante en las pérdidas por efecto corona en las líneas de transmisión. La lluvia parece ser uno de los factores que más influyen, sin embargo, las mediciones que se han tomado demuestran que las condiciones climáticas no influyen tanto como en el caso de las líneas de C.A. que en el caso de C.D. Para los arreglos del tipo bipolar, las pérdidas son de 1.5-2 veces más grandes que las que se obtienen con buen clima, y en el caso de sistemas monopolares y homopolares las pérdidas promedio-
anuales son de aproximadamente 2.5 veces mayores que las que se tienen con buen clima.

A continuación se presenta una comparación entre las pérdidas anuales promedio de un sistema de C.A. que opera a 400 kv y un siste

ma de C.D. que opera a \pm 250 kV, teniendo ambas una longitud de 500-kilómetros y un espacio entre conductores de 3.5 m, en el caso de C.D. y 11 m, en el caso de C.A.

	Línea de C.D. dos conductores tipo Martin (, 3.62 cm de dia metro). Pérdidas kW/km	Línea de C.A. conductores do- bles tipo Curley (3.17 cm de dia metro). Pérdidas kW/km
Pérdidas promedio con buen clima	0.85	1
Pérdidas máximas con buen clima	0.5	0.5
Máximas pérdidas en un tramo - corto de línea bajo las peores- condiciones climáticas	6	50
Máximas pérdidas para toda la lí- nea bajo las peores condiciones- climáticas.	4	10
Pérdidas anuales promedio para- toda la línea	1.7	4

La conclusión a la que se llega después de observar la tabla-comparativa es que las malas condiciones climáticas no tienen la mis-
ma influencia en las pérdidas por efecto corona en D.C. que en A.C.-
Las pérdidas para la línea de C.D. son considerablemente más bajas -
que las de A.C. para condiciones climáticas muy malas.

Los mismos resultados se obtienen para una línea de \pm 300 kV-
de C.D. y una línea de 400 kV (voltaje entre líneas). Esto signifi-
ca que para un valor dado de pérdidas anuales, una línea de C.D. pue-
de operar con un voltaje más alto (voltaje a tierra) que una línea
de C.A.

4.4 Radio interferencias

Las pequeñas descargas parciales en la superficie del conductor producidas por el efecto corona ocasionan interferencias con los radio receptores en la vecindad de la línea. El nivel de ruido decrece proporcionalmente con el inverso del cuadrado de la distancia entre los conductores, y produce serios problemas para las bandas de amplitud modulada, mientras que en el caso de FM y bandas de televisión no tiene un efecto marcado.

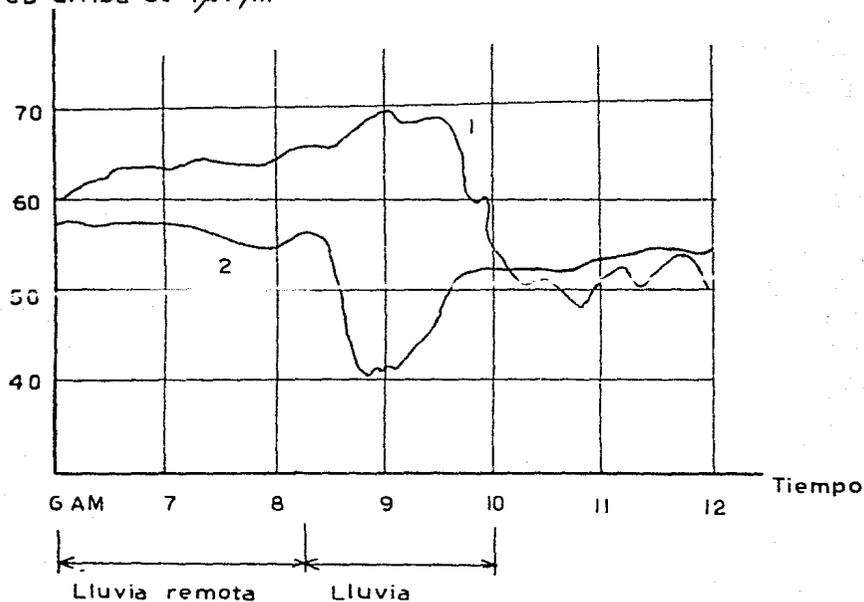
Mediciones realizadas en una línea de A.C. y una de D.C. (que utiliza conductores tipo Martín), han mostrado que para un mismo voltaje a tierra, el ruido producido por el sistema de D.C. es considerablemente más bajo que el producido por el sistema de A.C. Niveles de ruido iguales se obtienen para un voltaje de 390 kV (en el caso de D.C.) y 250 kV (rms).

Una línea de transmisión bipolar con dos conductores sencillos tipo Martín separados 9 m y operando a \pm 250 kV producen un nivel de ruido de 60 db a 0.2 MHz, con un sistema de A.C., que produce el mismo ruido, se opera a 220 kV (rms) con el mismo tipo de conductores o con conductores dobles tipo Curlew operando a 250 kV (rms) a tierra.

En un sistema de A.C. el nivel de ruido aumenta en 15-20 db durante una lluvia, dependiendo de la intensidad de la misma y del gradiente de los conductores. En un sistema de C.D., sin embargo, sucede lo contrario, los niveles de ruido decrecen considerablemente durante una lluvia. Este fenómeno se ilustra en la figura 4.1, donde también se muestra el nivel de ruido de una línea de C.A.

Radio interferencias a 0.83 MHz. 30m de distancia.

dB arriba de $1\mu\text{V}/\text{m}$



1 Línea de c.a. de 355 KV.

2 Línea de c.d. ±400 KV.

FIGURA 4.1

Pruebas realizadas muestran que en un sistema de C.D. se puede tolerar un nivel de ruido bastante alto (aproximadamente 10 db) para obtener la misma calidad en la recepción de las ondas de radio-

que la que se obtendría con un sistema de C.A. Esto se debe al hecho de que el ruido de una línea de C.A. es modulado por la frecuencia del sistema.

4.5 Aislamiento de la línea

En general, el nivel de aislamiento de las líneas está determinado por la magnitud de los sobrevoltajes ocasionados por rayos, maniobras en la línea y el propio voltaje de operación, de tal forma que se minimice el riesgo de falla del aislamiento.

Para los sistemas de corriente continua y alta tensión, los sobrevoltajes ocasionados por maniobras de switcheo en las líneas de transmisión cortas y cables subterráneos, por lo general no exceden a 1.7 p.u.

Por otra parte, la frecuencia de fallas por sobrevoltajes causados por rayos depende de las propiedades de " pantalla " de los cables de tierra, de la resistencia del terreno en las bases de las torres y de la magnitud de la descarga, la cual es función principalmente del espaciamiento entre el cable de guarda y las líneas de transmisión.

Para un sistema de C.D., donde se utilizan convertidores controlados, el tiempo para detectar una falla, desenergizar, desionizar las válvulas y volver a encender suele ser de 200-250 ms, el cual es mucho más bajo que el utilizado por los sistemas de C.A. Además, la corriente de falla puede limitarse a un valor similar a la corriente nominal de la línea, lo cual reduce el tiempo de la desionización de las válvulas. Consecuentemente, una corta duración de la falla junto con una corriente de baja intensidad, proporciona un me-

nor daño en los aislamientos de C.D.

Las líneas de transmisión de C.D. tipo bipolares, ofrecen una ventaja más sobre las líneas de C.A. La línea bipolar, contrario a una línea de C.A., puede operar aunque un polo de la misma se encuentre averiado, por lo tanto, la confiabilidad de una línea bipolar de C.D. puede ser comparada a una línea de C.A. de doble circuito.

La figura 4.2 muestra la mínima distancia o espaciamiento en el aire para líneas de C.D. i.T. La curva es usada para un diseño preliminar. Como se puede observar, algunas líneas tienen un espaciamiento superior al de los valores indicados por la curva. La razón de esto es que en algunos casos se tienen longitudes grandes para la línea de escape superficial debido a la contaminación ambiental, en otros casos es por la alta incidencia de rayos en la línea.

4.6 Corrientes de fuga y línea de escape superficial

Quando se aplica un voltaje de corriente continua a un aislante, dos corrientes separadas fluyen entre los electrodos del aislante. Existe una corriente interna de fuga, medida en nano-amperes, que circula a través del dieléctrico. Una corriente de fuga externa, circula también a través de los depósitos de la superficie del aislante.

La corriente de fuga interna no tiene prácticamente ningún efecto en la vida o confiabilidad del aislamiento. La magnitud de la corriente de fuga externa, se ve afectada principalmente por las condiciones que prevalecen en la superficie del aislante. Condiciones atmosféricas, grado de contaminación así como también la conductividad de los depósitos sobre la superficie del aislante, son unos de -

Mínimo espaciamento entre conductores y estructura de las torres.

Mínimo espaciamento

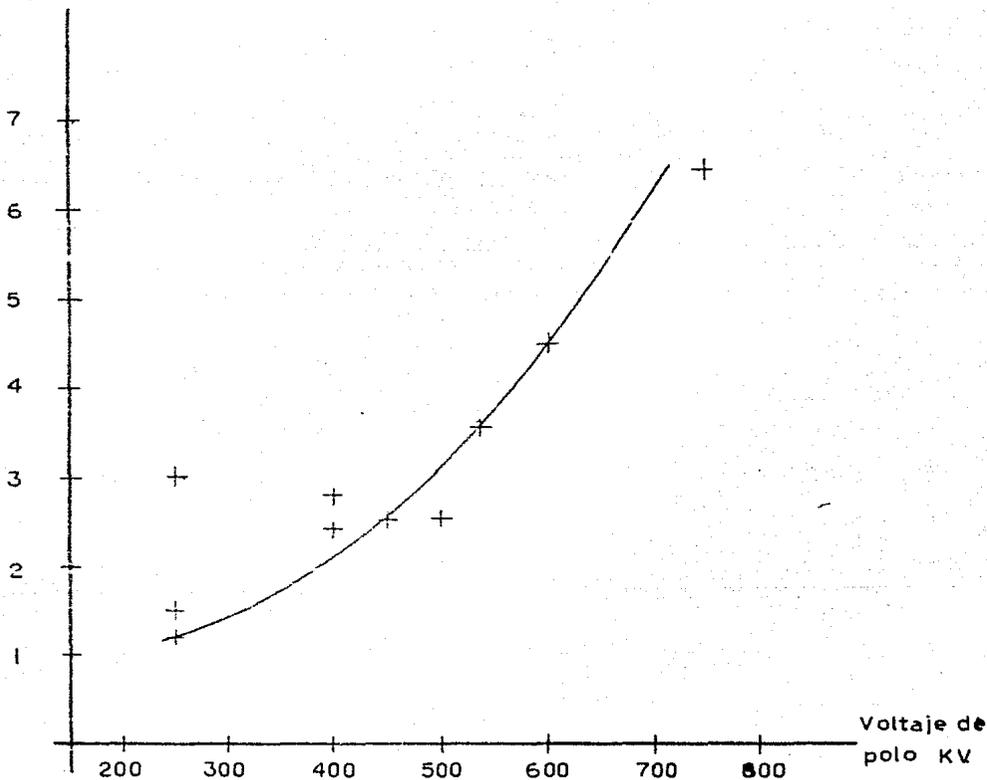


FIGURA 4.2

los principales factores.

Los esfuerzos más críticos se presentan cuando existen caminos de fuga debidos a la humedad o la contaminación en la superficie del aislante. Bajo estas condiciones, las corrientes superficiales de fuga están en el rango de los mili-amperes. El valor pico, durante las peores condiciones climáticas, puede alcanzar el valor de 100 mili-amperes.

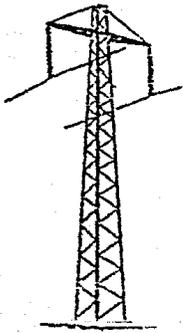
Debido a que los requerimientos de una línea de corriente continua en cuanto a su nivel básico de aislamiento son menores que los de una línea de C.A. , se recomienda emplear cadenas de aislamientos del tipo " antiniebla ". El uso de cadenas de aislamiento cortas con lleva a torres menos altas que las convencionales y espacios más reducidos.

4.7 Diseño mecánico de las torres de transmisión

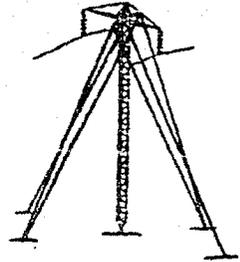
La torre con figura "T" es el diseño más natural para una línea del tipo bipolar. Las figuras 4.3.a y 4.3.b muestran una torre autosoportada y una torre atada con tirantes. Estos ejemplos son tomados de las transmisiones de Konti-Sken y el enlace entre Dinamarca y Suecia.

Un diseño de una torre para una transmisión monopolar se muestra en la figura 4.3.c, este ejemplo se tomó de la transmisión de Inga-Shaba (500 kV). Tal diseño es usado principalmente para transmisiones monopolares, pero si los requerimientos de seguridad son altos, en algunas ocasiones se ha considerado necesario usar este diseño para cada polo de una línea de transmisión bipolar.

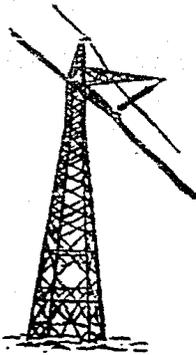
Una importante ventaja de la línea de C.D. comparada con una-



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.3

de C.A., es el hecho de que el derecho de vía es considerablemente -
reducido. Esto se puede apreciar en la figura 4.4 donde una línea de
 ± 500 kV es comparada con una línea de C.A. de 800 kV. Ambas líneas
tienen la misma capacidad de transmisión de potencia. El reducido de
recho de vía del sistema de C.D. hacen más sencillo el encontrar ru-
tas en áreas densamente pobladas.

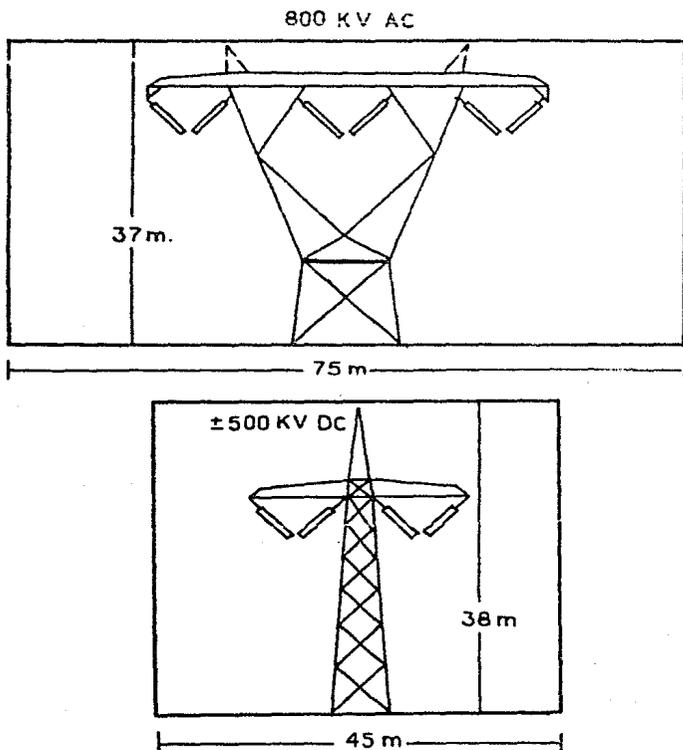


FIGURA 4.4

4.8 Líneas subterráneas

Los cables subterráneos, al igual que las líneas aéreas, presentan diversas ventajas en C.D., tales como, la ausencia de pérdidas en el dieléctrico y de C.A., la inexistencia dieléctrica y de C.A. durante la carga de corriente, no se requiere compensar reactivos, alta resistencia a la ruptura y descargas parciales.

En el caso de cruce de cables bajo el agua, no existe alternativa. Por esta razón casi todas las grandes conexiones de cables de C.D. se han realizado en tramos submarinos. En la transmisión por C.D. se ha usado mucho el tipo papel-aceite de masa sólida impregnada, el cual tiene las mejores propiedades dieléctricas debido a la amplia reducción de las descargas parciales por efecto corona.

La resistencia a la ruptura en C.D. del estado estacionario de corta duración, es del mismo orden que la resistencia al impulso, la cual en los dieléctricos de papel impregnado de aceite (llenos con aceite y de tipo sólido) tiene un valor aproximado a los 100 kV por mm. Por lo general, la resistencia en C.D. de corta duración es cuando menos tres veces mayor que la tensión de trabajo. Resulta obvio que la resistencia de larga duración es más importante, y es por esto que existe una diferencia entre los dieléctricos no presurizados o llenos con gas y los cables llenos con aceite.

El límite superior de la tensión de servicio es del orden de 25-30 kV/mm. La presión de gas existente en los cables llenos con gas, permite una tensión de operación mayor que la que se usa normalmente. En los cables llenos con aceite, es aceptable una tensión de servicio de 35-40 kV/mm.

4. 9 Tipos de cables y accesorios

- Tipo sólido (papel impregnado de aceite)

Los cables de tipo llamado " sólido " se han empleado exitosamente en numerosos sistemas de C.D. (Inglaterra/Francia, tramo a través del canal; Nueva Zelanda, estrecho de Cook; Suecia/Dinamarca, Konti-Skan; etc.). Ya que es inevitable que después del ciclo de calentamiento este tipo de cable presente espacios huecos llenos de gas, que con frecuencia están abajo de la presión atmosférica, se ha limitado su uso en los sistemas de C.A., a causa de los efectos dañinos de las descargas en estos huecos. En un cable de C.D., que contiene huecos, también pueden ocurrir las descargas, pero la velocidad de repetición es bastante reducida y depende de las dimensiones y resistividad de la superficie de los espacios huecos.

Este tipo de cable es atractivo para el empleo submarino, ya que es totalmente autocontenido, pero para uso más general es mejor el cable lleno con aceite, que representa una alternativa más económica. Los cables sólidos para C.D., se han usado hasta para 250 kV, con una tensión de 25 kV/mm. En la figura 4.5 se ilustra la sección recta de este cable. Por lo general ésta es circular para profundidades acuáticas menores de 90 m, y es de forma ovalada para profundidades mayores con objeto de evitar la formación de pliegues en la funda de plomo debido a la presión del agua durante el ciclo térmico.

- Cables llenos con aceite

En comparación con los cables sólidos, los cables llenos con aceite tienen propiedades eléctricas superiores; no están sujetos a las descargas internas ni a las sobretensiones durante las condicio-

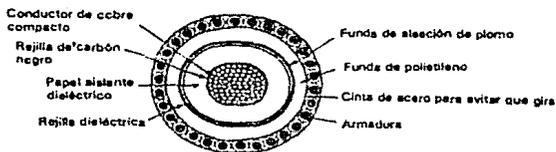


FIGURA 4.5

nes de enriamiento momentáneo, debido a la fluidez del aceite el cual tiene una acción de "lavado" sobre el dieléctrico. Una vez que se ha llenado con líquido correspondiente, se puede colocar en profundidades acuáticas de 1000 m. El diseño depende de la longitud de alimentación del aceite. Sin embargo, si se usa el aceite de más baja viscosidad, un ducto de aceite de 25-30 mm de diámetro, y una presión de alimentación del aceite de 25 atmósferas, se puede hacer frente a un cruce bajo el agua de una longitud de 60 km. En la actualidad la medida límite del conductor para un cable submarino de cobre es de 1300 mm². Una ventaja en este tipo de cables, es que el aceite bajo presión fluye fuera de un cable dañado, impidiendo la entrada de agua.

- Cables llenos con gas

En el circuito de Cook-Strait (Nueva Zelanda) de 250 kV, se empleó el cable para C.D. lleno con gas a alta presión. Se adoptó el

Llenado con gas a mayores presiones para asegurar que en el caso de que se presente una falla en la funda, el agua no pueda penetrar al cable, aun cuando se encuentre a máxima profundidad. El gas también inhibe las descargas y aumenta la resistencia dieléctrica del cable. Este cable se diseñó para una tensión máxima de 25 kV/mm.

En la figura 4.6, se muestra una sección recta típica de este cable. El aislamiento se compone con cintas de papel preimpregnado con compuestos de petróleo. Es probable que el agua penetre en el cable cuando este se daña, en especial si el ducto de gas queda obstruido por el compuesto. Se ha visto que la profundidad máxima es de 300 a 400 m.

- Accesorios

Se ha visto que es más difícil el cálculo de tensiones para un cable de C.D. que para uno de C.A. Mientras que, el campo eléctrico en un cable es radial y fácil de calcular, en un accesorio no sucede así, ya que el campo eléctrico sólo se puede calcular si se emplean métodos basados en las gráficas del campo.

A la fecha lo que se ha realizado es tomar diseños establecidos de accesorios para sistemas de C.A., y sujetarlos al tipo de pruebas necesario para C.D.

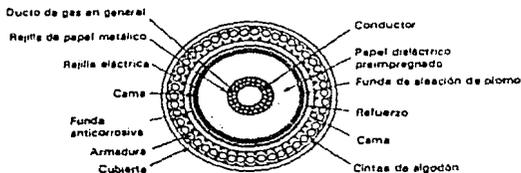


FIGURA 4.6

Se ha encontrado que los accesorios diseñados para C.A., también funcionan de manera satisfactoria en C.D. Una excepción la constituyen las terminales exteriores, para las que a la orilla del mar o en condiciones de contaminación ambiental muy elevada, la distancia de escurrimiento necesaria en C.D. es considerablemente mayor que la que se requiere para C.A. En la figura 4.7, se muestra el diseño de una junta total para un cable propuesto HPOF, tipo tubo, de ± 600 kV.

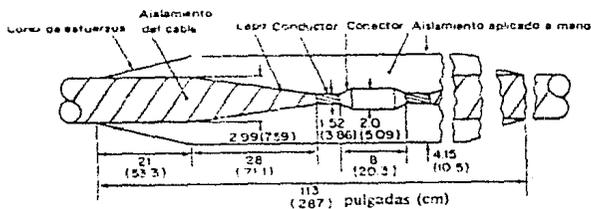


FIGURA 4.7

CONTROL DEL SISTEMA DE CORRIENTE CONTINUA**5.1 Introducción**

El control del paso de potencia en un sistema de transmisión de corriente continua y alta tensión presenta problemas muy diferentes a los encontrados en C.A. El método de control de potencia está íntimamente ligado al funcionamiento correcto de los convertidores en las estaciones terminales, y ha de ser considerado y evaluado de acuerdo a los requisitos de seguridad impuestos por el convertidor.

Si se efectúa esto, la transmisión por corriente continua tiene ciertas características que la proveen de mayor flexibilidad y más rapidez de respuesta que los sistemas de transmisión de corriente alterna.

En general, se necesitan dos tipos de acción de control: un control (ya sea manual o automático) bastante lento, para la operación normal del paso de potencia; y un control rápido para protección contra fallas. Al igual que con C.A., se necesitan dispositivos detectores de fallas o sobrecargas, sin embargo, mientras que en C.A. se tiene un interruptor normalmente asociado al sistema, en corriente continua se puede prescindir de interruptores aprovechando las cualidades de rápido control que ofrecen los rectificadores de silicio.

5.2 Control del paso de potencia entre dos convertidores

El sistema de corriente continua típico representado en la figura 5.1 puede ser representado convenientemente por el circuito equivalente de la figura 5.2. Puesto que el punto medio de cada estación terminal está conectado al potencial de tierra, las mitades superior e inferior del sistema son simétricas, por lo que solamente se necesita considerar una mitad. Esta representación sirve para el estudio en régimen estacionario de la transferencia de potencia.

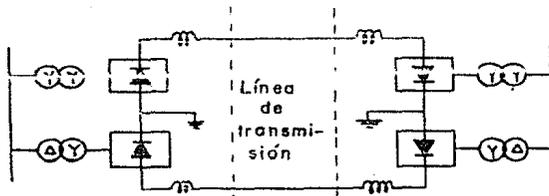


FIGURA 5.1

La resistencia de la línea de transmisión está representada por R . La estación en el lado de la izquierda es rectificadora y los parámetros que le conciernen tienen un sufijo r . La estación en el lado de la derecha es inversora y el sufijo correspondiente es i . Se supone que ambas estaciones funcionan con ángulos de retardo constantes, α y β , respectivamente.

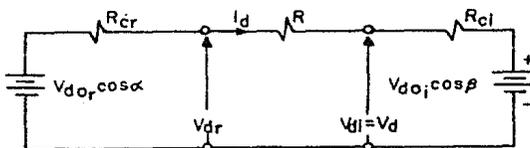


FIGURA 5.2

La corriente I_d que atraviesa la línea está determinada por:

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R}$$

Sustituyendo V_{dr} y V_{di} por las expresiones apropiadas obtenemos:

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \beta}{R + R_{cr} + R_{cl}}$$

Puede conseguirse un cambio en la intensidad de corriente y, por tanto, en la potencia transmitida alterando cualquiera de cuatro posibles parámetros:

- a) El ángulo de control del rectificador.
- b) El ángulo de control del inversor.
- c) La tensión del bobinado conectado a las válvulas del transformador del rectificador
- d) La tensión del bobinado conectado a las válvulas del transformador del inversor.

Los casos (c) y (d) suponen cambio de tomas en los transformadores del convertidor, o cambio de la tensión de la fuente de corriente alterna.

5.3 Control del rectificador

La figura 5.3 muestra las tensiones de fase y la intensidad de una fase de un rectificador para dos valores del ángulo de control, $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 30^\circ$, suponiendo una reactancia de conmutación despreciable. Es claro que, con $\alpha = 0^\circ$, el ángulo de desplazamiento, β , representando el defasamiento entre la componente de frecuencia fundamental de la onda de corriente y la tensión de la fase correspondiente es cero. El ángulo de desplazamiento aumenta a medida que aumenta

α . Puede deducirse, por tanto, que, para una demanda de VAR's del -
 rectificador mínima, el ángulo α se debe mantener tan próximo a cero
 como sea posible.

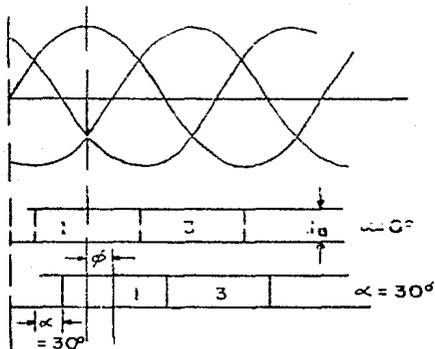


FIGURA 5.3

De hecho, aun para $\alpha = 0^\circ$, existe un ángulo de desplazamiento -
 debido al valor finito de la reactancia de conmutación. Cualquier -
 control de la tensión del rectificador para valores de larga dura -
 ción debe hacerse por cambio de tomas en el transformador, permitien -
 do que se varíe α para proveer cualquier cambio rápido necesario de -
 Vdr. En la práctica y bajo condiciones normales, α se mantiene cerca
 de 15° por dos razones. En primer lugar, para asegurar que todas las -
 válvulas de un puente sean encendidas en el mismo instante de tiempo
 y, en segundo lugar, para permitir un pequeño margen de tensión nece -
 sario para un pequeño aumento inmediato de potencia, si tal aumento -
 es ordenado por el control de la compuerta del tiristor.

5.4 Control del inversor

La figura 5.4 muestra las tensiones de fase y las intensidades de corriente de un inversor para dos ángulos de control $\alpha = 0^\circ$, $u = 0^\circ$ y $\phi = 60^\circ$, $u > 0^\circ$. De la misma manera que en el funcionamiento del rectificador, la demanda mínima de VAR's del inversor tendrá lugar con $\alpha = 0^\circ$. Para $\alpha > 0^\circ$ la corriente está adelantada con relación a la tensión y el inversor consume VAR's negativos.

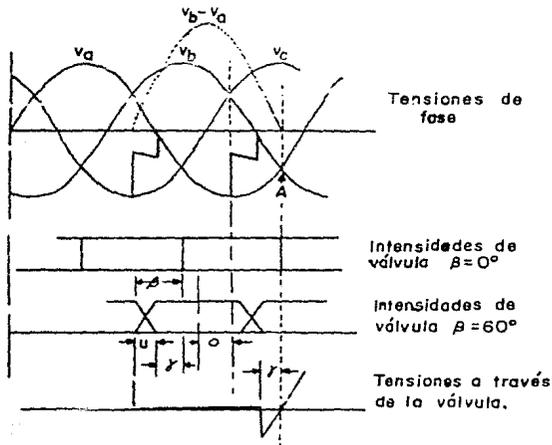


FIGURA 5.4

Es importante mencionar que el margen en el que puede obtenerse la inversión está limitado por el instante A en la figura 5.4. Después de A no puede hacerse que la corriente conmute de la vólvula 1 a la 3, puesto que la tensión de conmutación cambia de signo. El ángulo β entre las ondas de tensión y de corriente no puede hacerse igual a cero.

Debe introducirse un ángulo de extinción γ igual, como mínimo a γ_0 , el ángulo de desionización de la válvula. En la figura 5.4.c - se muestra una porción de la tensión a través de una válvula cuando el puente está invirtiendo. Después del instante A, la tensión de cátodo a ánodo se hace positiva y, si para entonces la ~~compuerta~~ no ha recuperado su control, la válvula conducirá de nuevo. El ángulo γ ocupa el intervalo relativamente pequeño durante el cual la tensión cátodo-ánodo es negativa.

Un ángulo de extinción más pequeño que γ_0 originará una falla en la conmutación. Un ángulo de extinción mayor que γ_0 originará una demanda innecesaria de VAR's. Parece entonces, que las condiciones de funcionamiento más deseables para el inversor, implican un control de ángulo de extinción constante.

5.5 Control de ϕ constante

Supongamos que V_d representa la tensión en las terminales del inversor. Entonces, tendremos para el rectificador más la línea,

$$V_d = V_{d0} \cos \phi - (R_{cr} + R) I_d$$

y para funcionamiento del inversor con ϕ constante:

$$V_d = V_{d0} \cos \phi + (R_{ci}) I_d$$

Estas dos ecuaciones aparecen en el diagrama de funcionamiento de la figura 5.5. Para que circule una corriente, la tensión de vacío del rectificador debe ser mayor que la tensión de corriente continua en el inversor con el circuito abierto. El punto de intersección de las dos características define el punto de operación.

El funcionamiento del inversor bajo tales condiciones no es satisfactorio por dos razones:

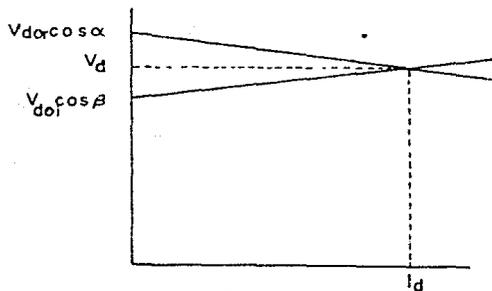


FIGURA 5.5

- a) El ángulo de extinción puede ser mayor que el necesario, implicando una demanda de VAR's innecesarios.
- b) La seguridad del inversor se pone en peligro en caso de disminuir la tensión de la fuente de C.A.

Esto se ilustra en la figura 5.6. Supongamos que está circulando una intensidad normal y que ϕ está ajustado de forma que $\gamma > \gamma_c$, como en la figura 5.6.a. Si, ahora la tensión trifásica de alimentación sufre una reducción simétrica como en la figura 5.6.b., y suponiendo que la corriente no cambia de forma apreciable, la misma corriente ha de ser conmutada a la tensión reducida. Las áreas sombreadas de las dos figuras han de ser iguales. Como resultado, γ de la figura 5.6.b. se reduce por debajo de γ_c con el consiguiente fallo de la conmutación.

Si se hubiera tomado un ϕ muy grande en previsión de reducciones de tensión, la demanda de VAR's en el inversor habría sido excesiva.

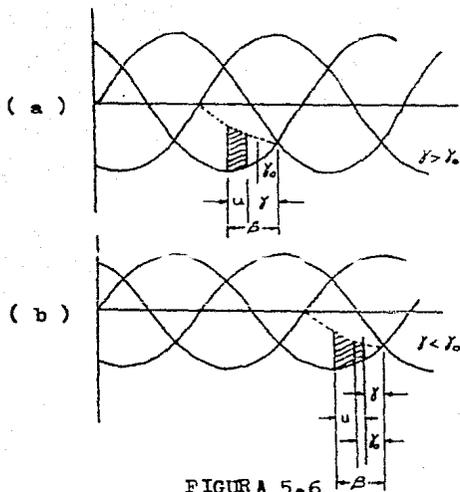


FIGURA 5.6

5.6 Control con γ constante

El control de ángulo de extinción constante requiere un dispositivo rápido. La siguiente ecuación describe la naturaleza del problema de control.

$$I_d = \frac{V_l}{\sqrt{2} X_c} (\cos \gamma - \cos \varphi)$$

Para un valor de intensidad de corriente continua, I_d , y una tensión entre fases en el lado de la válvula, V_l , la expresión indicará el φ correcto, de manera que, después de terminada la conmutación, quede aún un ángulo remanente γ .

Si este cómputo se realiza de una forma continua y las válvulas son encendidas conforme a él, existe todavía un riesgo substan-

cial de falla en la conmutación por las siguientes razones:

a) El cómputo está basado en reducciones de tensión trifásicas simétricas. La inmensa mayoría de las averías son asimétricas. Una avería entre dos fases no solamente reducirá la tensión de conmutación, sino que también hará aumentar o disminuir el ángulo de conmutación-disponible, como se ve en la figura 5.7.

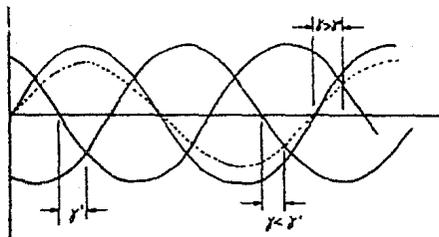


FIGURA 5.7

b) Pese a la gran reactancia de alisado, la variación de la intensidad de c.c. puede ser apreciable, después de una reducción de la tensión en el sistema de C.A.

c) Aún si se hubiera diseñado un dispositivo de control ideal, podría ocurrir un fallo de la conmutación si la reducción de tensión tiene lugar justamente antes del ángulo de encendido o después de que la válvula ha comenzado a conducir. Sin embargo, este fallo en la conmutación no es grave y el funcionamiento del inversor será normal, siempre que el encendido de la próxima válvula se comience en el instante correcto.

El dispositivo de regulación de ángulo de extinción constante

se ha usado en los proyectos Gotland y Cruce del Canal y recibe el nombre de " control consecutivo ". Este dispositivo de control de ángulo de extinción constante es una computadora analógica separada para cada grupo de válvulas conectadas a la misma fase. Esto es necesario, debido a que no se puede presuponer un equilibrio completo entre las dos fases, especialmente después de condiciones de falla asimétrica. Cada computadora calcula de manera continua y suministra un impulso de salida cuando llega el momento correcto de encender una válvula con una conmutación segura. Las diversas magnitudes y parámetros que tiene que tener en cuenta la computadora, son los siguientes:

- a) La amplitud de la tensión de conmutación
- b) La fase de dicha tensión
- c) La magnitud de la intensidad de corriente continua
- d) La proporción de la variación de la intensidad de c.c.

La tensión de conmutación es la tensión cuando circula la corriente de conmutación cuando conducen simultáneamente dos válvulas de la misma línea. Antes de la conmutación, esta tensión aparece a través de las válvulas que van a conducir. En efecto, es la tensión entre dos fases: la fase que está conectada a la válvula que conduce y la fase que está conectada a la válvula próxima a encender.

En la figura 5.8 se muestra la característica del sistema de c.c. con control de α constante y de γ constante. El punto de intersección de las dos características del convertidor, las cuales tienen pendiente negativa, define el punto de funcionamiento, V_d , I_d . En el caso de haber reducciones en la tensión del sistema de c.a. -

del inversor, la característica del inversor se desplazará hacia abajo paralelamente a sí misma. Como resultado, el punto de funcionamiento se desplazará hacia grandes sobrecargas. Aunque el órgano de control automático de γ constante puede impedir una falla de

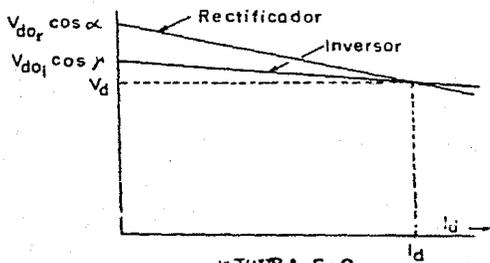


FIGURA 5.8

comutación, es también importante que las válvulas deben funcionar dentro de su valor nominal de intensidad. Por tanto, es claramente deseable una regulación de intensidad constante del lado del rectificador.

En la figura 5.9 se ilustra el funcionamiento de un rectificador con control de regulación. Se puede ajustar el órgano de control del rectificador para cualquier valor deseado de intensidad I_{d1} , I_{d2} ..., y, por tanto, para cualquier potencia transferida.

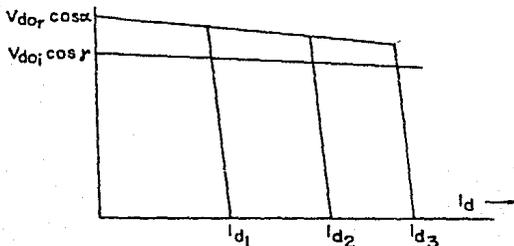


FIGURA 5.9

El regulador del rectificador consiste en un amplificador sumador que compara la intensidad real con un valor preestablecido. Si la corriente es menor que el valor consignado, no hay señal de salida y el rectificador funciona en la característica de α constante. Si la intensidad es mayor que el valor preestablecido, se envía una señal a las unidades de impulsos, de tal forma que α se varía hasta que la diferencia de intensidades se reduzca a un valor pequeño. La ganancia del amplificador determina la pendiente de la parte de la característica de intensidad constante. La pendiente debe ser inferior a cierto valor, pues, de otra forma, a causa de la resistencia negativa del inversor compuesto, durante los cambios en la tensión de c.c., habrá oscilaciones.

Si desciende la tensión del sistema de c.a. del rectificador, la característica de α constante del rectificador se desplazará hacia abajo, de DD a CC (figura 5.10). El sistema, entonces, dejará de funcionar, puesto que $V_{doi} \cos \beta > V_{dor} \cos \alpha$.

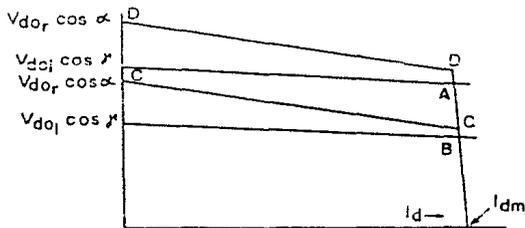


FIGURA 5.10

Si se quiere conservar la continuidad del suministro, deberá introducirse un regulador de intensidad en la estación inversora. Es

te regulador cuidará de que la corriente no descienda por debajo de cierto valor. Tal regulador aumentará ϕ por encima del valor requerido para mantener \bar{v} constante y reducirá la tensión por detrás del in-
versor, tendiendo, de este modo, a mantener la corriente.

La figura 5.11 muestra la característica del rectificador y - del inversor bajo estas circunstancias. El punto de funcionamiento - normal es A. Cuando la característica del inversor está más alta que la del rectificador, como el punto B, el inversor trabaja con regula-
ción de intensidad constante y el rectificador trabaja sin ningún - problema con regulación de tensión natural. Cuando la característi-
ca del rectificador está más alta, éste trabaja con corriente cons-
tante y el inversor con control de \bar{v} constante. El sistema no deja - de funcionar por cambios en la tensión de c.a. o bloqueos de uno de-
los puentes en cualquiera de los lados.

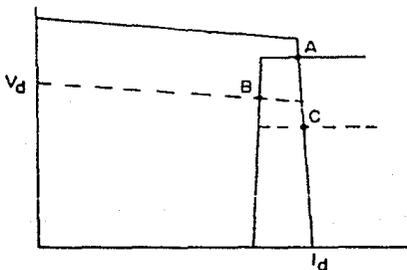


FIGURA 5.11

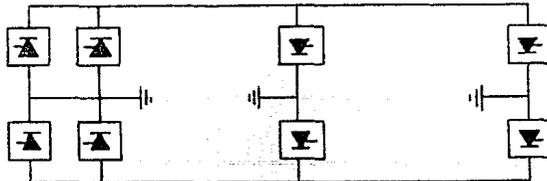
La diferencia entre los ajustes de los reguladores de intensidad en ambas estaciones se llama " margen " y debe ser suficiente pa-
ra dar alguna diferencia entre las tensiones respectivas, impidiendo
el funcionamiento simultáneo de los reguladores de intensidad, que -

podría producir inestabilidad. Para una reducción de carga, deben ajustarse ambos reguladores de intensidad para una corriente más baja manteniendo el margen original. Esto requiere un enlace de comunicación de alta velocidad entre las dos estaciones.

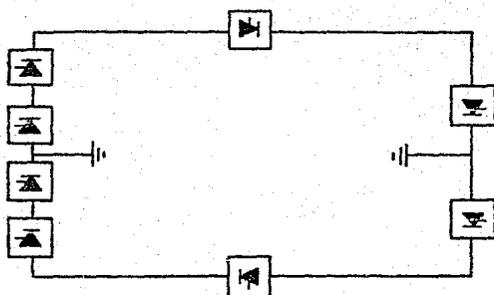
Si el punto de funcionamiento en la figura 5.11, cae desde A a C, disminuye $\cos \alpha$ y aumenta la demanda de VAR's en el sistema de c.a. del rectificador. En tales circunstancias, el ajustador de t_o - mas del rectificador actuará para restaurar el punto de funcionamiento cerca de la característica de $\alpha = 0^\circ$, mejorando así el factor de potencia. La señal para el ajustador de tomas del transformador puede obtenerse, ya sea de una unidad de medición del ángulo de encendido. o bien, por un relé de medida del factor de potencia situado en el lado de c.a.

5.7 Transmisión de energía eléctrica en C.D. con más de dos estaciones generadoras

Hay dos posibilidades de conectar más de dos estaciones, la conexión serie o la conexión paralela (ver figura 5.12). Intrínsecamente, el sistema conectado en serie es un sistema de corriente constante, y el conectado en paralelo es de tensión constante. Pueden usarse de todos modos, sistemas mixtos teniendo las ventajas de ambos métodos. La siguiente tabla da una breve comparación de los dos sistemas.



SISTEMA 1



SISTEMA 2

FIGURA 5.12

ASPECTO	SISTEMA 1	SISTEMA 2
Constante	Tensión	Corriente
Variable	Corriente	Tensión
Conexión	En paralelo	En serie
Pérdidas Ctes.	Aislamiento (V G)	Conductores (I R)
Pérdidas Var.	Conductores (I R)	Aislamiento (V G)
Para arrancar	Cerrar conmutador	Abrir conmutador
Acción protectora	Interruptor	Cierre del circuito
Ampliación del sistema	En corriente	En tensión
Refuerzo de	Conductores	Aislamiento
Tamaño de la estación	Apenas restringido por la elección de la tensión del sistema.	Restringido por la elección de la corriente del sistema.
Ampliación del sistema	Convertidor más grande	Más convertidores

a) Conexión en serie de estaciones

No parecen existir dificultades en conectar convertidores en serie. Si se supone que el sistema consta de una estación rectificadora compuesta 1, y dos estaciones inversoras, 2 y 3, funcionando con ξ constante, como en la figura 5.13, el punto de funcionamiento, A, queda determinado por la intersección de la característica conjunta de los inversores, 4 y la línea de intensidad constante del rectificador. V_2 y V_3 son las tensiones desarrolladas a través de los convertidores 2 y 3. Si las pendientes de 2 y 3 son aproximadamente iguales, para una intensidad más pequeña en el sistema (punto de funcionamiento B), la repartición de potencia es aproximadamente la misma que para el punto A.

La situación es similar para dos inversores compuestos Para γ constante.

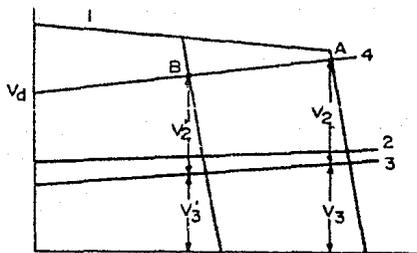


FIGURA 5.13

En la figura 5.14, se muestra el caso de un inversor funcionando con γ constante y el otro con ξ constante. Es evidente que el reparto de potencia entre dos inversores variará de acuerdo con la -

intensidad del sistema.

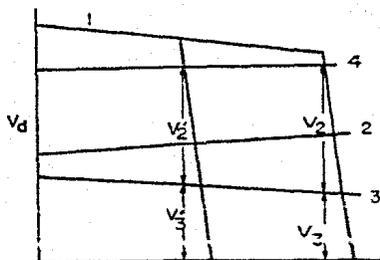


FIGURA 5.14

Si ambos inversores están funcionando con γ constante y con la mínima corriente, las características serán como en la figura 5.15. La línea punteada representa la característica conjunta de los inversores. En caso de haber caídas de tensión en la alimentación de c.a. del rectificador, el inversor cuyo ajuste de corriente mínima sea más alto, determinará la corriente del sistema. El punto de funcionamiento, entonces se desplaza de A a B, y está claro que la distribución de potencia entre los inversores es asimétrica.

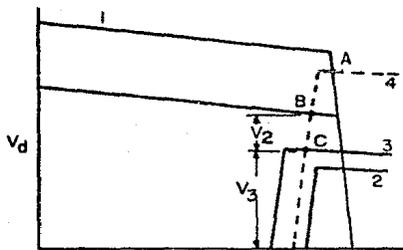


FIGURA 5.15

De hecho, si el punto de funcionamiento desciende por debajo de C, el convertidor 2 funcionará como rectificador, puesto que la tensión cambiará de polaridad.

En un sistema conectado en serie, entonces, el rectificador con el ajuste mínimo de intensidad constante determinará la intensidad del sistema en condiciones normales de funcionamiento. En caso de reducciones de la tensión del sistema del rectificador, el inversor cuyo ajuste de corriente mínima sea más alto determinará la intensidad del sistema.

El reparto de potencia no presenta problemas en condiciones normales de funcionamiento, pero queda alterado en caso de reducciones anormales de la tensión en el sistema de c.a. del rectificador o del inversor.

La desventaja del excesivo cambio de tomas, si únicamente se necesita un margen limitado de variación de potencia, puede superarse parcialmente variando las tensiones así como las intensidades del sistema. Tomando el caso más sencillo, ilustrando en la figura 5.16, el convertidor 1 está rectificando y las estaciones 2 y 3 invierten. Suponiendo que circula la intensidad I_d de plena carga y que $V_2 = V_3 = 1/2 V_d$ en el punto de funcionamiento A. La potencia cedida a cada inversor es $1/2 V_d I_d$. Suponiendo que, ahora, el inversor 2 requiere una potencia $1/4 V_d I_d$ y que el convertidor 1 requiere toda vía $1/2 V_d I_d$. La tensión V_2 puede ser reducida por cambios de tomas a $1/4 V_d$, de forma que el punto de funcionamiento sea B.

Como variante se puede hacer que el rectificador disminuya la corriente a $3/4 I_d$, que V_3 aumente a $2/3 V_d$ y que V_2 disminuya a la-

tercera parte de V_d . Esta condición queda representada por el punto C.

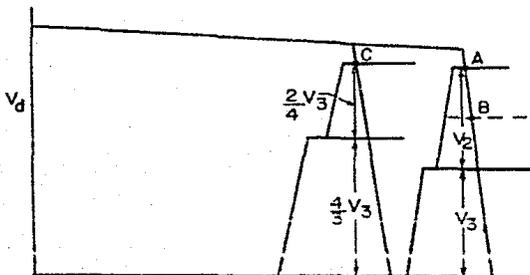


FIGURA 5.16
 $\frac{3}{4} I_d$ I_d

La conexión serie podría tener una ventaja económica si hubieran de interconectarse estaciones situadas geográficamente aproximadas en una circunferencia. A lo largo del circuito, solamente habría de ser tendido un conductor. Sin embargo, las excesivas interferencias con las comunicaciones y la señalización de ferrocarriles podrían hacer impracticable este método.

b) Conexión en paralelo de estaciones.

Si se examina un sistema comprendido por un rectificador y dos inversores, despreciando entonces la resistencia de la línea, pueden obtenerse las siguientes conclusiones: Los dos inversores pueden funcionar en paralelo satisfactoriamente si ambos están controlados con ϕ constante, o uno con ϕ constante y otro con γ constante, siempre que la pendiente de la característica de γ constante sea menor que la inclinación ascendente de la característica de ϕ constante.

Si ambos inversores operan con γ constante, cualquier intensidad circulando entre ellos, producirá un aumento de tensión en uno y una disminución en el otro. Este cambio de tensión acrecentará la corriente de circulación que, finalmente, transferirá toda la carga a uno de los inversores. Es preciso, entonces, que un sistema con varios inversores funcione de modo que nunca dos de ellos operen sobre sus características de ángulo de extinción constante. Esto puede ser llevado a cabo a partir de la práctica acostumbrada de controlar dos estaciones. En la figura 5.17, el rectificador está compuesto para intensidad constante e intensidad mínima. El punto de funcionamiento B no está definido, no obstante, por la intersección de la característica de γ constante y por la línea de intensidad constante del rectificador, sino por la intensidad constante del inversor y la α constante del rectificador. El nivel de tensión queda definido por el rectificador y la intensidad por el inversor. La desventaja de funcionar sobre la característica de intensidad constante del inversor estriba en una mayor demanda de VAR's del inversor, puesto que éste funciona con un ángulo de extinción mayor que el necesario.

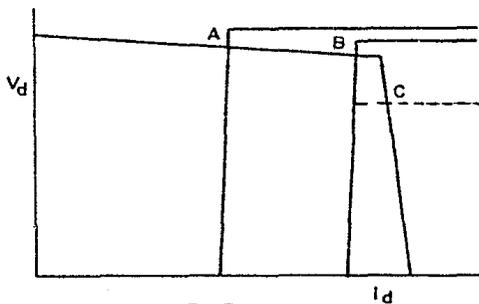


FIGURA 5.17

En la figura 5.18, desde el rectificador 1 se alimentan dos inversores (2 y 3). La intersección de la característica conjunta del inversor y la del rectificador, es el punto A y $I_{d1} = I_{d2} + I_{d3}$.

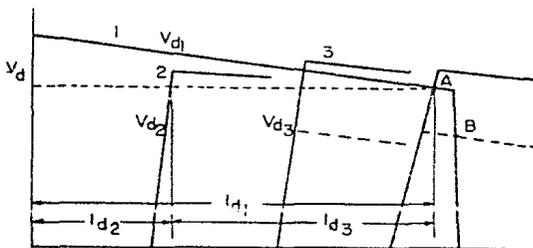


FIGURA 5.18

el nivel de tensión queda definido por la característica de α constante del rectificador. Si ahora, la tensión de c.a. del inversor 3 experimenta una reducción, el punto de funcionamiento se desplaza a B y la corriente I_{d3} queda limitada. Está claro que el aumento de la corriente I_{d3} depende del ajuste relativo del regulador de intensidad constante del rectificador con relación al ajuste de los reguladores de corriente mínima de los inversores. Es necesario, por tanto que sea mantenido un margen constante de intensidad entre la suma de los valores de ajuste de los reguladores de los rectificadores y la suma de los valores de ajuste de los reguladores de los inversores. Esto puede conseguirse mediante un enlace de telemidida.

PROTECCION DE LOS CONVERTIDORES Y DEL SISTEMA DE C.D.
6.1 Introducción

Gran cantidad de fenómenos del sistema inciden en la elección y especificación de equipos de protección de todas clases. Así, elementos instalados para atenuación o amortiguamiento, podrían considerarse como parte integrante del sistema global de protección, y el método adoptado para control del convertidor presenta, claramente, rasgos intrínsecos con la protección del sistema, puesto que todos los sistemas de C.D.A.T. son tipo bloque, en los que el aislamiento de la línea depende de manipulaciones en el convertidor.

6.2 Clasificación de fallas

La siguiente tabla da un resumen de los principales tipos de defectos y sus consecuencias:

TIPO DE FALLA	PRINCIPALES CONSECUENCIAS
Fallas en el lado de c.a. del inversor	a) Reducción de la tensión de c.a. b) Desequilibrio de las tensiones de c.a. c) Aumento transitorio de la c.c. a), b) y c) llevan la posibilidad de un fallo de conmutación.
Fallas en el inversor:	I) y III) Ocurre un cortocircuito en el lado de c.c. y la corriente en p.u. excede transitoriamente a la de

I) Falla de conmutación
II) Retroencendido
III) Autoencendido
Fallas en la línea o cable
del sistema de c.c.

Fallas en el rectificador
I) Falla de conmutación
II) Retroencendido

Fallas en el lado de c.a.
del rectificador

c.a.

II) Ocurre una falla de c.a. con el transformador intercalado, y la c.a. excede a la c.c.

Ocurre un cortocircuito y la corriente de falla de c.c. en p.u., aumenta a un valor que no excede el permitido por el sistema de control. Cae la tensión de salida.

I) Sobreviene la magnetización de los dos núcleos del transformador; aparecen armónicas.

II) Ocurre un cortocircuito de c.a. y esta excede a la c.c. durante un tiempo mayor que en el caso del inversor.

Posibilidad de que el sistema de c.c. cese en su funcionamiento.

a) Fallas en el lado de c.a. del inversor

Todas estas fallas tendrán como resultado la disminución, deformación o anulación de la tensión de c.a. en las terminales del inversor.

b) Fallas distantes

Estas no son necesariamente geográficamente lejanas, pero son distantes eléctricamente en el sentido de que están al otro lado del transformador principal. Debido a tal tipo de defecto, habrá cierta reducción de la tensión en las terminales del inversor. La disminución de la tensión depende de la capacidad de cortocircuito del transformador y de la reactancia entre los arrollamientos primario y secundario.

Una falla trifásica tendrá como consecuencia solamente la dis

minución de la tensión, mientras que las fallas monofásicas y bifásicas producirán, además, una deformación de la onda de tensión. La disminución de la tensión del inversor puede tener las siguientes consecuencias:

I) Un aumento en la magnitud de la intensidad de c.c., que puede impedirse mediante el uso del control de corriente constante, aunque es inevitable un aumento transitorio de intensidad.

II) Aumento del ángulo de conmutación, que puede tener por resultado un fallo en la conmutación. El ángulo de conmutación aumentará - aunque se mantenga constante la intensidad, ya que, para corriente constante, es inversamente proporcional a la tensión de conmutación.

III) Debido a la deformación de la onda de tensión en los casos de cortocircuitos asimétricos, el ángulo de conmutación disponible - aumentará para dos válvulas y disminuirá para otras dos. Con ángulo reducido, puede haber fallo al conmutar.

Existe, por lo tanto, una tendencia general a producirse una falla en la conmutación, y se ve claramente que se deben tomar especiales cuidados (debido a la frecuencia de estas fallas), para impedir que, como resultado, falle el funcionamiento del inversor.

El fallo en la conmutación se puede prevenir haciendo el ángulo lo suficientemente grande, de forma que exista margen suficiente para una conmutación segura en caso de tenerse una reducción de tensión de, por ejemplo, un 20%. Esto quiere decir que habrá de suministrarse energía reactiva suficiente durante el funcionamiento normal para conseguir el ángulo necesario.

El único método realista de evitar un fallo en la conmutación

es prever que, bajo todas las condiciones de disminución o distorsión de la tensión, el ángulo ϕ sea ajustado a un valor seguro.

Para reducir las fluctuaciones del sistema debidas a este tipo de falla, se ha sugerido la conveniencia de conectar un capacitor síncrono en el terciario del transformador del convertidor, estando diseñado dicho terciario de forma que su reactancia de pérdidas hacia el lado del inversor sea pequeña y hacia el lado del sistema sea grande.

Si se va a utilizar una combinación de capacitores estáticos con un síncrono, éste debe ser lo suficientemente grande respecto de aquéllos para mantener una tensión tan grande como sea posible en las terminales del inversor durante las fallas en el lado de c.a. También, cuanto mayor sea el tamaño de la reactancia en el lado de c.c. del inversor, más favorecerá a esta situación, debido al aumento de la constante de tiempo de la corriente de descarga.

c) Fallas próximas

Una falla próxima implica la desaparición total de la tensión de c.a. y el cortocircuito de la c.c. en las terminales del inversor. El rectificador impedirá el aumento prolongado de la corriente, pero, debido a la capacitancia de la línea, podrá existir un valor considerable de corriente inicialmente.

El paso de esta corriente de cortocircuito, primeramente será a través de los arrollamientos; y si continúan encendidas las válvulas derivará en un cortocircuito para un par de válvulas. Es probable que un control apropiado del inversor le permitirá volver a funcionar de forma automática tan pronto como se restablezca la tensión

de c.a.; si es así, no será necesario el bloqueo del inversor. Este tipo de defecto puede ser considerado como una falla de conmutación.

6.2 Corriente de c.a. de falla en el extremo inversor de un sistema de potencia interconectado c.a.-c.c.-c.a.

En general puede demostrarse que los niveles de la corriente de cortocircuito en el lado de c.a. pueden ser controlados por el enlace de c.c. Es más, el valor de la corriente de falla de c.a. es menor funcionando el enlace de c.c. que con él desconectado y también menor que el que se tendría si el enlace de c.c. fuese reemplazado por una línea de transmisión de c.a. convencional a la tensión apropiada.

En la figura 6.1 y 6.2 se tiene:

- Re Equipo rectificador (puente trifásico)
- Is Equipo inversor (puente trifásico)
- SC Capacitor estático
- Trd Transformador del inversor
- Tr1, Tr2, Tr3 Transformadores en el sistema de c.a.
- V2 Tensión terminal de c.a. del transformador del inversor
- V1r Tensión de c.a. equivalente del sistema 2
- V2r Tensión de c.a. equivalente del sistema 3
- I2 Intensidad de c.a. que entra en el sistema desde el enlace de c.c.
- Is1, Is2 Intensidades de falla en la línea afectada
- θ1r Angulo de defasamiento entre V1r y V2
- Yer Admitancia del capacitor estático
- Z1r Impedancia equivalente de secuencia positiva del sistema 2

- Z_{2r} Impedancia de la línea de c.a. despreciando la capacitancia
- Z_{dr} Impedancia equivalente del enlace de c.c.
- V_{d1} Tensión de c.c. equivalente del enlace de c.c. en el extremo transmisor

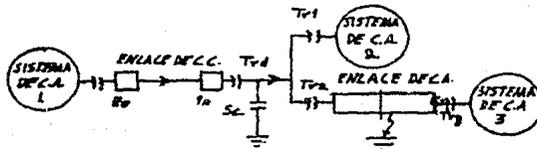


Fig. 6.1

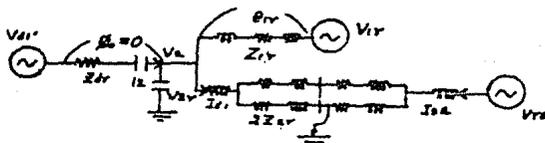


Fig. 6.2

El sistema de la figura 6.1 es un sistema interconectado c.a.-c.c.-c.a. en el que, por motivos analíticos, se supone que la potencia fluye de izquierda a derecha. También se supone que se ha proporcionado al inversor cierta compensación reactiva, con la instalación de un capacitor estático, SC, o un capacitor síncrono.

Es conveniente empezar con el serio problema de un cortocircuito trifásico en una línea de c.a. del sistema conjunto. Después se pueden estudiar por separado las fallas asimétricas, como casos más detallados.

a) Intensidad de corriente de cortocircuito en el caso de control de ángulo de extinción constante.

En el enlace de c.c. el ángulo de extinción o margen de conmutación (γ), es siempre controlado de forma que se obtenga un funcionamiento estable del inversor. Del circuito equivalente de la figura 6.2, puede obtenerse una ecuación aplicando la condición de θ_0 igual a 0° , es decir, factor de potencia unitario en el extremo transmisor. Esta condición permite que el análisis se realice de forma sencilla; si se eligiera la condición de $\theta_0 \neq 0^\circ$, podría realizarse el estudio, pero el circuito equivalente del extremo transmisor se hace más complicado.

$$I_2 - j Y_{er} V_2 + \frac{(V_{1r} - V_2)}{j X_{1r}} = \frac{V_2}{j X_{2r}} \quad \dots (6.1)$$

donde θ_2 es el ángulo de defasamiento de I_2 en el inversor.

La ecuación 6.1 puede simplificarse si se desprecia la resistencia del sistema de c.a.

$$I_2 - j Y_{er} V_2 + \frac{(V_{1r} - V_2)}{j X_{1r}} = \frac{V_2}{j X_{2r}} \quad \dots (6.2)$$

De la ecuación 6.1, pueden obtenerse dos ecuaciones escalares (6.3) y (6.4):

$$V_2 = \frac{I_2}{X_{1r} + X_{2r} - Y_{er} X_{1r} X_{2r}} (X_{2r} V_{1r} \cos \theta_{1r} - X_{1r} X_{2r} I_2 \sin \theta_2) \quad \dots (6.3)$$

$$\sin \theta_{1r} = - \frac{X_{1r} I_2}{V_{1r}} \cos \theta_2 \quad \dots (6.4)$$

De la ecuación de funcionamiento del inversor, se obtiene el factor de potencia en adelanto de la intensidad de corriente alterna (I_2), como sigue:

$$\cos \theta_2 = \cos \delta - \frac{r X_{1r}}{s V_2} I_2 \quad \dots (6.5)$$

La reactancia de conmutación es casi igual a la reactancia - del transformador, cuando la admitancia Y_{er} es mayor que 0.6 p.u. (- con una base de potencia igual a la nominal de c.c.). En consecuencia, en el estudio siguiente, se ha supuesto que la reactancia del - transformador es igual a la de conmutación.

De las ecuaciones 6.3, 6.4 y 6.5, resueltas para los valores- de V_2 , θ_{1r} y θ_2 , puede obtenerse la distribución de la corriente de- falla.

La corriente de cortocircuito de c.a., I_{s2} , es independiente- del circuito de c.c.; sin embargo, I_{s1} está bajo la influencia de - las condiciones del circuito de c.c. y puede obtenerse de la ecua - ción 6.3, como sigue:

$$I_{s1} = \frac{1}{X_{1r} + X_{2r} - Y_{er}X_{1r}X_{2r}} (V_{1r} \cos \theta_{1r} - X_{1r}I_2 \sin \theta_2) \quad \dots (6.6)$$

Si en las ecuaciones 6.4 y 6.6 se hace $I_2 = 0$, podremos obte- ner la corriente de falla de c.a. en el caso de que el enlace de c.c. esté desconectado. En este caso I_{s1} se hace:

$$I_{s1} (\text{c.c. abierta}) = \frac{V_{1r}}{X_{1r} + X_{2r} - Y_{er}X_{1r}X_{2r}} \quad \dots (6.7)$$

Lo las ecuaciones 6.6 y 6.7, la diferencia entre I_{s1} e I_{s1} (- c.c. abierta) es:

$$\begin{aligned} I_{s1} (\text{c.c. abierta}) - I_{s1} \\ = \frac{1}{X_{1r} + X_{2r} - Y_{er}X_{1r}X_{2r}} V_{1r} (1 - \cos \theta_{1r}) + \\ X_{1r}I_2 \sin \theta_2 \quad \dots \dots \dots (6.8) \end{aligned}$$

De las ecuaciones 6.4 y 6.8, si $I_2 \gg 0$

$$1 - \cos \theta_{1r} \gg 0 \quad ; \quad X_{1r}I_2 \sin \theta_2 \gg 0$$

Por lo tanto, si $I_2 \neq 0$, entonces

$$I_{s1} \text{ (c.c. abierta) } - I_{s1} \neq 0 \quad \dots\dots (6.9)$$

Es decir,

$$I_{s1} \text{ (c.c. abierta) } \neq I_{s1} \quad \dots\dots (6.10)$$

Se deduce entonces, de las ecuaciones 6.4 y 6.8 que, cuanto más aumente la intensidad de c.c., más descenderá la intensidad de falla de c.a. Dicho de otra forma, el resultado muestra que la corriente de falla puede disminuirse por medio del control de la c.c. Este fenómeno se puede comprender mejor con ayuda de la figura 6.3, considerando al inversor como una inductancia variable y una resistencia negativa en paralelo, por reducción del circuito equivalente de la figura 6.2.

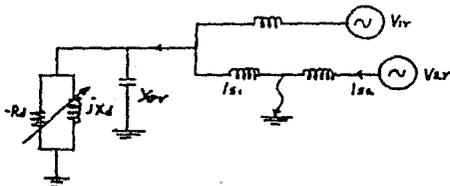


FIGURA 6.3

Además, si la interconexión fuera por c.a. en lugar de c.c., la intensidad del cortocircuito de c.a. sería aún mayor que el valor de I_{s1} (c.c. abierta). A este nuevo valor se conviene en llamar I_{s1} (conex. c.a.). La relación que liga a las corrientes de falla para los tres casos es:

$$I_{s1} \text{ (conex. c.a.) } \neq I_{s1} \text{ (c.c. abierta) } \neq I_{s1} \quad \dots (6.9)$$

Esta relación es de mucha importancia en el proyecto y en el funcionamiento de los enlaces c.a.-c.c.-c.a. Dicha relación no cam -

bia si, en lugar de un banco de capacitores estáticos, se utiliza un capacitor síncrono funcionando con excitación constante.

La potencia de c.c. en el caso anterior es:

$$P_d = 3 V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

Los resultados mostrados en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 son para los diversos valores de la corriente, tomando como parámetros el ángulo de margen de conmutación y las reactancias X_{1r} y X_{2r} .

La figura 6.4 da los valores de la corriente de falla de c.a. I_{s1} y la tensión terminal del convertidor, en función de la intensidad de c.c. para diferentes valores de la reactancia X_{1r} , para el caso de $\gamma = 10^\circ$ y $X_{2r} = 0.3$ p.u.

La figura 6.5 muestra las mismas relaciones pero para el caso de $\gamma = 45^\circ$ y $X_{2r} = 0.3$ p.u.

La figura 6.6 da el valor de la corriente de falla I_{s1} y la tensión terminal del convertidor V_2 en función de I_2 , para distintos valores de X_{2r} , para el caso de $\gamma = 10^\circ$ y $X_{1r} = 0.6$ p.u.

En el sistema generalizado de las figuras 6.1 y 6.2, cuando el segundo sistema equivalente síncrono (es decir, la tensión V_{1r}) funciona como generador, este generador equivalente se acelerará al ocurrir la falla. Por lo tanto, para aumentar la estabilidad del sistema de c.a., es deseable que, durante este corto tiempo se invierta el flujo de potencia de c.c. Las condiciones para la inversión de la potencia se dan cuando tiene lugar un aumento del ángulo de margen de conmutación. Por tanto, como se observa en las figuras 6.4 y 6.5, la corriente de falla de c.a. I_{s1} disminuye, el inversor se convierte en rectificador y, en el proceso de disminuir el ángulo de con-

trol de compuerta, α , es aumentada la corriente de falla de c.a. Cuando el inversor está funcionando totalmente como rectificador, puede obtenerse la corriente de falla de c.a. resolviendo las tres ecuaciones siguientes:

$$V_2 = \frac{X_{2r}V_{1r} \cos \theta_{1r} - X_{1r}X_{2r}I_2 \sin \theta_2}{X_{1r} + X_{2r} - Y_2 X_{1r}X_{2r}} \quad (X_{2r}V_{1r} \cos \theta_{1r} - X_{1r}X_{2r}I_2 \sin \theta_2) \quad \dots\dots (6.11)$$

$$\sin \theta_{1r} = \frac{X_{1r}I_2 \cos \theta_2}{V_{1r}} \quad \dots\dots (6.12)$$

$$\cos \theta_2 = \cos \alpha - \frac{X_{1r}I_2}{6 V_2} \quad \dots\dots (6.13)$$

(en este caso el ángulo de factor de potencia θ_2 es en retraso).

Las tres ecuaciones anteriores se obtienen haciendo $\gamma = \alpha$ en las ecuaciones 6.3, 6.4 y 6.5, cambiando al mismo tiempo el signo de θ_{1r} .

Por lo tanto, si $\alpha = \gamma$, la corriente de falla de c.a. es igual a I_{s1} . La figura 6.7 da el valor de la corriente de falla de c.a. y la potencia de c.c. en función de la intensidad de c.c. Para el caso de $\alpha = 10^\circ$ y valores arbitrarios de $X_{1r} = 0.6$ p.u. y $X_{2r} = 1$ p.u.

Puede verse de esta manera, que el control de ángulo de extinción constante asegura que los niveles de falla de c.a. en un sistema conectado a un inversor, son menores que si el sistema de c.c. fuese sustituido por uno de c.a. de la misma capacidad nominal o menor que si el sistema de C.C. estuviese desconectado. Esta importante conclusión queda representada por la ecuación 6.9.

Como se ha visto, la corriente de falla se reduce al aumentar la intensidad en el sistema de c.c. y que cuanto más se aumente la -

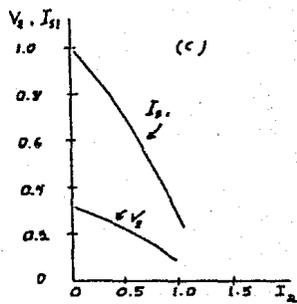
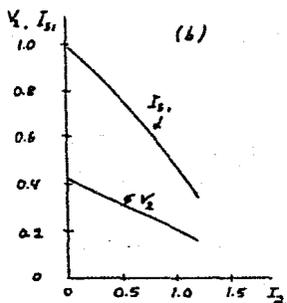
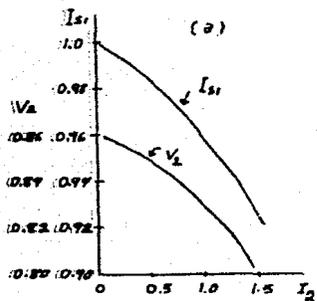


FIGURA 6.4

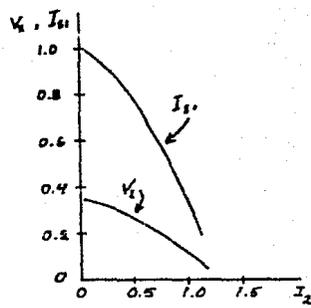
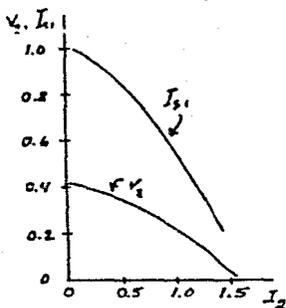
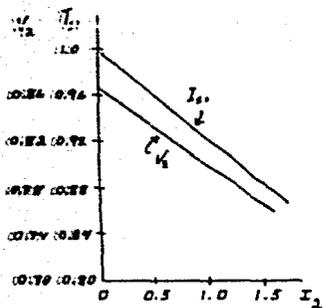


FIGURA 6.5

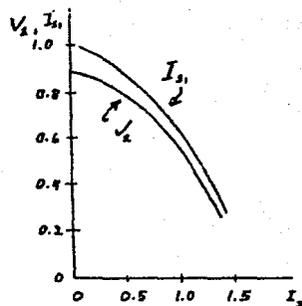
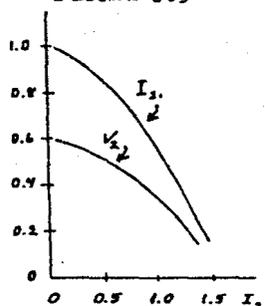
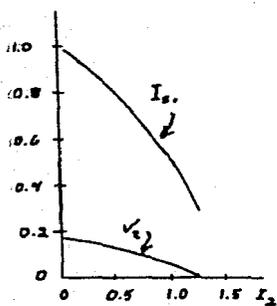


FIGURA 6.6

reactancia X_{1r} , mayor es la reducción. La comparación de las figuras 6.4 y 6.5 muestra, además, que a mayor valor de γ , corresponde un valor menor de la corriente de falla. Esto demuestra de qué manera puede ser utilizado un control de γ , si es necesario, para controlar el nivel de falla de c.a., ahorrando en el costo y características de los interruptores de c.a.

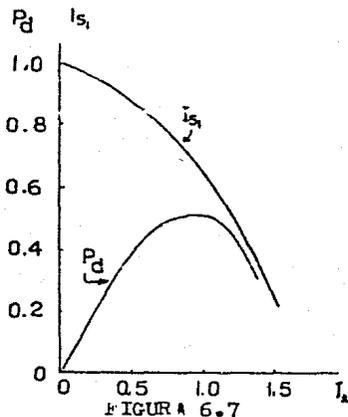


FIGURA 6.7

Según la figura 6.6, cuanto mayor sea la reactancia X_{2r} , mayor será la tensión terminal del convertidor. Además, de lo anterior se deduce que el control de c.c. puede usarse ventajosamente para aumentar la estabilidad del sistema. Ningún sistema interconectado de c.a. tiene esta propiedad, y ésta es la razón fundamental por la que se prefiere utilizar la corriente directa para enlaces de alta tensión cortos.

Haciendo las mismas consideraciones, puede determinarse la corriente de falla para defectos asimétricos.

6.3 Corrientes de cortocircuito monofásico a tierra con resistencia

En el sistema de la figura 6.1, si los puntos neutros de los transformadores del sistema de c.a. (Tr1, Tr2, ...) están puestos a tierra a través de resistencias elevadas, el circuito equivalente aproximado se convierte en el mostrado en la figura 6.8, al ocurrir una falla monofásica a tierra en la línea de c.a.

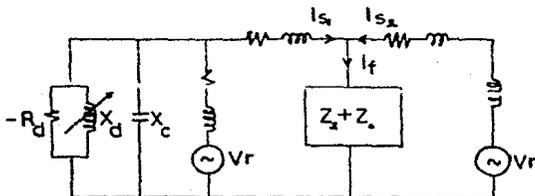


FIGURA 6.8

En la figura 6.8, Z_2 , Z_0 son, respectivamente, las impedancias de secuencia negativa y cero del sistema de c.a. solamente vistas desde el punto de la falla. De nueva cuenta, la corriente de cortocircuito a tierra (I_f) aumenta si se desconecta el sistema de c.c.; es decir, que la ecuación 6.11 tiene validez también para este caso particular de falla asimétrica. El poner a tierra los neutros de los transformadores resulta en la disminución de la impedancia Z_0 conectada en paralelo.

6.4 Corriente de falla de c.a. para el caso de cortocircuito bifásico

Una primera aproximación para calcular la corriente de falla, se deduce del circuito equivalente de la figura 6.9. Una vez más, a causa de la similar configuración del circuito, la corriente de fa -

lla disminuye por la acción del control del circuito de c.c.

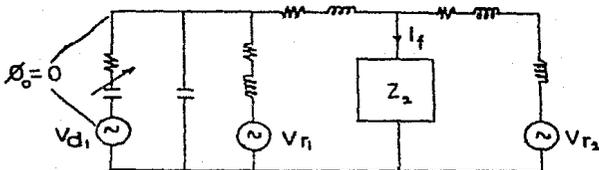


FIGURA 6.9

6.4 Corriente de fallo de c.a. para el caso de cortocircuito bifásico a tierra.

Por el circuito equivalente de la figura 6.10 se puede obtener una primera aproximación de la corriente de falla y, de nuevo, se observa que la corriente de falla disminuye por la acción de control del circuito de c.c.

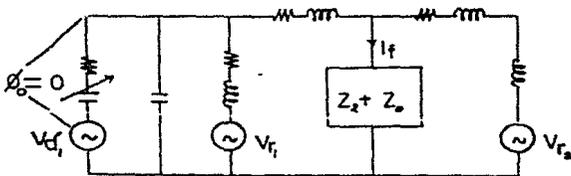


FIGURA 6.10

6.5 Dispositivos de protección de los sistemas de corriente continua

a) Falla de conmutación en los inversores

La falla de conmutación en los inversores puede ser inevitable, si durante el proceso de conmutación tiene lugar una reducción de la tensión de c.a. o si ocurre un fallo en la excitación. El fa -

llo de conmutación en el inversor tiene, inevitablemente, por resultado, un cortocircuito de la c.c. durante un período durante el cual se anula la tensión de retroceso del inversor; si la tensión del inversor no es reducida en la misma proporción, circulará una gran intensidad de corriente, cuya proporción de aumento sólo está limitada por las reactancias de alisamiento. En este caso, el inversor debe ser bloqueado y puesto fuera de servicio. Si, después de una falla en la conmutación, la siguiente conmutación tiene lugar correctamente, entonces el inversor se recobraría automáticamente sin necesidad de ninguna acción de bloqueo y el efecto de fallo en el lado de c.a. será despreciable.

Las causas que dan origen a una falla en la conmutación de un inversor se pueden clasificar conforme a la tabla 6.2.

TIPO DE FALLA	CAUSAS QUE LO PRODUCEN
Falla al encender	<ul style="list-style-type: none"> a) Falla en la excitación b) Falla del circuito de impulsos c) Defecto de la estructura de la compuerta
Autoencendido	<ul style="list-style-type: none"> a) Falla en el bloqueo de la compuerta b) Sobretensiones en la válvula c) Defecto en la compuerta
Retroencendido	Incidencia estadística para cualquier tipo de disposición de los SCR

Un método de detección de fallas en la conmutación consiste en medir $d(I_d)/dt$ midiendo la tensión a través de la reactancia de alisado. Cuando $d(I_d)/dt$ excede de un cierto valor, puede suponerse que existe una falla en la conmutación. Con referencia a la figura 6.11, supongase que ha tenido lugar una falla en el punto A y que

La intensidad aumenta súbitamente. Debido a las reactancias de alisado, la proporción del aumento es limitada, pero $d(I_d)/dt$ ha cambiado de cero a un valor finito; el dispositivo de detección basado en este principio funcionará casi inmediatamente en el punto A, mientras que el basado en la comparación de I_d con I_L funcionará en un punto tal como B, cuando el exceso de I_d es medible. El intervalo de tiempo AB depende de las reactancias de alisado y puede ser del orden de 10 ms.

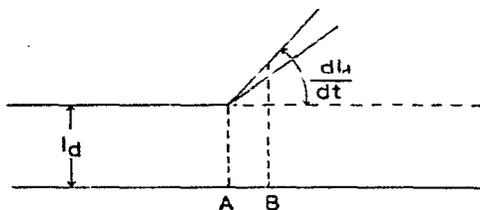


FIGURA 6.11

La desventaja más importante del uso de $d(I_d)/dt$ es que no se puede distinguir entre una falla de conmutación y una variación de la corriente que pueda producirse en el funcionamiento normal.

Quando se ha detectado una falla en la conmutación, se envía una señal a un circuito de avance temporal de fase (fig. 6.12), que enviará a su vez, una señal a un circuito de control de ángulo de extinción constante para aumentar temporalmente el ángulo por un tiempo prefijado, del orden de unos pocos ciclos; por consiguiente, se debe esperar que el inversor reanude el funcionamiento normal. Debe advertirse que tal avance de fase no puede impedir que un fallo de conmutación simple evolucione a uno doble sucesivo, ya que la comparación directa lo detecta demasiado tarde; puede sin embargo, preve-

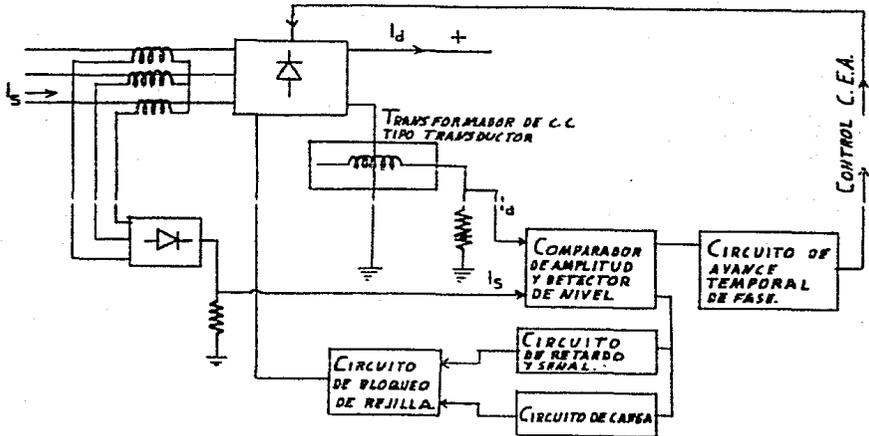


FIGURA 6.12

nir la falla de conmutación doble y posteriores expansiones.

Es conveniente estudiar por separado los elementos individuales de la figura 6.12. El transformador de c.c. tipo transductor ya ha sido mencionado, equipo de este tipo es esencial para derivar una señal de c.c. de la magnitud apropiada sin la presencia de impulsos de conmutación a la salida.

- Comparador de amplitud y detector de nivel

Los requisitos necesarios son los siguientes:

- I) Debe obtenerse una señal de salida cuando $I_d > I_L$.
- II) Respuesta instantánea o muy rápida
- III) Razonable independencia de la temperatura.

- Circuito de avance temporal de fase

Para tal circuito, las condiciones esenciales son las siguientes:

I) Cuando la señal de llegada es una función en escalón de polaridad negativa se obtendrá a la salida un impulso negativo, como en la figura 6.13.d.

II) La duración del impulso, t , debe ser controlable.

Además de éstas, puede haber otra limitación introducida por la impedancia de salida. En la forma original de este circuito, fue necesario hacer la impedancia de salida baja para equipararla con la impedancia de entrada de un dispositivo asociado de control de ángulo de extinción constante.

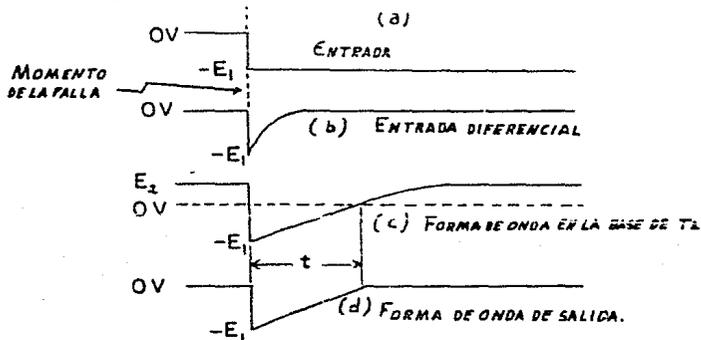


FIGURA 6.13

- Circuito de tiempo para falla en la conmutación

Para éste, los requisitos son los siguientes:

I) El circuito es necesario sólo cuando han sido detectadas fallas de conmutación sucesivas, debiendo dar una señal de salida

lida solamente cuando se ha detectado un segundo fallo dentro de un determinado tiempo desde que sucedió el primero.

II) El intervalo de tiempo aludido en (I) debe ser controlable.

III) La forma más conveniente de la señal de salida es un impulso negativo que pueda ser conducido a los circuitos de bloqueo de la válvula principal del convertidor.

- Circuito de carga

Solamente se necesita que funcione cuando una falla de conmutación dura más tiempo que el límite prefijado. Esto implica, probablemente, algún fallo en los dispositivos del circuito de ángulo de extinción constante. En cualquier caso el inversor debe ser bloqueado y, después de unos ciclos, desbloqueado. Si persiste la falla, - el inversor puede ser bloqueado permanentemente.

b) Detección de una falla de conmutación en el rectificador

Una manera adecuada para detectar una falla de uno u otro tipo principal, es detectar las armónicas de 50 c/s. La señal puede ser comparada, después de rectificadas, con una tensión prefijada d.c.c., cuyo valor representa el contenido de armónicas de 50 Hz. Posible en la tensión de salida de un rectificador en condiciones normales de funcionamiento. Los defectos por falla en el encendido se pueden distinguir de las fallas por autoencendido, puesto que los primeros producen mayor magnitud de armónicas de 50 Hz.

La detección puede hacerse entre las terminales del puente y la reactancia de alisado en el lado de c.a., como lo muestra la figura 6.14.

La señal de falla, V_f , se introduce en dos detectores donde -

se compara con V_1 y V_2 , los dos niveles de tensión prefijados, que representan las fallas de encendido y autoencendido, respectivamente. Si $V_1 > V_2$, el detector 2 emitirá una señal a través del circuito de retardo y la "puerta", a un circuito de señal. Este hace funcionar a la unidad de bloqueo para un bloqueo transitorio. Sin embargo, si V_f supera a V_1 , tendrán que funcionar los dos detectores de nivel, puesto que $V_1 > V_2$; pero el detector 2 funcionará antes que el 1, puesto que V_f tomará el valor V_2 antes que V_1 . El circuito de retardo actúa, entonces, demorando la señal del detector del nivel 2, de tal manera que la señal A llegue al circuito "puerta" antes que la B, y este circuito no dé ninguna salida.

El indicador 1 funcionará, así como el circuito de señal, pero no así el indicador 2, informando de esta manera la falla de encendido de la válvula.

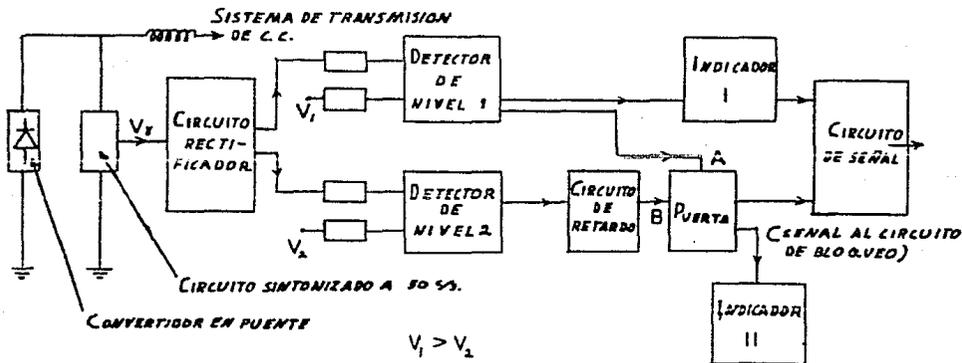


FIGURA 6.14

La unidad de bloqueo obstruirá el puente rectificador durante

algunos ciclos, desbloqueándolo posteriormente; si persiste el defecto de falla, el puente será bloqueado indefinidamente.

6.6 Fallas en la línea de transmisión de corriente continua

Este tipo de falla origina una gran intensidad de corriente en el rectificador, si no está controlado. Pero debido al control de intensidad constante, el ángulo α del rectificador aumentará, estableciéndose en algo menos de 90° .

Esta falla originará también la detención del inversor, ya que la tensión de c.c. se anula, por lo que deberá ser despejada lo antes posible. Esto sólo puede conseguirse bloqueando el rectificador. Por ejemplo, en el supuesto de que un aislador se halla cortado por cualquier motivo pasajero, el arco originado, una vez iniciado, no se extinguirá mientras no sea cortada la corriente. De aquí la necesidad de bloquear el rectificador y seguidamente, una vez que haya desaparecido la corriente, desbloquearlo. Cabe aclarar, que existen interruptores que detectan el cortocircuito en la línea y abren el circuito, por medio de crear su propio cruce por cero, sin embargo su costo es tan alto que se prefiere seguir el método ya mencionado.

Si al inversor se le ha provisto también con un control de corriente constante, el ángulo del inversor aumentará a más de 90° (si el control lo permite) y trabajará como rectificador para mantener el valor de intensidad prefijado. En ese caso, la corriente en el punto de falla será solamente la correspondiente al " ajuste de margen " , es decir, el exceso entre el ajuste del rectificador y el inversor, existiendo muchas más posibilidades de una rápida recuperación.

ción y menos probabilidad de daño permanente causado por el arco en el punto de falla. No obstante, es necesario el bloqueo del rectificador para eliminar el defecto; si hay varios puentes en serie del mismo lado de la Puesta a tierra, será necesario bloquear todos ellos.

Sin embargo, si el sistema utiliza dos conductores externos, con neutro aterrizado, sólo será necesario bloquear el lado (Positivo o negativo) donde esté la falla, pudiendo continuar ininterrumpidamente el suministro por el otro lado y utilizando la tierra como retorno.

Si el defecto es permanente, no será útil el reenganche, y el rectificador será bloqueado de nuevo. En tal caso, es necesario efectuar una parada hasta que la avería sea reparada, o cambiar a otro conductor (si es posible hacerlo).

Pueden suceder estas fallas por causa de un aislador roto o contaminado, hielo sobre los aisladores, sobretensiones, y en el caso de cables, fallas en el aislamiento. Los cables subterráneos son expuestos, además a averías mecánicas causadas por la actividad de los barcos. Para tales casos, el único remedio es bloquear el rectificador; debe ponerse cuidado, sin embargo, en asegurarse que el rectificador no sea bloqueado como consecuencia de una falla en el inversor (que también aparece como un cortocircuito de c.c., visto desde el rectificador), ya que el inversor es capaz de recobrase de sus propias fallas.

Así, pues, es necesario establecer una discriminación entre las fallas en el inversor y las fallas en la línea de c.c., pudiendo detectarse estas últimas midiendo la tensión en el lado de salida de

c.c., después de la reactancia de alisado, ya que, para un defecto - en la línea de c.c., la tensión caerá casi a cero.

Puede conseguirse una diferenciación rápida midiendo la magnitud de aumento de la intensidad de c.c., y puede completarse midiendo la tensión transitoria a través de la reactancia de alisado del - rectificador por medio de un transformador de medida. Se obtendrá la discriminación entre los dos tipos de falla ajustando un límite de $d(i)/dt$ debido a fallas en el inversor, por debajo del cual no será bloqueado el rectificador.

Se puede disponer un reenganche automático después de un tiempo predeterminado, como en la práctica habitual de las líneas de - transmisión de c.a.a.t.; si la falla es transitoria, continuará la - transmisión después de una corta interrupción.

CONCLUSIONES

- Los sistemas de corriente continua aventajan a los tradicionales sistemas de C.A. en los siguientes aspectos: Las pérdidas por efecto corona y radiointerferencias son menores, los niveles de aislamiento requeridos para una línea o una subestación de corriente continua no son comparables a los requeridos por un sistema de C.A. Un sistema de C.D. no presenta problemas de estabilidad y no se encuentra restringido en cuanto a longitud de las líneas por no existir efectos capacitivos.
- El principal campo de aplicación de los sistemas de corriente continua y alta tensión en el territorio mexicano es en el área de las interconexiones, las cuales pueden enlazar sistemas con distinta frecuencia de operación (esto tiene la ventaja de poder importar o exportar energía eléctrica a los países vecinos según sea el caso), las interconexiones en C.D. pueden enlazar sistemas que, si se hiciera la interconexión en C.A., originaría problemas de resonancia o inestabilidad en el entero sistema.
- El circuito tipo puente resulta ser el más indicado para usarse en la transmisión de energía eléctrica por corriente continua y alta tensión, su simplicidad y costo son las principales razones para aseverar lo anterior.
- El costo de una línea aérea de C.D. es menor que el de una línea aérea de C.A., puesto que requiere menos conductores, un nivel de aislamiento más bajo y torres más sencillas estructuralmente que las de C.A. En el caso de las líneas subterráneas, se han preferido siempre, sobre las de C.A., las líneas de corriente-

continua, porque no tienen problemas de sobrecalentamiento, no existen pérdidas en el dieléctrico y no se requiere compensar reactivos.

- Existen cuatro distintas formas de regular el paso de potencia a través de las estaciones conversoras, variando el ángulo de disparo de los rectificadores, variando el ángulo de extinción de los inversores, una mezcla de ambos (control de f constante) o variando la tensión en los transformadores, ya sea del lado rectificador o del lado inversor. En las transmisiones actuales, se usa una combinación de los métodos ya mencionados, puesto que ninguno presenta ventajas absolutas sobre los demás.

- Un control adecuado de las estaciones conversoras minimiza la intensidad de corrientes de corto circuito en un enlace de C.D./C.A. y este control puede usarse ventajosamente para aumentar la estabilidad del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- Arrillaga J., Brameller A., Campos-Barros J. y Wong K.P.; "Fault Level Comparisons in A.C./D.C. Transmission Systems"; IEEE Conference Publication No. 108.
- ASEA; "HVDC Seminar"; HV Switchgear and HVDC Converter Division.
- Bedford H.; "Principles of Inverter Circuits"; John Wiley and Sons.
- Bevan R.A.; "Surge Protection of High Voltage D.C. Transmission Lines"; IEEE Conference Publication No. 108.
- Casson W. y Lane F.J.; "Interconnection of Electricity Supply Systems by Means of Combined A.C./D.C. Circuits"; IEEE Conference Publication No. 107.
- Cory B.J.; "Convertidores y Sistemas de C.C. de Alta Tensión"; Ediciones URMO.
- Danfors P. y Hammarlund B.; "Comparison between A.C. and D.C. in choice of Transmission Voltage"; IEEE Conference Publication No. 107.
- Dey P. and Orawski G.; "Optimisation of Direct Current Overhead Transmission Lines"; IEEE Conference Publication No. 109
- Erche M. y Kunisch H.J.; "Economic Aspects of HVDC and HVAC Cable Systems"; IEEE Conference Publication No. 109.
- Gilsig T. y Karady G.; "System Constraints on High Voltage D.C. Thyristor Valves"; IEEE Conference Publication No. 107.
- Hall J.E.; "A.C. or D.C. Power System Interconnection Considerations"; IEEE Conference Publication No. 107.
- Knight U.G.; "Operational Aspects of the Comparison between A.C.

- and D.C. Transmission "; IEEE Conference Publication No. 107.
- Kosow I.I.; " Máquinas Eléctricas y Transformadores "; Reverté.
 - Krishnaya P.C.S.; " Some Considerations on the Use of HVDC Power Transmission in Developing Countries "; IEEE Conference Publication No. 109.
 - Roy, Jean-Claude; " Evaluation of EHV Transmission Options "; IEEE Conference Publication No. 108.
 - Sugandhi R.K. y Sugandhi K.K.; " Tiristores, Conceptos y Aplicaciones "; LIMUSA.
 - Tani T., Horigome T., Sato H., Hara T. y Meri H.; " Thyristor Converter Valve for 10 kV, 30 kA D.C. Bridge "; IEEE Conference Publication No. 107.
 - Viqueira Landa J.; " Redes Eléctricas, Tomo I "; Representaciones y Servicios de Ingeniería.
 - Viqueira Landa J.; " Redes Eléctricas, Tomo II "; Representaciones y Servicios de Ingeniería.
 - Weedy B.M.; " Líneas de Transmisión Subterráneas "; LIMUSA.

APPENDICE I

Comparación de Costos de los enlaces entre la Planta Generadora Chicoasén y la Subestación Topilejo, realizado por R. E. Clayton de la empresa POWER TECHNOLOGIES INCORPORATED, (Memorandum 5049-8), para la COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD en 1975.

Opción CA 400 kV (G 1.5)

Estimación del costo de instalación 1975

Concepto	Costo Unitario (US\$)	Costo Total (US M\$)
<u>Líneas</u>		
2 X 400 kV-370 km, CHSN-TEMASC	364,960/km (1)	729.92
1 X 400 kV-370 km, TEMASC-TOFIL	64,960/km	64.96
<u>Compensación Serie</u>		
3 X 62 MVAR, MALPASO-MINATITLAN	9.628/kVAR (1)	2.8884
2 X 87.5 MVAR, TEMASC-PUEBLA	9.628/kVAR	19.256
2 X 161 MVAR, CHSN-TEMASC	9.628/kVAR	19.256
1 X 107 MVAR, TEMASC-TOFIL	9.628/kVAR	9.628
<u>Subestación</u>		
1 en CHSN	1.67 X 10 ⁶ (1)	1.67
1 en TEMASC	1.67 X 10 ⁶	1.67
2/3 en TEMASC	1.11 X 10 ⁶ (2)	1.11
2/3 en TOFIL	1.11 X 10 ⁶	1.11
		<u>84.66</u>

(1) Costos CFE 1975

(2) Costo proporcional de (1)

CHSN: Chicoasén

TEMASC: Temascal

TOFIL: Topilejo

PTI: Power Technologies, Inc.

Opción CA 400 kv (G 2.5)
Estimación del costo de instalación 1975

Concepto	Costo Unitario (US\$)	Costo Total (US M\$)
<u>Líneas</u>		
3 X 400 kv-370 km, CHSN-TEMASC	\$64,960/km (1)	\$72.11
2 X 400 kv-370 km, TEMASC-TOFIL	64,960/km	48.07
<u>Compensación Serie</u>		
3 X 59 MVAR, MALPASO-MINATITLAN	9.628 X 10 ⁶ (1)	1.70
<u>Subestación</u>		
1 en CHSN	1.67 X 10 ⁶ (1)	1.67
2/3 en CHSN	1.11 X 10 ⁶ (2)	1.11
2 X 1 en TEMASC	1.67 X 10 ⁶	3.34
2/3 en TEMASC	1.11 X 10 ⁶	1.11
1 en TOFIL	1.67 X 10 ⁶	1.67
		<u>\$130.78</u>

(1) Costos CFE 1975

(2) Costo proporcional de (1)

Opción híbrida CD +400 kv (G C.5)
Estimación del costo de instalación 1975

Concepto	Costo Unitario (US\$)	Costo Total (US M\$)
<u>Líneas</u>		
1 X +400 kv CD-740 km, CHSN-TOFIL	\$50,000/km (1)	\$37.00
1 X 400 kv - 370 km, CHSN-TEMASC	64,960/km (2)	24.03
<u>Convertidores</u>		
2 de 1000 MW	40.81/kw (3)	81.62
<u>Compensación Serie</u>		
1 X 161 MVAR, CHSN-TEMASC	9.628/kVAR (2)	1.55
3 X 62 MVAR, MALPASO-MINATITLAN	9.628/kVAR	1.79
<u>Subestación</u>		
2/3 en CHSN	1.11 X 10 ⁶ (4)	1.11
1/3 en TEMASC	0.56 X 10 ⁶ (4)	0.56
		<u>\$147.66</u>

(1) PTI

(2) CFE

(3) ASEA

(4) Costo proporcional de (2)

Opción híbrida 800 kv (G 8H)
Estimación del costo de instalación 1975

Concepto	Costo Unitario (US\$)	Costo Total (US M\$)
<u>Líneas</u>		
1 X 800 kv-370 km, CHSN-TEMASC	\$138,000/km (1)	\$51.06
1 X 800 kv-370 km, TEMASC-TOPIIL	138,000/km (2)	51.06
1 X 400 kv-370 km, CHSN-TEMASC	64,900/km (2)	24.03
<u>Subestación</u>		
<u>TOPIIL</u>		
2 X 2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	4.44
2/3 en 400 kv	1.11 X 10 ⁶ (3)	1.11
2 X 800/400 kv, transf. 600 MVA	2.62 X 10 ⁶ (2)	5.24
<u>TEMASC</u>		
1 en 800 kv	3.34 X 10 ⁶ (1)	3.34
2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	2.22
1/2 en 400 kv	0.56 X 10 ⁶ (3)	0.56
2 X 800/400 kv, transf. 600 MVA	2.62 X 10 ⁶ (2)	5.24
<u>CHSN</u>		
2 X 2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	4.44
2 X 2/3 en 400 kv	1.11 X 10 ⁶ (3)	2.22
2 X 800/411 kv, transf. 600 MVA	2.62 X 10 ⁶ (2)	5.24
		<u>\$160.20</u>

(1) PTI

(2) CPE

(3) Prorrata CPE

Opción 800 kv circuito simple (G 1X8)
Estimación del costo de instalación 1975

Concepto	Costo Unitario (US\$)	Costo Total (US M\$)
<u>Líneas</u>		
1 X 800 kv-370 km, CHSN-TEMASC	\$138,000/km (1)	\$51.06
1 X 800 kv-370 km, TEMASC-TOPIIL	138,000/km	51.06
<u>Subestación</u>		
<u>TOPIIL</u>		
2 X 2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	4.44
2/3 en 400 kv	1.11 X 10 ⁶ (3)	1.11
2 X 800/400 kv, transf. 600 MVA	2.62 X 10 ⁶ (2)	5.24
<u>TEMASC</u>		
1 en 800 kv	3.34 X 10 ⁶ (1)	3.34
2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	2.22
2 X 800/400 kv, transf. 900 MVA	3.93 X 10 ⁶ (2)	7.87
<u>CHSN</u>		
2 X 2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	4.44
1 X 2/3 en 400 kv	1.11 X 10 ⁶ (3)	1.11
2 X 800/400 kv, transf. 900 MVA	3.93 X 10 ⁶ (2)	7.87
		<u>7.87</u>
		\$139.76

- (1) PTI
(2) CPE
(3) Prorrata CPE

Opción 800 kv circuito doble (G 2x8)
Estimación del costo de instalación 1975

Concepto	Costo Unitario (US\$)	Costo Total (US M\$)
<u>Líneas</u>		
2 X 800 kv-370 km, CHSN-TEMASC	\$138,000/km (1)	\$102.12
2 X 800 kv-370 km, TEMASC-TOPIIL	138,000/km	102.12
<u>Subestación</u>		
<u>TOPIIL</u>		
1 en 800 kv	3.34 X 10 ⁶ (1)	3.34
2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	2.22
2/3 en 400 kv	1.11 X 10 ⁶ (3)	1.11
2 X 800/400 kv, transf. 600 MVA	2.62 X 10 ⁶ (2)	5.24
<u>TEMASC</u>		
2 en 800 kv	3.34 X 10 ⁶ (1)	6.68
2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	2.22
2 X 800/400 kv, transf. 900 MVA	3.93 X 10 ⁶ (2)	7.87
<u>CHSN</u>		
1 en 800 kv	3.34 X 10 ⁶ (1)	3.34
2/3 en 800 kv	2.22 X 10 ⁶ (1)	2.22
2/3 en 400 kv	1.11 X 10 ⁶ (3)	1.11
2 X 800/400 kv, transf. 900 MVA	3.93 X 10 ⁶ (1)	7.87
		<u>\$247.46</u>

- (1) PTI
(2) CFE
(3) Prorrata CFE