

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



CONTROL DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

JHONNY ARMANDO MEJÍA CUZCANO

PROMOCIÓN

2001- II

LIMA – PERÚ

2011

**CONTROL DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
EN CORRIENTE CONTINUA**

DEDICATORIA:

A mi madre y mi hijo por apoyarme y entregarme su amor siempre sin importar el motivo.

SUMARIO

Los Sistemas de Transmisión de Energía de Alto Voltaje en Corriente Continua HVDC (del inglés "High Voltage Direct Current"), han aumentado considerablemente en el último tiempo; este tipo de transmisión presenta, para ciertas aplicaciones, varias ventajas en comparación a la transmisión tradicional en corriente alterna. Entre sus principales usos se destaca la transmisión de energía a largas distancias y la transmisión subterránea, caracterizándose por su alta controlabilidad, seguridad y precisión. Estos sistemas necesitan gran cantidad de componentes, con diferentes funciones entre sí para poder operar de forma óptima, por lo que su correcta implementación presenta varios desafíos. El sistema de control de estos enlaces puede ser considerado como uno de los elementos más complejos e importantes del sistema de transmisión de corriente continua, ya que en un alto grado determina toda la forma de funcionamiento tanto del sistema de corriente continua (CC) como de los sistemas de corriente alterna (AC) conectados por el enlace.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA (HVDC)	2
1.1.- Antecedentes	2
1.2.- Objetivos	3
CAPÍTULO II	
INTRODUCCIÓN A LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA	4
2.1.- Introducción	4
2.2.- Comparación frente a Sistemas de corriente Alterna	4
2.2.1.- Características Técnicas	4
2.2.2.- Características Ambientales	6
2.2.3.- Características Económicas	6
2.3.- Configuraciones de enlace de corriente continua	8
2.3.1. - Monopolar	8
2.3.2.- Homopolar	9
2.3.3. - Bipolar	9
2.3.4. - Back to Back	9
2.4. - Componentes de un Sistema de Corriente Continua	10
2.4.1.- Estaciones Convertidoras	10
2.4.2.- Filtros AC	11
2.4.3.- Filtros DC	11
2.4.4.- Conductores de la línea	11
2.4.5.- Fuentes de Potencia Reactiva	11
2.5.- Tecnología del Convertidor Conmutado por Línea (LCC)	11
2.5.1.- Rectificador Controlado de Silicio o Válvulas	12
2.5.2.- Convertidor Controlado de 6 pulsos	13
2.5.3.- Funcionamiento del rectificador	14
2.5.4.- Inversión del flujo de potencia	15
2.5.5.- Voltajes y Corrientes	15
2.5.6.- Ángulos en las estaciones convertidoras	16

2.5.7.-	Compensación de potencia reactiva	16
2.5.8.-	Rectificador de 12 pulsos	17
2.5.9.-	Fallas de conmutación	18
CAPÍTULO III		
CONTROL EN TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE		
CONTINUA		
3.1.-	Introducción	20
3.2.-	Principios básicos de Control	21
3.2.1.-	Principios de control	21
3.2.2.-	Ecuaciones Básicas del Rectificador e Inversor	23
3.2.3.-	Requerimientos básicos de control	25
3.2.4.-	Control básico	26
3.2.5.-	Control de corriente en el inversor	26
3.2.6.-	Característica Ideal	27
3.2.7.-	Características reales	29
3.2.8.-	Combinación de características de rectificador e inversor	30
3.2.9.-	Límite de corriente	31
3.2.10.-	Limitador de corriente dependiente del Voltaje (VDCOL)	33
3.2.11.-	Ángulo límite de disparo	33
3.2.12.-	Modos de control alternativos en el inversor	33
3.3.-	Control del Sistema de Disparo	35
3.3.1.-	Sistema de control de fase individual (IPC)	36
3.3.2.-	Sistema de control de pulso equidistante (EPC)	36
3.4.-	Control del Transformador de Conversión	37
3.5.-	Jerarquía y Organización del Sistema de Control	37
3.5.1.-	Control Maestro	38
3.5.2.-	Controlador del polo	39
3.5.3.-	Control del grupo de válvulas y tiristores	40
3.6.-	Controles Avanzados	41
3.6.1.-	Control de frecuencia y de potencia/frecuencia	41
3.6.2.-	Estabilización de la red AC por medio de una línea DC	41
3.6.3.-	Amortiguación de oscilaciones sub síncronas	42
3.6.4.-	Control de voltaje	42
CAPÍTULO IV		
CASO DE APLICACIÓN DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (HVDC)		
4.1.-	Sistema de Transmisión Aysén-Chile	44
4.2.-	Especificaciones generales	44

CONCLUSIONES	45
ANEXO A (Modelo de aplicación)	47
ANEXO B (Simulación)	53
BIBLIOGRAFÍA	60

INTRODUCCIÓN

El sistema de control de un enlace de corriente continua se puede considerar como el corazón de todo el enlace HVDC, ya que en un alto grado determina las propiedades de operación de todo el sistema de transmisión. El sistema de control de un enlace de corriente continua si bien se encarga de controlar todas las variables del sistema (potencia activa y reactiva, protecciones, fallas, rendimiento, ruido, comunicaciones, etc.), su principal función es controlar la tensión y la corriente de las líneas de transmisión, ajustando los ángulos de disparo y de extinción de los tiristores en las estaciones rectificadoras e inversoras.

Es usual para el control de la transmisión de HVDC, que una de las dos conversoras fije el voltaje (generalmente inversor), mientras el otro regule la corriente controlando el voltaje DC relativo al que mantiene fijado la otra estación.

Debido a que la resistencia de la línea DC es baja, pequeños cambios en el voltaje del lado rectificador implican un gran incremento en la corriente DC, y por lo tanto la potencia puede ser controlada con pequeños cambios de los ángulos de disparo. En general se utilizan dos métodos independientes para controlar el voltaje DC de las estaciones conversoras:

- i) Modificando el ángulo de disparo α de los tiristores
- ii) Modificando el voltaje AC de la estación conversora por medio de los taps de los transformadores de conversión.

La gran controlabilidad de los sistemas de control de corriente continua por medio del control de los ángulos de disparo en las estaciones conversoras, presenta varias ventajas en comparación a la transmisión tradicional en corriente alterna. En este tipo de transmisión la potencia transmitida por el enlace puede ser controlada completamente, lo que puede ser utilizado para mejorar la estabilidad transitoria y permanente de los sistemas AC conectados al enlace. Además de esto, una de las principales ventajas de este tipo de transmisión consiste en el gran número de servicios y aplicaciones auxiliares en que se pueden utilizar en estos sistemas, aplicaciones tales como controlar frecuencia en alguno de los sistemas AC conectados por el enlace, controlar oscilaciones armónicas o subsincrónicas, controlar el voltaje AC en la estación rectificadora o inversora, etc.

CAPÍTULO I

TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA (HVDC)

1.1.- Antecedentes

En los últimos años los sistemas de transmisión de energía en corriente continua han tenido un aumento significativo. Las distintas ventajas que posee este tipo de tecnología han hecho que para un gran número de aplicaciones esta tecnología haya reemplazado a la transmisión tradicional en corriente alterna. En la actualidad la transmisión de corriente continua se puede considerar como una tecnología consolidada con aproximadamente 5,000.000 GW instalados en más de 200 proyectos a lo largo de todo el mundo^[4].

Si bien los sistemas HVDC ya cuentan con la madurez suficiente y se puede considerar una tecnología consolidada en el mundo, en nuestro país no se encuentran aplicaciones de esta tecnología. Por lo anterior la transmisión en corriente continua en alto voltaje representa un tópico relativamente nuevo en nuestro país que ha surgido de la necesidad de transmitir grandes volúmenes de energía con reducidas pérdidas a través de distancias largas.

La primera transmisión comercial fue construida por ASEA (ABB) en 1954 (100 kV, 20 MW) que Interconectaba la isla de Gotland con Suecia mediante un cable submarino de 98km. El problema más importante que tenían los primeros dispositivos eran las bajas potencias que podían procesar, alrededor de 30MW, y el elevado costo que tenían. En 1967 se comenzó a utilizar válvulas de estado sólido (tiristores) en la transmisión en HVDC, siendo Gotland una vez más el primer enlace en manejar esta tecnología.

El primer ejemplo de aplicación de tiristores lo encontramos en Canadá, con una instalación también pionera por ser la primera conexión de Doble Convertidor (back-to-back) del mundo, esta tenía una potencia de 320MW.

Los mayores proyectos realizados hasta la fecha son:

- Mayor enlace construido (Itaipu, Brasil): 6.300 MW, ± 600 kV, Año 1985.
- El mayor convertidor (Gorges-Changzhou, China): 1.500 MW, 500 kV, Año 2002.
- El cable subterráneo de mayor longitud con tecnología de Convertidor de Fuente de Tensión VSC (del inglés "Voltage Source Converter") en Murraylink, Australia: 180 km. 200 MW, Año 2002.

- El mayor sistema VSC (Cross Sound, USA): 330 MW. Año 2002.
- Primera carga en alta mar (plataforma petrolífera Troll, Noruega): 2x42 MW. (Proyecto en año 2002).
- Primer sistema multiterminal (Québec-Nueva Inglaterra, Canadá): 2000 MW. Año 1992.
- El cable submarino tendido a mayor profundidad (Italia-Grecia): 1km. Año 2001.
- Tres gargantas Shanghái (China). Tecnología de conmutación con tiristores de segunda generación, línea de 900km, 3000MW, 150kV, Año 2007.
- Instalación de línea eléctrica aérea de deshielo. Levis De-Icer Canadá ± 250 MW, 242km, 17kV, Año 2008
- Proyecto Ballia-Bhiwadi, (India). Línea de 700km. 2500MW , 500kV, año 2009

Actualmente en Chile existen dos proyectos de generación que estudian la tecnología HVDC para viabilizar la transmisión de su potencia a su respectivo Sistema Interconectado desde el extremo sur del país. Los proyectos de HidroAysén y Energía Austral considera la construcción de centrales hidroeléctricas de gran tamaño en la región de Aysén. La energía generada por estas centrales deberá ser conducida por un sistema de transmisión eléctrica hasta el Sistema Interconectado del país en mención. La tecnología que permitirá esta transmisión en forma eficiente es HVDC, tecnología que utiliza válvulas de tiristores para concretar la conversión AC-DC y viceversa ^[6].

Un sistema de transmisión en corriente continua se encuentra conformado por diferentes elementos, sin embargo, los principales componentes de este tipo de transmisión son las llamadas estaciones convertoras. Normalmente se utiliza una estación rectificadora, encargada de transformar la corriente desde alterna a continua, y una estación inversora, encargada de realizar el proceso inverso. Si bien existen diversas tecnologías utilizadas para realizar este doble proceso, la más antigua y utilizada es la del Convertidor Conmutado por Línea (LCC) del inglés Line Commutated Converter, caracterizada por la utilización de tiristores.

1.2.- Objetivos

Con el presente informe se persiguen los siguientes objetivos generales:

- Describir la tecnología HVDC, el funcionamiento de sus componentes y sus ventajas y desventajas con respecto a la transmisión de corriente alterna.
- Estudiar el control de un sistema de corriente continua y sus modelos con el fin de proporcionar una operación eficiente y estable de control de potencia sin comprometer la seguridad de los componentes del Sistema de Transmisión.

CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN A LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA

2.1.-Introducción

La transmisión de energía fue desarrollada originalmente en corriente continua. La disponibilidad de transformadores y el desarrollo de motores de inducción a comienzos de los años 20, fueron uno de los principales factores para la entrada de la transmisión en corriente alterna, que por un periodo de tiempo fue la única tecnología para la transmisión de energía eléctrica. A pesar de esto, la tecnología de transmisión en corriente continua continuó desarrollándose en paralelo.

Las ventajas económicas de la transmisión en corriente continua eran conocidas desde los primeros días del desarrollo de los sistemas de potencia, sin embargo las aplicaciones en corriente continua tuvieron que esperar el desarrollo y sustentabilidad de la electrónica de potencia.

El primer enlace en HVDC se realizó en el año 1954 en Alemania, existiendo a esta fecha una gran cantidad de enlaces de corriente continua instalados a lo largo de todo el mundo. La transmisión HVDC se puede considerar como una tecnología consolidada, aunque en continua evolución tanto por el desarrollo de la electrónica de potencia como por las mejoras tecnológicas de los cables y líneas de transmisión.

En este capítulo se presentan los principios básicos de la transmisión en corriente continua, así como los principales componentes asociados a este tipo de tecnología. Por otra parte, se describen las principales ventajas que tienen este tipo de sistemas de transmisión en comparación con la transmisión en corriente alterna.

2.2. Comparación Frente a Sistemas de corriente Alterna

2.2.1. Características Técnicas

Las diferencias más notables de un sistema de CC con uno de AC son las siguientes:

- Debido a la elevada corriente capacitiva de excitación que requieren los cables que transmiten corriente alterna, las distancias de transmisión se ven limitadas y por ejemplo los enlaces submarinos no pueden sobrepasar los 30 o 40 km. Como es sabido, este efecto capacitivo no existe en corriente continua, por lo que no existen límites en la longitud de los cables, además pueden ser de un diámetro menor.

- El unir dos grandes sistemas con un mismo enlace de Corriente continua genera transferencias de potencia que varían con las pequeñas oscilaciones que sufre la frecuencia de cada sistema. Para evitar esto, en sistemas AC se aplican sistemas de control en las centrales de generación. Este problema es evitado con un enlace de corriente continua ya que genera un enlace asíncrono entre ambos sistemas AC.
- Por la misma razón anterior (conexión asíncrona), es posible conectar con un enlace de corriente continua dos sistemas de distinta frecuencia.
- En líneas aéreas AC es necesario elevar la tensión para evitar problemas de estabilidad, lo que hace que la línea quede operando fuera del óptimo económico, además para operar con baja carga se conectan condensadores serie y reactores paralelo. Esto en Corriente continua es totalmente prescindible y la línea puede ser operada en su óptimo económico. Además sólo se necesita un cable aéreo en vez de los tres de AC y no es necesario realizar trasposiciones.

Si bien, las anteriores son las diferencias técnicas más importantes, es necesario agregar algunas que pueden ser decisivas al momento de establecer un proyecto:

- Gracias a que en DC el campo es unidireccional (pues en general el flujo de potencia es unidireccional) es posible disminuir de forma importante la aislación en los cables.
- Las sobretensiones de maniobra en DC son mucho menores (1,5 a 2 veces la tensión nominal) en comparación con las ocurridas en AC (2 a 3 veces la nominal).
- Es necesario un gran consumo de reactivos (cerca al 50% y hasta 60% de la potencia activa transmitida) en las subestaciones convertoras que utilizan la tecnología clásica en corriente continua. En corriente alterna el consumo de reactivos depende del largo de la línea (reactancia) y llega a ser mayor pasado los 400Km en comparación con DC.
- Gracias al rápido control de las válvulas de un enlace de corriente continua las sobrecorrientes producidas por una falla llegan a ser mucho menores que en el caso AC.
- Esta velocidad también puede ser aprovechada para amortiguar oscilaciones en las variables del lado AC.
- Además, reacciona de manera casi instantánea a los cambios de potencia activa que puede manifestar la demanda.
- No es posible elevar o disminuir fácilmente el nivel de tensión en el lado DC. Sin embargo en la actualidad esto es prescindible porque se puede elevar o disminuir fácilmente la tensión en AC y luego trabajar con grandes voltajes en DC.
- Las corrientes armónicas generadas por un enlace de corriente continua son de un nivel importante ^[5].

2.2.2. Características Ambientales

Las principales características ambientales de un sistema de corriente continua en comparación con uno de corriente alterna son:

- Los campos magnéticos en corriente alterna pueden llegar a ser 3 veces mayor a la necesaria con una instalación de corriente continua para transmitir la misma potencia.
- Necesidad de una franja de servidumbre menor para líneas aéreas HVDC en comparación con HVAC, con la misma transmisión de potencia y con torres más simples, por lo que el impacto visual también es menor (ver figura 2.1).
- Los campos eléctricos y magnéticos generados por una línea HVDC son estáticos y del mismo orden de magnitud que los generados por la Tierra de forma natural, por lo que a priori no afectan negativamente a ningún ser vivo. En el caso de los campos magnéticos, éstos se anulan al instalar retornos metálicos.
- La generación de ozono por efecto corona es del mismo orden de magnitud que el generado en procesos naturales.
- En las instalaciones monopolares con retorno por tierra, el campo magnético puede modificar la lectura de una brújula en las proximidades del cable. Esto puede solucionarse mediante un retorno metálico que anule dicho campo magnético. Estas instalaciones también pueden inducir corrientes en tuberías o conductos metálicos cercanos a las estaciones de conversión. En estos casos, la instalación de un retorno metálico puede ser también necesario.
- El efecto corona es superior en HVAC, por lo que las medidas para atenuarlo deben ser mayores, con el costo que esto acarrea.
- La altura geográfica de la instalación afecta más a las líneas aéreas HVDC que a la HVAC, debido a que las tensiones tipo rayo y la densidad del aire (inferior a mayor altura) están relacionadas ^[5].

2.2.3. Características Económicas

Las características económicas de los sistemas de corriente continua son efectivamente las que han postergado su participación en el mundo, estas se listan a continuación:

- El alto costo de las estaciones convertoras, que basan su tecnología en dispositivos semiconductores controlados, son en general mayores a las subestaciones tradicionales primero por el costo de los mismos dispositivos electrónicos pero también por el del equipo adicional necesario.
- Es necesario abastecer el consumo de potencia reactiva de las subestaciones rectificadoras y disminuir la amplitud de las armónicas de corriente que se transmiten hacia el lado AC mediante condensadores y reactores en las mismas subestaciones,

que elevan el costo de inversión de un esquema de corriente continua.

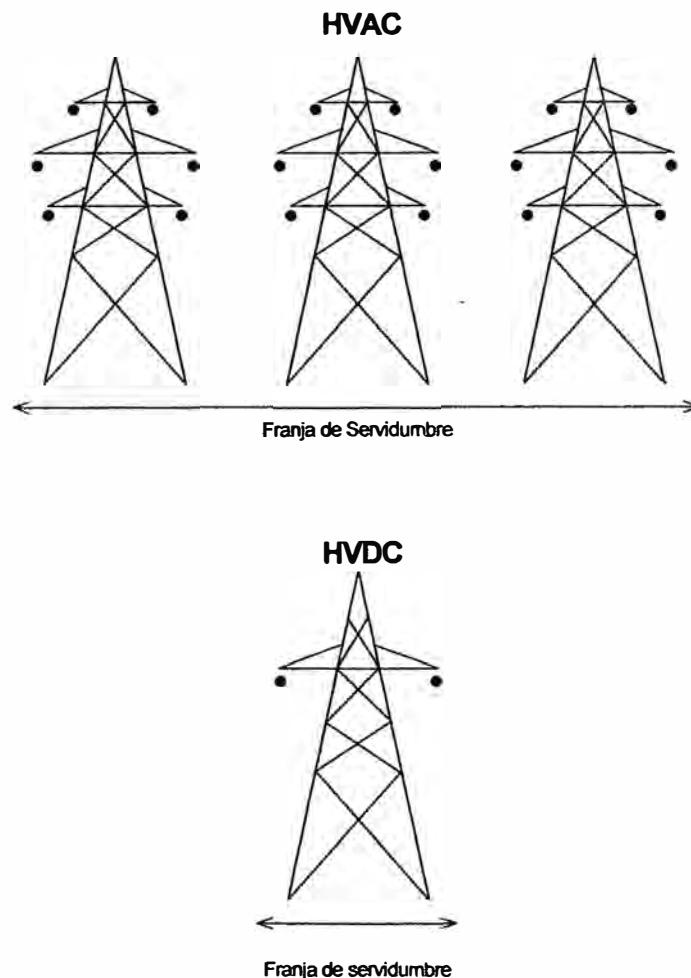


Fig.2.1 Torres típicas para transportar 1000 MW

- Debido a las dificultades técnicas presentadas anteriormente en un sistema de corriente alterna al aumentar la longitud de una línea de transmisión, es necesario invertir en mayor equipamiento lo que genera un alza en los costos. Esto se suma al nivel de pérdidas producidas por un sistema de corriente alterna en una línea de gran longitud, lo que hace finalmente que los sistemas de corriente continua sean económicamente competitivos. La figura 2.2 muestra la comparación de los costos de ambos sistemas en función de la longitud de la línea de transmisión, donde es posible apreciar que existe una distancia mínima para la cual el sistema de corriente continua se hace económicamente mejor. Esta distancia mínima depende de un gran número de factores económicos como tasas de interés, costos específicos, etc., pero se estima que para líneas aéreas se encuentra en el rango de 500 a 800 km ^[5].
- Para igual potencia de transmisión, las torres necesarias para sostener los cables conductores en corriente continua son de menor tamaño y por lo tanto sus costos de construcción son menores.

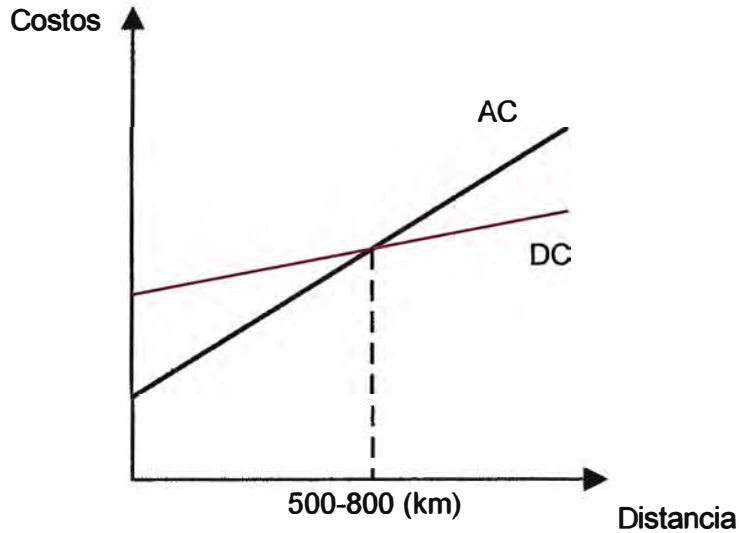


Fig.2.2 Costos totales vs. distancia

2.3. Configuraciones de enlace de corriente continua

2.3.1. Monopolar

La configuración de enlace monopolar se caracteriza por utilizar solo un cable para la transmisión de la corriente continua. En general se utiliza este conductor polarizado negativamente (para disminuir el efecto corona y la radio-interferencia provocada) y el retorno puede ser tierra, mar, etc. Puede usarse un retorno metálico opcionalmente si la resistividad del retorno genera interferencia con estructuras metálicas. Este esquema es mostrado en la figura 2.3 ^[1].

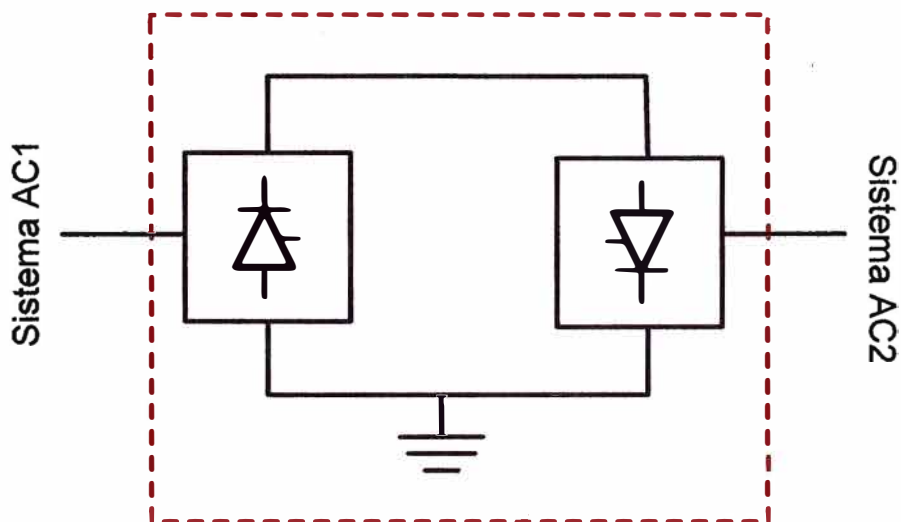


Fig.2.3 Configuración monopolar con retorno por tierra

2.3.2. Homopolar

La configuración de enlace homopolar utiliza (en el esquema más básico) 2 conductores de polaridad negativa y un retorno por tierra opcionalmente metálico. En la figura 2.4 se ve este tipo de configuración ^[1].

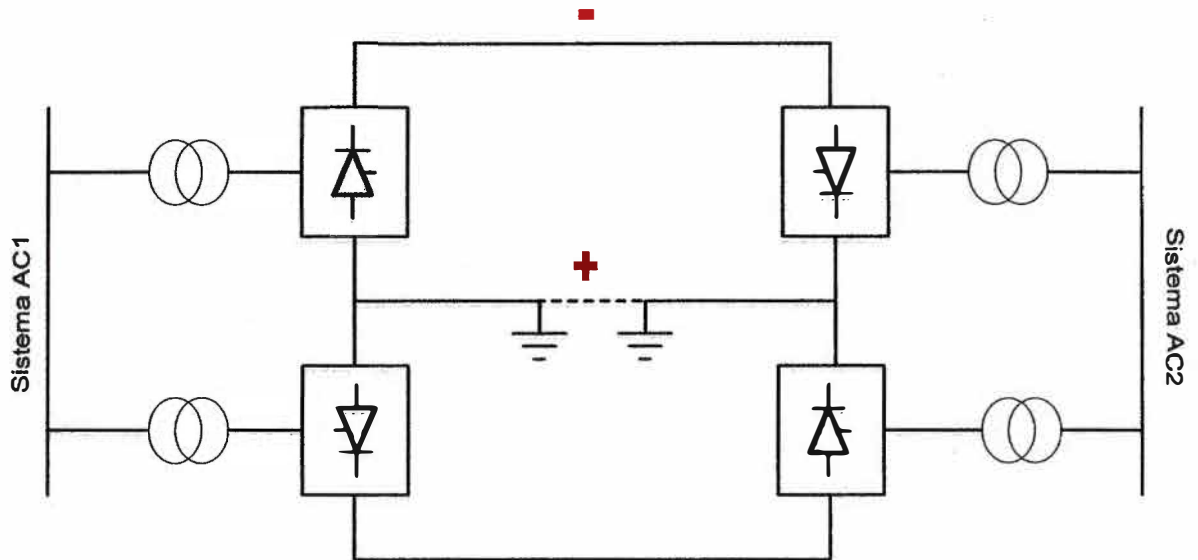


Fig.2.4 Configuración homopolar

2.3.3. Bipolar

La figura 2.5 muestra la configuración bipolar, la que se caracteriza por utilizar dos cables conductores de corriente continua pero de distinta polaridad. Esta configuración agrega un nivel armónico mucho menor que la configuración monopolar a los consumos cercanos al enlace. La gran ventaja de esta configuración es que si uno de los polos deja de funcionar la corriente puede volver por un retorno por tierra que se encuentra siempre conectada pero generalmente sin transportar energía ^[1].

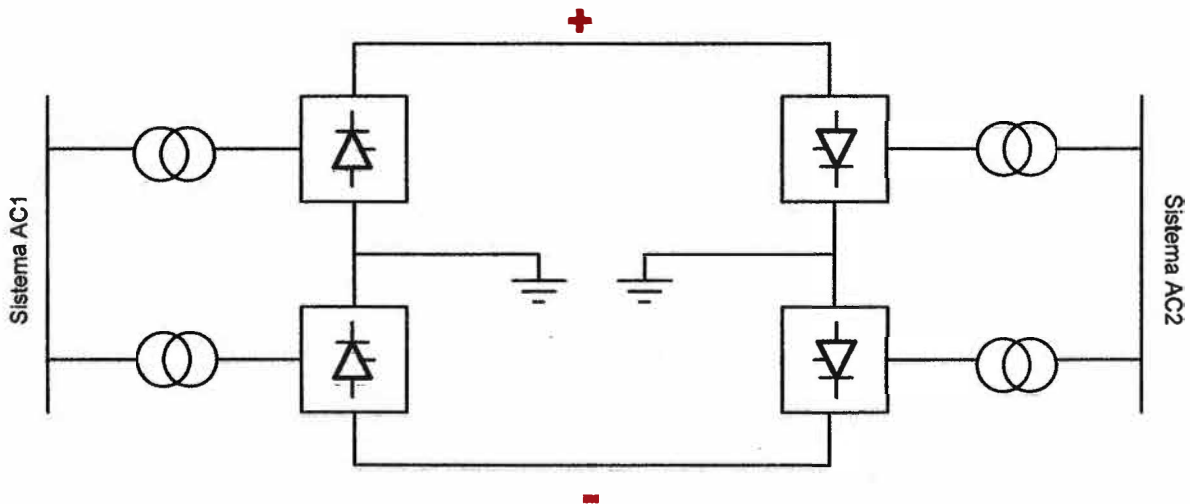


Fig.2.5 Configuración Bipolar

2.3.4. Back to back

Esta configuración, puede corresponder a cualquier de las anteriores mostradas, pero tiene la característica que ambas estaciones convertoras se encuentran emplazadas en el mismo lugar físico, evitando líneas de transmisión, por lo que están orientadas a la conexión de sistemas que funcionan a distinta frecuencia o para aislar las variaciones de

frecuencia de dos grandes áreas. La figura 2.6 muestra un ejemplo de este tipo de configuración ^[1].

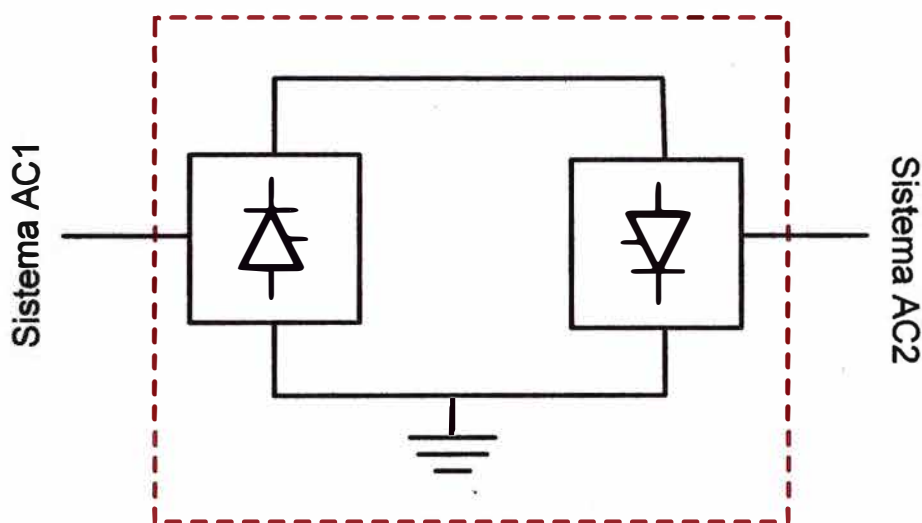


Fig.2.6 Back to back

2.4. Componentes de un Sistema de Corriente Continua

Los principales componentes asociados a un sistema HVDC son mostrados en la figura 2.7, usando como ejemplo un sistema bipolar.

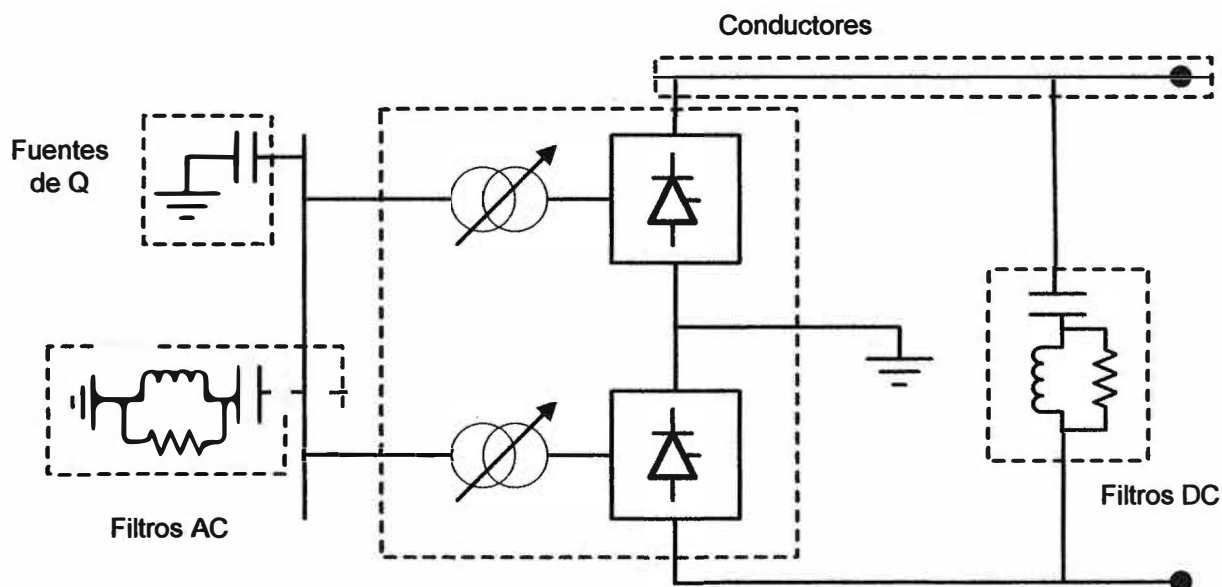


Fig.2.7 Componentes de un Sistema HVDC

Cada una de estas componentes es detallada a continuación:

2.4.1. Estaciones Convertidoras

Las estaciones convertidoras tienen como objetivo realizar la conversión AC – DC en el lado de rectificación y DC – AC en el lado de inversión. Para lograrlo pueden utilizar distintas tecnologías en donde la más clásica es la del Convertidor Conmutado por Línea LCC (del inglés "Line Commutated Converter"). Estas estaciones están conformadas de transformadores con cambiadores de tap y puentes de Graetz (de 6 o 12 pulsos).

2.4.2. Filtros AC

Reactores y condensadores son colocados en el lado de alterna para filtrar las componentes de alta frecuencia de la corriente AC del convertidor, es decir, el contenido armónico producto de la conversión de corriente. En el lado AC los filtros deben estar preparados para eliminar armónicas de orden $pk \pm 1$ donde p es el número de pulsos del rectificador y k un número entero.

Además, en condiciones anormales de operación (error en cualquier de los dos lados) pueden aparecer armónicas de tercer orden que es necesario filtrar^[1].

2.4.3. Filtros DC

En el lado de corriente continua los filtros son esencialmente para eliminar el zumbido del voltaje continuo. En este lado las armónicas presentes son del orden pk donde p es el número de pulsos del rectificador y k un número entero. Estos filtros son conectados en paralelo a la línea DC. En general se suelen colocar tanto al comienzo como al final de la línea DC. Las inductancias tienen como función extra de prevenir las fallas de conmutación en el lado de inversión y retardar la crecida de una corriente de falla.

2.4.4. Conductores de la línea

Cables que conducen la corriente continua desde la Estación Rectificadora a la Estación Inversora. Son la parte del sistema que ha tenido menores cambios en su tecnología, sin embargo en la actualidad estudios para mejorar la calidad y la capacidad de los conductores DC están siendo realizados alrededor de todo el mundo.

2.4.5. Fuentes de Potencia Reactiva

Como se dijo anteriormente, la tecnología clásica en sistemas de corriente continua es la del Convertidor Conmutado por Línea LCC (del inglés "Line Commutated Converter")

Esta tecnología se caracteriza por el gran consumo de reactivos que tienen las estaciones conversoras, llegando a casi el 50% de la potencia activa transmitida. Este consumo debe ser suministrado en la misma instalación del sistema de corriente continua por lo que existen bancos de condensadores en las barras de los transformadores de poder a la entrada y salida del enlace.

2.5. Tecnología del Convertidor Conmutado por Línea (LCC)

En esta tecnología se utiliza el principio de mantener la dirección de la corriente continua de transmisión y controlar el sentido del flujo de potencia en el enlace mediante la variación del voltaje continuo, el que no sobrepasará nunca el valor para el cual fue diseñada la línea. Su contraparte, la tecnología del Convertidor de Fuente de Tensión VSC (del inglés "Voltage Source Converter") utiliza el principio inverso: mantener la

polaridad del voltaje de la línea constante y variar el flujo de potencia cambiando la corriente que

se transporta por la línea. Esta tecnología se asemeja a la de las líneas AC cambiando la corriente que se transporta por la línea.

Para lograr el objetivo, LCC utiliza dispositivos semiconductores conocidos como tiristores (del inglés "Thyristor") los cuales suelen también llamarse válvulas o Rectificadores Controlados de Silicio (SCR por sus siglas en inglés), elementos que poseen una gran similitud con los diodos al conducir solo cuando están polarizados de manera directa, pero su gran característica es que su encendido puede ser controlado mediante una señal externa (ángulo de disparo: α) de control aplicada al terminal de compuerta.

2.5.1. Rectificador Controlado de Silicio o Válvulas

De la familia de los transistores, los SCR son dispositivos semiconductores que poseen cuatro distintas capas dopadas y por lo tanto 3 junturas, donde una de ellas posee una conexión externa llamada Compuerta (G por su nomenclatura en inglés: Gate). En la figura 2.8 se muestra su estructura física y su símbolo.

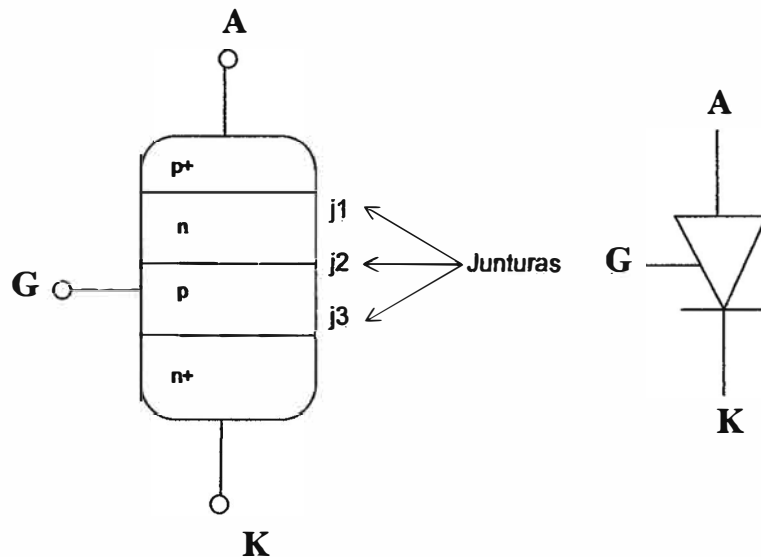


Fig.2.8 Estructura física y símbolo de un tiristor

Dependiendo de la operación, el tiristor puede encontrarse en 3 distintos estados:

- Estado de Bloqueo Inverso: sucede cuando el voltaje ánodo-cátodo es negativo. En este estado las junturas se polarizarán de manera de impedir el paso de corriente entre los bornes, por lo cual no habrá conducción.
- Estado de Bloqueo Directo: sucede cuando el voltaje ánodo-cátodo es positivo, pero la corriente por la compuerta es cero. En este estado las junturas 1 y 3 se encontrarán polarizadas de forma directa, pero la juntura 2 estará de manera inversa, lo que impedirá el paso de electrones por los bornes del tiristor.

- Estado de Conducción: sucede cuando el voltaje ánodo-cátodo es positivo y además existe corriente de compuerta. Esta corriente hará que la juntura 2 quede polarizada directamente y por lo tanto el tiristor comenzará a conducir.

Similar a la curva del diodo, la curva del tiristor se muestra en la figura, en donde se ve el efecto de una señal de disparo por la compuerta. Al recibir dicha señal de disparo y estar polarizado directamente, el tiristor comenzará a conducir y solamente podrá ser apagado si se hace que la corriente por el dispositivo sea cero por la aplicación de una tensión inversa, es decir, solo se puede controlar su encendido y no su apagado.

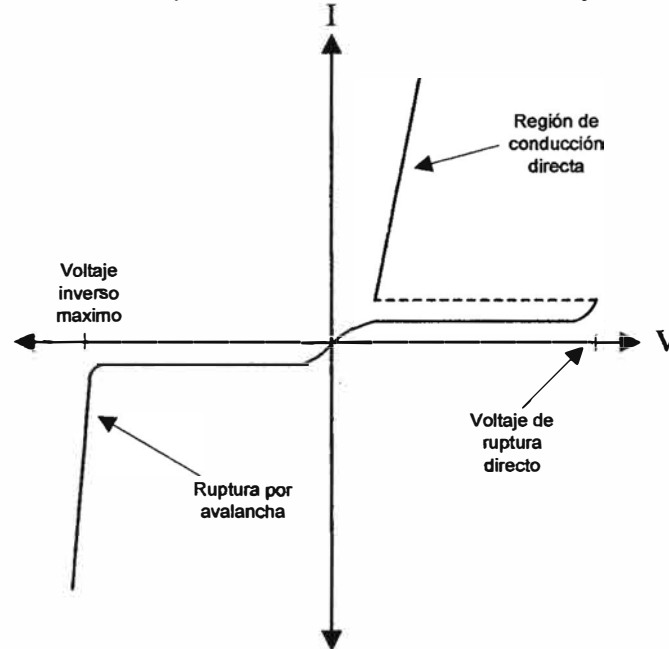


Fig.2.9 Curva característica del tiristor

2.5.2. Convertidor Controlado de 6 pulsos

Un conversor controlado de 6 pulsos está constituido por 6 válvulas conectadas como se indica en la figura 2.10, lo que se conoce como Puente de Graetz.

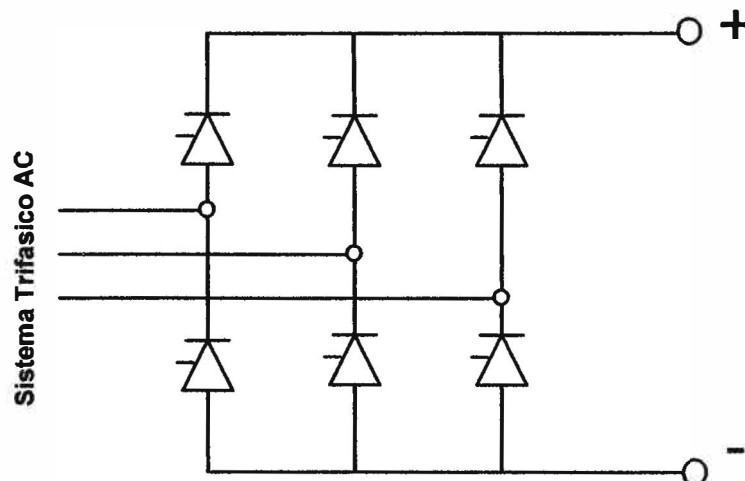


Fig.2.10 Configuración básica de un rectificador de 6 pulsos

Sin considerar la existencia de la reactancia del transformador, y suponiendo que

la señal de disparo por la compuerta está desfasa en un ángulo (ángulo de disparo) con respecto al cruce por cero del voltaje de cada tiristor, la señal a la salida del rectificador es la que se muestra en la figura 2.11:

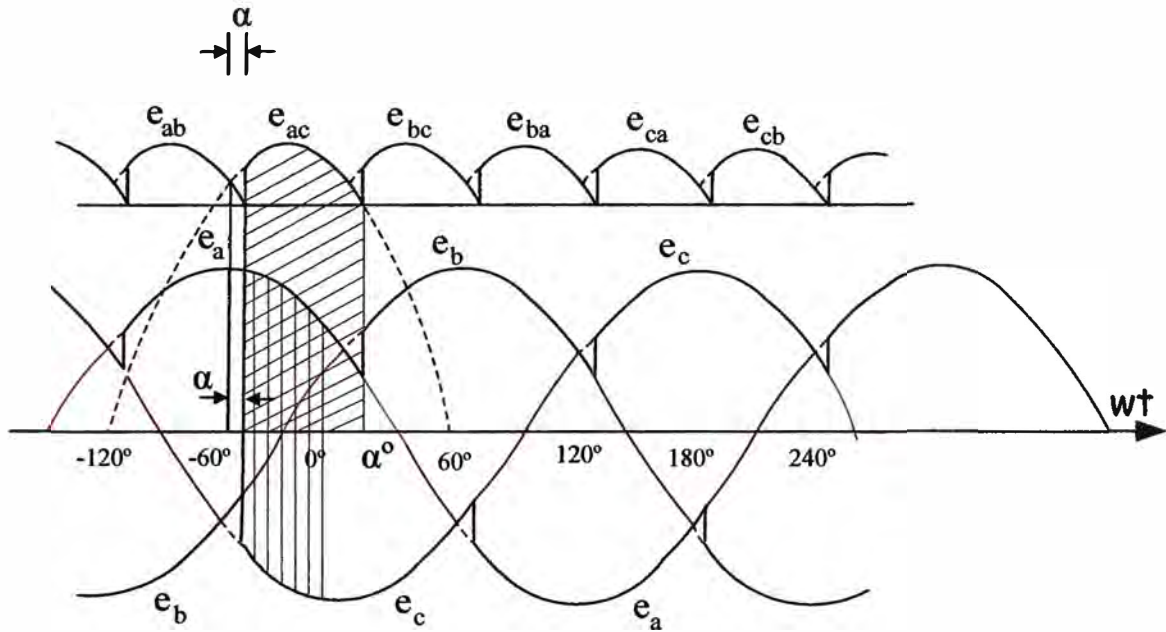


Fig.2.11 Formas de onda de voltaje con ángulo de disparo

2.5.3.- Funcionamiento del rectificador

El rectificador de 6 pulsos mostrado en la figura 2.10 es la unidad convertidora básica en la transmisión de corriente continua y es usada tanto como rectificador cuando la potencia fluye desde el lado AC hacia al lado DC, como inversor cuando la potencia fluye desde el lado DC hacia el lado AC. Las válvulas de tiristores actúan como interruptores que se encienden y dejan pasar corriente cuando les llega un impulso o señal de disparo por la compuerta de control. Una válvula conducirá corriente en una dirección siempre que reciba una señal de encendido y que la diferencia de voltaje entre el ánodo y el cátodo sea positiva, de la misma forma la válvula dejará de conducir únicamente cuando la polarización sea negativa. Es decir, las válvulas actúan como interruptores, las cuales son encendidas a voluntad con el objeto de entregar el voltaje continuo deseado.

El proceso en que la corriente pasa desde una válvula a otra, existiendo por lo tanto una disminución de la corriente en una válvula y un aumento en la siguiente, es llamado conmutación; esto se muestra en la figura 2.12 ^[1]:

Si se considera el proceso de rectificación, cada válvula se encenderá al recibir una señal por la puerta de control (si está en polarización directa). En el proceso de conmutación la corriente de una válvula no se transferirá hacia la válvula siguiente instantáneamente, sino que esta conmutación se realizará a través de los arrollamientos del transformador o lo que exista antes del puente, ésta es la llamada reactancia de

conmutación X_c .

El momento en que la corriente comienza a circular por una válvula, o a conmutar desde una válvula a otra puede ser retrasado posponiendo el momento en que se aplica el pulso de control a los tiristores. Este método permite variar el voltaje promedio entregado a la salida del rectificador.

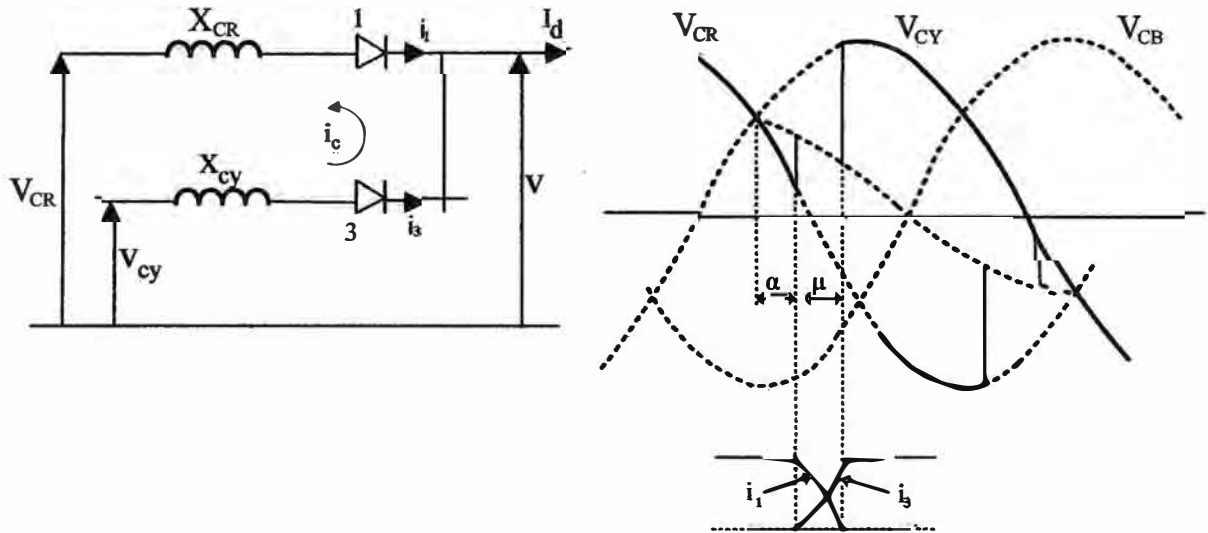


Fig.2.12 Proceso de conmutación

2.5.4- Inversión del flujo de potencia

Invertir el flujo de potencia en este tipo de sistemas no es posible invirtiendo la dirección de la corriente, ya que las válvulas solo permiten la conducción en una sola dirección. El flujo de potencia solo puede ser invertido en este tipo de convertidores variando la polaridad del voltaje continuo en las estaciones convertidoras. Esta operación de las convertidoras tanto para rectificar como para invertir se realiza por medio del control de los pulsos de disparo en los tiristores de las estaciones convertidoras ^[1].

2.5.5- Voltajes y Corrientes

Debido al proceso de conmutación entre las distintas válvulas, una corriente no sinusoidal es tomada desde el lado AC por el rectificador, y es entregada al sistema AC por el inversor. Ambas corrientes se encuentran en retraso con respecto a sus voltajes.

2.5.6.- Ángulos en las estaciones convertidoras

La Figura 2.13 muestra los ángulos eléctricos, utilizados comúnmente para definir el modo de operación de las estaciones convertidoras. Estos ángulos son medidos utilizando el voltaje trifásico en las válvulas y están basados en condiciones ideales, con el sistema actuando libre de armónicos y el voltaje de conmutación trifásico balanceado. Se aplican tanto al inversor como al rectificador ^[1].

Ángulo de retraso α : El tiempo expresado en grados eléctricos medido desde que el voltaje de conmutación sinusoidal idealizado cruza por cero hasta el instante en que la

corriente por una válvula comienza a circular. Este ángulo es controlado por el pulso de disparo en la puerta de control del tiristor. Si este ángulo es menor que 90° , el convertidor actúa como rectificador, y si este ángulo es mayor a 90° , actúa como inversor. Este ángulo es a menudo referido como ángulo de disparo.

Ángulo de adelanto β : Corresponde al tiempo expresado en grados eléctricos medido desde el instante en que la corriente empieza a conducir por una válvula hasta el próximo cruce por cero del voltaje de conmutación (idealizado). El ángulo de avance o adelanto β está relacionado en grados con el ángulo de disparo α por:

$$\beta = 180 - \alpha \quad (2.1)$$

Ángulo de traslape μ : El tiempo de duración de la conmutación entre dos válvulas expresadas en grados eléctricos.

Ángulo de extinción γ : El tiempo expresado en grados eléctricos medido desde el término en la conducción de corriente de una válvula hasta el próximo cruce por cero del voltaje de conmutación idealizado. Gamma depende del ángulo de avance β y del ángulo de traslape μ según la siguiente ecuación:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (2.2)$$

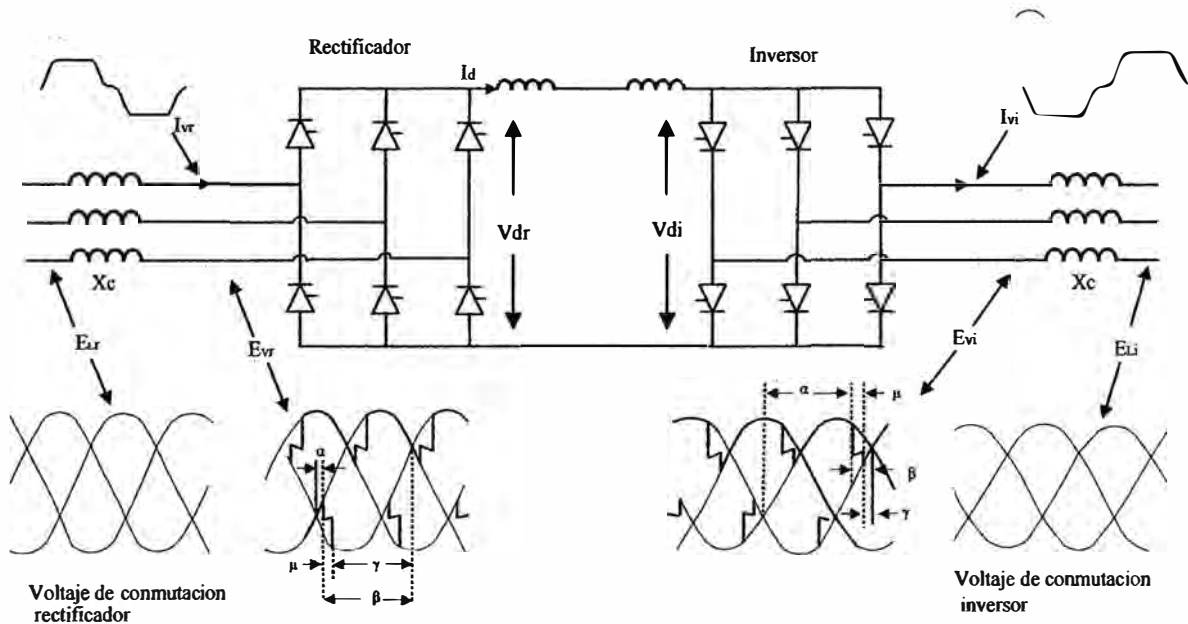


Fig.2.13 Forma del voltaje y corriente asociada a los convertidores.

2.5.7.- Compensación de potencia reactiva

Al existir el ángulo de retraso y el ángulo de conmutación (duración en radianes de la conmutación de dos válvulas) mostrados en la Figura 2.13 la corriente en cada fase siempre retrasa al voltaje. Es por esto que en el proceso de rectificación siempre va a existir un consumo de reactivos, el cual va a tener que ser proporcionado por dispositivos especiales en el lado AC (filtros AC, bancos de condensadores, etc.) o absorbiendo reactivos del sistema AC ^[1].

En algunos casos las necesidades del sistema de corriente continua pueden ser entregadas por el sistema AC, caso especialmente frecuente cuando el rectificador está próximo a la estación generadora. En otros casos, debido al incremento en los niveles de transmisión, es necesario aportar cierta cantidad de potencia reactiva al sistema AC durante condiciones de sobrecarga, con el fin de que pueda mantener los niveles de voltaje, característica común en los sistemas AC débiles.

Por lo general, los filtros AC proporcionan el 60% del consumo de potencia reactiva, siendo el resto aportado por diferentes medios:

- Banco de condensadores de derivación.
- Condensadores sincrónicos
- Compensadores estáticos de reactivos (CER o SVC)
- Bancos de reactores de derivación.
- Máquinas sincrónicas.

El consumo de potencia reactiva varía linealmente con la potencia activa, pero la generación sólo puede ser cambiada en escalones por medio de la conexión o desconexión de los bancos de filtros. La figura 2.14 muestra una gráfica que relaciona el consumo de potencia reactiva con el valor de la potencia activa transmitida.

En los sistemas en los que se opera con valores elevados de alfa o gamma, el consumo de potencia reactiva es mayor, por lo que se debe considerar una posible disminución del voltaje continuo. Si esto no es posible, se producirá un aumento considerable de los costes de fabricación de los transformadores y válvulas. Por otra parte, si puede reducirse, habrá un aumento de las pérdidas en la línea o cable pudiendo afectar el consumo de reactivos de la otra estación. Además, puede que una operación con un ángulo alfa elevado provoque un aumento en la generación de armónica y del nivel de perturbaciones en ambos lados del enlace de corriente continua ^[1].

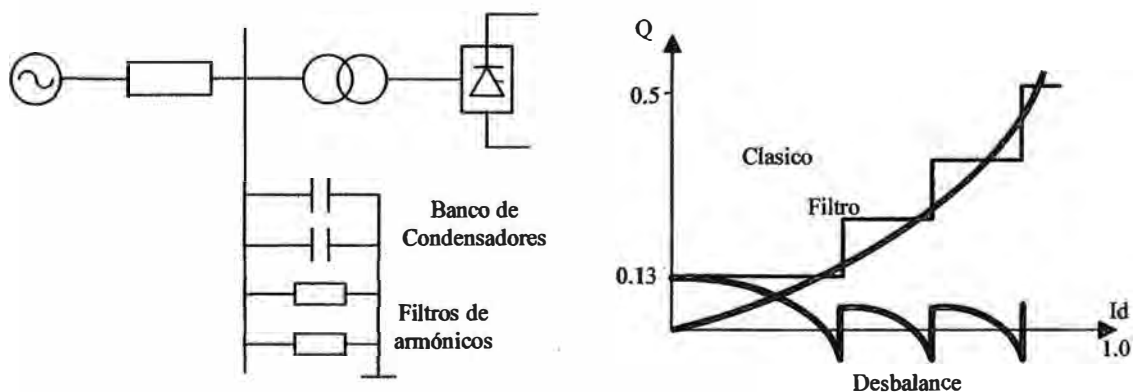


Fig.2.14 Forma del voltaje y corriente asociada a los convertidores

2.5.8.- Rectificador de 12 pulsos

Prácticamente todas las convertidores de corriente continua utilizan rectificadores

de 12 pulsos en vez del de 6 pulsos estudiado anteriormente.

Como se puede ver en la figura 2.15, el rectificador de 12 pulsos está formado por 2 convertidores de 6 pulsos conectadas en cascada. La salida del rectificador se toma entre los extremos de los convertidores de 6 pulsos no conectados entre sí. Con el objeto de conseguir una salida lo más plana posible se utilizan dos tipos de conexiones diferentes en los transformadores de entrada: uno conectado estrella-estrella (desfase 0°) y la otra conectada estrella-delta (desfase de 30° o 150°). La salida de cada convertidora de 6 pulsos son dos ondas de tensión con una frecuencia de 300 Hz desfasadas 30° entre sí. La combinación de ambas tensiones genera una tensión de 600 Hz, más estable y más plana que en el rectificador de 6 pulsos. Estos convertidores generan armónicos de orden $12n \pm 1$ en el lado AC y de orden $12n$ en el lado DC.

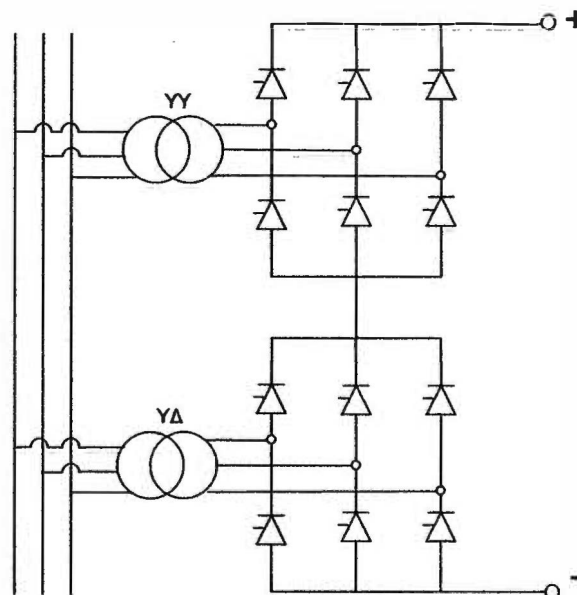


Fig.2.15 Rectificador de 12 pulsos

2.5.9.- Fallas de conmutación

Cuando una estación convertidora se encuentra operando como inversor en el otro extremo al final del enlace de corriente continua, una válvula se apagará cuando su corriente conmute a cero y el voltaje a través de la válvula se torne negativo. El periodo en el cual la válvula se encuentra con una polarización negativa corresponde al ángulo de extinción γ , sin un pulso de disparo, la válvula idealmente se encontrará en un estado no conductivo o bloqueado, incluso si experimenta una polarización positiva ^[1].

Todas las válvulas DC requieren que se les remueva la carga interna almacenada en su interior producida cuando la válvula se encuentra conduciendo (periodo $\alpha + \mu$ en el inversor) antes de que la válvula pueda, exitosamente, recuperar su habilidad de bloqueo cuando se encuentra en polarización negativa. El inversor, por lo tanto, requiere un periodo mínimo de polarización negativa o un valor mínimo de γ para que su capacidad de

bloqueo sea recuperada. Si este bloqueo falla y la conducción de la válvula es iniciada sin un pulso de disparo, una falla de conmutación va a ocurrir. Esto también va a resultar en una falla para mantener la corriente en la siguiente válvula. Las fallas de conmutación en las estaciones convertidoras operando como inversor son causadas principalmente por alguna de las siguientes razones:

- 1) Cuando la corriente DC entrando al inversor experimenta un aumento en magnitud, causará que el ángulo de conmutación μ se incremente, el ángulo de extinción γ por lo tanto se verá reducido, pudiendo alcanzar un punto donde la válvula pierda la capacidad de mantener su capacidad de bloqueo. Al aumentar la inductancia de las estaciones convertidoras, principalmente a través de la bobina de aislamiento, se va a conseguir que la tasa de cambio de la corriente DC decrezca lo que va a ayudar a disminuir las fallas de conmutación.
- 2) Cuando la magnitud de la tensión AC al lado del inversor se reduce en una o más fases, o si es distorsionado, va a causar que el ángulo de extinción sea inadecuado y por lo tanto puede que ocurra una falla de conmutación.
- 3) Un cambio en las fases del voltaje de conmutación AC puede causar una falla de conmutación. Sin embargo, una reducción en la magnitud del voltaje AC y no un cambio de fase es el factor principal que determina que se produzca una falla de conmutación.
- 4) El valor del ángulo de extinción antes de la contingencia también afecta la sensibilidad del inversor a una falla de conmutación. Un valor de $\gamma=18^\circ$ es usual para la mayoría de las estaciones inversoras. Al aumentar el valor de γ a valores de 25° , 30° o mayores va a reducir la posibilidad de una falla de conmutación (a expensas de incrementar el consumo de potencia reactiva de la estación inversora).
- 5) El valor de la corriente en la válvula antes de la falla de conmutación también afecta las condiciones en las cuales una falla de conmutación puede ocurrir. Una falla de conmutación puede ocurrir con mayor probabilidad si la corriente por la válvula que existía antes de la contingencia es relativamente grande en comparación con la corriente nominal.

CAPÍTULO III

CONTROL DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA

3.1 Introducción

Una de las principales ventajas de los sistemas de transmisión de corriente continua es su alta controlabilidad. Por medio del control de los ángulos de disparo de los tiristores en las estaciones convertidoras se puede modificar de forma casi instantánea el voltaje de salida de las convertidoras, variando de esta forma la corriente continua y la potencia transmitida. La alta controlabilidad de los sistemas de corriente continua puede ser usada, además de controlar la corriente o potencia transmitida, para estabilizar el sistema AC al cual se encuentra conectada, para controlar la frecuencia de la red o para auxiliar al control de frecuencia de los generadores conectados a la estación rectificadora.

Las estaciones convertidoras tiene normalmente un sistema de control básico encargado de controlar la corriente en el rectificador y el voltaje (por medio del control del ángulo de extinción γ) en el inversor. Cuando se desea controlar otras variables, como por ejemplo la potencia transmitida o la frecuencia del sistema, un sistema de control más avanzado debe generar señales adicionales en el sistema de control.

Algunos de los requerimientos más importantes que debe tener el sistema de control en una transmisión de corriente continua son ^[1]:

- 1) Suficiente rango de estabilidad y velocidad de respuesta en el control, principalmente cuando el enlace se conecta a sistemas débiles.
- 2) Operación aceptable del rectificador y del inversor a variaciones de la frecuencia.
- 3) Bajos contenidos de armónicas no características generadas por las estaciones convertidoras.
- 4) Un correcto funcionamiento en la operación de la estación inversora, con el fin de tener la menor tasa de fallas de conmutación posible para distintas condiciones del voltaje.
- 5) El menor consumo posible de potencia reactiva, es decir, operando con el menor ángulo de disparo posible y con el menor ángulo de extinción posible sin incrementar el riesgo de fallas de conmutación.
- 6) Transición suave del control de corriente al control de voltaje DC (o ángulo de extinción).

El control rápido de las estaciones convertidoras para prevenir fluctuación en la

corriente DC es un importante requerimiento para la operación satisfactoria en los enlaces de corriente continua. Los requerimientos de velocidad de respuesta son válidos principalmente para el control de corriente, y los requerimientos de una operación segura del inversor sin fallas de conmutación principalmente se refieren al control con ángulo de extinción constante. Con el objetivo de entregar una operación estable y eficiente, y maximizar la flexibilidad del control de la potencia sin comprometer la seguridad de los componentes del sistema de transmisión, existen varios elementos de control que son utilizados de una manera jerárquica. A continuación se describirán los principios de operación de estos controles, su implementación y su funcionamiento durante condiciones normales y anormales.

3.2.- Principios básicos de Control

3.2.1 Principios de control

El enlace HVDC mostrado en la figura 3.1 representa a un sistema homopolar o a un enlace bipolar. El correspondiente circuito equivalente es el que se muestra en la figura 3.2 y el perfil de voltaje se muestra en la figura 3.3 ^[1].

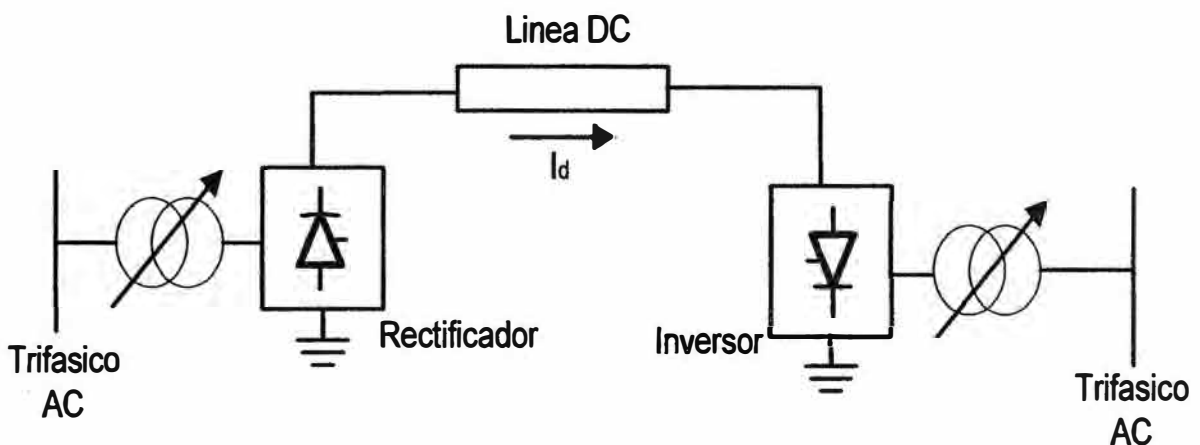


Fig.3.1 Sistema equivalente de enlace de corriente continua

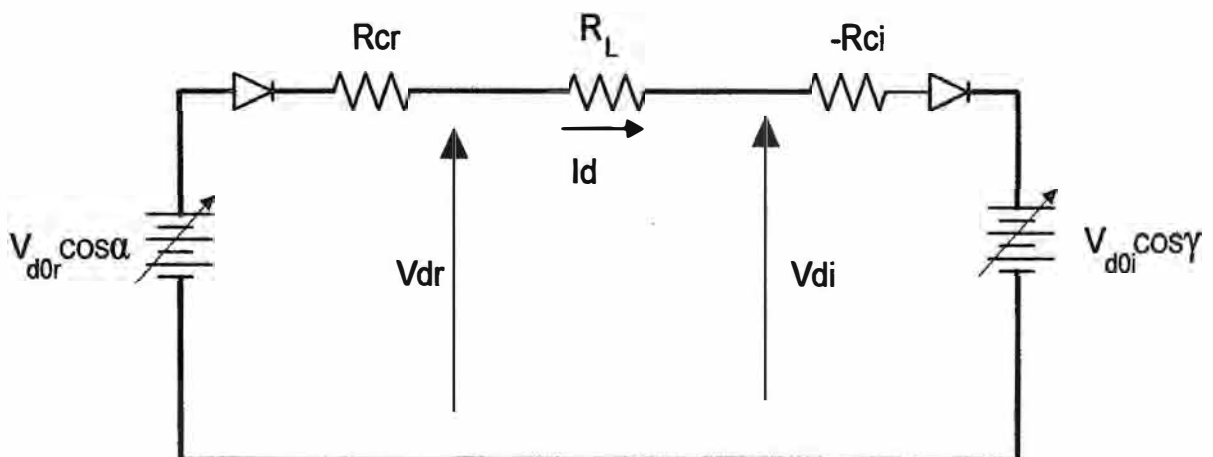


Fig.3.2 Sistema equivalente de enlace de corriente continua

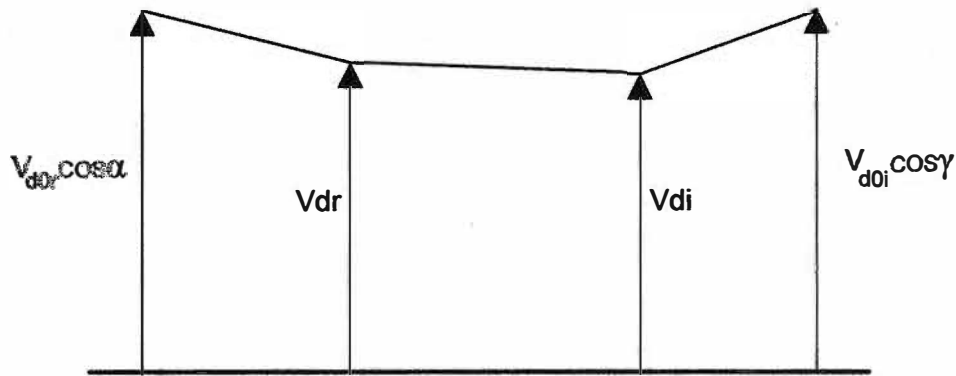


Fig.3.3 Perfil de tensión

La corriente que fluye del rectificador al inversor es:

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (3.1)$$

La potencia en los terminales del rectificador es:

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \quad (3.2)$$

y en los terminales del inversor:

$$P_{di} = V_{di} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \quad (3.3)$$

Y la resistencia equivalente en función de las reactancias de conmutación en el rectificador e inversor respectivamente es:

$$R_{cr} = \left(\frac{3}{\pi} \right) X_{cr} \quad (3.4)$$

$$R_{ci} = \left(\frac{3}{\pi} \right) X_{ci} \quad (3.5)$$

Como el denominador en la ecuación (3.1) es pequeño, leves cambios en las magnitudes de V_{dor} o V_{doi} pueden traer como resultado grandes cambios en la corriente I_d , si las otras variables son mantenidas constantes. Por ejemplo, un 25% de cambio en el voltaje en el rectificador o en el inversor puede causar que la corriente varíe más de un 100%. Como los cambios de voltaje pueden ser imprevistos, no es factible el control manual de los ángulos de disparo de las estaciones convertoras.

Por lo tanto, normalmente se debe utilizar el control rápido y directo de la corriente por medio del control de los ángulos de disparo de los tiristores en las estaciones convertoras. El control directo y rápido de la corriente también es deseable desde el punto de vista de limitar la sobrecorriente de las válvulas de tiristores, las cuales tienen una capacidad térmica limitada. Es de notar que tanto la corriente como la potencia pueden ser controladas cambiando los taps de los transformadores, pero es un proceso

lento que puede ser alcanzado sólo con interruptores mecánicos. Con el fin de minimizar las pérdidas en la línea, es importante mantener un elevado voltaje DC y ajustar la corriente para alcanzar la potencia deseada [1].

3.2.2 Ecuaciones Básicas del Rectificador e Inversor

A continuación se detallan las ecuaciones básicas para la evaluación de la operación en régimen permanente del rectificador e inversor respectivamente:

- Ecuaciones del Rectificador: En la figura 3.4 se presenta el siguiente esquema básico:

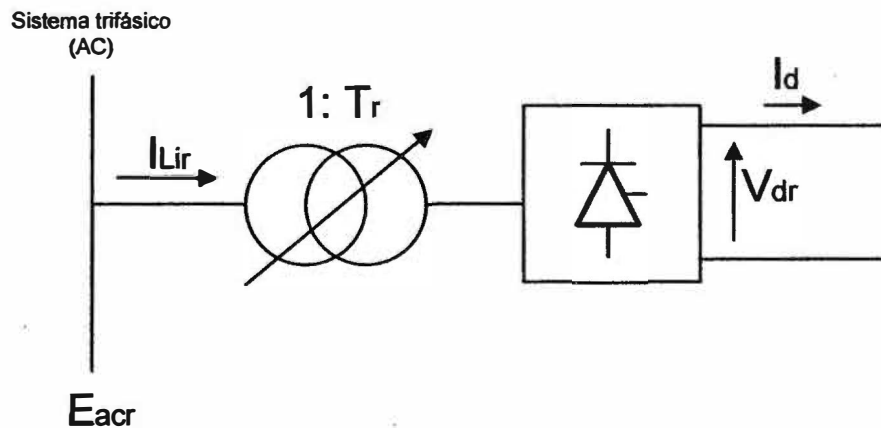


Fig.3.4 Esquema general del Rectificador

Y las ecuaciones que representan la operación como rectificador se presentan a continuación:

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d \quad (3.5)$$

$$P_r = V_{dr} \cdot I_d \quad (3.6)$$

$$V_{dor} = E_{acr} 1.3505 B_r T_r \quad (3.7)$$

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha - B_r R_{cr} I_d \quad (3.8)$$

$$\cos \phi_r = V_{dr} / V_{dor} \quad (3.9)$$

$$Q_r = P_r T_g \phi_r \quad (3.10)$$

$$V_{dr} = V_{dor} (\cos \gamma + \cos \beta) / 2 \quad (3.11)$$

$$I_{Lir} = (\sqrt{6} / \pi) B_r T_r I_d \quad (3.12)$$

De la misma manera las ecuaciones para la operación como inversor:

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d \quad (3.13)$$

$$P_i = V_{di} I_d \quad (3.14)$$

$$V_{doi} = E_{aci} 1.3505 B_i T_i \quad (3.15)$$

$$V_{di} = V_{doi} \cos \gamma - B_i R_{ci} I_d \quad (3.16)$$

$$\cos \phi_i = V_{di} / V_{doi} \quad (3.17)$$

$$Q_i = P_i T_g \phi_i \quad (3.18)$$

$$V_{di} = V_{doi} (\cos \gamma + \cos \beta) / 2 \quad (3.19)$$

$$I_{Lii} = (\sqrt{6} / \pi) B_r T_r I_d \quad (3.20)$$

Dónde:

V_{dr}	:	Tensión en los terminales del rectificador
V_{di}	:	Tensión en los terminales del inversor
V_{dor}	:	Tensión de vacío en los terminales del rectificador
V_{doi}	:	Tensión de vacío en los terminales del inversor
I_{Lir}	:	Corriente de línea del rectificador
I_{Lii}	:	Corriente de la línea del inversor
R_L	:	Resistencia de la línea DC
R_{cr}	:	Resistencia de conmutación equivalente del rectificador
R_{ci}	:	Resistencia de conmutación equivalente del inversor
I_d	:	Corriente DC
P_r	:	Potencia del rectificador
P_i	:	Potencia del inversor
Q_r	:	Potencia reactiva del rectificador
Q_i	:	Potencia reactiva del inversor
E_{acr}	:	Tensión AC del rectificador
E_{aci}	:	Tensión AC del inversor
B_r	:	Numero de puentes en serie del rectificador
B_i	:	Numero de puentes en serie del inversor
T_r	:	Relación de transformación del rectificador
T_i	:	Relación de transformación del inversor
ϕ_r	:	Ángulo de factor de potencia en el rectificador
ϕ_i	:	Ángulo de factor de potencia en el inversor
γ	:	Ángulo de extinción
β	:	Ángulo de adelanto
α	:	Ángulo de disparo

α_{\min}	Ángulo de disparo mínimo
α_{\max}	Ángulo de disparo máximo
μ	Ángulo de conmutación

3.2.3. Requerimientos básicos de Control

Los siguientes requerimientos son necesarios para lograr un esquema de control realizable [1]:

- Prevenir grandes fluctuaciones en la corriente transportada debido a las variaciones de la tensión en el sistema AC.
- Mantener el voltaje continuo cerca del valor nominal. Esto minimiza la corriente continua y por lo tanto las pérdidas en la línea.
- Mantener los factores de potencia a ambos lados del enlace lo más altos posible. Se logra manteniendo los ángulos de control en valores muy pequeños.
- Prevenir las fallas de conmutación. Se logra manteniendo un mínimo ángulo de extinción en el inversor.
- Limitar el máximo de la corriente continua transmitida.

El rápido control de los convertidores para prevenir grandes fluctuaciones de corriente directa I_d es esencial para la apropiada operación de los sistemas. Sin este principio de control los sistemas de transmisión en CC serían impracticables.

Razones que exigen que se mantengan un alto factor de potencia:

- Para mantener la potencia de los convertidores tan alto como sea posible en los valores de corriente y tensión nominal de transformadores y válvulas (tiristores)
- Para reducir el estrés de tensión sobre las válvulas (tiristores)
- Para minimizar las pérdidas en condiciones normales de corriente, de los equipos usados en el lado AC donde los convertidores están conectados
- Para minimizar la caída de tensión en los terminales AC con el incremento de carga
- Para minimizar el costo de potencia reactiva suministrada a los convertidores

De las relaciones para el factor de potencia se tiene:

$$\cos\phi \approx \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (3.21)$$

$$\cos\phi \approx \frac{\cos\gamma + \cos(\gamma + \mu)}{2} \quad (3.22)$$

Se concluye, que para mantener alto los factores de potencia los ángulos (α) del rectificador y el ángulo (γ) del inversor deben mantenerse lo más pequeño posible.

Sin embargo el rectificador, tiene un límite mínimo para α de aproximadamente 5° para asegurar un voltaje adecuado a través de la válvula antes de que esta sea disparada. Por ejemplo, en el caso de los tiristores, el voltaje positivo que aparece en cada tiristor

antes de dispararlo es usado para cargar el circuito auxiliar que provee la energía para el pulso de disparo al tiristor. Por lo tanto, el disparo no puede ocurrir antes de $\alpha = 5^\circ$. Para condiciones normales de funcionamiento, el rectificador opera normalmente con valores de α entre los rangos de a 15° a 20° , con el fin de dejar cierto margen para incrementar el voltaje del rectificador y controlar los flujos de potencia.

En el caso del inversor, es necesario mantener un cierto valor mínimo en el ángulo de extinción para evitar las fallas de conmutación. Es importante asegurar que la conmutación sea completa, con el suficiente margen, que permita la recuperación de la capacidad de bloqueo antes que la tensión de conmutación se invierta entre ánodo y cátodo en $\alpha = 180^\circ$ o $\gamma = 0$. El ángulo de extinción γ es igual a $\beta - \mu$ con el ángulo de traslape μ dependiente del nivel de corriente I_d y del voltaje de conmutación. Debido a la posibilidad del cambio en la magnitud de la corriente directa y amplitud de la tensión alterna aun después de iniciada la conmutación.

Suficiente margen de conmutación por encima del límite mínimo para γ debe ser mantenido. Valores típicos son: $\gamma = 15^\circ$ para sistemas de 50 Hz y $\gamma = 18^\circ$ para sistemas de 60 Hz ^[1].

3.2.4.- Control básico

En condiciones normales, la estación rectificadora se encarga de controlar la corriente constante (CC), mientras que la estación inversora se encarga de controlar el voltaje manteniendo el ángulo de extinción constante (CEA); esto se utiliza por las siguientes razones:

- 1.- El aumento de la corriente y de la potencia en el enlace es alcanzado disminuyendo el ángulo de disparo en el rectificador, lo cual mejora el factor de potencia para grandes cargas y minimiza el consumo de potencia reactiva en el rectificador.
- 2.- El inversor puede operar a mínimo ángulo de extinción, minimizando de esta forma el consumo de potencia reactiva.
- 3.- La corriente durante fallas en la línea DC son automáticamente limitadas con la estación rectificadora por medio del controlador de corriente.

Mientras existe una necesidad de mantener un mínimo ángulo de extinción en el inversor para evitar fallas de conmutación, es económico operar el inversor en un ángulo de extinción constante, el cual se encuentra levemente por encima del mínimo absoluto requerido de modo que no se produzcan fallas de conmutación. Esto resulta en reducir los costos de la estación inversora, reducir las pérdidas en la estación y disminuir el consumo de potencia reactiva ^[1].

3.2.5.- Control de corriente en el inversor

Como se mencionó anteriormente, con el fin de satisfacer los requerimientos

básicos descritos anteriormente, las responsabilidades de la regulación de voltaje y de la regulación de corriente son asignadas a distintas estaciones. Bajo condiciones de operación normal, al rectificador le corresponde la tarea de controlar la corriente (CC), y al inversor la tarea de mantener el ángulo de extinción en un valor constante (CEA), valor que va a depender del consumo de potencia reactiva y de la posibilidad que se produzcan fallas de conmutación en la estación inversora. Al existir una disminución del voltaje AC en el rectificador, va a ser necesario cambiar el modo de control en el inversor a control de corriente, con el fin de evitar que el enlace sufra inestabilidades cuando el controlador del rectificador llega a su límite (α_{\min}) y no pueda seguir controlando corriente. Esto implica que también se debe proveer un controlador de corriente en el inversor en adición al controlador CEA. Para evitar el traslape de los dos controladores de corriente, la corriente de referencia en el inversor menor que el valor de corriente de referencia del rectificador por un valor llamado corriente de margen. Este valor es típicamente alrededor de un 10% de la corriente de referencia del rectificador ^[1].

3.2.6- Características Ideal

La filosofía de control básico se explica mejor utilizando las curvas voltaje - corriente, mostradas en la figura 3.5.

Bajo operación normal, el rectificador mantiene la corriente constante (CC) y el inversor opera a ángulo de extinción constante (CEA), manteniendo adecuado margen de conmutación.

La característica V-I del rectificador y del inversor son medidas en los terminales del rectificador, es decir, que la característica del inversor incluye la caída de tensión a través de la línea.

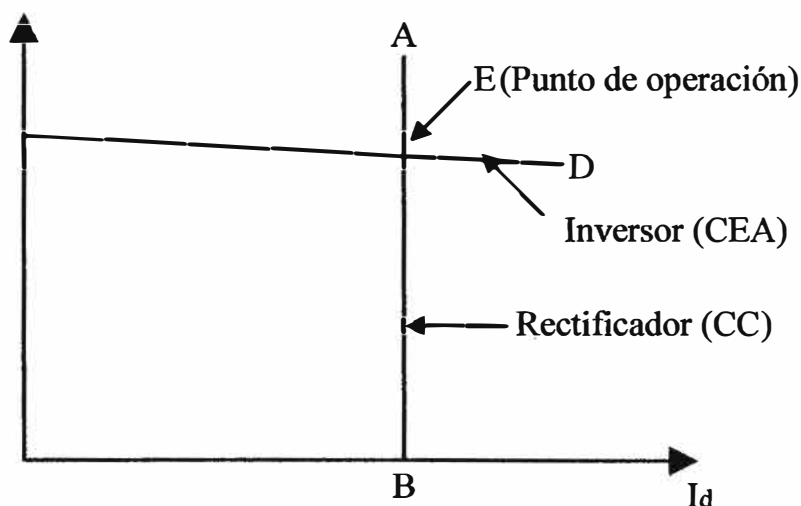


Fig.3.5 Característica ideal V-I en estado estacionario

Con el rectificador manteniendo la corriente constante, su característica V-I es como se muestra en la figura 3.5, una línea vertical AB ^[2].

$$V_d = V_{doi} \cos \gamma + (R_L - R_{ci}) I_d \quad (3.23)$$

Con la expresión indicada, es obtenida la característica V-I del inversor, con el ángulo γ mantenido en un valor fijo. Si la resistencia de conmutación R_{ci} es ligeramente mayor que la resistencia de la línea R_L , la característica del inversor presentara pendiente negativa como se indica por la línea CD.

Como la condición de operación debe satisfacer las características del rectificador y del inversor, el punto de operación es definido por la intersección de ambas características que corresponde al punto E de la figura 3.5.

La característica del rectificador puede desplazar en forma horizontal ajustando el comando de corriente. Si la corriente medida es menor I_d que la del comando, el regulador disminuye el ángulo α [2].

La característica del inversor puede incrementarse o disminuirse por medio del cambio del tap del transformador donde el convertidor está conectado. Cuando el tap es cambiado, el regulador (CEA) rápidamente restablece el valor de γ deseado. Como resultado, la corriente directa cambia, la cual es rápidamente restablecida por el regulador de corriente del rectificador (fig. 3.6).

El tap del transformador del rectificador también será cambiado para colocar el ángulo α en el rango deseado es decir entre 10° y 20° de manera de asegurar alto factor de potencia y adecuado tope máximo para el control.

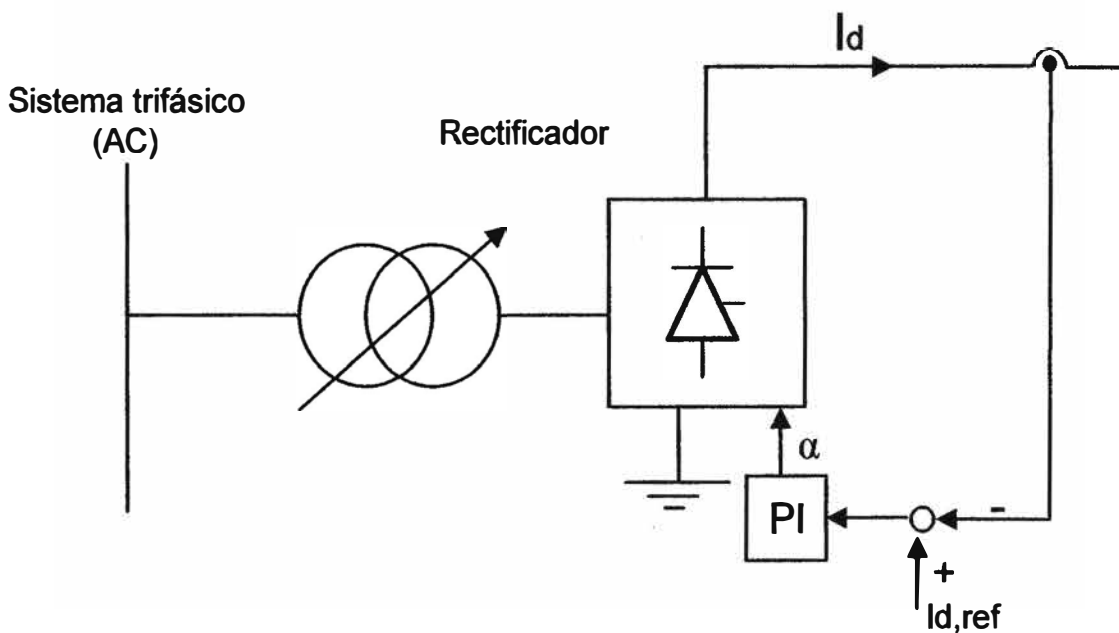


Fig.3.6 Regulador de corriente del Rectificador

La operación del inversor a ángulo γ constante es controlada, tomando en consideración variaciones en los valores instantáneos de tensión y corriente. El control del

ángulo γ se realiza de manera que el ángulo sea mayor al ángulo de recuperación de los tiristores como muestra en la figura 3.7 [2].

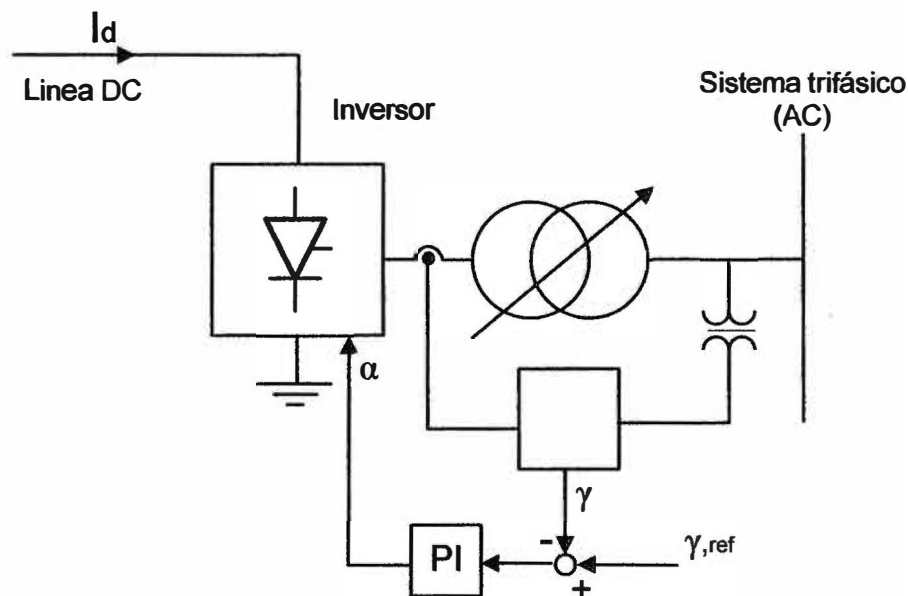


Fig.3.7 Regulador del ángulo de extinción del inversor (CEA)

3.2.7 Características reales

El rectificador mantiene la corriente constante variando el ángulo de disparo α . Sin embargo, el ángulo α no puede ser menor que un valor mínimo ($\min \alpha$). Una vez que este ángulo es alcanzado, no es posible continuar incrementando el voltaje, y el rectificador operará a un ángulo de disparo constante $\min \alpha$ (CIA). Por lo tanto, la característica del rectificador tiene dos segmentos (AB y FA) como se muestra en la Figura 3.8. El segmento FA corresponde al mínimo ángulo de disparo en el rectificador y representa el modo de control CIA; el segmento AB representa el modo de control normal de corriente constante (CC).

En la práctica, la característica de corriente constante puede no ser puramente vertical, lo que depende del controlador de corriente. Con un controlador proporcional, este tiene una gran pendiente negativa debido a la ganancia del regulador de corriente. Con un control proporcional integral PI, la característica de corriente constante (CC) es perfectamente vertical. La curva completa del rectificador a voltaje nominal es definida por el segmento FAB de la figura 3.8. Con un voltaje reducido, la curva cambia, lo que se indica en el segmento F'A'B' de la figura 3.8.

La curva del inversor (CEA) intersecta a la curva del rectificador (CC) en el punto E para voltaje nominal. Sin embargo, la curva del inversor (CEA) no intersecta la del rectificador a voltajes reducidos representados por el segmento F'A'B'. Por lo tanto, una gran reducción en el voltaje del rectificador podría causar que la corriente y la potencia sean reducidas a cero luego de algún tiempo dependiendo del reactor de aislamiento. El

sistema de esta forma podría colapsar.

Como se dijo anteriormente, con el objeto de evitar este problema, el inversor también es provisto de un controlador de corriente, el cual es dispuesto a un valor más bajo que la corriente de referencia que el rectificador. La característica completa del inversor es dada por el segmento DGH, consistente en dos segmentos: uno para CEA y el otro para CC.

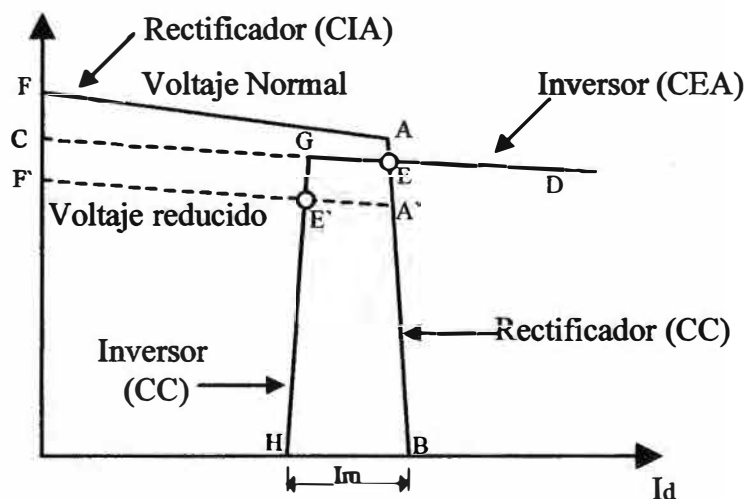


Fig.3.8 Característica real del control en estado estacionario de los convertidores

La diferencia entre la corriente de referencia del rectificador y la corriente de referencia del inversor es llamada corriente de margen I_{marg} , en la figura 3.8. Esta se fija usualmente entre 10% o 15% de la corriente de orden o referencia del rectificador, con el fin de asegurar que las dos curvas de corriente constante no se crucen entre sí debido a errores en la medición o alguna otra causa.

En condiciones normales (punto E) el rectificador controla la corriente y el inversor la tensión directa. Con una tensión reducida en el rectificador (posiblemente causada por una falla cercana), el punto de operación o condición de operaciones representado por el punto E'. En este caso el inversor toma el control de la corriente y el rectificador establece el voltaje. El cambio de un modo al otro es referido como "mode Shift" [1].

3.2.8.- Combinación de características de rectificador e inversor

En muchos sistemas HVDC cada convertidor debe funcionar como rectificador o como inversor, en consecuencia, cada convertidor tiene características combinadas como se muestra en la figura 3.9 (a), cada modo de operación de cada convertidor consta de tres segmentos CIA (ángulo de ignición constante), CC (corriente constante) y CEA (ángulo de extinción constante). La potencia activa fluye del convertidor I al convertidor II cuando la característica es la mostrada por trazo continuo en la figura 3.7(a), esta condición de operación está representada por el punto E1. El flujo de potencia se invierte, cuando la característica es la representada por los segmentos de trazo continuo mostrada en la parte inferior de la figura 3.9(a), estando esta condición de operación representada

por el punto E2 la que se obtiene invirtiendo el margen de corriente.

La inversión del margen de corriente se logra, haciendo que la corriente de consigna del convertidor II sea mayor que la corriente de consigna del convertidor I. La condición de operación ahora está representada por el punto E2 como se muestra en la figura 3.9 (b), siendo la corriente la misma que antes, pero con la polaridad de las tensiones cambiadas [1].

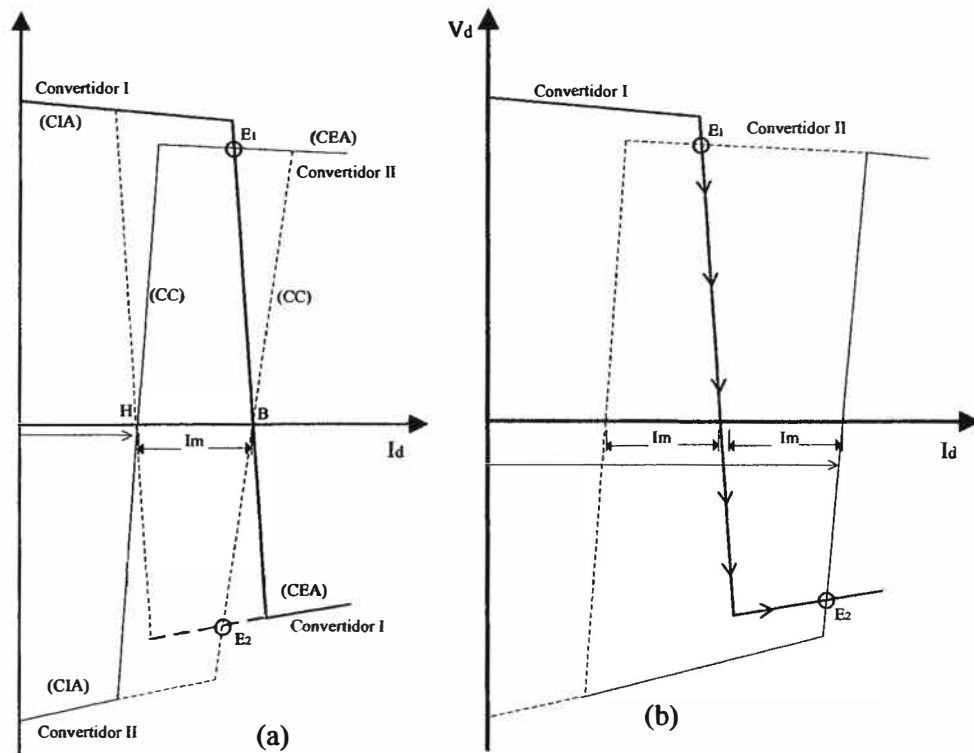


Fig.3.9 Combinación de características e inversión de flujo de potencia

3.2.9.- Límite de corriente

En la implementación del sistema de control, existen varios límites que se utilizan para asegurar el funcionamiento seguro de todo el sistema de transmisión. En cuanto a las corrientes, los límites utilizados son los siguientes:

(a) Límite máximo

Usualmente se limita a 1.2-1.3 veces la corriente nominal a plena carga, con el fin de evitar daños térmicos en las válvulas.

(b) Límite mínimo

A bajos valores de la corriente DC, el *ripple* en la corriente puede causar que ésta sea intermitente, por lo tanto este valor, prácticamente, nunca es fijado en cero [1].

3.2.10.- Limitador de corriente dependiente del Voltaje (VDCOL)

Por lo general los sistemas de control de corriente incluyen un limitador de la corriente de referencia, cuyo principal objetivo es reducir la corriente de referencia del rectificador cuando la tensión DC presenta un valor muy bajo.

Bajo condiciones de voltaje reducido, puede ser no deseable o posible mantener el valor de la corriente DC o de la potencia transmitida por el enlace; esto debido a las siguientes razones ^[1]:

- (a) Cuando el voltaje en una de las convertoras baja más allá de un 30%, la demanda de potencia reactiva de las estaciones se incrementa más allá de su valor nominal, lo cual puede tener un efecto adverso en el sistema AC. Valores muy grandes de los ángulos α o γ necesarios para controlar la corriente, causan un incremento de potencia reactiva más allá de su valor nominal. Por otra parte, valores reducidos en el voltaje AC también causan la disminución de la potencia reactiva entregada por los filtros y condensadores, los cuales entregan gran cantidad de la potencia reactiva necesaria para el funcionamiento de las estaciones convertoras.
- (b) A voltajes reducidos, también existen riesgos de fallas de conmutación y de inestabilidades de voltaje.

Las características del VDCOL se pueden determinar en función del voltaje de conmutación AC o del voltaje DC. En la Figura 3.10 se puede observar la curva característica típica de un VDCOL.

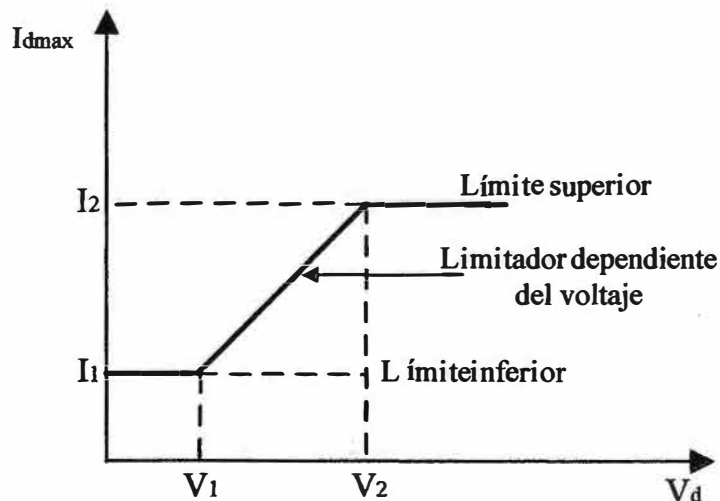


Fig.3.10 Limitador de corriente dependiente del voltaje continuo.

Para la operación del VDCOL, el voltaje DC medido, es pasado a través de un retardador o filtro de primer orden. Generalmente, este retardador es diferente cuando incrementa o disminuye las condiciones del voltaje. Cuando el voltaje está disminuyendo, una acción rápida del VDCOL es requerida; por lo tanto, el retardo es pequeño. Si el mismo retardo es utilizado durante la recuperación del voltaje, esto puede producir oscilaciones y posibles inestabilidades. Para prevenir esto, cuando el voltaje DC se está recuperando normalmente se utiliza un gran tiempo de retardo.

La característica del VDCOL incluye límites máximos y mínimos, siendo el último de mayor complejidad que el primero. El punto de inflexión V_2 por debajo del cual I_{ref}

disminuye con el voltaje, puede ser diferente según la aplicación. Cuando el sistema AC receptor es muy débil se suele localizar el punto V_1 muy cercano a V_2 aunque en casos normales esta en el margen del 50% al 70% del voltaje nominal.

En la Figura 3.11 se puede observar la curva V_d versus I_d del control en el rectificador y en el inversor incorporando los límites impuestos por el VDCOL ^[1].

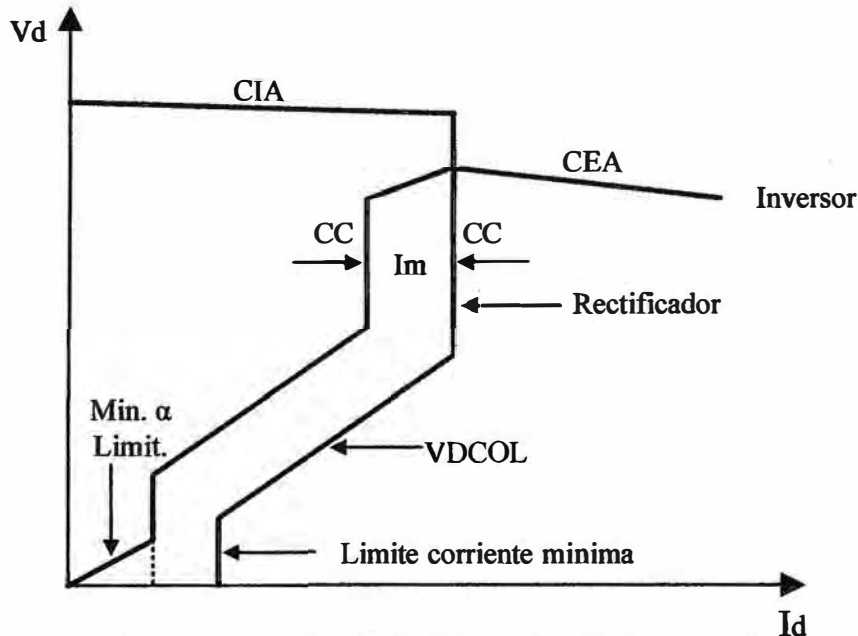


Fig.3.11 Curva V-I incorporando el VDCOL, las limitaciones en la corriente y en los ángulos de disparo

3.2.11.- Ángulo límite de disparo

En el inversor es normal incorporar un límite en el ángulo de disparo α , lo que se indica en la figura 3.11. Este límite se utiliza normalmente para evitar que el inversor opere como rectificador en el caso de que exista una falla de telecomunicación que transmite tanto la corriente de referencia como la corriente margen. El ángulo de disparo mínimo en el inversor se limita normalmente a valores mayores a 90° , típicamente en el rango de 95° a 120° . A diferencia con lo que ocurre en el inversor, al rectificador se le es permitido trabajar como inversor en ciertos casos especiales. Como consecuencia, el límite máximo impuesto en el ángulo de disparo del rectificador se encuentra normalmente en el rango de 90° a 140° ^[1].

3.2.12.- Modos de control alternativos en el inversor

Las siguientes son variaciones de modo de control CEA descrito anteriormente para el inversor. Estas variaciones ofrecen algunas ventajas en algunos casos especiales.

• Modo de control de voltaje

En lugar de controlar el ángulo γ , se puede controlar el voltaje DC con el fin de mantener un valor constante en algún punto de la línea. En comparación al control CEA, el control de voltaje tiene la ventaja de que la característica de control V-I del inversor es

plana como se muestra en la figura 3.12. Por otro lado, al utilizar el control de voltaje, el ángulo γ utilizado tiene un valor ligeramente mayor al utilizado con el control CEA, y por lo tanto el inversor es menos propicio a las fallas de conmutación ^[1].

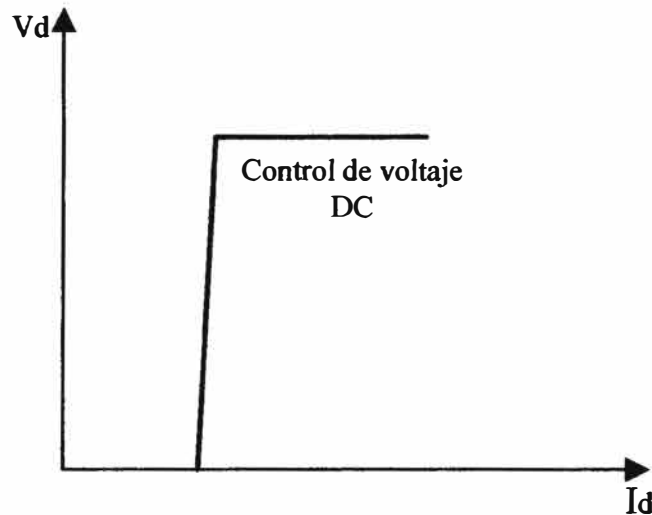


Fig.3.12 Modo de control alternativo en el inversor - Control voltaje DC

- **Control de beta**

Con un valor del ángulo β constante, la característica V-I del inversor tiene una pendiente positiva como se muestra en la figura 3.13. Al existir una disminución de la corriente por la línea DC, el control de β constante entrega una seguridad adicional en contra de fallas de conmutación. Sin embargo, con corrientes elevadas el ángulo β aumenta, con lo cual el valor mínimo de γ puede ser alcanzado rápidamente. El control de β constante no es utilizado normalmente para operación normal, se utiliza como un tipo de control auxiliar para actuar directamente sobre el ángulo de disparo en el caso tener que realizar una acción de control auxiliar al existir fallas en el sistema ^[1].

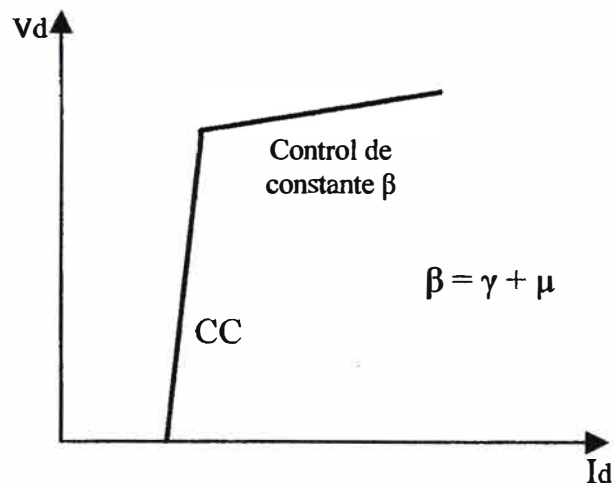


Fig.3.13 Modo de control alternativo en el inversor - Control beta constante

- **Modo de estabilización**

El modo de estabilización fue en un principio introducido para evitar que las curvas casi paralelas del rectificador y del inversor coincidieran en el caso de alguna perturbación

en los voltajes AC conectados a los dos convertoras (Figura 3.14(a)).

Esta modificación tiene una gran importancia en la estabilidad del sistema de control de corriente. Como se muestra en la figura 3.14 (b), la intersección de la curva CIA (min α) del rectificador y CEA del inversor, puede no estar bien definidas para ciertos niveles de voltaje cerca de la transición entre las curvas CEA y CC del inversor. En esta región, un pequeño cambio en el voltaje AC puede causar un gran cambio en la corriente continua.

Con el fin de evitar este problema, se utiliza normalmente una curva con una pendiente positiva (β constante) en la transición entre los controles CEA y CC, como se muestra en la figura 3.15 (a). Otra variación, como se muestra en la siguiente figura 3.15 (b), es controlar el voltaje continua V_d en un valor constante [1].

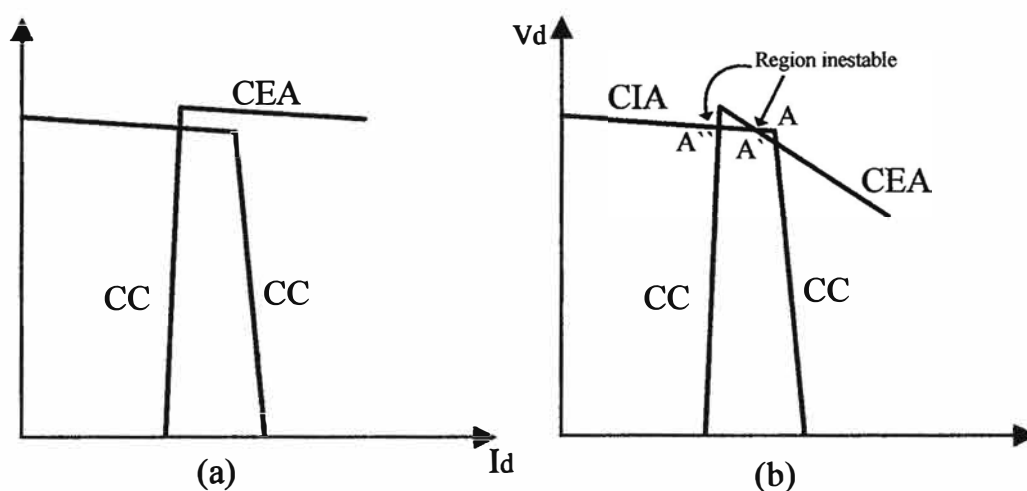


Fig.3.14 Curvas con regiones ambiguas

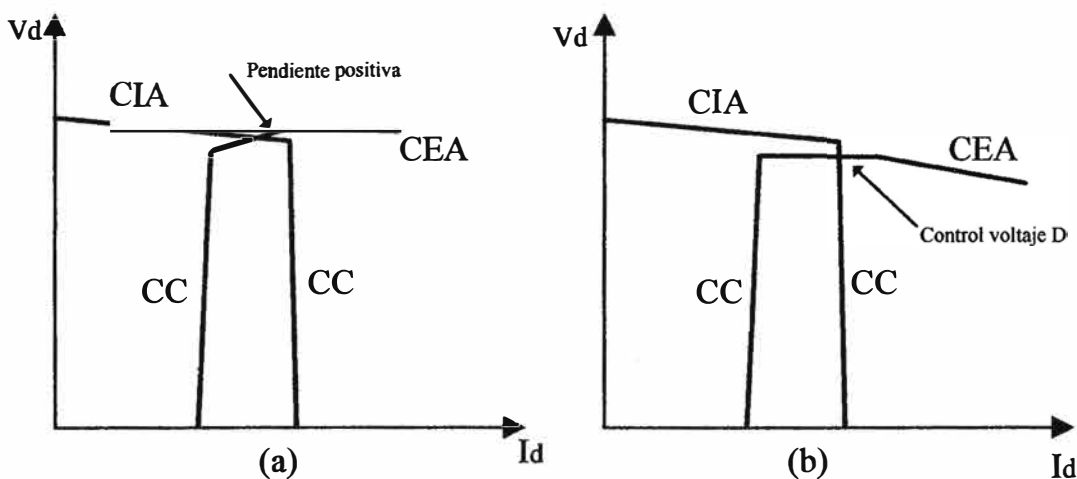


Fig.3.15 Curvas luego de aplicar control de beta y control de voltaje DC

3.3.- Control del Sistema de Disparo

El sistema de control de disparo en las estaciones convertoras establece el instante de disparo de las válvulas con tal que las estaciones convertoras operen en el

modo de control deseado: corriente constante CC, ángulo de disparo constante CIA, ángulo de extinción constante CEA, etc. Este sistema debe generar pulsos de disparo para todas las válvulas con orden y fase correctos, dentro del intervalo α_{\min} a α_{\max} . La salida del sistema de control de disparo se conecta a un generador de pulsos que proporciona los pulsos de control individuales para todas las válvulas que forman el convertidor.

Los tipos básicos de control que han sido usados para la generación de los pulsos en las estaciones conversoras son ^[1]:

- Control de fase individual (IPC)
- Control de fase equidistante (EPC)

3.3.1.- Sistema de control de fase individual (IPC)

Este sistema fue ampliamente usado en las primeras instalaciones de corriente continua. Su principal característica es que los pulsos de disparo son generados individualmente para cada válvula. El disparo es sincronizado con respecto al punto de cruce por cero del voltaje de conmutación, lo que introduce el inconveniente de que las distorsiones que presente el voltaje AC son realimentadas a través del sistema de control de disparo, provocando variaciones del ángulo de disparo.

El sistema IPC tiene la ventaja de ser capaz de alcanzar altos voltajes DC bajo desequilibrios o formas de onda distorsionadas, debido a que el instante de encendido para cada válvula es determinado independientemente. Sin embargo, en el sistema IPC la señal de control es derivada del voltaje AC de la línea, por lo tanto cualquier desviación de la forma ideal de voltaje creará un disturbio en la simetría de la señal de corriente, lo que introducirá distorsiones adicionales en las formas de ondas por medio de armónicas no características. Si el sistema AC al cual está conectada la estación conversora es débil, el efecto de la retroalimentación puede distorsionar aún más el voltaje AC y de esta forma guiar a una inestabilidad armónica ^[1].

3.3.2.- Sistema de control de pulso equidistante (EPC)

En este sistema las válvulas son iniciadas a intervalos de tiempo iguales, y los ángulos de inicio de todas las válvulas son retardados o avanzados de igual forma, con el fin de obtener el modo de control deseado. En este sistema existe una sincronización indirecta con el voltaje alterno del sistema.

Desde 1960, todos los fabricantes de HVDC utilizan este sistema de control para el control del disparo de las válvulas de tiristores.

El componente básico del sistema consiste en un oscilador controlado por voltaje (VCO). Este dispositivo genera un tren de pulsos de frecuencia $12f_0$ (en el caso un puente de 12 pulsos) cuando la señal de control es cero, es decir cuando el valor de la α medido

es igual al valor del α proporcionada por el orden de corriente (α_{orden}). Un cambio temporal del α_{orden} debido a una perturbación, provoca un desequilibrio entre el orden de corriente y la respuesta de corriente, dando lugar a una desviación momentánea de la frecuencia del VCO. Este tipo de corrección automática de la fase del pulso continúa hasta que el valor de alfa se adapta a la nueva situación, momento en el cual se entra en un modo de operación estable con un desplazamiento de fase en la salida del VCO y un cambio en el valor de alfa, si se compara con la situación anterior. A continuación el generador de pulsos convierte la señal de frecuencia $12f_0$ a 12 señales individuales de frecuencia f_0 .

El sistema de control de pulsos equidistante da como resultado un bajo nivel de armónicas no características y un funcionamiento estable para sistemas AC débiles. Sin embargo, cuando la asimetría del sistema AC es considerablemente grande, el sistema da como resultado una disminución en el voltaje DC y en la potencia [1].

3.4.- Control del Transformador de Conversión

El punto de operación deseado en las estaciones conversoras, es alcanzado por la acción de los cambiadores de tap dinámicos de los transformadores. En el inversor, el transformador ajusta el voltaje DC por medio de sus taps, con el fin de mantener el ángulo y en su valor nominal.

En el caso que se desee controlar el voltaje V_d , el cambiador de tap debe ajustar sus taps para que el nivel de tensión V_d sea alcanzado con un ángulo de extinción igual o muy cercano a su mínimo. En el rectificador, el cambiador de tap del transformador conversor se utiliza para ajustar los tap con tal de que el ángulo de disparo tenga un rango de funcionamiento entre 10° a 15° , manteniendo la tensión DC en el valor deseado.

Se debe tener en cuenta que el cambiador tiene una dinámica mucho más lenta que la de las funciones de control básico que actúan sobre los ángulos en las estaciones conversoras. Un cambio de conexión o de tap necesita algunos segundos para efectuarse. Cada nivel o escalón del cambiador de tap proporciona un cambio del 1 a 1.5% de los valores establecidos para el secundario [1].

3.5.- Jerarquía y Organización del Sistema de Control

La jerarquía de los controles varían desde un sistema DC a otro, pero los conceptos generales son comunes. El esquema de control básico se muestra en la figura 3.16 y se divide normalmente en cuatro niveles: control del grupo de válvulas, control de polo, control maestro y control general o despacho [1].

Los principios a aplicar en un sistema de control son:

- Organización jerárquica estricta
- Separación estricta entre las funciones de control, protección y supervisión

- Funciones de control segregadas y referidas al nivel jerárquico más bajo
- Si es posible, no debe incluir protecciones a nivel de bipolo

Las funciones de control básicas son similares para la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, funciones de control de más alto grado, son determinadas para una función específica de algún sistema. Para la operación confiable de los sistema de corriente continua, cada polo debe funcionar lo más independiente posible del otro. Las funciones de control y la protección deben ser segregadas e implementadas en el nivel más bajo de la jerarquía.

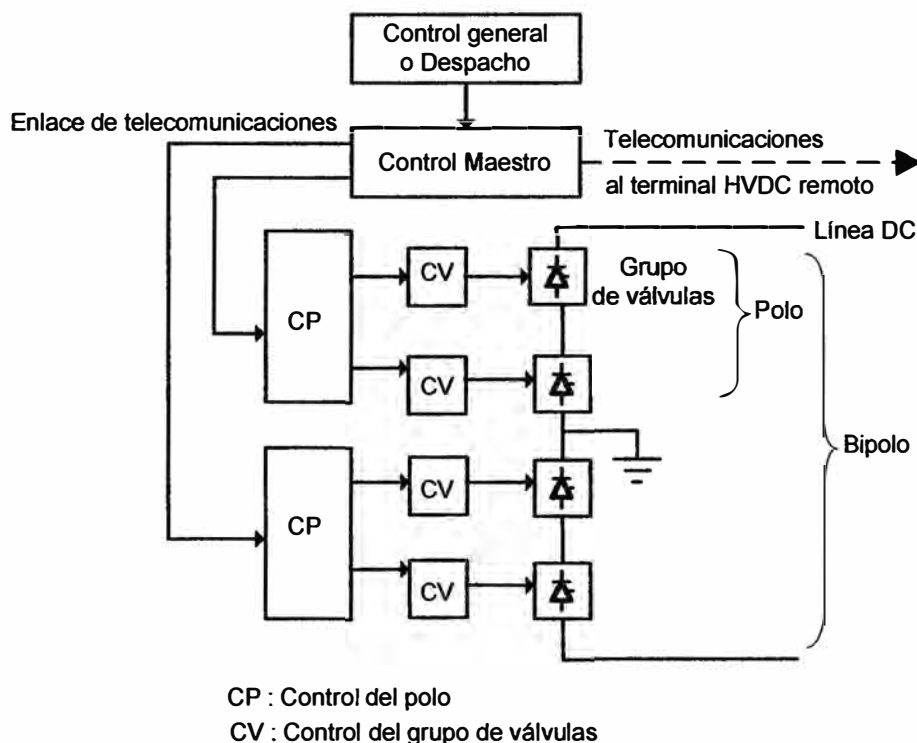


Fig.3.16 Organización del sistema de Control

3.5.1.- Control Maestro

El control maestro se encarga de supervisar el control del bipolo completo, incluye funciones de control de frecuencia, modulación de potencia, control del voltaje y de la potencia reactiva. Por otra parte, también se encarga de supervisar el funcionamiento bipolar y monopolar del sistema, de los aumentos de corrientes transitorias ocurridas con la salida de un polo, del balance de corriente de los polos y de la comunicación del orden de potencia/corriente a las estaciones de conversión.

El controlador principal o maestro, usualmente recibe una potencia de referencia a transportar desde el sistema de despacho. Esto se encuentra normalmente sujeto a un controlador auxiliar que se preocupa de controlar la tasa de cambio de la potencia con el fin de proteger al sistema de cambios súbitos en la potencia entregada. Una señal suplementaria de potencia ΔP (Figura 3.17), también puede ser implementada en esta etapa para diferentes aplicaciones de control, en el caso de que el sistema de corriente

continua sea utilizado para estabilizar el sistema AC. La potencia máxima P_{max} y potencia mínima P_{min} limitan las excursiones de potencia. Finalmente la potencia de referencia es dividida por el voltaje DC medido con el fin de entregar la corriente de orden o de referencia deseada, esta última es enviada al controlador de los polos [1].

La salida de este controlador es la corriente de referencia o de orden cuyo valor límite se encuentra sujeto a la característica del VDCOL. Este sistema es común para ambas estaciones y está localizado en una de ellas. El orden de corriente es generado en esa unidad y enviado a la otra estación por medio de un enlace de telecomunicaciones.

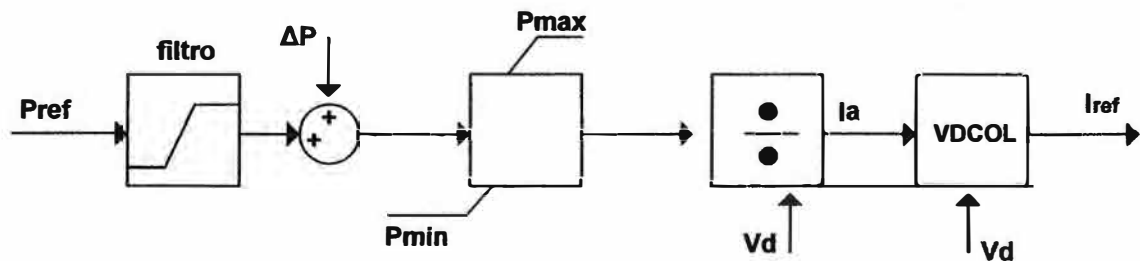


Fig.3.17 Control maestro

La figura 3.18 ilustra un esquema general para la implementación de controles. En muchos casos estos pueden ser dos o tres grupos de válvulas por polo conectadas en serie. Usualmente se utilizan dos tipo de conexiones en los transformadores de entrada Y-Y y Y-Δ y rectificadores de 12 pulsos.

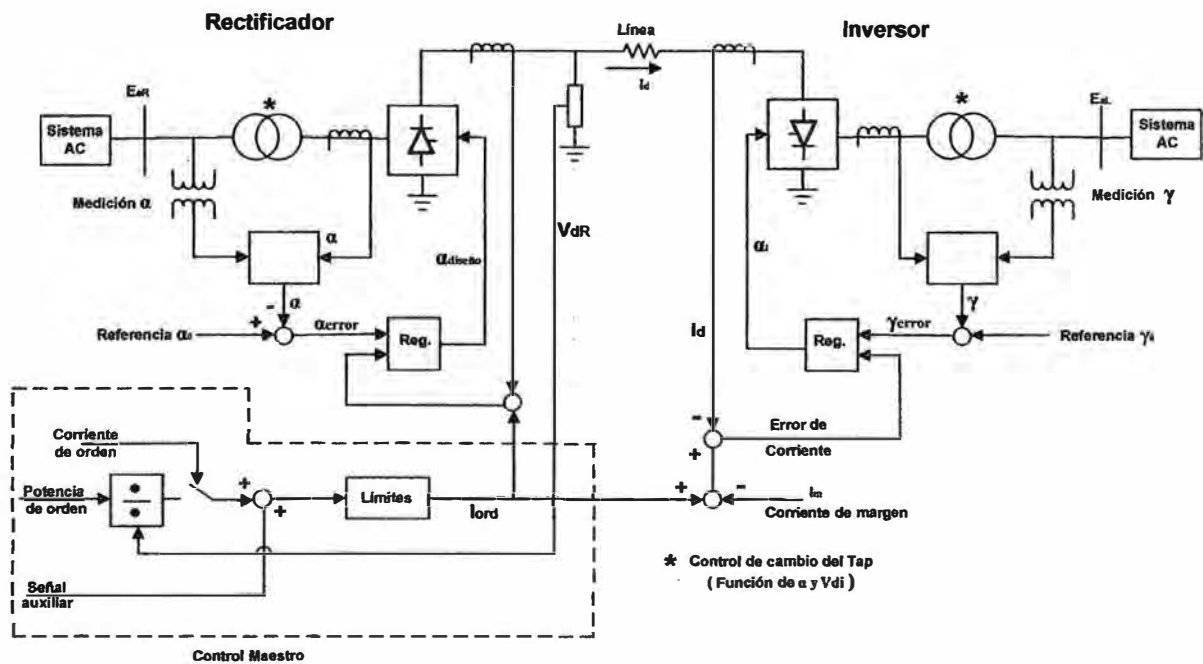


Fig.3.18 Esquema de control básico

3.5.2.- Controlador del polo

La entrada de este controlador es la corriente de referencia I_{ref_lim} recibida desde el control maestro.

La corriente suplementaria ΔI (Figura 3.19) puede ser añadida a la corriente de orden o referencia I_o para alcanzar cualquier modulación de la corriente de referencia si es que así se desea. La corriente de entrada está, en algunos casos, limitada a un valor máximo y a un valor mínimo como protección del sistema. Después de este límite, la corriente de referencia es usualmente comparada con la corriente medida I_d para generar una señal de error la cual alimenta a un controlador. Otra señal que modifica la corriente de referencia es la corriente margen la cual es requerida sólo en el inversor. En el caso del inversor, además del control de corriente descrito anteriormente, también se necesita un controlador del ángulo gamma, que consiste básicamente de un sistema encargado de medir gamma y de un controlador, alimentado con el error entre el gamma medido y el gamma de orden o referencia. Además de esto, también se puede implementar una señal de control auxiliar con el fin de realizar alguna modificación al control del ángulo gamma en el inversor [1].

En este nivel también se encuentran algunas protecciones tales como protección diferencial del polo, la protección armónica DC y alguna subfunción del control de secuencia.

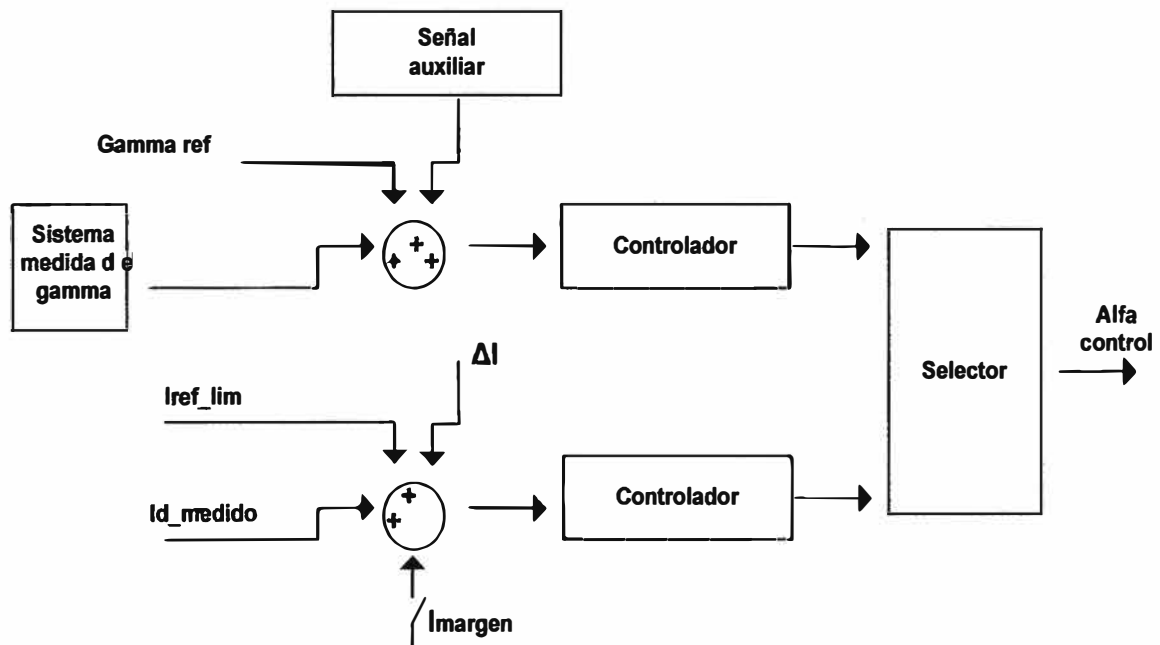


Fig.3.19 Controlador de polo

3.5.3.- Controlador del grupo de válvulas y tiristores

La señal de salida del controlador del polo es utilizada para generar los pulsos de disparo en las válvulas de control de cada convertora (Figura 3.20). El controlador de las válvulas tiene comúnmente dos controladores separados asociados a ella:

- 1) Control de taps del transformador y
- 2) Controlador de fallas de conmutación. El último controlador detecta las posibilidades

de que se produzca una falla de conmutación, para esto utilizan medidas de la corriente AC, del voltaje de conmutación, y de la corriente DC. En función del detector de fallas de conmutación, se realizan rápidos cambios del ángulo de disparo pre-programados con el fin de asistir a la recuperación del sistema luego de estas fallas.

3.6.- Controles Avanzados

Existen varios controladores que pueden ser añadidos al control básico del sistema de corriente continua con el fin de tomar ventaja de la respuesta rápida de los enlaces de corriente continua y ayuda en mejorar el funcionamiento de los sistemas AC conectados al enlace.

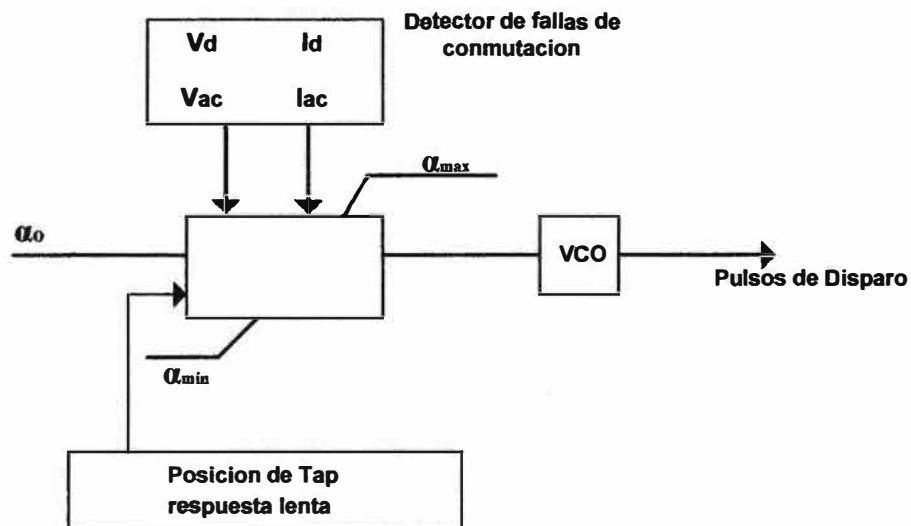


Fig.3.20 Controlador grupo de válvulas.

La potencia en un enlace de corriente continua puede ser controlada en respuesta a diferentes parámetros derivados del sistema AC (como frecuencia), con el fin de mejorar la seguridad y funcionamiento de todo el sistema. Esto es alcanzado por una potencia o corriente auxiliar derivada del controlador de emergencia o de algún controlador auxiliar. Algunos controles de este tipo se describen a continuación ^[1]:

3.6.1.- Control de frecuencia y de potencia/frecuencia

El control de frecuencia puede ser usado principalmente en el caso de i) cargas aisladas y ii) generación aislada. En el último caso, el objetivo es mejorar la disminución o aumento de frecuencia, y reducir el uso de los sistemas de control de los generadores.

Cuando un enlace DC es utilizado entre dos sistemas interconectados, la frecuencia puede ser utilizada para ajustar el flujo de potencia sobre el enlace para asistir al sistema en dificultades. Es de notar que un enlace de corriente continua no tiene inherentemente sensibilidad a la frecuencia del sistema a menos que deliberadamente se le introduzca un sistema de control.

3.6.2.- Estabilización de la red AC por medio de una línea DC

Cuando dos sistemas AC son interconectados por líneas paralelas AC y DC, las

líneas DC pueden ser utilizadas para estabilizar la interconexión a un grado no posible con sistemas AC puros.

3.6.3.- Amortiguación de oscilaciones subsíncronas

Las turbinas a vapor y los generadores eléctricos pueden tener oscilaciones mecánicas subsíncronas entre las distintas etapas de la turbina y el generador. Si este tipo de generador alimenta un rectificador en los enlaces DC, se puede requerir un control auxiliar en el enlace para asegurar que los modos de oscilación subsíncronos sean amortiguados, limitando la torsión en el eje de la turbina.

3.6.4.- Control de voltaje

Una de las principales características de las estaciones conversoras de corriente continua es su necesidad de potencia reactiva en la barra de conmutación AC. Debido a los ángulos de disparo asociados con el proceso de conmutación, a los controladores de voltaje o para evitar fallas de conmutación; la componente fundamental de la corriente siempre atrasa al voltaje de conmutación AC. Tanto en la operación como rectificador o como inversor, los terminales DC absorben potencia reactiva en proporción a la potencia activa transmitida. Para esquemas convencionales de corriente continua esta proporción es de aproximadamente 60% en condiciones normales de operación. Si el sistema AC tiene una impedancia relativamente grande (baja corriente de cortocircuito), este sistema no podrá suplir esta potencia reactiva, porque el voltaje en la barra AC tenderá a caer a niveles no permitidos.

Las principales razones por las cuales es deseable mantener el voltaje del sistema AC y el voltaje de conmutación en un valor constante son las siguientes:

- Para limitar los sobrevoltaje transitorios y dinámicos a límites aceptables definidos por las especificaciones y normas de los equipos de la subestación.
- Para prevenir el pestañeo de voltaje AC y fallas de conmutación debido a fluctuaciones en el voltaje AC cuando interrupciones en la carga o filtros puedan ocurrir.
- Para mejorar la recuperación del sistema de transmisión de corriente continua después de fallas severas en el sistema AC.
- Para evitar la inestabilidad del sistema de control, particularmente cuando se opera controlando el ángulo de extinción en la estación inversora.

La compensación sincrónica ha sido el medio preferido para controlar el voltaje AC, ya que tiene la ventaja de incrementar la corriente de cortocircuito y servir como fuente de potencia reactiva. Sus desventajas incluyen altas pérdidas y mantenimiento que se suma a los costos totales. Además de este elemento, existen controladores del voltaje AC que incluyen:

- 1.- Compensadores estáticos que utilizan tiristores con el fin de controlar la corriente que

circula a través de reactores e interruptores, utilizados para conectar o desconectar bancos de condensadores. Por este medio, es posible un control rápido de la potencia reactiva, de modo de mantener el voltaje AC dentro de límites aceptables. La principal desventaja es que no aumentan la corriente de cortocircuito.

2.- Utilizar varistores especiales de óxido metálico junto con interruptores metálicos rápidos de reactores *shunt*, condensadores o filtros. Estos varistores protegen el equipamiento del sistema HVDC contra sobrevoltajes transitorios, donde la conexión y desconexión de los componentes de potencia reactiva permiten el balance de potencia reactiva. La desventaja es que el control de voltaje no es continuo, el control de la potencia reactiva es retrasado por la velocidad de los interruptores mecánicos, y no se incrementa el nivel de cortocircuito.

3.- Condensadores en serie en forma de CCC (Capacitor Commutated Converter) o CSCC (Controlled Series Capacitor Converter), pueden aumentar la corriente de cortocircuito y mejorar la regulación del voltaje AC de conmutación.

4.- Compensadores estáticos o STATCOM. Éste es el controlador de voltaje más rápido existente.

5.- Una quinta solución más económica y confiable, es regular la potencia reactiva consumida por la estación convertidora en respuesta a las variaciones del voltaje AC. Esto puede ser realizado instalando un regulador del voltaje AC actuando directamente en los controles de disparo de las estaciones convertidoras. Por ejemplo, si aumenta el voltaje AC, el regulador de voltaje actuará aumentando el ángulo de disparo en el caso del rectificador (o del ángulo de extinción en el caso del inversor) con el fin de reducir el voltaje, eliminando las señales de otros reguladores. Por lo tanto, la potencia reactiva absorbida por la estación convertidora se incrementa para limitar el sobrevoltaje. En otras palabras, el convertidor se diseña con el fin de actuar de un modo similar a un SVC (Static Var Compensators), sin que por esto se deterioren las características básicas del convertidor. Sin embargo, este tipo de control presenta varias desventajas, ya que al aumentar los ángulos de disparo existe un mayor consumo de potencia reactiva en las estaciones conversoras en tanto que el voltaje DC en la línea sufre una disminución, lo que provoca mayores pérdidas en el sistema de transmisión ^[1].

CAPÍTULO IV

CASO DE APLICACIÓN DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA (HVDC)

4.1.- Sistema de Transmisión Aysén - Chile

El proyecto Aysén consiste en la construcción de un conjunto de centrales hidroeléctricas con una capacidad estimada de 2.850 MW, aprovechando el potencial hidroeléctrico de los ríos Baker y Pascua de la XI Región del país de Chile. Este proyecto supone varios desafíos para su realización, uno de las principales pruebas, se encuentra en la implementación del sistema de transmisión a utilizar para transmitir la gran cantidad de potencia generada en Aysén hasta Santiago. Este sistema de transmisión, a causa del largo de la línea y de la gran cantidad de potencia a transmitir se deberá realizar por medio de un enlace de corriente continua HVDC como se muestra en la figura 4.1.

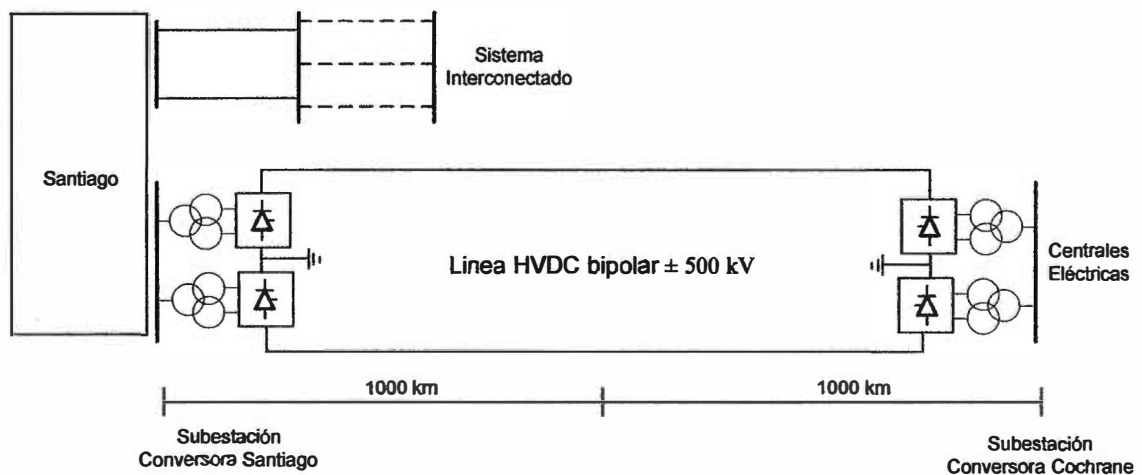


Fig. 4.1 Sistema de Transmisión HVDC

4.1.2 Especificaciones generales:

- Potencia : 2400MW
- Distancia : 2000 km
- Tensión : ±500kV
- Red : Línea aérea y submarina

CONCLUSIONES

1.-La transmisión de energía eléctrica en HVDC es bastante útil y conveniente para solucionar problemas como las distancias, inestabilidad, conectar sistemas asíncronos, etc.

Para transmitir a una distancia mayor que 800 km es muy conveniente ya que el costo es menor que la transmisión en HVAC, pero en una distancia menor ya no es conveniente debido a que el costo de rectificación e inversión es demasiado alto y no se compensa con el ahorro en la transmisión.

2.- La transmisión se puede hacer de distintas formas ya sea subterránea, submarina y aérea, y en todas produciendo menos daño a la naturaleza y pudiendo llegar a lugares mucho más alejados.

3. La transmisión en HVDC es mucho más estable y más controlable que en HVAC, pudiendo transmitir mucha más energía eléctrica manteniendo una potencia que se podría decir independiente de la distancia que tenga la línea de transmisión. Las perturbaciones en la línea son menores y es mucho más fácil la inyección de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables como la energía eólica, solar, etc.

4.- A pesar de que el modo de medir las variables involucradas en el control de los sistemas no se analizó con detalle en este informe, el tipo de medición y el tiempo de respuesta de estos elementos son muy importantes para el correcto funcionamiento de todo el sistema de control, en particular a la medición de la variable γ , debido a que ésta, por lo general, se mide de forma indirecta existiendo gran cantidad de formas de medición.

5.- De la misma forma, en este trabajo no se analizó el sistema de protecciones tanto de los sistemas AC como del sistema DC, debido a que este informe está centrado en los modelos de control en transmisión de corriente continua.

6.- Aun cuando el informe realizado se ha enfocado únicamente en controlar el ángulo de disparo de la estaciones convertoras, la alternativa de controlar las estaciones por medio del control de los taps de los transformadores de conversión puede mejorar notablemente la operación de los sistemas, pero con tiempos de respuesta lentos para el análisis transitorio.

7.-El sistema de control empleado en un enlace de corriente continua, permite incorporar un sin número de aplicaciones, con el fin de apoyar a la estabilidad y operación de los

sistemas. Entre las posibles aplicaciones se encuentra por ejemplo utilizar el sistema de control con el fin de regular frecuencia, estabilizar sistemas, etc.; por lo tanto, al utilizar el sistema de control se abre un sin número de posibles aplicaciones del sistema de control, que son motivos de investigación.

ANEXO A
MODELO DE APLICACIÓN

ANEXO A

Mostrar como a través de las ecuaciones de los convertidores y de los esquemas de control presentados, es posible estudiar un sistema HVDC en régimen estacionario [1].

1.- Modelo de Aplicación

En la figura 1 se muestra el esquema de un sistema de transmisión de corriente continua (enlace en CC) de tipo bipolar 1,000 MW, ± 250 kV. La resistencia de la línea de transmisión es de $10\Omega/\text{line}$ y cada estación está compuesto por dos convertidores de 12 pulsos con $R_c = \left(\frac{3}{\pi}\right)X_c = 12\Omega$ (6Ω por cada convertidor de seis pulsos).

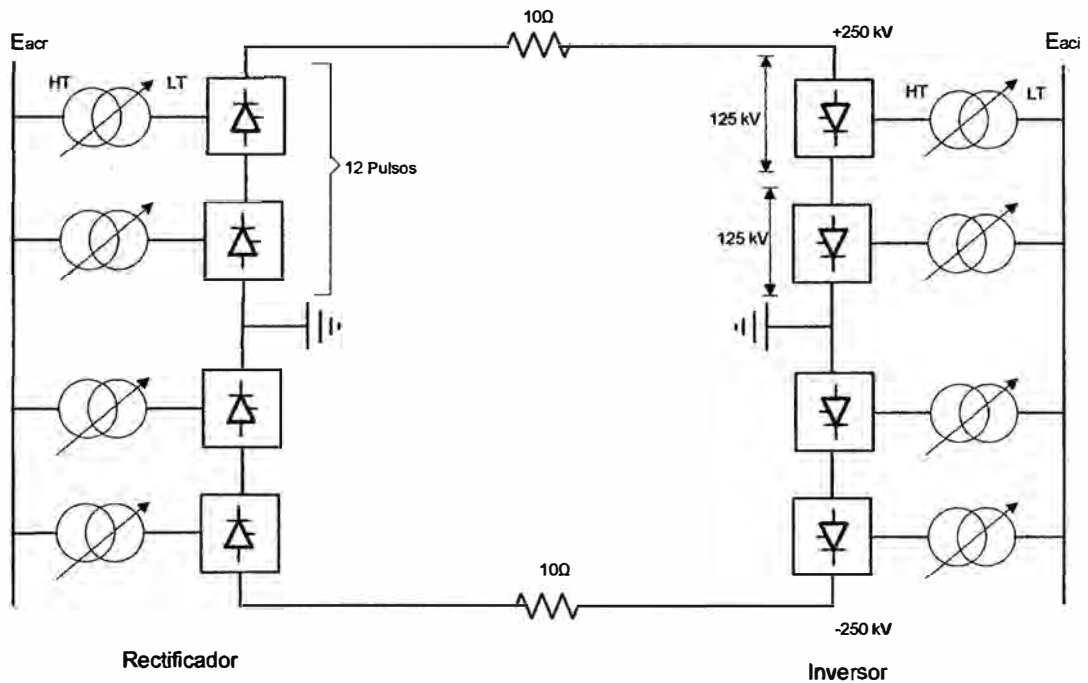


Fig.1

El desempeño del enlace CC es analizado considerándolo como un enlace monopolar de ± 500 kV, siendo 5° el mínimo ángulo de ignición (α_{\min}) del rectificador. Las pérdidas en el convertidor y la caída de tensión en las válvulas son despreciables.

El enlace en DC es operado inicialmente con el rectificador en modo de control de corriente con $\alpha_o = 18.167^\circ$, y el inversor en el modo de control de ángulo de extinción constante con $\gamma_o = 18.167^\circ$. El margen de corriente I_m es colocado en el de 15%, y la relación de transformación de cada transformador conectado a cada convertidor es de 0.5. Si la potencia en bornes del inversor es de 1000 MW y el voltaje es 500kV (para el equivalente monopolar)

(a) Para las condiciones iniciales mencionadas se calcula:

- (i) El factor de potencia y la potencia reactiva en los terminales HT del inversor
- (ii) El ángulo de conmutación μ del inversor
- (iii) El valor rms de la tensión de línea, la componente fundamental de la corriente de

línea y la potencia reactiva en la barra HT del rectificador

(b) Si la tensión AC en el lado de HT del rectificador cae en 20% se podrá calcular:

- (i) La tensión CC en los terminales del rectificador y del inversor
- (ii) El ángulo α del rectificador, el ángulo γ y μ del inversor
- (iii) La potencia activa y reactiva en la barra de HT del rectificador y del inversor.

Asumiendo que el tap del transformador es mantenido fijo y que la tensión AC del lado del inversor se mantiene constante.

Solución:

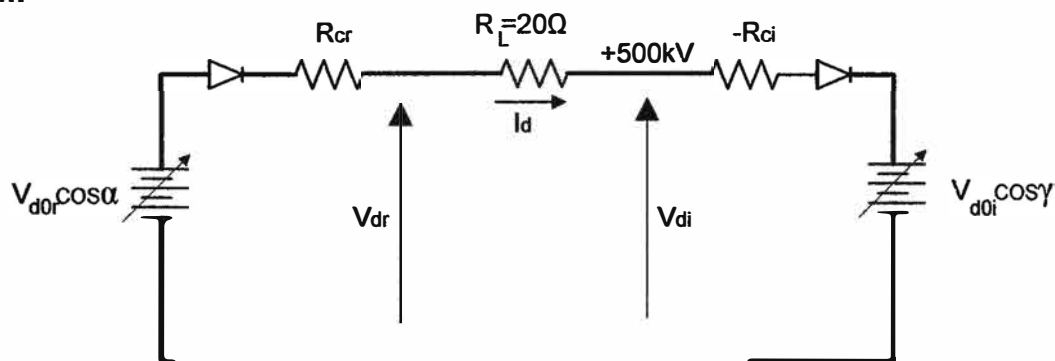


Fig.2

$$B_r = 4$$

$$R_{cr} = 6 \text{ ohm / convertidor}$$

$$B_i = 4$$

$$R_{ci} = 6 \text{ ohm / convertidor}$$

(a) $\alpha_0 = \gamma_0 = 18.167^\circ$

$$T_r = T_i = 0.5$$

$$P_i = 1000 \text{ MW}$$

$$V_{di} = 500 \text{ kV}$$

- (i) De la potencia en los terminales del inversor se calcula la corriente de la ecuación (3.2)

$$I_d = P_i / V_{di} = 1000 \cdot 10^6 / 500 \cdot 10^3 = 2 \text{ kA}$$

Luego la tensión de vacío del inversor se obtendrá a partir de la ecuación (3.16)

$$V_{di} = V_{doi} \text{ Cos} \gamma_0 - B_i R_{ci} I_d$$

$$V_{doi} = (V_{di} + B_i R_{ci} I_d) / \text{Cos} \gamma_0 = (500 \cdot 10^3 + 4 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 10^3) / \text{Cos} 18.167^\circ$$

$$V_{doi} = 576.75 \text{ kV}$$

El factor de potencia en los terminales HT del inversor de la ecuación (3.17)

$$\text{Cos} \phi_i = V_{di} / V_{doi} = 500 / 576.75 = 0.8669$$

$$\phi_i = 29.896^\circ$$

La potencia reactiva consumida en los terminales HT se calcula de la ecuación (3.18)

$$Q_i = P_i T_g \phi_i = 1000 \cdot 10^6 \cdot T_g 29.896^\circ = 574.94 \text{ MVar}$$

(ii) El ángulo de conmutación se calcula de la ecuación (3.19)

$$V_{di} = V_{doi} (\cos \gamma + \cos \beta) / 2$$

$$\cos \beta = 2V_{di} / V_{doi} - \cos \gamma_0 = 2 \cdot 500 / 576.75 - \cos 18.167^\circ = 0.7837$$

$$\beta = 38.399^\circ$$

$$\mu_i = \beta - \gamma_0 = 38.399^\circ - 18.167^\circ = 20.232^\circ$$

(iii) De la ecuación (3.5) se calcula:

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d$$

$$V_{dr} = 500 \cdot 10^3 + 20 \cdot 2 \cdot 10^3 = 540 \text{ kV}$$

De la ecuación (3.8) se calcula:

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha_0 - B_r R_{cr} I_d$$

$$V_{dor} = (V_{dr} + B_r R_{cr} I_d) / \cos \alpha_0 = (540 \cdot 10^3 + 4 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 10^3) / \cos 18.167^\circ$$

$$V_{dor} = 618.85 \text{ kV}$$

El valor de la tensión de línea en la barra de HT se calcula de la ecuación (3.7):

$$E_{acr} = V_{dor} / (1.3505 B_r T_r) = 618.85 \text{ kV} / 81.3505 \cdot 4 \cdot 0.5$$

$$E_{acr} = 229.12 \text{ kV}$$

La suma de las componentes fundamentales de corriente de línea de los cuatro transformadoras en valor rms se calcula de la ecuación (3.12):

$$I_{Lir} = (\sqrt{6} / \pi) B_r T_r I_d = 0.7797 \cdot 4 \cdot 0.5 \cdot 2 \text{ kA}$$

$$I_{Lir} = 3.119 \text{ kA}$$

La potencia en los terminales del rectificador se calcula de la ecuación (3.6)

$$P_r = V_{dr} I_d = 540 \text{ kV} \cdot 2 \text{ kA} = 1080 \text{ MW}$$

El factor de potencia en los terminales HT se calcula de la ecuación (3.9)

$$\cos \phi_r = V_{dr} / V_{dor} = 540 / 618.85 = 0.8726$$

$$\phi_i = 29.24^\circ$$

La potencia reactiva en la barra HT (sin considerar las pérdidas) se calcula de la ecuación (3.10)

$$Q_r = P_r T_g \phi_r = 1080 \cdot 10^6 \cdot T_g 29.24^\circ = 604.58 \text{ MVar}$$

(b) Con el TAP del transformador sin modificar, la tensión interna V_{dor} es directamente proporcional a E_{acr} por lo tanto, cuando en la barra de HT del rectificador se produce una caída de tensión de 20% se tiene:

$$V_{dor} = 0.8 \cdot 618.85 = 495.08 \text{ kV}$$

Si se asume que el enlace en CC (corriente continua), continua operando con el rectificador en modo de control de corriente con $I_{dr} = I_{ord} = 2 \text{ kA}$, el inversor en el modo de ángulo de extinción constante (CEA) con $V_{di} = 500 \text{ kV}$

La tensión en los terminales del rectificador se calcula de la ecuación (3.13):

$$V_{dr} = V_{di} + R_L I_d = 500 \cdot 10^3 + 2 \cdot 2 \cdot 10^3 = 540 \text{ kV}$$

De la ecuación (3.8) se calcula:

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha - B_r R_{cr} I_d$$

$$\cos \alpha = (V_{dr} + B_r R_{cr} I_d) / V_{dor} = (540 + 4 \cdot 6 \cdot 2) / 495.08 = 1.187$$

El modo 1 de operación (pto. A de la figura 3) no es satisfecho y el control se modifica al modo 2 (pto. A' de la figura 3) que corresponde al rectificador operando con ángulo de ignición constante (CIA) con $\alpha = \alpha_{\min} = 5^\circ$ y el inversor operando en el modo de corriente constante (CC) con $I_d = I_{ord} - I_m$

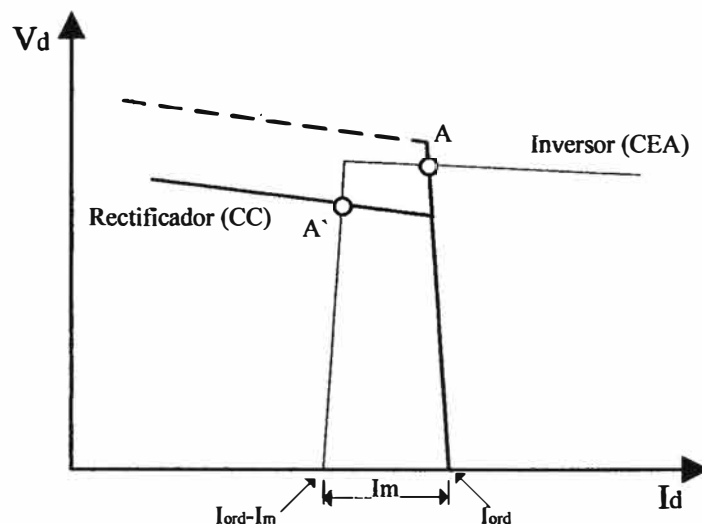


Fig.3

$$I_d = I_{ord} - I_m = (100 - 15\%) \cdot 2 \text{ kA} = 1.7 \text{ kA}$$

La tensión de salida del rectificador se calcula de la ecuación (3.8)

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha_{\min} - B_r R_{cr} I_d = 495.08 \cos 5^\circ - 4 \cdot 6 \cdot 1.7 = 452.39 \text{ kV}$$

La tensión en bornes del inversor se calcula de la ecuación (3.13):

$$V_{di} = V_{dr} - R_L I_d = 452.39 - 20 \cdot 1.7 = 418.39 \text{ kV}$$

ii) Como la tensión en el lado AC del inversor no ha cambiado, el ángulo de extinción se calcula de la ecuación (3.16):

$$V_{di} = V_{doi} \cos\gamma - B_i R_{ci} I_d$$

$$\cos\alpha = (V_{di} + B_i R_{ci} I_d) / V_{doi} = (418.39 + 4 \cdot 6 \cdot 1.7) / 576.75 = 0.796$$

$$\gamma = 37.25^\circ$$

De la ecuación (3.19) se calcula:

$$V_{di} = V_{doi} (\cos\gamma + \cos\beta) / 2$$

$$\cos\beta = (2V_{di} / V_{doi}) - \cos\gamma = (2 \cdot 418.39 / 576.75) - 0.796 = 0.655$$

$$\beta = 49.10^\circ$$

$$\mu = \beta - \gamma = 49.10^\circ - 37.23^\circ = 11.87^\circ$$

iii) La potencia en los terminales del inversor se calcula de la ecuación (3.14):

$$P_i = V_{di} I_d = 418.39 \cdot 1.7 = 711.26 \text{ MW}$$

El factor de potencia en los terminales HT del inversor se calcula de la ecuación (3.17):

$$\cos\phi_i = V_{di} / V_{doi} = 418.39 / 576.75 = 0.725$$

$$\phi_i = 23.97^\circ$$

La potencia reactiva se calcula de la ecuación (3.10):

$$Q_r = P_r T_g \phi_r = 769.06 \cdot T_g 23.97^\circ = 341.87 \text{ MVar}$$

ANEXO B
SIMULACIÓN

ANEXO B

1.- Simulación

Empleando la versión de evaluación del simulador PSCAD/EMTDC 4.2.1^[7], el sistema transmisión HVDC en corriente continua, cuyo esquema es mostrado en la figura 1 y cuyas características son indicadas en la tabla N°1, fue simulado obteniéndose los siguientes resultados:

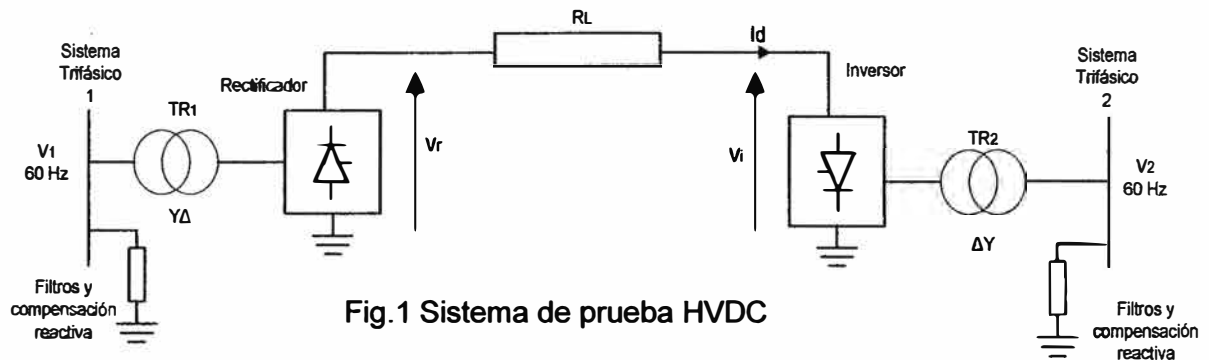


Fig.1 Sistema de prueba HVDC

TABLA N°1

Parámetro	Rectificador	Inversor
Sistema trifásico	390 kV	223 kV
Transformador (Y Δ)		
Tensiones y frecuencia	345/418 kV, 60 Hz	223/418 kV, 60 Hz
Tensión de cortocircuito de los transformadores	18 %	18%
Potencia aparente de los transformadores	1207.5 MVA	1183.6 MVA
Resistencia de conmutación equivalente R_c	22.78 ohm	25.28 ohm
Tensión DC	540 kV	500 kV
Corriente DC	2 kA	2 kA
Potencia DC	1080 MW	1000 MW
Ángulos iniciales	Alfa = 18^0	Gama = 21^0

Los valores de base considerados son: $V_{base} = 500$ kV, $I_{base} = 2$ kA y $S_{base} = 1000$ MVA. La resistencia de conductor de la línea DC es $R_L = 20$ ohm.

2.- Resultados

- En la figura 2 se muestra el primer resultado obtenido cuando el valor de referencia de corriente, del control de corriente del rectificador, es colocado en el valor nominal de 1 p.u. es decir I_d en 2 kA en el tiempo $t = 2.25$ s. También se muestra los valores

promedios de las tensiones del inversor (V_i) que está en el valor de 1.0 p.u. o de 500 kV DC, obtenida mediante el ajuste del ángulo γ o de la tensión de la red donde está conectado, y el valor medio de la tensión del lado del rectificador (V_r) en 1.08 p.u. o de 540 kV DC. El rectificador está operando como fuente de corriente y el inversor como fuente de tensión con el ángulo γ constante.

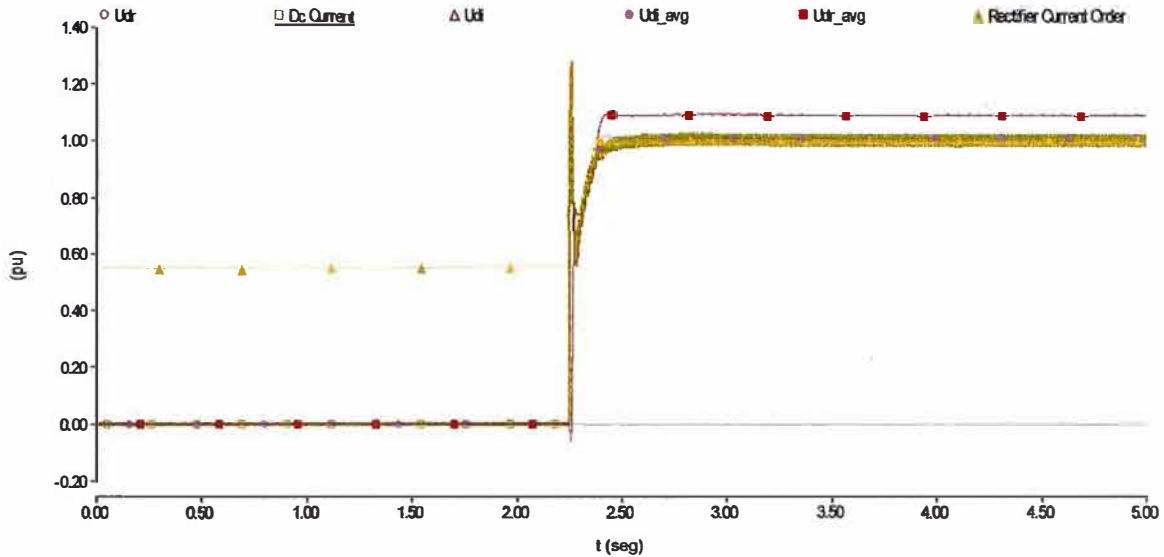


Fig.2 Tensiones y corrientes DC del Sistema HVDC

- En la figura 3 muestra la forma de onda de corriente DC y tensión en el lado del inversor

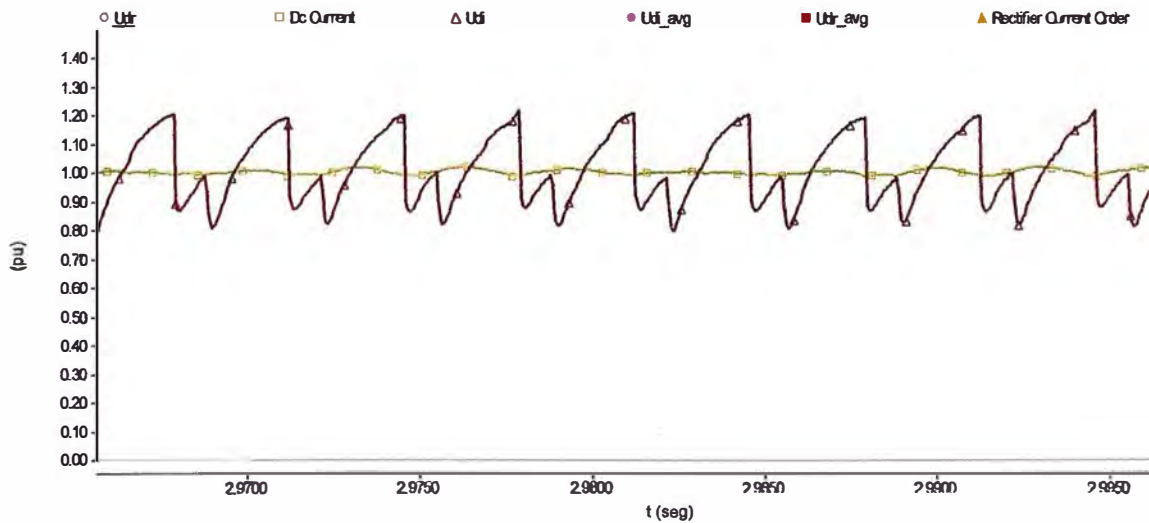


Fig.3 Tensiones U_{di} y corriente I_d en el inversor del Sistema HVDC

- La figura 4 muestra el valor de los ángulos de ignición o alfa del rectificador y del inversor en 18° y 142.5° respectivamente así como el ángulo “ γ ” del inversor en 21° grados.

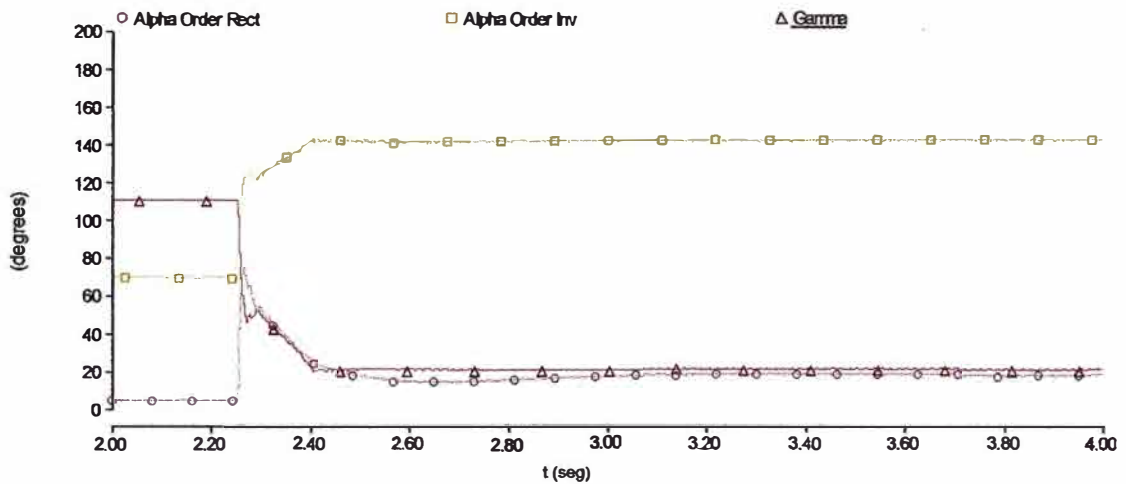


Fig.4 Tensiones U_{di} y corriente I_d en el inversor del Sistema HVDC

- La figura 5 muestra la tensión por fase y la corriente de línea del sistema trifásico donde está conectado el rectificador. En la figura se observa como la corriente está adelantada de la tensión, producto de los filtros y la compensación reactiva aplicada en ese punto; así como la distorsión de tensión y corriente como resultado de la actuación de los filtros.

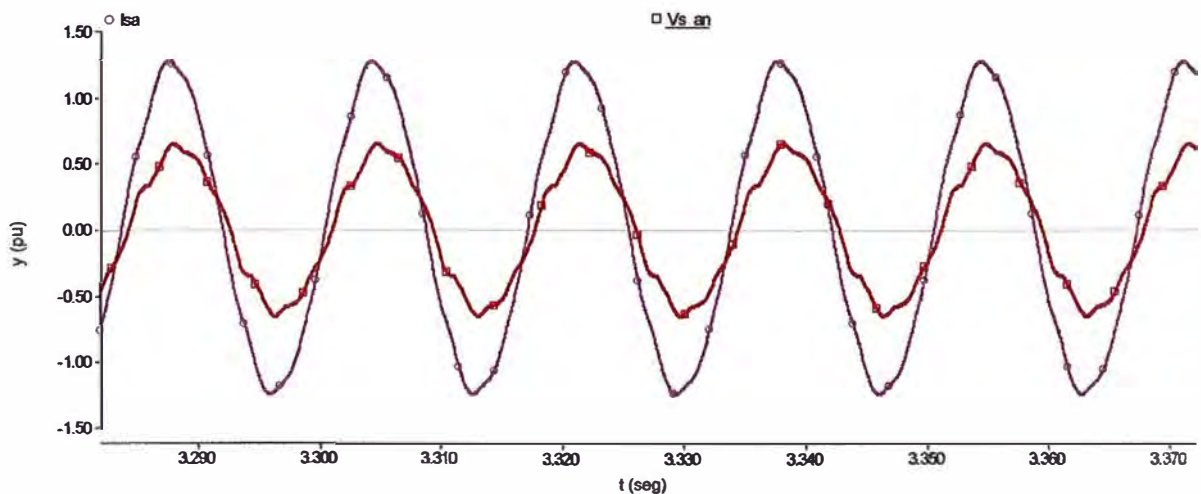


Fig.5 Tensión por fase y corriente de línea del lado del rectificador

- A continuación en la figura 6 se presenta el resultado cuando se produce una caída de tensión 390 kV a 290 kV en la red donde está conectado el rectificador, haciendo que el control de corriente sea realizado por el inversor y el rectificador opere como fuente de tensión con ángulo de ignición constante de 5° grados.

En este caso la referencia de corriente para el regulador de corriente del inversor está determinado por la referencia del rectificador menos el margen de corriente I_M que es de 10% del valor de la referencia que es de 1.0 en p.u. Si la tensión se reduce aun más, entonces el sistema VDCOL establece un valor más reducido para la referencia.

De esta forma se mantiene la operación del sistema sin que el enlace en corriente continua tenga que salir de operación.

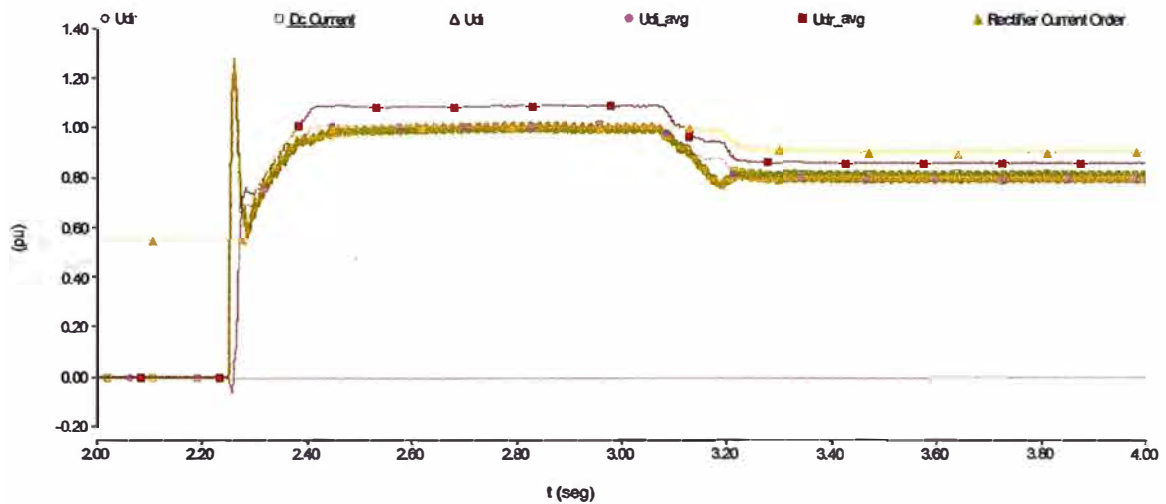


Fig.6 Tensiones y corrientes DC del Sistema HVDC con reducción de tensión de la red donde está conectado el rectificador

- La figura 7 muestra los ángulos del rectificador e inversor, verificándose que en el caso del rectificador el ángulo de ignición o alfa se hace constante e igual a 5° grados en tanto que el ángulo de extinción del inversor o ángulo gama comienza a variar (42.7° grados) para mantener el control de la corriente en 0.8 p.u. o 1.8 kA. Como consecuencia, las tensiones del rectificador e inversor pasan a ser 0.86 p.u. o 430 kV y 0.80 p.u. o 400 kV respectivamente.

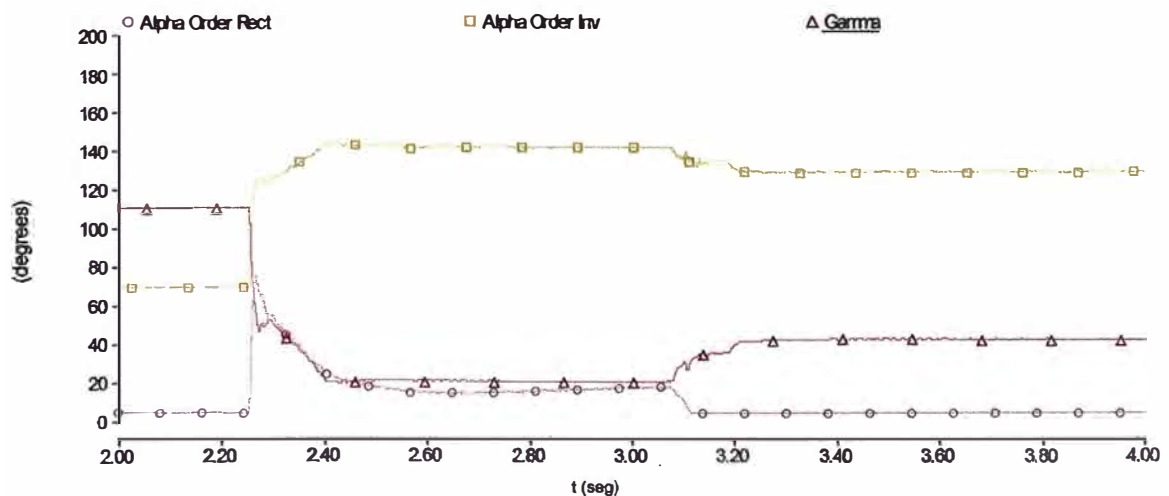


Fig.7 Ángulos de ignición y de extinción durante la contingencia

3.- Modelamiento del Sistema HVDC

En la figura 8 se muestra el Sistema HVDC implementado en el PSCAD. Asimismo los detalles del Sistema de control del inversor y del rectificador se muestran la figura 9 y en la figura 10 respectivamente.

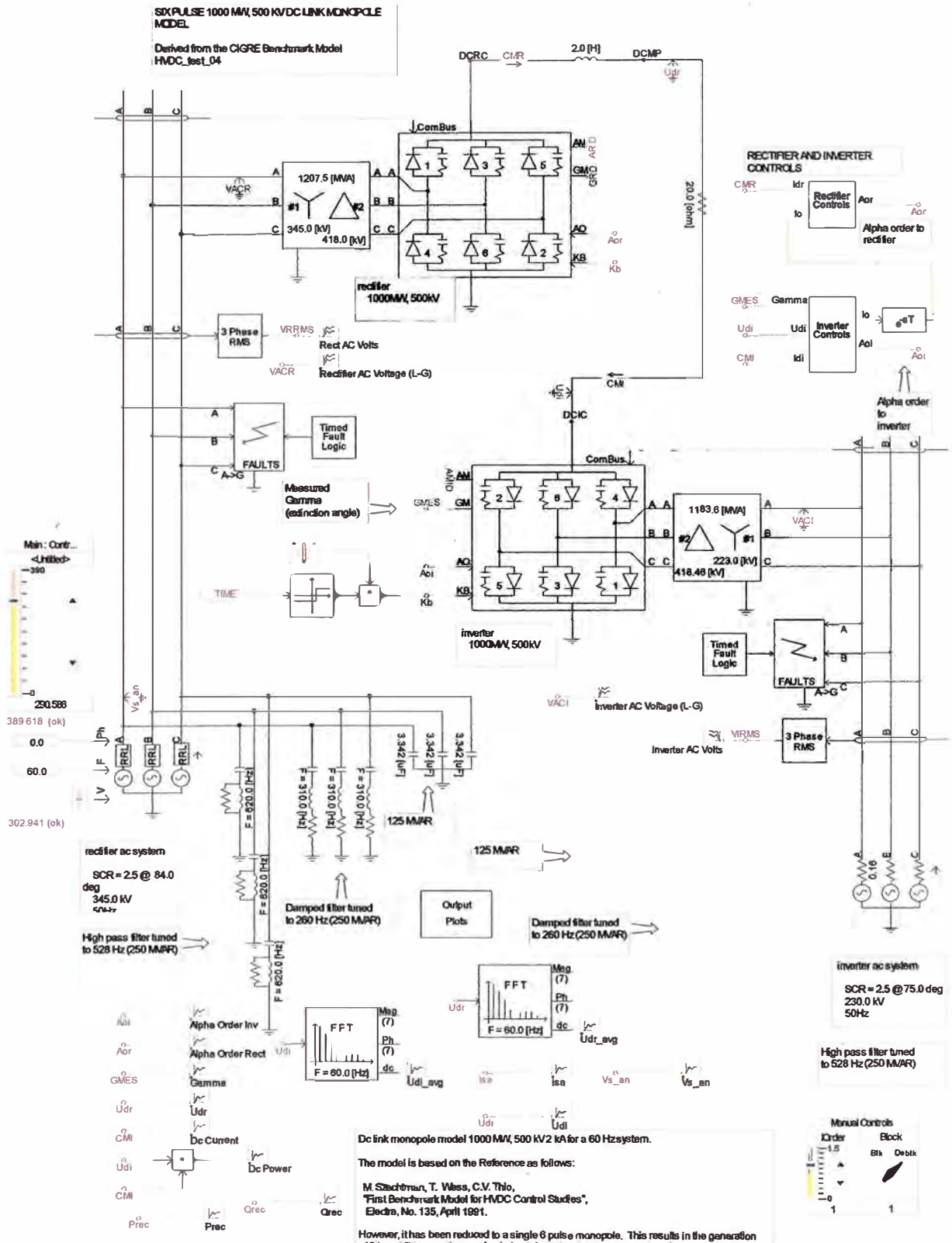


Fig.8 Sistema HVDC

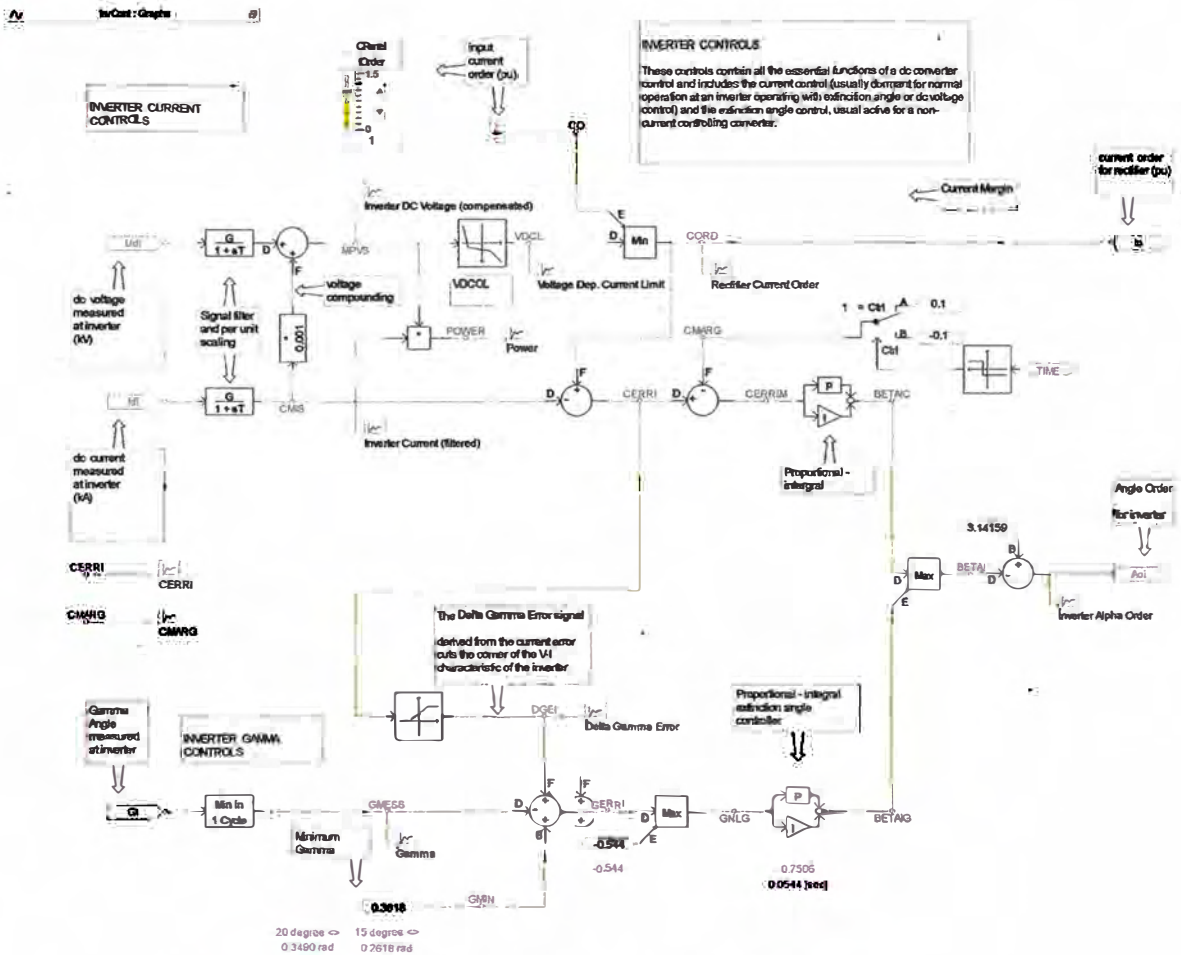


Fig.9 Sistema de control del inversor

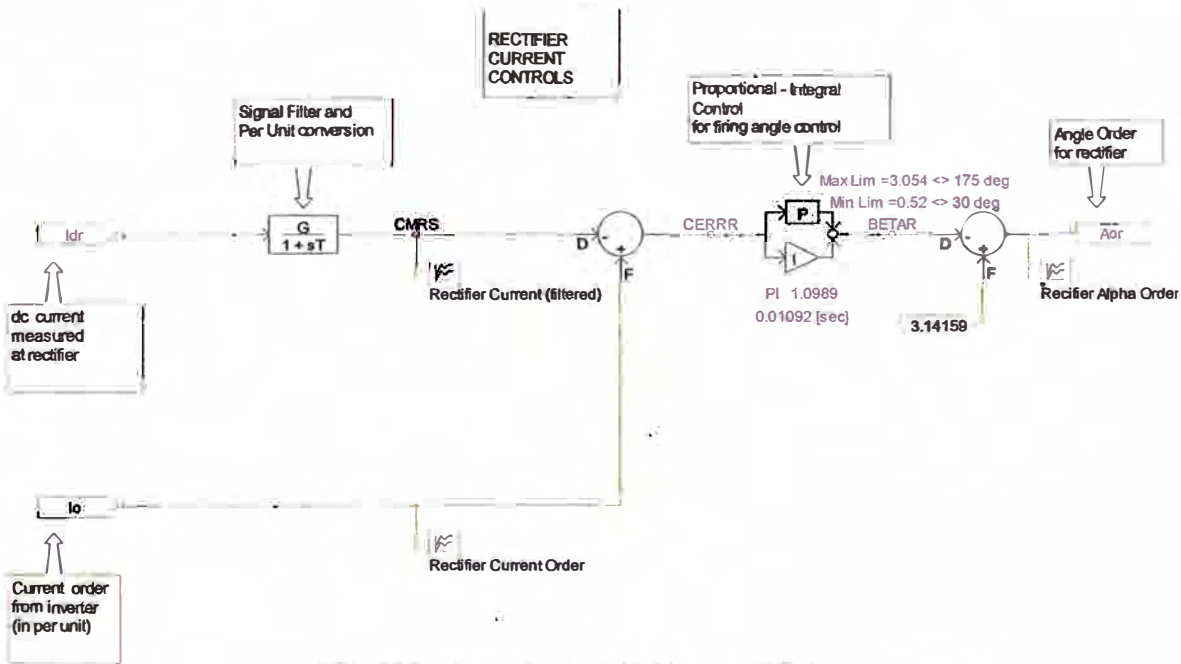


Fig.10 Sistema de control del rectificador

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Kundur "Power System Stability and Control" EPRI. Mc Graw-Hill 1994.
- [2] Curso de Electrónica de Potencia EE80 – Ing. Rodolfo Moreno
- [3] Technology Trends for HVDC Thyristors Valves. Lips, H.P. Siemens.
www.ev.siemens.de
- [4] 50 years of HVDC. ABB Power Technologies AB, Suecia.2004 www.abb.com/hvdc
- [5] HVDC Transmission Michael Bahrman, P.E. IEEE PSCE Atlanta, November 2006.
- [6] HVDC Transmisión de Potencia digna de confianza Seminario Internacional Cigré
2005 Confiabilidad de los Sistemas Eléctricos Santiago Noviembre, 2005.
www.abb.com/hvdc
- [7] PSCAD/EMTDC V.4.2.1 de Manitoba, Canadá, 2004.