

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

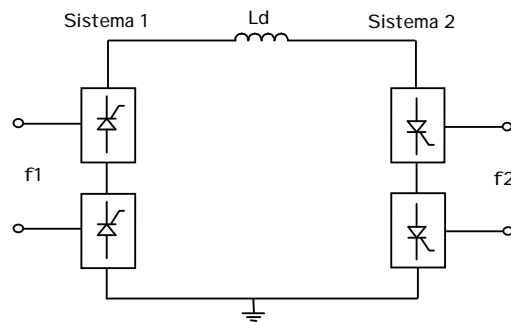
#### 5.1 - Generalidades

##### 5.1.1. - Configuraciones de sistemas HVDC

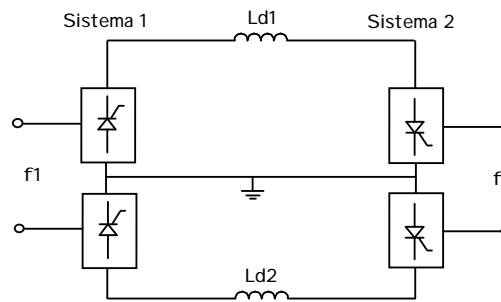
Por cuestiones económicas los sistemas a ser utilizados generalmente son los sistemas de 12 pulsos.

##### 5.1.1.1.- Sistemas punto a punto

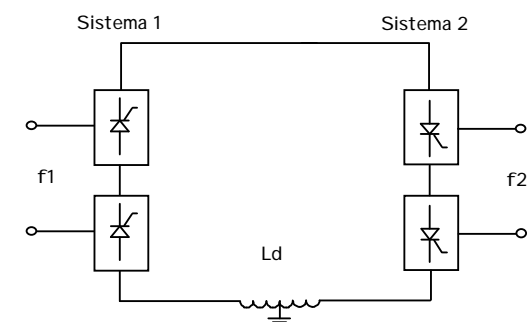
En este arreglo o configuración la conexión de los dos sistemas se realiza al interior de una subestación y por tanto no hay una línea de transmisión. Este arreglo normalmente se utiliza para conectar dos sistemas de distinta frecuencia (también denominados asincrónicos), o en sistemas eólicos de energía alternativas. La figura 5.1 muestra los diferentes esquemas para esta configuración.



(a) Con un reactor de alisamiento



(b) Con dos reactores de alisamiento

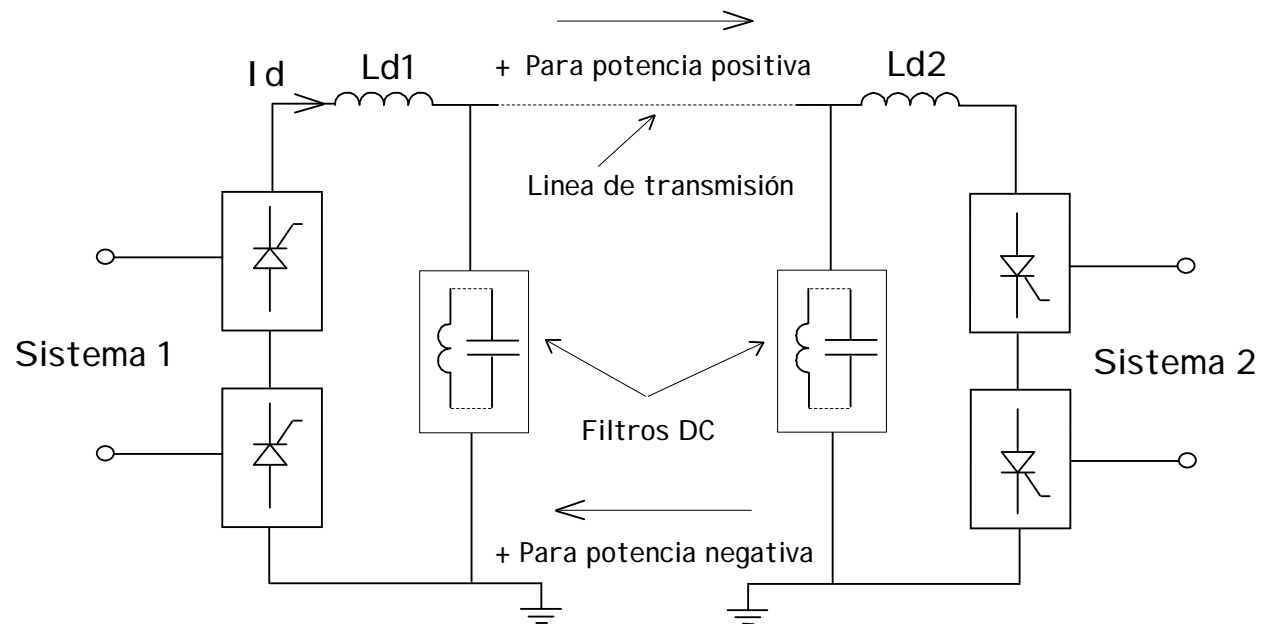


(c) Con un reactor de alisamiento con punto centro aterrizado

**Fig. 5.1**

### 5.1.1.2.- Configuración monopolar con retorno por tierra

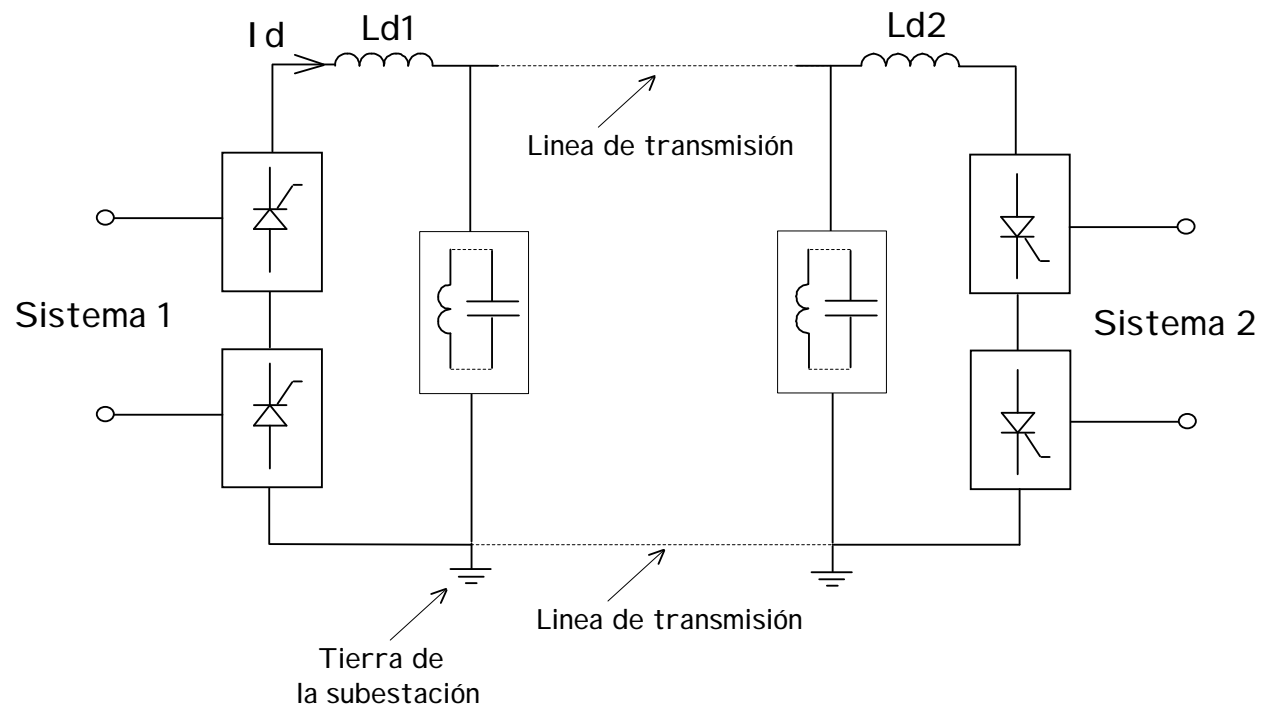
Este arreglo utiliza únicamente un conductor para transmitir la energía eléctrica, el retorno se realiza mediante electrodos conectados a las estaciones de conversión, que hacen las funciones de ánodo y cátodo. Esta transmisión se utiliza generalmente para grandes distancias, en particular para líneas submarinas, donde el mar puede realizar las funciones de retorno ofreciendo menos pérdidas que un retorno metálico. Se puede observar que es un arreglo económico ya que no necesita un cable de retorno. La figura 5.2 muestra el esquema de esta configuración.



**Fig. 5.2**

### 5.1.1.3.- Configuración monopolar con retorno metálico

Esta configuración será utilizada, cuando es imposible realizar el retorno mediante electrodos conectados a tierra, esto se puede deber a cuestiones medioambientales o cuando las pérdidas son demasiado importantes. En este sistema obligatoriamente dos reactores DC son necesarios en ambos extremos de los conductores de alta, ver figura 5.3.



**Fig. 5.3**

#### **5.1.1.4.- Sistema HVDC bipolar**

Este es el arreglo más comúnmente utilizado y se refiere cuando se conectan dos estaciones HVDC por subestación, en una línea de transmisión DC. Se utiliza cuando se supera la capacidad de una configuración monopolar.

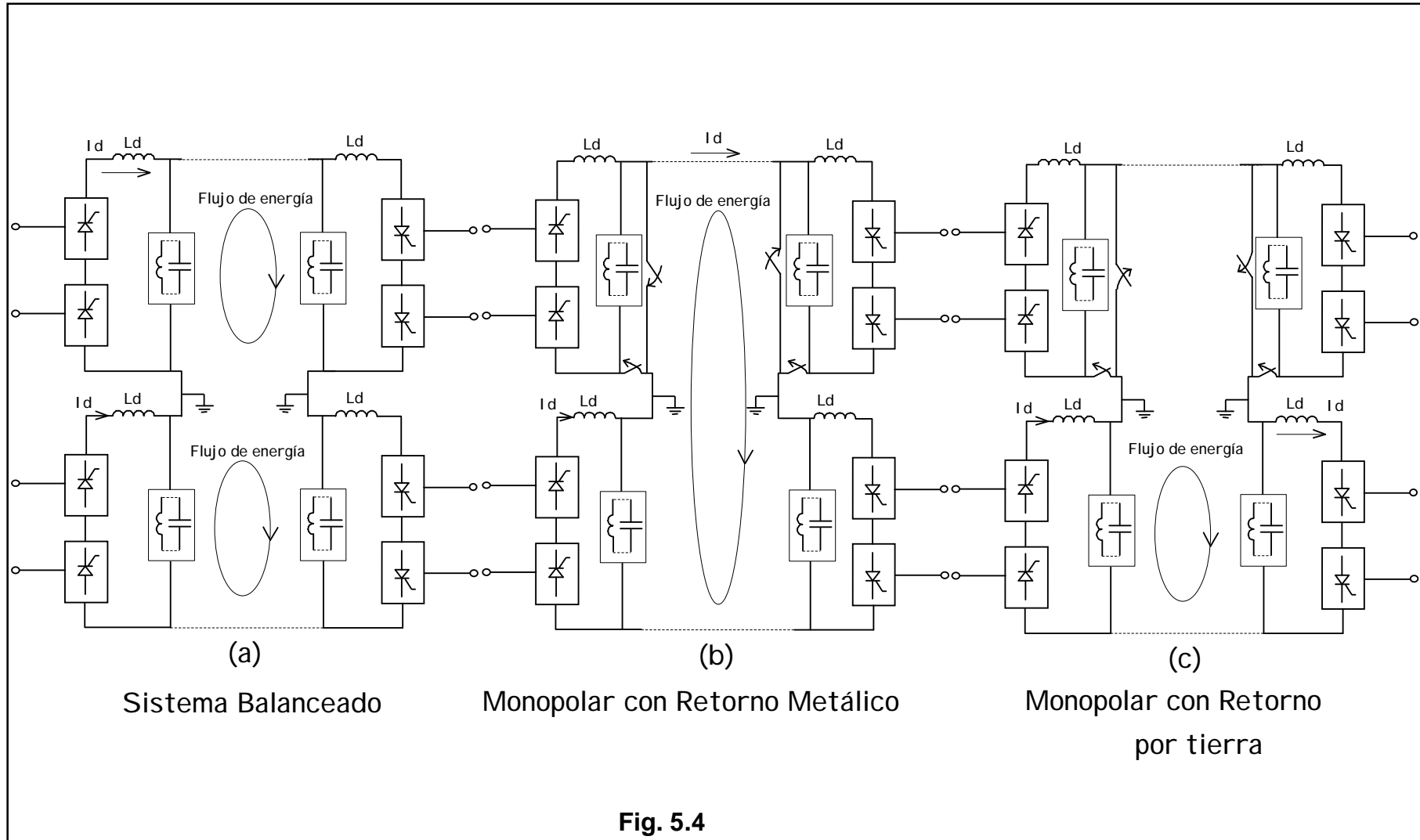
Además, proporciona una mayor confiabilidad al sistema ya que puede utilizarse como monopolar (ya sea por retorno metálico o por tierra) cuando uno de los polos queda fuera de servicio. Los enlaces bipolares pueden estar conectados a tierra mediante electrodos o conectados entre ellos mediante un cable de retorno.

La figura 5.4 muestra las tres configuraciones posibles, en 5.4a como sistema balanceado, en 5.4b como monopolar con retorno metálico y en 5.4c como monopolar con retorno por tierra.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.1 - Generalidades



**Fig. 5.4**

#### 5.1.1.5.- Configuración multiterminal

Este arreglo se obtiene cuando se conectan tres o más subestaciones conversoras geográficamente separadas a una línea de transmisión HVDC. La conexión puede ser:

**Paralela:** Donde todas las subestaciones están conectadas a una misma tensión. Se utiliza en general cuando las subestaciones superan el 10% de la potencia total de las estaciones rectificadoras.

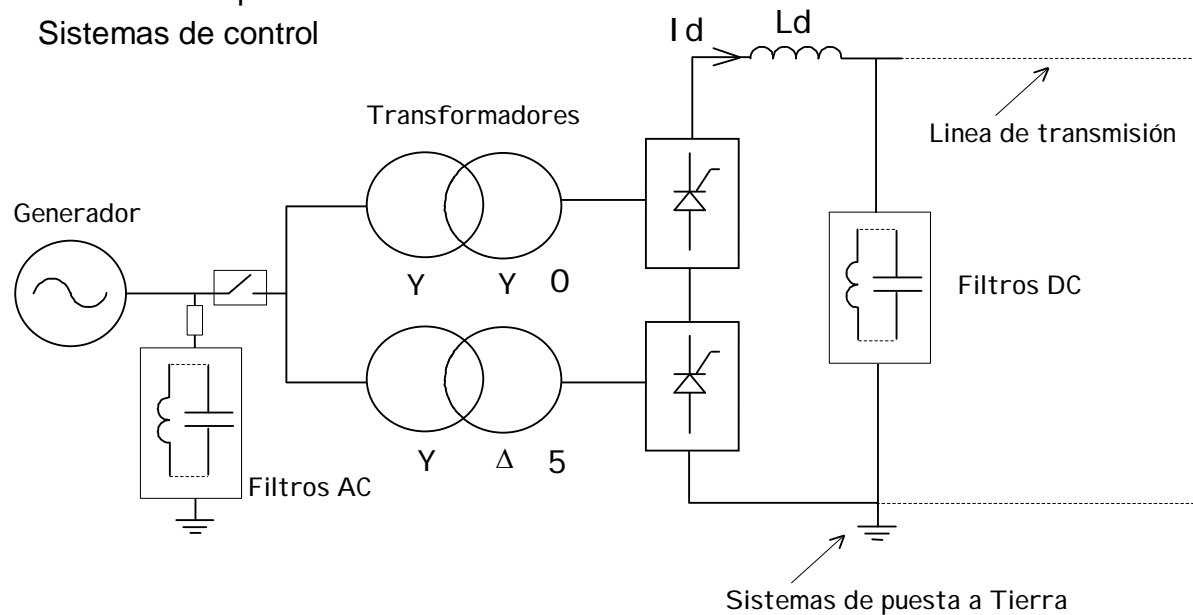
**Serie:** Debido a que las subestaciones son conectadas en serie cada una recibe una tensión diferente. Una subestación conectada en serie no puede absorber más del 10% de la potencia total, esto debido a que aquellas que procesen más del 10% producirán grandes diferencias de tensiones con aquellas que consumen menos del 10%.

**Mixta o híbrida:** Es una combinación de los dos sistemas anteriores.

### 5.1.2.- Componentes de un Sistema de transmisión HVDC

Los principales elementos constituyentes para realizar este doble proceso son:

- Convertidores AC/DC
- Transformador o transformadores de conversión
- Línea de transporte (incluyendo la inductancia de alisamiento  $L_d$ )
- Filtros DC y AC
- Y Sistema de puesta a tierra
- Sistemas de control



**Fig. 5.5**

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.1 - Generalidades

a) Transformador de potencia

El objetivo principal es transformar la tensión alterna del sistema AC a un nivel de tensión adecuado para los convertidores AC/DC. Por otro lado, también se utilizan normalmente con conexiones Yy y Yd para obtener desfases de  $30^\circ$  ó  $150^\circ$  grados de modo de que las corrientes en el sistema AC tiendan a ser sinusoidales.

Son transformadores con un aspecto diferente a los utilizados normalmente en corriente alterna debido a la altura de sus contactos, necesarios para alcanzar las torres de las válvulas.

b) Filtros AC y DC

- *Filtros AC*

Los filtros AC poseen normalmente una doble función ya que por un lado se encargan de atenuar los armónicos generados por los convertidores y por otro proporcionan una parte de la potencia reactiva necesaria en el proceso de conversión. Los filtros para rectificadores de 12 pulsos se diseñan principalmente para filtrar armónicas de funcionamiento, es decir las  $12k+1$  y las  $12k-1$ , aunque se pueden producir armónicas no características, como las pares o las de 3<sup>er</sup> orden, que también se deben filtrar.

- *Filtros DC*

Estos filtros se encargan de reducir la ondulación de la señal continua. Básicamente, son filtros pasa bajos diseñados para filtrar armónicas de varias ordenes de frecuencia mayores que la continua. La configuración de los filtros DC son muy semejantes a los filtros AC, sin embargo respecto de su funcionalidad son totalmente diferentes.



## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.1 - Generalidades

##### c) Reactor de alisamiento

Las principales funciones de este dispositivo son:

- Prevención de corrientes discontinuas, ya que si se produce este tipo de corriente puede provocar sobretensión en los transformadores y valvulas.
- Limitación de corriente de falla DC.
- Prevención de resonancias en el enlace de continua.
- Reducir armónicas de corriente en alta frecuencia para limitar la interferencia telefónica.

##### d) Sistemas de puesta a tierra

Esto es especialmente importante en el caso de sistemas monopolares. Debido a que realiza las funciones de retorno de la corriente DC. En sistemas bipolares tiene funciones similares al neutro de un sistema trifásico; en el caso equilibrado no tiene ninguna función, pero en el caso normal no balanceado lleva a tierra la diferencia entre ambos polos.

Las puestas a tierra suelen conectarse a cierta distancia de las estaciones de conversión (entre 10 y 50 Km) para evitar interferencias con los equipos instalados en la estación. En función de las necesidades, pueden instalarse horizontal ó verticalmente, en tierra, a baja o a gran profundidad, pueden ser anódicos o catódicos, haciendo la función de electrodo en conexiones submarinas.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.1 - Generalidades

##### e) Sistema de control

Algunos de los requerimientos más importantes que debe tener el **sistema de control** en una transmisión HVDC son:

- Suficiente rango de estabilidad y velocidad de respuesta en el control principalmente cuando el enlace se conecta a sistemas débiles (con variaciones de tensión).
- Operación aceptable del rectificador y del inversor a variaciones de la frecuencia. Grandes variaciones de la frecuencia se pueden dar cuando la transmisión HVDC es la única carga en un sistema de potencia, sobre todo cuando hay grandes inyecciones de potencia activa.
- Baja cantidad generada de armónicos no característicos en las estaciones convertidoras.
- Un correcto funcionamiento en la operación de la estación inversora, con el fin de tener la menor tasa de fallas de conmutación posibles para distintas condiciones de voltaje.
- El menor consumo posible de potencia reactiva, es decir, operando con el menor ángulo de disparo posible y con el menor riesgo de falla a la conmutación.
- Suave paso de transición desde control por corriente a control de tensión DC.

### 5.2.1.- Principio de funcionamiento régimen permanente de un sistema de transmisión HVDC

Considerando el enlace HVDC mostrados por las figuras 5.6 y 5.7. Estos representan el modelo estático de un enlace monopolar o un polo de un enlace bipolar.

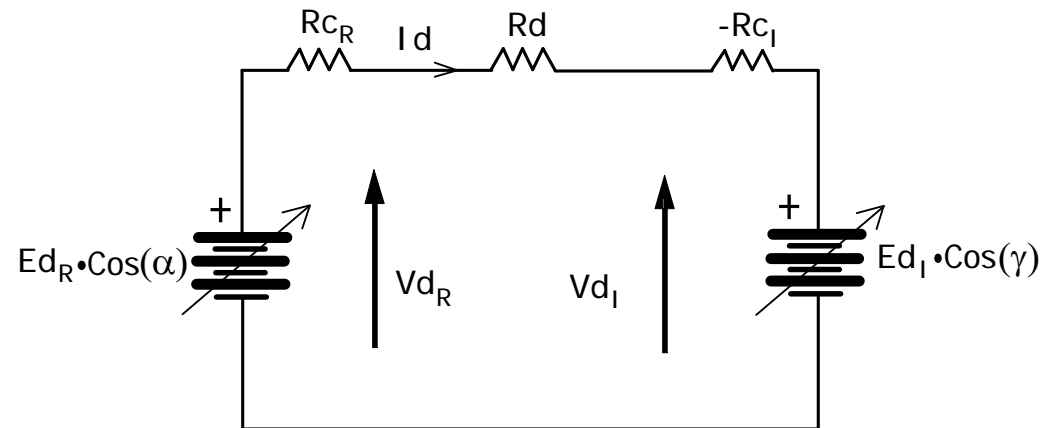


Fig. 5.6

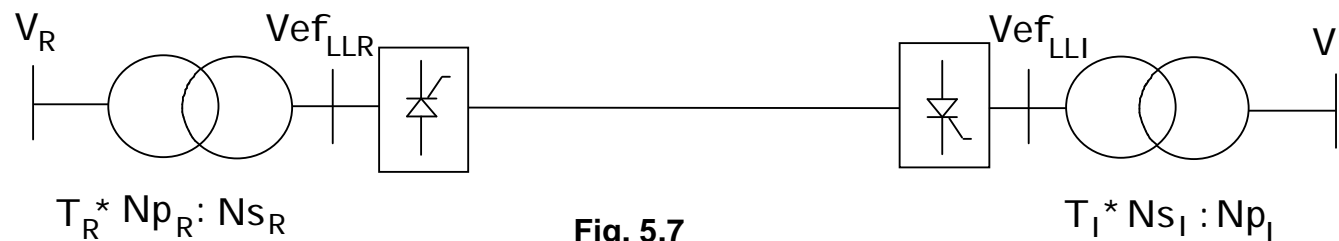


Fig. 5.7

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.2 – Operación de un sistema HVDC

En el circuito equivalente de la Fig. 5.6, se asume que todos los grupos de válvulas de las estaciones convertidoras son idénticos y presentan los mismos ángulos de disparo. Además, el número de grupos de válvulas conectadas en serie ( $\eta_b$ ) en las dos estaciones siempre son iguales.

Los voltajes de las fuentes  $V_{dR}$  y  $V_{dI}$  mostrados en la Fig. 5.6 se definen como:

$$V_{dR} = \left( \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \right) \cdot \eta_b \cdot V_{efLLR} \cdot \cos \alpha - R_{CR} \cdot I_d \quad (5.1)$$

$$V_{dI} = \left( \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \right) \cdot \eta_b \cdot V_{efLLI} \cdot \cos \gamma + R_{CI} \cdot I_d \quad (5.2)$$

Donde  $V_{efLLR}$  y  $V_{efLLI}$  son los voltajes eficaces de línea en las válvulas, en los lados secundarios

de los transformadores, del rectificador e inversor respectivamente y  $\frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 1.35$ . Estos voltajes son calculados de la siguiente forma:

Además se definen:

$$V_{efLLR} = \frac{N_{SR} \cdot V_R}{N_{PR} \cdot T_R} \quad (5.3)$$

$$E_{dR} = 1.35 \cdot \eta_b \cdot V_{efLLR} \quad (5.5)$$

y

$$V_{efLLI} = \frac{N_{SI} \cdot V_I}{N_{PI} \cdot T_I} \quad (5.4)$$

$$E_{dI} = 1.35 \cdot \eta_b \cdot V_{efLLI} \quad (5.6)$$

$$\gamma, \quad \gamma = \pi - (\alpha + \mu)$$

Capítulo 5  
Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

5.2 – Operación de un sistema HVDC

Donde  $V_R$  y  $V_I$  son los voltajes eficaces de línea AC del lado de alta tensión de ambas estaciones convertidoras.  $T_R$  y  $T_I$  es la posición nominal de los tap's en el rectificador o inversor respectivamente.

Mientras que  $N_P$  y  $N_S$  corresponde a la razón de transformación primario y secundario de los transformadores de potencia.

La corriente transmitida varía según la siguiente ecuación:

$$I_d = \frac{E_{dR} \cdot \cos \alpha - E_{dI} \cdot \cos \gamma}{R_{CR} + R_d - R_{CI}} \quad (5.7)$$

Donde:

$$R_{CI} = \left( \frac{3 \cdot \eta_b}{\pi} \right) \cdot X_{CI} \quad \text{y} \quad R_{CR} = \left( \frac{3 \cdot \eta_b}{\pi} \right) \cdot X_{CR} \quad (5.8)$$

$X_{CR}$  y  $X_{CI}$  corresponden a las reactancias de conmutación ( $\omega L_c$ ) del transformador de conversión en el rectificador o inversor respectivamente.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.2 – Operación de un sistema HVDC

Luego la potencia en el extremo receptor es dada por:

$$P = \frac{E_{dl} \cdot \cos \gamma \cdot (E_{dR} \cdot \cos \alpha - E_{dl} \cdot \cos \gamma)}{R_{CR} + R_d - R_{CI}} \quad (5.9)$$

Como el denominador en la ecuación anterior es pequeño, leves cambios en las magnitudes de tensión puede provocar como resultado grandes cambios en la potencia transmitida. Por lo tanto, normalmente se debe utilizar un control rápido y directo de la corriente, realizándose por medio del control de los ángulos de disparo de las válvulas en las estaciones convertidoras.

Hay dos controles fundamentales con diferente filosofía para controlar los convertidores, estos son:

- **Control con fase individual;** donde los ángulos para cada conmutación de cada dispositivo son controlados individualmente, esto hace que para variaciones transitorias el angulo de una válvula sea diferente de la subsiguiente lo cual genera armónicas pares o múltiplo de 3, denominadas no características.

Y el;

- **Control con disparos equidistantes;** donde se da igual espaciamiento entre todos los instantes de disparo, de cada dispositivo, consecutivos. Aunque este ultimo método es lento, ya que debe esperar el disparo de todas las válvulas, se prefiere este último debido a que tiene una menor generación de armónicos no característicos.

### 5.2.2 - Característica estática

Las responsabilidades de la regulación de tensión y de corriente simultaneas no se asignan a un mismo convertidor. Bajo condiciones de operación normal, el que realiza la función de rectificador le corresponde controlar la corriente (CC), se realiza variando el ángulo de disparo, y el que realiza la de inversor tiene la tarea de mantener la tensión, lo cual se realiza manteniendo el ángulo de extinción en un valor constante (CEA). El cual a su vez su valor dependerá del consumo de potencia reactiva y de la posibilidad que se produzcan fallas de conmutación en la estación inversora.

Ante una posible disminución del voltaje AC en el rectificador o se aumente en demasía ' $\alpha$ ', el inversor entra a controlar la tensión controlando su ángulo de ignición o disparo (CIA), con esto se hace necesario cambiar el modo de control del inversor pasando este ahora al control de corriente. Esto es realizado de forma tal de evitar que todo el enlace CC sufra inestabilidades cuando el rectificador llegue a su valor de ángulo mínimo ( $\alpha_{min}$ ) y no consiga controlar la corriente.

Para evitar el traslape de los dos controladores de corriente, la corriente de referencia para la estación inversora se debe dejar bajo el valor de la corriente de referencia del rectificador por un valor denominado corriente de margen ( $\Delta I_d$ ), ver Fig. 5.8. este valor es típicamente de un 10% de la corriente de referencia del rectificador.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.2 – Operación de un sistema HVDC

Si en el rectificador la corriente actual del sistema es menor que la corriente de referencia, el control de disparo aumenta el voltaje directo ( $V_D$ ) disminuyendo el ángulo de retardo, de esta forma aumenta la corriente  $I_D$ .  $V_D$  aumentara hasta que; la corriente actual se iguale a la de referencia o a la máxima tensión que se puede tener, esto ocurre cuando se dispara en el ángulo mínimo,  $\alpha_{\min}$ .

Por otro lado, si la corriente de referencia es menor que la corriente actual,  $V_D$  es correspondientemente disminuido. Normalmente, el voltaje máximo limite en el inversor es menor que el del rectificador. Esto es, el inversor mantiene la tensión y el rectificador ajusta su voltaje hasta que la corriente sea igual a la de su referencia, así un punto estable  $P_1$  es establecido.

Esta acción es limitada cuando la operación del convertidor ha sido cambiada desde rectificación a inversión y el disparo es dado para el menor ángulo de conmutación permitido, para asegurar la recuperación de la válvula. Si el limite del voltaje del inversor, en valor absoluto, es mayor que el del rectificador, el inversor pasa a controlar la corriente y el rectificador mantiene un voltaje máximo, por lo cual un punto  $P_2$  estable de trabajo es alcanzado.

Como pudo ser notado, el rectificador usualmente controla la corriente y el voltaje DC es determinado por el inversor.

La corriente de referencia del inversor será igual a la del rectificador menos la corriente de margen. Con esto el inversor es forzado a disparar en el menor ángulo permitido, manteniendo constante el margen de conmutación,  $\gamma_{\min}$ , de modo de establecer el voltaje en la línea DC.

Para transmisión en larga distancia el voltaje directo  $V_D$ , es usualmente mantenido constante dentro de limites cerrados por un apropiado control del inversor y de los intercambiadores tap's del transformador.



Capítulo 5  
Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

5.2 – Operación de un sistema HVDC

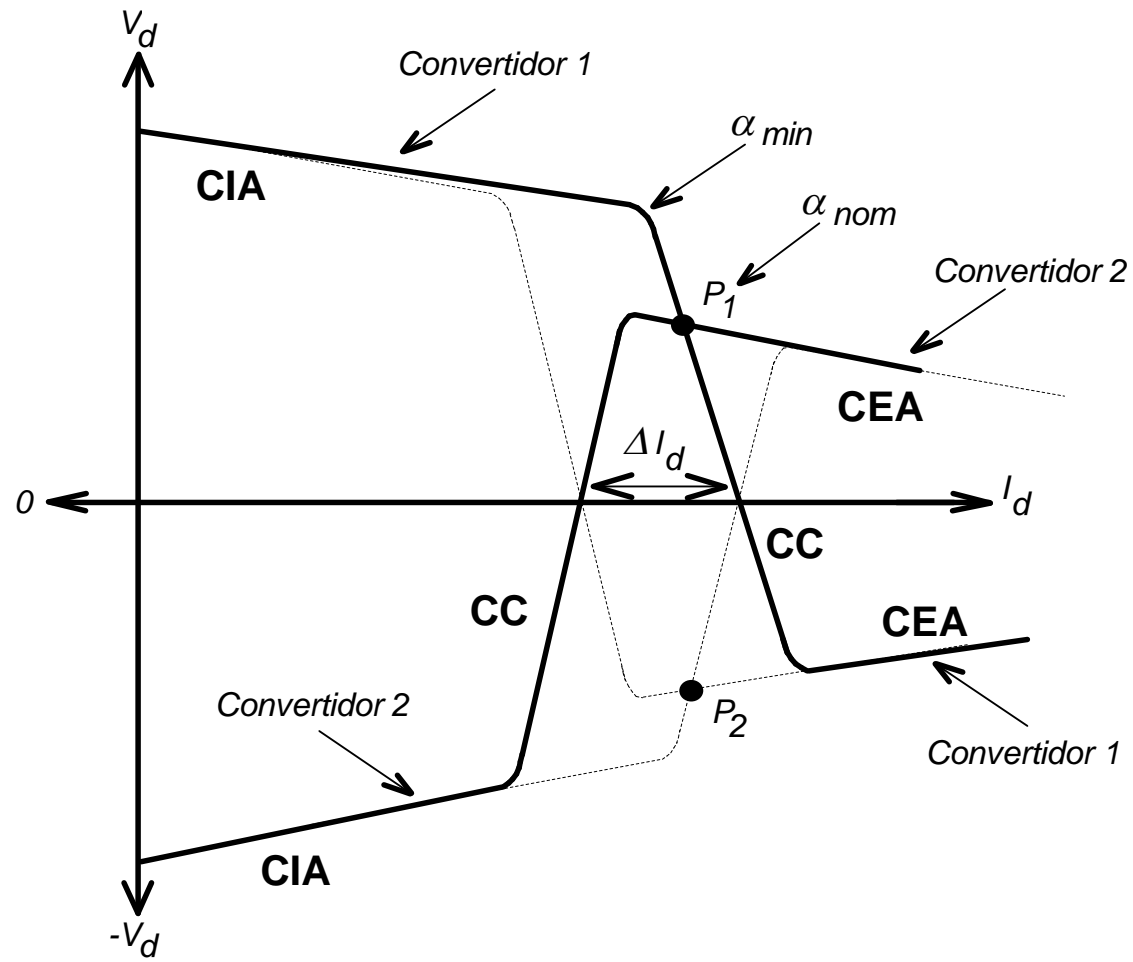


Fig. 5.8

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.2 – Operación de un sistema HVDC

La Fig. 5.8 muestra la característica estática completa de una línea de transmisión HVDC, donde para el primer cuadrante se transfiere energía del convertidor 1 al 2 con  $p_1$ , siendo el punto de operación del sistema. En este punto de operación el rectificador mantiene la corriente constante variando el ángulo de disparo,  $\alpha$ .

Sin embargo,  $\alpha$  no puede ser menor que un valor mínimo ( $\alpha_{\min}$ ) el cual normalmente es de 5 grados. Una vez que este ángulo es alcanzado no es posible seguir aumentando la tensión, por tanto el rectificador mantendrá este ángulo, trabajando ahora con ángulo de ignición constante (CIA).

En el caso del inversor; también este tiene un ángulo de extinción mínimo,  $\gamma_{\min}$ , de modo de evitar las posibles fallas de conmutación.

En condiciones normales de funcionamiento, el rectificador opera normalmente con valores de ' $\alpha$ ' que varían entre 15 y 20 grados, de modo de dejar un margen de aumento de tensión y poder controlar el flujo de potencia. Para el caso del ángulo de extinción del convertidor que trabaja como inversor, el valor del ' $\gamma$ ' mínimo utilizado es de 15° para sistemas de 50Hz y 18° para 60Hz.

Los límites máximos y mínimo de corriente son; para límite máximo se tiene 1.2 a 1.3 veces la corriente nominal a plena carga para evitar daños térmicos y para límite mínimo siempre se fija un valor mayor que el valor de ondulación de corriente DC, de modo de no caer en conducción discontinua.

### 5.2.3 - Jerarquía de los controles

Los varios circuitos de control que componen una subestación HVDC son generalmente estructurados de manera jerárquica. Estos sistemas normalmente operan automáticamente. Para los sistemas HVDC se necesita de un enlace de telecomunicaciones para realizar la coordinación entre el rectificador y el inversor. Los varios niveles en la jerarquía de control son descritos a continuación, comenzando por los niveles más bajos (ver Fig. 5.9).

#### a) Unidad de control de convertidores (UCC)

La UCC es esencialmente un control en lazo abierto, su salida son los pulsos de disparo a las válvulas individuales en la unidad de convertidores de 12 pulsos. Estos son sincronizados al sistema de voltaje AC. La entrada es el ángulo de retardo,  $\alpha$ , ó el ángulo de extinción,  $\gamma$ , suministrado por los niveles más altos de jerarquía.

Los requerimientos funcionales de la UCC son:

- i) Operación con el más bajo, posible, de consumo de potencia reactiva.
- ii) Operación con valores aceptables (esto es entre 2-3) de la relación entre la capacidad de cortocircuito de la red AC y la potencia DC transmitida definida como:

$$SCR = \frac{MVA_{3\phi corto}}{MW_{DC}}$$

Donde SCR es del inglés *Short-Circuit Ratio*, y los valores dados a continuación son establecidos por la IEEE;

SCR Alto (sistema AC Fuerte): **SCR > 3**;

SCR Bajo: **2 < SCR < 3**

SCR Muy Bajo (sistema AC Débil): **SCR < 2**

Capítulo 5  
Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

5.2 – Operación de un sistema HVDC

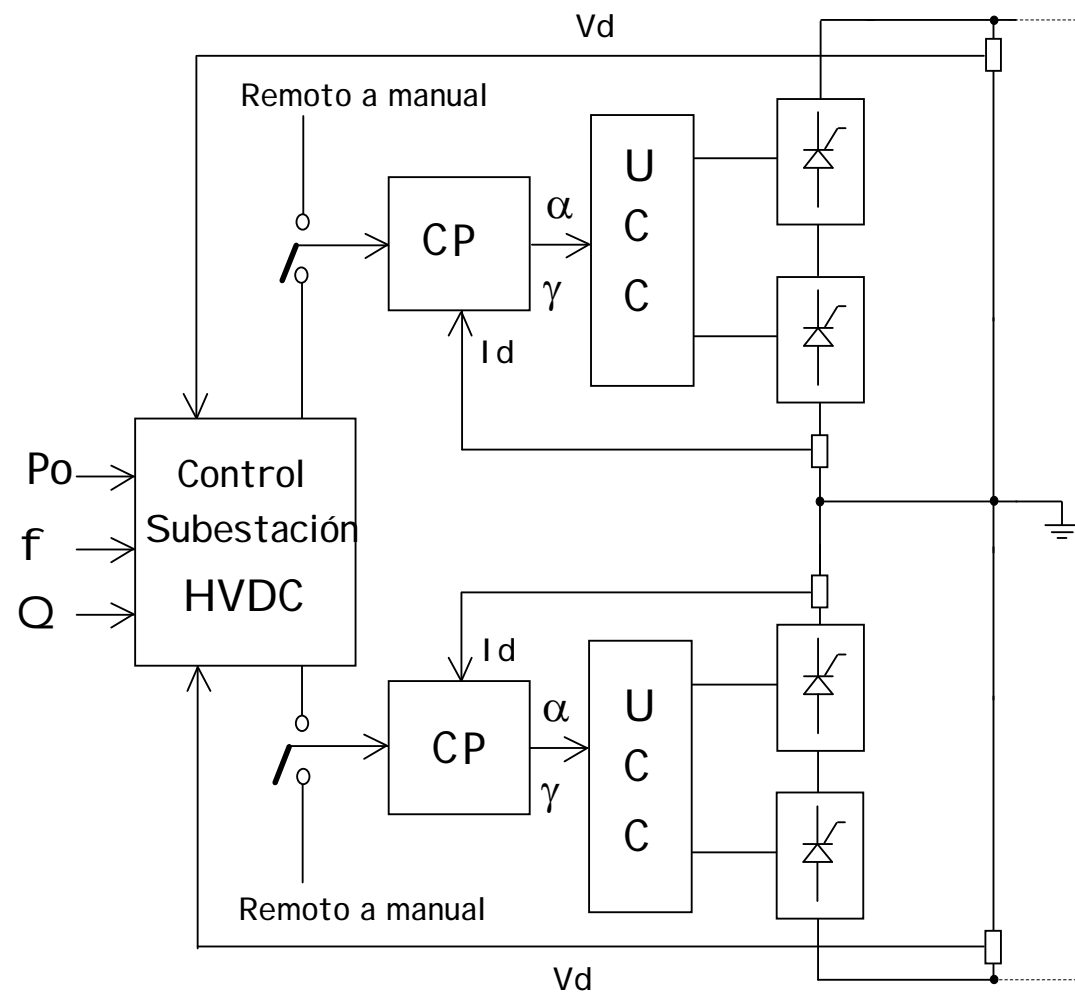


Fig. 5.9

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.2 – Operación de un sistema HVDC

iii) Que la desviación permitida en los disparos equidistantes sea normalmente indicada como un  $\pm\Delta^\circ$  esto es, cada disparo durante una condición específica se producirá  $30^\circ \pm\Delta^\circ$ , después del disparo anterior (para una unidad convertidora de 12 pulsos). Se debe notar que  $\Delta^\circ$  puede variar para los diferentes modos de operación (ya sea CIA, CC etc..). Una desviación desde el disparo equidistante lleva a la generación de armónicas no características. Por tanto el valor máximo permitido de  $\Delta^\circ$  es de  $0,2^\circ$ , asumiendo que el sistema AC y las impedancias son balanceadas.

iv) La desviación entre el orden de la corriente de referencia y la corriente actual del sistema depende de la tolerancia de la corriente actual del sistema y del sensor de corriente. Típicamente la tolerancia total es menor que 1%.

#### **b) Control del Polo (CP)**

El CP provee el valor de referencia para todas las UCC conectadas en serie por polo. El CP es un control en lazo cerrado e incluye las funciones de control básicas que son requeridas para operación estable del sistema HVDC.

Generalmente cada polo-subestación es provista con un CP (ver fig. 5.9) que controla el voltaje DC de salida determinando el instante de disparo de las válvulas.

#### **c) Control de la subestación HVDC**

El control de la subestación HVDC es un control en lazo cerrado el cual incluye:

- i) Coordinación de corrientes de referencias entre los extremos por medio de un enlace de telecomunicaciones, usualmente uno por polo.
- ii) Control de Potencia
- iii) Coordinación entre los polos de una subestación HVDC (si hay más de un polo).

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.2 – Operación de un sistema HVDC

iv) Estrategias de control más sofisticadas. Algunos ejemplos pueden ser:

- Control de potencia reactiva.

- La subestación HVDC puede ser coordinada con un control externo a la subestación, por ejemplo; al governor de la turbina de una estación generadora.

- Puede ser especificado un control del balance de los polos de la subestación de modo de minimizar la corriente del electrodo a tierra para evitar problemas de corrosión en las estructuras metálicas bajo tierra.

#### **d) Control Maestro**

Este es usualmente integrado en el control de la subestación HVDC. Sin embargo, si más de una subestación HVDC es conectada a la misma barra AC, el control maestro es un control con nivel por encima de la subestación y, en general, incluye estrategias de control más sofisticadas, incluye funciones de control de frecuencia , modulación de potencia etc.

Es la interfase con el sistema AC y la coordinación con las diferentes subestaciones.

El control maestro recibe a distancia, por ejemplo, desde un centro de despacho o un centro de control de sistemas de potencia (PSCC) la potencia de referencia a transportar. Para este caso, se debe considerar de un sistema de telecomunicaciones desde el PSCC a la subestación HVDC. Además de supervisar la comunicación del orden de potencia/corriente entre las subestaciones de conversión.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.3 – Comparación entre un sistema de transmisión HVDC y una HVAC

En la siguiente sección se realiza una comparación entre los sistemas de transmisión AC y DC tomándose en cuenta diferentes aspectos tales como; costos de transmisión, consideraciones técnicas, confiabilidad y disponibilidad de cada tecnología de transmisión.

#### **5.3 – Aspectos cualitativos y de confiabilidad**

##### **5.3.1 - Comparación de costos de transmisión**

El costo de cualquiera línea de transmisión AC ó DC generalmente incluye el costo de derecho a vía la cual es la cantidad de terreno que puede ser ocupado durante la instalación de torres, conductores, aisladores, además de los costos de operaciones tales como las pérdidas en las líneas de transmisión.

Sin embargo, para las mismas restricciones operacionales dadas para ambas líneas, DC y AC, las DC tienen la capacidad de transmitir mayor potencia. La línea DC, para una misma potencia, realiza la transmisión con 2 conductores y la línea AC lo hace con 3 conductores. Además la línea DC requiere una menor infraestructura lo cual consecuentemente reduce el costo de la instalación.

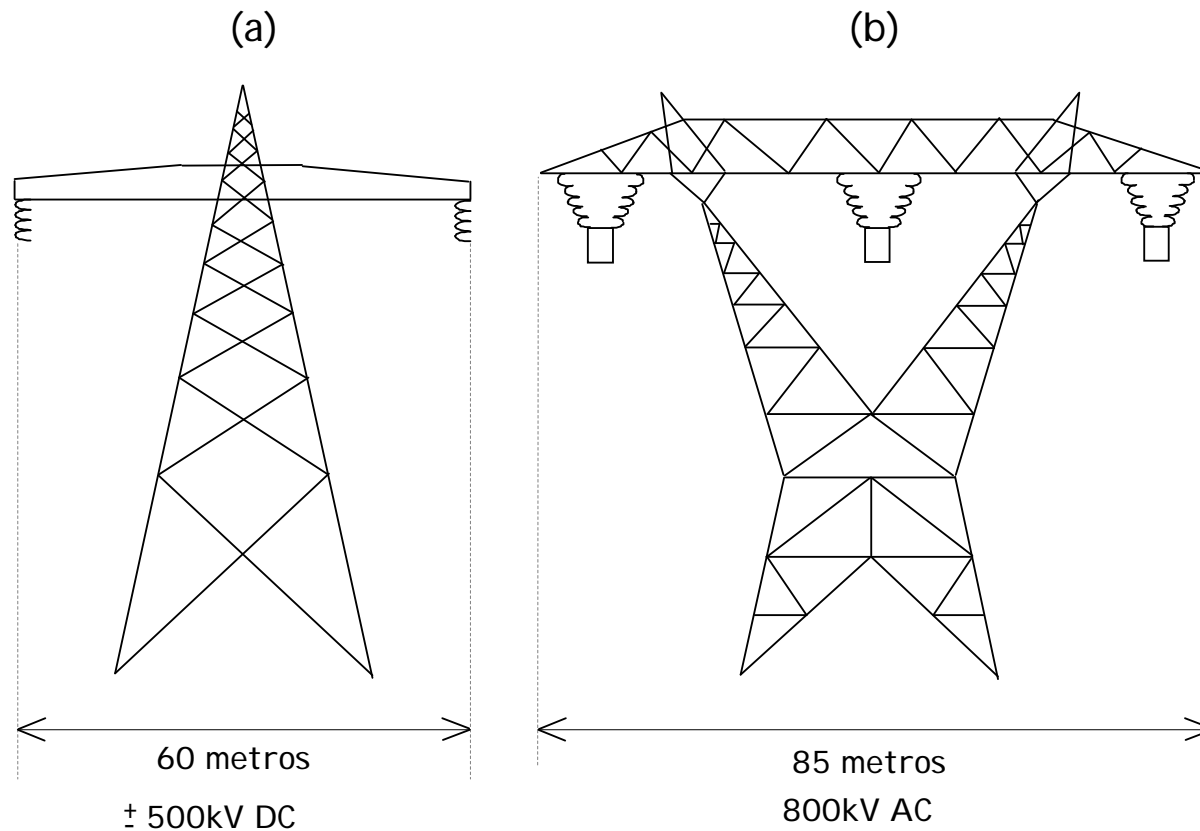
En la figura 5.10 muestra una comparación respecto a tamaño de las torres y de derecho de vía para ambas líneas.

En transmisión DC con 2 conductores, las pérdidas serán reducidas a  $\frac{2}{3}$  del sistema AC comparable. Los efectos Corona y Skin tienden a ser menores en el caso DC, por consecuencia las pérdidas de transmisión son reducidas.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.3 – Comparación entre un sistema de transmisión HVDC y una HVAC



**Fig. 5.10 : Derecho a vía (servidumbre de paso). Típicas estructuras para transmisión (a) DC y (b) AC, para aproximadamente 2000MW.**



## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.3 – Comparación entre un sistema de transmisión HVDC y una HVAC

En la figura 5.11 muestra el costo total de una línea AC y DC con respecto a la distancia.

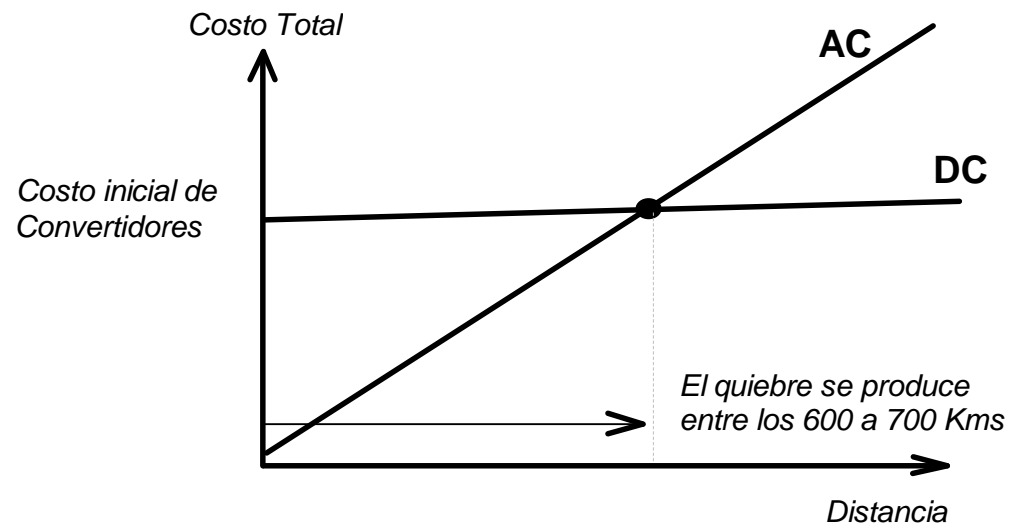


Fig. 5.11

#### 5.3.2 - Comparación técnica

La rápida y plena controlabilidad de los enlaces de transmisión HVDC hacen posible modular la potencia transmitida con rapidez y eficacia, además la línea de transmisión DC no tiene reactancia de línea. Por tanto tiene un impacto directo en:

- a) Los límites de estabilidad; al no tener reactancia de línea evidentemente el sistema DC no tiene límite de estabilidad respecto al ángulo de carga, como si los tiene los sistemas AC.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.3 – Comparación entre un sistema de transmisión HVDC y una HVAC

##### b) El control de voltaje;

En una línea de transmisión AC el control de voltaje es complicado, ya que depende directamente de la carga. Para condiciones de alta carga la tensión tiende a caer necesitándose, en algunos casos, de compensación de reactivos para mantenerla, ó la potencia transferida será limitada. Y Para condiciones de baja carga esta tenderá a elevarse.

Para el caso de transmisión DC solo se producirá la caída de tensión debido a las resistencias parasitas de la línea.

##### c) Compensación de reactivos en los sistemas AC;

En los sistemas de transmisión AC de larga distancia el problema de carga de línea, limitación de estabilidad y variación del nivel de voltaje crecerán. Estos problemas son eliminados por equipos de compensación serie o paralelo. Tal como esta escrito en capítulos anteriores la forma de aumentar la capacidad de transmisión de potencia, así como la mantención de estabilidad de tensión etc..se debe a la utilización de controladores FACTS. Sin embargo esto hace onerosa la transmisión AC.

#### **5.3.3 - Aumento de performance del sistema AC usando HVDC**

La interconexión de dos sistemas AC, usando una línea AC requerirá de controladores de generación automáticos para ambos sistemas a ser coordinados, usando controladores tanto para potencia como frecuencia. Sin embargo, aún así los sistemas AC interconectados con coordinación de control están sujetos a problemas de operación, tales como:

- Grandes oscilaciones que pueden dejar un equipo con mal funcionamiento.
- Problemas de nivel de falla (altos niveles de corto-circuito)
- Disturbios de transmisión desde un sistema a otro.

## Capítulo 5

### Sistemas de transmisión en Corriente Continua - HVDC

#### 5.3 – Comparación entre un sistema de transmisión HVDC y una HVAC

Usando las líneas DC como línea de enlace se eliminarían la mayoría de los problemas mencionados. La línea DC es insensible a la frecuencia y esta podría conectar dos sistemas asíncronos y aislar los disturbios del sistema.

La Fig. 5.12 muestra la interconexión de dos sistemas AC a través de un enlace DC, observándose que el sistema DC actúa como “Corta Fuego” para el caso de una falla, entre un sistema u otro.

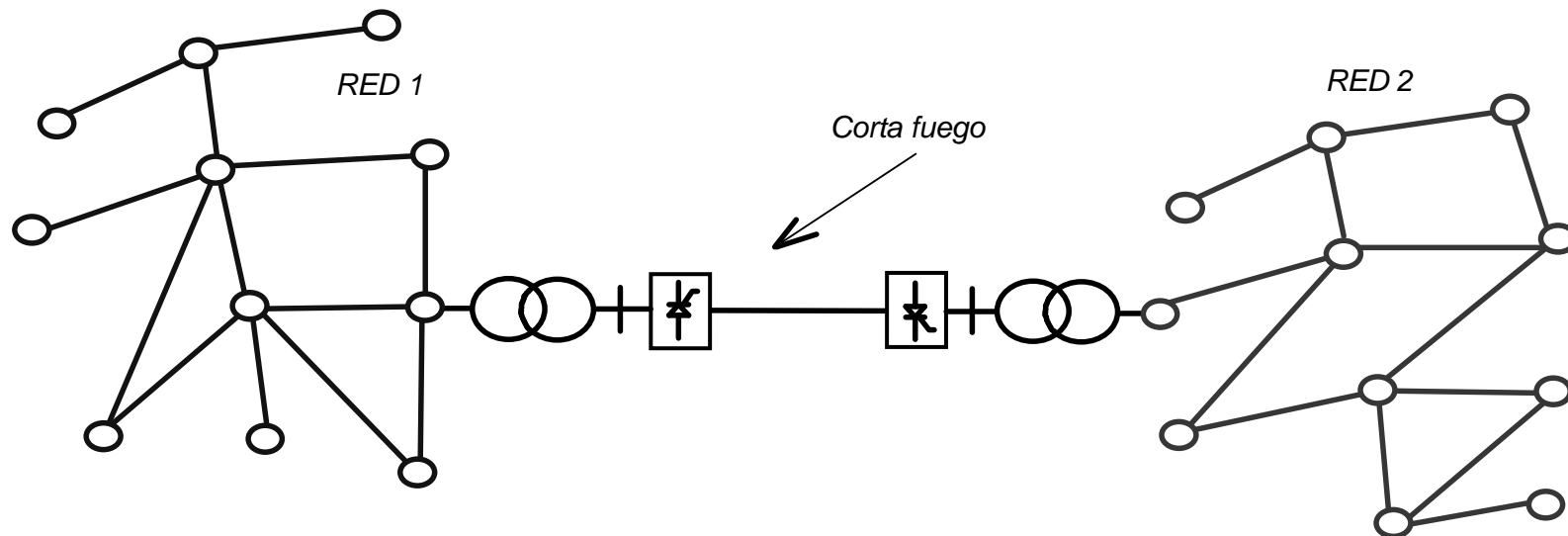


Fig. 5.12

#### **5.4 - Desventajas de la transmisión HVDC**

Algunos factores que aún limitan la aplicación de la transmisión DC, son:

- Costo muy alto de los equipos para conversión de potencia.
- Armónicos resultantes desde la operación de las válvulas en la estación convertidora.
- Requerimientos de potencia reactiva para los convertidores.
- Control complejo.
- Las líneas DC podrían contribuir a un colapso de tensión durante oscilaciones que pueden venir por excesivo consumo de potencia reactiva después de grandes disturbios seguidos. Sin embargo usando técnicas de modulación de potencia activa y reactiva en los controladores HVDC se subsanan estos problemas, esto es posible solo con conmutación forzada, es decir, con transistores como interruptores.

Los avances tecnológicos intentan sobrellevar las desventajas mencionadas. Recientemente alguno de los siguientes avances ya han sido utilizados:

- Aumento de los rangos de tensión-corrientes en las válvulas.
- Convertidores multipulsos ( 24 pulsos o más pulsos).
- Uso de conmutación forzada.
- Y el uso de componentes electrónicos de señal rápidos, tales como; fibra óptica, procesamiento digital de señales, computadores digitales en el control de los convertidores.



## Bibliografía

- 1.- BARBI Ivo, “Eletrônica de potência”, Ed. do autor, ano 2004, UFSC – Brasil.
- 2.- HINGORANI Narain, “Flexible AC transmission”, IEEE Spectrum, April 1993 pp. 40-45.
- 3.- CAÑIZARES Claudio y otros, “Modeling and Implementations of TCR ang VSI based **FACTS** Controllers”, Internal Report, ENEL and Politecnico di milano, october 1999.
- 4.- UZUNOVIC E., Cañizares C., Reeve J., “Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator ”, NAPS, Laramie Wyoming, October 1997, pp 49-54.
- 5.- CAÑIZARES C., Faur Z., “Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse”, IEEE Trans. Power Systems, vol. 14, No1, February 1999, pp. 158-165.
- 6.- MOHAN, Undeland and Robbins, “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, Ed. John Wiley & Sons. 1989.
- 7.- SONG Y. and Johns A., “Flexible AC Transmission Systems (**FACTS**)” Published by The Institution of Electrical Engineers, London UK, 1999.
- 8.- WATANAVE E., Barbosa P., Almeida K., Taranto G.,”Tecnologia **FACTS**- Tutorial”, Revista SBA Controle e Automação vol 9 No1/ Jan. Fev. Mar. e Abril 1998.
- 9.- WATANAVE E., Aredes M.,”Teoria de Potência ativa e reativa instantanea e aplicações - Filtros ativos e **FACTS**”, Tutorial.
- 10.- PEREIRA J. L.R.,”Modelagem de Dispositivos de Controle **FACTS** em Sistemas de Potência para analise em Regime Permanente”, Minicurso, XIII Congresso Brasileiro de Automatica, 11 a 14 de setembro de 2000, Florianopolis SC.



## Bibliografía

- 11.- LENNART Anquist, “Synchronous Voltage Reversal Control of Thyristor Controlled Series Capacitor”, Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm 2002.
- 12.- GYUGYI L. Schauder C. and Sen K.K., “Static series compensators: A solids-state Approach to the series Compensation os transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No1 Jan 1997 pp. 406-407.
- 13.- WATANABE Edson y Mauricio Aredes, “Teoría de Potencia Activa y Reactiva Instantáneas y Aplicaciones- Filtros Activos y FACTS”. Laboratorio de Electrónica de Potencia. UFRJ – Brasil.
- 14.- RAMOS Reynaldo y Héctor Medina S., ”Estudio del compensador Estático de Reactivos – SCV”, Informe interno LEP-PUCV 2004.
- 15.- RAMOS Reynaldo y Héctor Medina S., ”Estudio del compensador Síncrono Estático - STATCOM”, Informe interno LEP- PUCV 2004.
- 16.- MOHAN, Undeland and Robbins, “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, Ed. John Wiley& Sons. 1989.
- 17.- RAMOS Reynaldo, ” Familia de inversores Multinivel Híbridos para aplicaciones en alta tensión y alta potencia”, Tesis de magister LEP- PUCV 2007.



## Bibliografía

