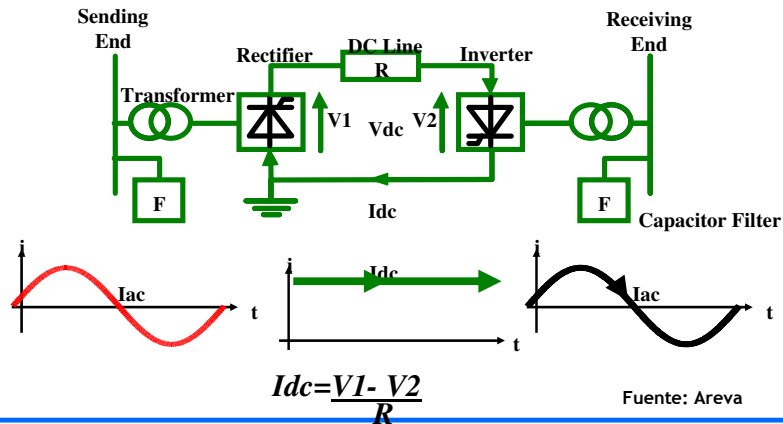


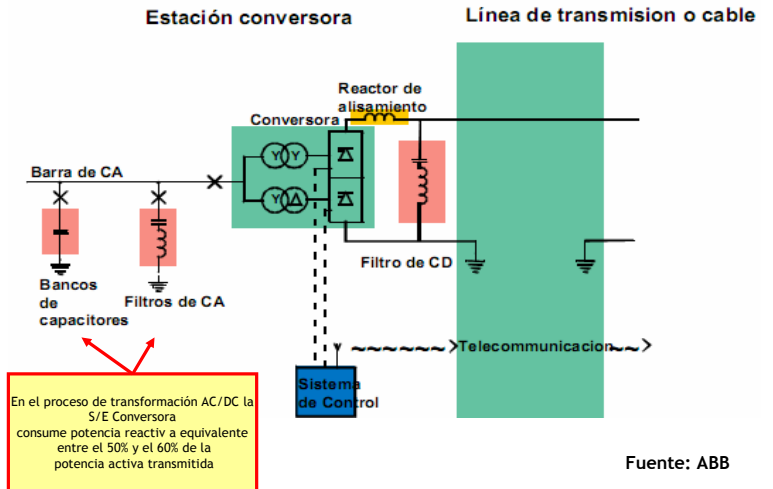
**AUXILIAR 4:** Transmisión de Energía Eléctrica de Alta Tensión en Corriente Continua - HVDC (Primera I)

➤ Esquema de Transmisión General en HVDC



Fuente: Areva  
 EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

➤ Componentes Básicos de S/E Convertora HVDC



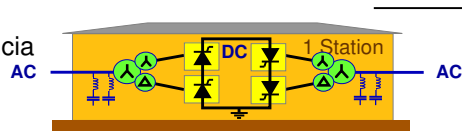
En el proceso de transformación AC/DC la S/E Convertora consume potencia reactiva equivalente entre el 50% y el 60% de la potencia activa transmitida

EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

➤ Esquemas HVDC

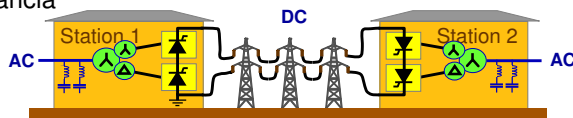
• Back-to-Back

- Enlaces en distinta frecuencia



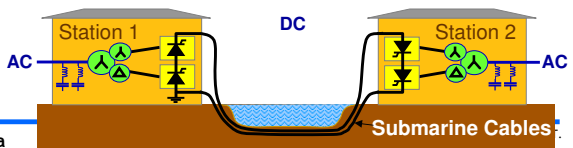
• Punto a Punto

- Enlaces de gran distancia



• Punto a Punto

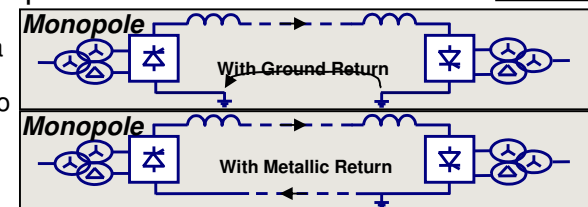
- Enlaces entre islas



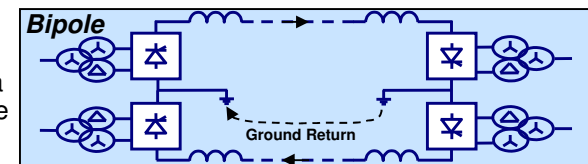
Fuente: Areva  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

➤ Sistemas Monopolar/Bipolar

- ▶ Equivalente a línea de simple circuito AC

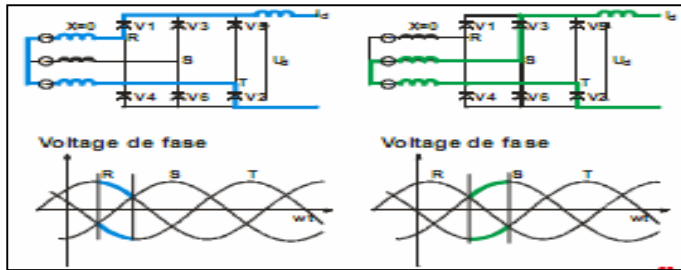
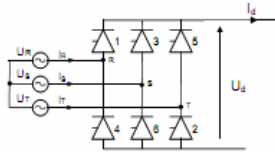


- ▶ Equivalente a línea de doble circuito AC



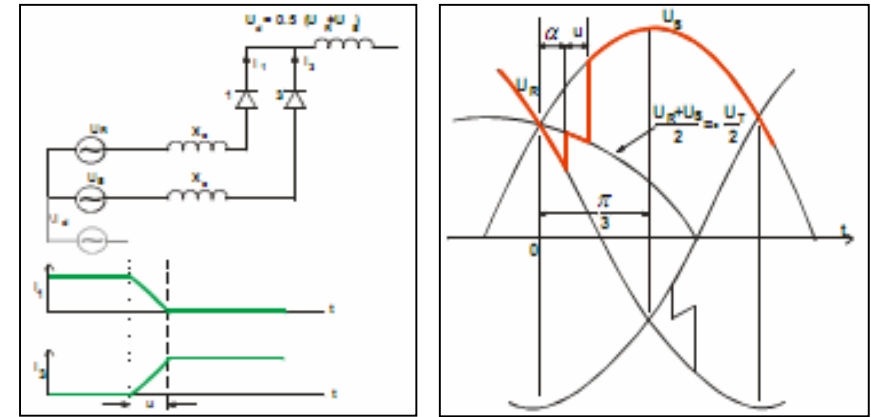
Fuente: Areva  
 EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

➤ Resumen de Conmutación AC/DC - Rectificador de 6 pulsos



Fuente: ABB

EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

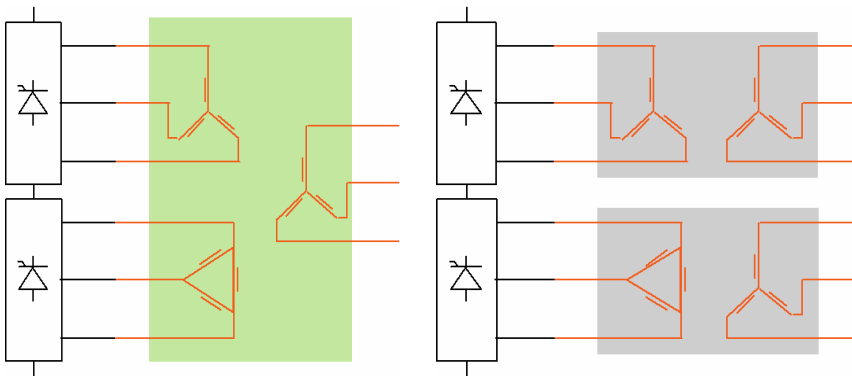


$\alpha$ : Ángulo de disparo  
 $\mu$ : Ángulo de conmutación  
 $\delta$ :  $\alpha + \mu$  (Ángulo de extinción)

Fuente: ABB

EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

➤ Resumen de Conmutación AC/DC - Rectificador de 12 pulsos. Configuración de Transformadores



Conexión de 12 pulsos - 1 Transformador trifásico de tres enrollados

Conexión de 12 pulsos - 2 Transformadores trifásico de dos enrollados

Fuente: Areva

EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.

➤ Ecuaciones Básicas HVDC

Se puede demostrar que:  $V_{do} = 1.65 \cdot E_m$  (voltaje fase-neutro)

En RMS:

$$V_{do} = 2.34 \cdot E_{LN}$$

$$V_{do} = 1.35 \cdot E_{LL}$$

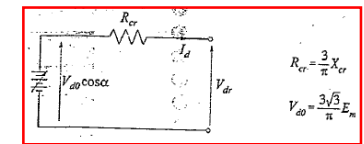
RECTIFICADOR

Diferencia de Voltaje debido al traslape de conmutación:  $\Delta V_d = \frac{V_{do}}{2} \cdot (\cos \alpha - \cos \delta)$

Corriente Directa:  $I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot E_m}{2 \omega L_c} \cdot (\cos \alpha - \cos \delta)$

$$\text{Así: } \Delta V_d = \frac{3}{\pi} \cdot I_d \cdot \omega \cdot L_c$$

Voltaje de Salida en Directa:  $V_d = V_{do} \cdot \cos \alpha - \Delta V_d$   
 $= V_{do} \cdot \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \cdot \omega \cdot L_c \cdot I_d$   
 $= V_{do} \cdot \cos \alpha - R_c \cdot I_d$



$R_c$ : Resistencia de conmutación equivalente que no consume potencia.

EL605 2007 Prof.: Agustín León T.  
 Aux.: Ricardo Fuentes M.



**INVERSOR**

Voltaje de Salida en Directa:  $V_d = V_{do} \cdot \cos \alpha - \Delta V_d$

$$V_d = \frac{V_{do}}{2} \cdot (\cos \alpha + \cos \delta), \text{ con } \alpha > 90^\circ$$

Es común describir  $V_d$  en términos de los ángulos:

$\beta = \pi - \alpha$ : Ángulo de avance de ignición

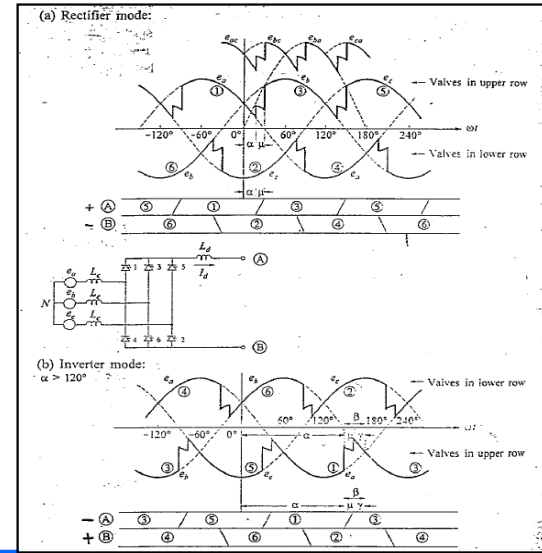
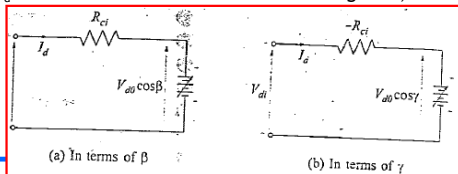
$\gamma = \pi - \delta$ : Ángulo de avance de extinción

Así:  $I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot E_m}{2 \cdot \omega \cdot L_c} \cdot (\cos \gamma - \cos \beta)$

$$V_d = V_{do} \cdot \frac{\cos \gamma + \cos \beta}{2}$$

$$V_d = V_{do} \cdot \cos \beta + R_c \cdot I_d = V_{do} \cdot \cos \gamma - R_c \cdot I_d$$

(El voltaje  $V_d$  en caso de inversora se considera negativo)



Si no se consideran pérdidas:  $P_{ac} = P_{dc}$   
 $3 \cdot E_{LN} \cdot I_L \cdot \cos \phi = V_d \cdot I_d$

Se puede demostrar que:

$$I_{LN} |_{\mu=\mu^*} \approx I_{LN} |_{\mu=0^\circ} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d$$

$$\cos \phi = \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2}$$

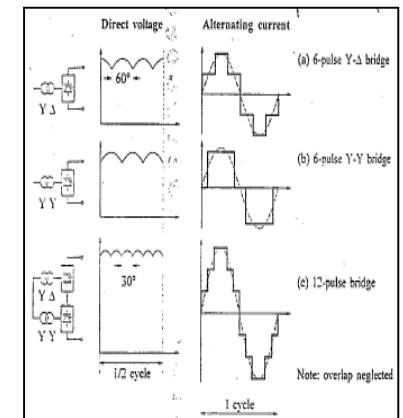
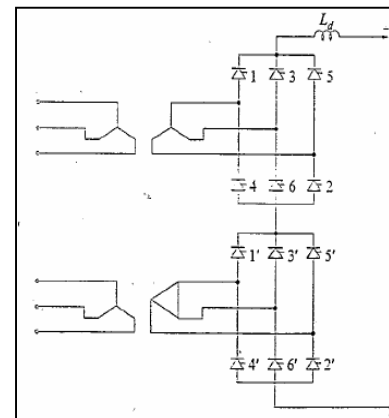
$$V_d \approx V_{do} \cdot \cos \phi$$

$$\cos \phi \approx \cos \alpha - \frac{R_c \cdot I_d}{V_{do}}$$

$$V_d \approx \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot E_{LN} \cdot \cos \phi$$



➤ Caso de S/E Convertora de 12 Pulsos



Se puede demostrar las siguientes relaciones:

B: Número de grupos de tiristores conectados en serie

T: Radio del transformador

$$V_{do} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot B \cdot T \cdot E_{LL}$$

$$V_d = V_{do} \cdot \cos \alpha - I_d \cdot B \cdot \left( \frac{3 \cdot X_c}{\pi} \right)$$

$$V_d = V_{do} \cdot \cos \gamma - I_d \cdot B \cdot \left( \frac{3 \cdot X_c}{\pi} \right)$$

$$V_d \approx V_{do} \cdot \cos \phi$$

$$I_{L1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot B \cdot T \cdot I_d$$

### > Ejemplo

Un rectificador de 12 pulsos es alimentado con un transformador de 220 kV/110 kV

- Si el voltaje es 230 kV y  $T=0.48$ , determine el voltaje de salida DC cuando el ángulo de disparo  $\alpha = 20^\circ$  y el ángulo  $\mu = 18^\circ$
- Si la corriente DC de salida es de 2000 A, calcular la reactancia de conmutación  $X_c$ , el valor RMS de la componente fundamental de  $I_d$ , el factor de potencia y la potencia activa y reactiva en el primario del transformador.

### Solución

1) A 12-pulse bridge circuit comprises two 6-pulse bridges. Hence  $B=2$ .

The no-load direct voltage is

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B T E_{LL}$$

$$= 1.3505 \times 2 \times 0.48 \times 230$$

$$= 298.18 \text{ kV}$$

The extinction angle is

$$\delta = \alpha + \mu = 20^\circ + 18^\circ = 38^\circ$$

Hence, the reduction in average direct voltage due to commutation overlap is

$$\Delta V_d = V_{do} \frac{\cos \alpha - \cos \delta}{2}$$

$$= 298.18 \times \frac{\cos 20^\circ - \cos 38^\circ}{2}$$

$$= 22.61 \text{ kV}$$

The dc output voltage is

$$V_d = V_{do} \cos \alpha - \Delta V_d$$

$$= 298.18 \cos 20^\circ - 22.61$$

$$= 257.58 \text{ kV}$$

Alternatively,

(b)  $\Delta V_d = B R_c I_d$ . Hence,

$$R_c = \frac{\Delta V_d}{B I_d} = \frac{22.61}{2 \times 2} = 5.65 \ \Omega$$

$$X_c = \frac{\pi R_c}{3} = \frac{\pi \times 5.65}{3} = 5.92 \ \Omega/\text{phase}$$

Fundamental component of alternating current on the primary side is

$$I_{L1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} B T I_d$$

$$= 0.7797 \times 2 \times 0.48 \times 2000$$

$$= 1.497 \text{ kA}$$

Power factor at the HT bus is

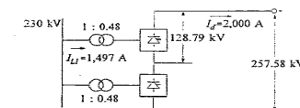
$$\cos \phi = \frac{V_d}{V_{do}} = \frac{257.58}{298.18} = 0.8638$$

Hence,  $\phi = \cos^{-1}(0.8638) = 30.25^\circ$

$$P_{dc} = P_{dc} = V_d I_d = 257.58 \times 2 = 515.16 \text{ MW}$$

$$Q_{HT} = P_{dc} \tan \phi = 515.16 \times \tan 30.25^\circ = 300.43 \text{ MVar}$$

The solution is shown in Figure E10.1.



$$P = 515.16 \text{ MW} \rightarrow$$

$$Q = 300.43 \text{ MVar} \rightarrow$$