

SISTEMAS HVDC **(High Voltage Direct Current)**

**Sistemas de transmisión de energía eléctrica
en corriente continua a alta tensión.**



**Segundo Seminario de Actualización del Sector
Eléctrico (SASE)**

Ronald Dickson Barrera
Septiembre de 2016

- ¿Qué es Intercolombia?
- Antecedentes HVDC
- Diferencias con los sistemas AC (Ventajas y desventajas)
- Diagrama de bloques de un sistema HVDC
- Configuraciones de un sistema HVDC
- HVDC en los sistemas de transmisión
- Convertidores de potencia
- Tecnologías de los sistemas HVDC (CSC, VSC)
- Aplicaciones en sistemas de potencia
- Sistemas HVDC en Colombia



¿Qué es Intercolombia S.A. E.S.P.?

INTERCOLOMBIA

La nueva filial de ISA dedicada al transporte de energía eléctrica a alto voltaje en Colombia.

El mayor transportador de energía en el país y el único con cubrimiento nacional.

Representamos, administramos, operamos y mantenemos más de 10,309 km de circuito y activos en 75 subestaciones

Contamos con 531 empleados altamente capacitados



Empresa de servicios públicos mixta, constituida como sociedad anónima, encargada de administrar, operar y mantener los activos eléctricos propiedad de ISA en Colombia.

Tenemos presencia en 334 municipios del país

Usamos responsablemente los recursos, en equilibrio con el medio ambiente y en el marco de una gestión sostenible.

Desarrollamos proyectos de transmisión de energía con seguridad, confiabilidad y oportunidad



-  Subestación de ISA
-  Subestación de otras empresas
-  Subestación de otras empresas con activos de ISA
-  Capital de la República
-  Red a 500kV propiedad ISA
-  Red a 230kV propiedad ISA
-  Conexión Internacional

Fuente: INTERCOLOMBIA

HVDC: Válvulas de arco de mercurio

- **1951** Moscú- Kashira (100 KV, 30 MW, 100 Km)
- **1954** Suecia – Isla de Gotland (100 KV, 20 MW, 96 Km)

1970 Válvulas de arco de mercurio → Tiristores





Diferencias con los sistemas AC

INTERCOLOMBIA

Ventajas

- Transmisión de **potencia** sobre **largas distancias**
- Interconectar **sistemas asíncronos**
- **Torres** de transmisión de **menor tamaño**
- **Mayor potencia** por conductor
- **Retorno** por tierra
- Menores pérdidas por **efecto corona** y **menor radio** interferencia
- Capacidad para **operar en modo degradado**

Desventajas

- Costos de los convertidores
- Requerimientos de potencia reactiva y generación de armónicos (CSC)
- Dificultad para la transformación de voltaje

Diagrama de bloques de un sistema HVDC

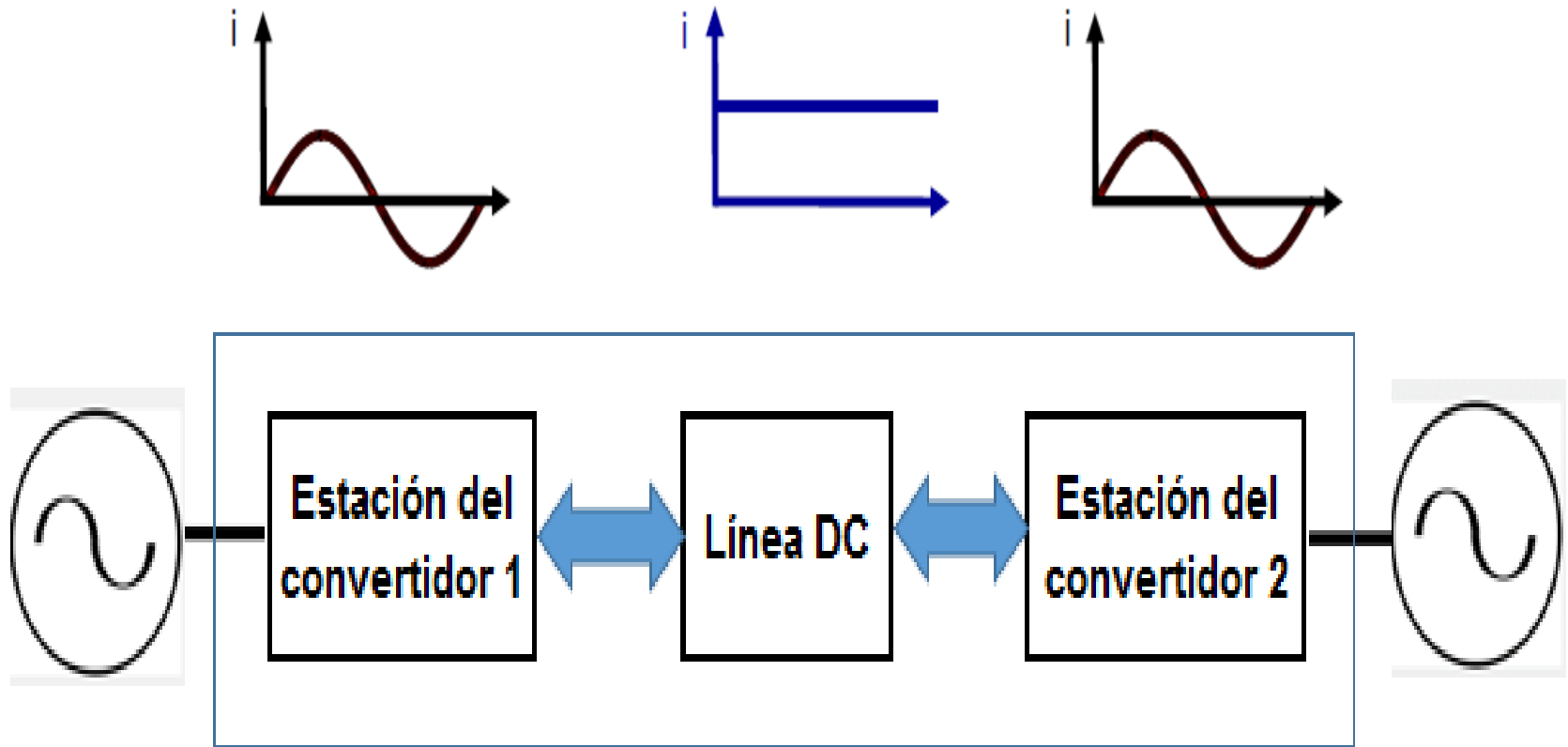
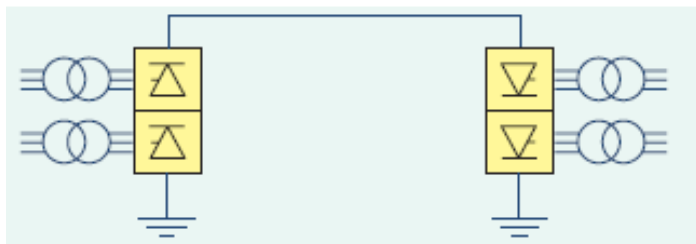


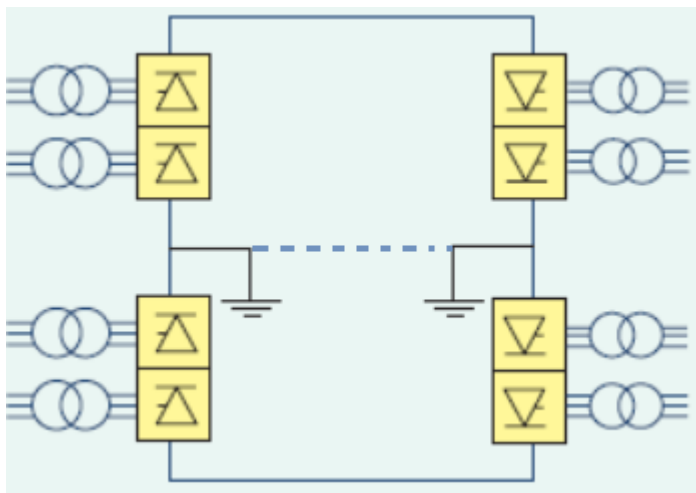
Diagrama de bloques



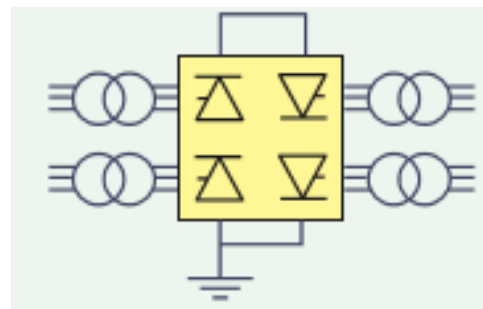
Mono polar



**Mono polar, con retorno.
(Conductor metálico)**



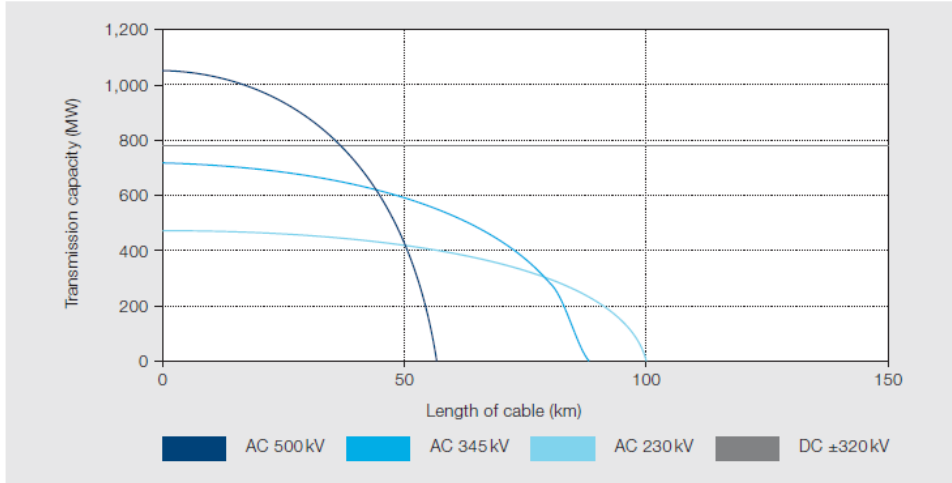
Bipolar



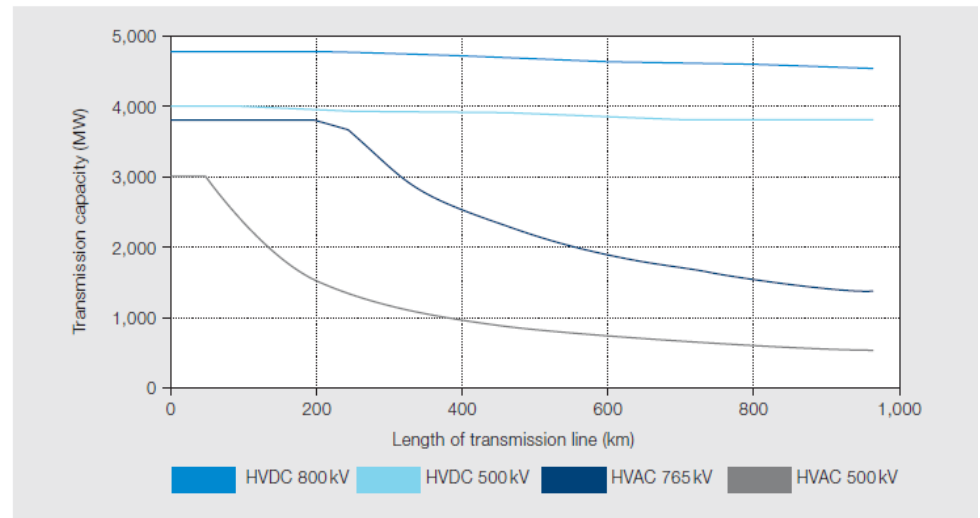
Back to back

HVDC en los sistemas de transmisión

Capacidad de transmisión en cables y líneas de transmisión



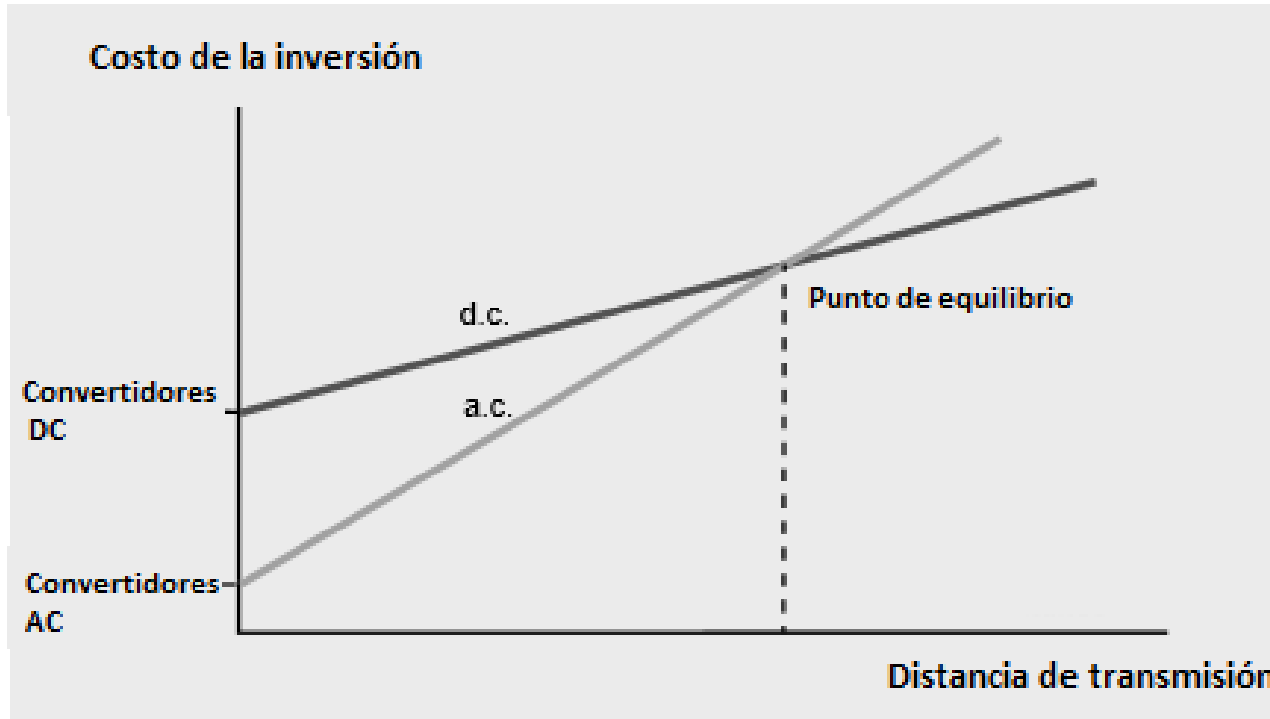
Cables AC y DC [5]



Línea de transmisión AC y DC [5]

HVDC en los sistemas de transmisión

Consideraciones económicas



Punto de Equilibrio:
600 – 800 Km (Líneas Aéreas)
40 – 60 Km (Cables)

Factores de influencia

- ✓ Tasa de interés
- ✓ Costos de los materiales y de la servidumbre

HVDC en los sistemas de transmisión

Relación de aislamiento entre los sistemas AC y DC

$$\text{Relación de aislamiento} = \frac{\text{Longitud de aislamiento por fase en AC}}{\text{Longitud de aislamiento por fase en DC}} = \frac{k \cdot k_{AC}}{k_{DC}} * \frac{V_{Fase}}{V_d}$$

k = La relación de voltaje no disruptivo entre los sistemas (longitud de aislamiento dada)

$$k = \frac{\text{Voltage DC}}{\text{Voltage AC (RMS)}} = 1 \quad (\sqrt{2} \text{ Áreas menos contaminadas})$$

$$k_{AC} = \text{Índice de aislamiento en AC} \quad k_{AC} = \frac{\text{Nivel de aislamiento AC}}{V_{Fase}} = 2.5 - 3$$

$$k_{DC} = \text{Índice de aislamiento en DC} \quad k_{DC} = \frac{\text{Nivel de aislamiento DC}}{V_d} = 1.7 \text{ (Control)}$$

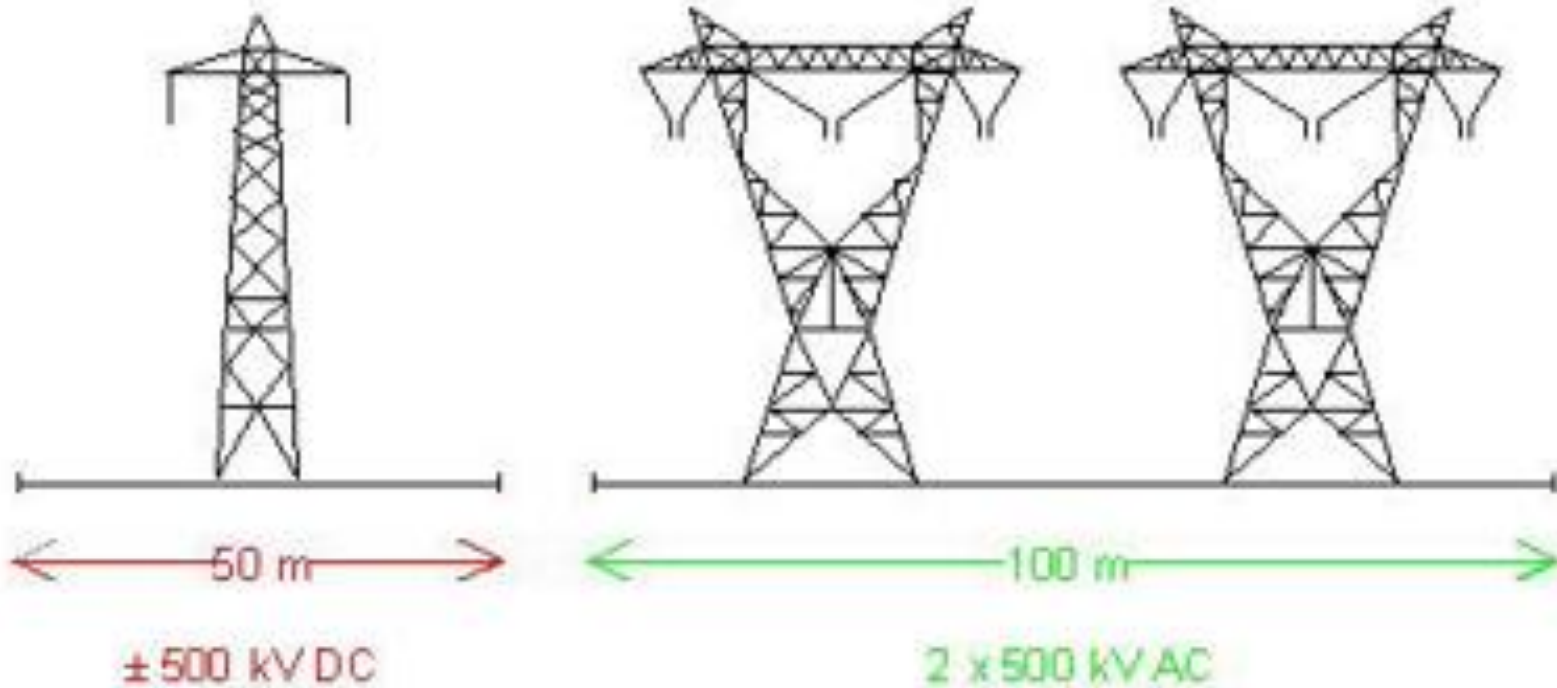
Sistema 3 ϕ en AC con un sistema bipolar en DC (**Potencia, conductor, pérdidas**)

$$V_d = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\right) * V_{Fase} \quad \text{Relación de aislamiento} = 1.2 \text{ (Líneas aéreas)}$$

Fuente: J. Arrillaga, High voltage direct current transmission, London: The institution of Electrical Engineers , 1998.

HVDC en los sistemas de transmisión

Comparación de torres de transmisión (DC Vs AC)

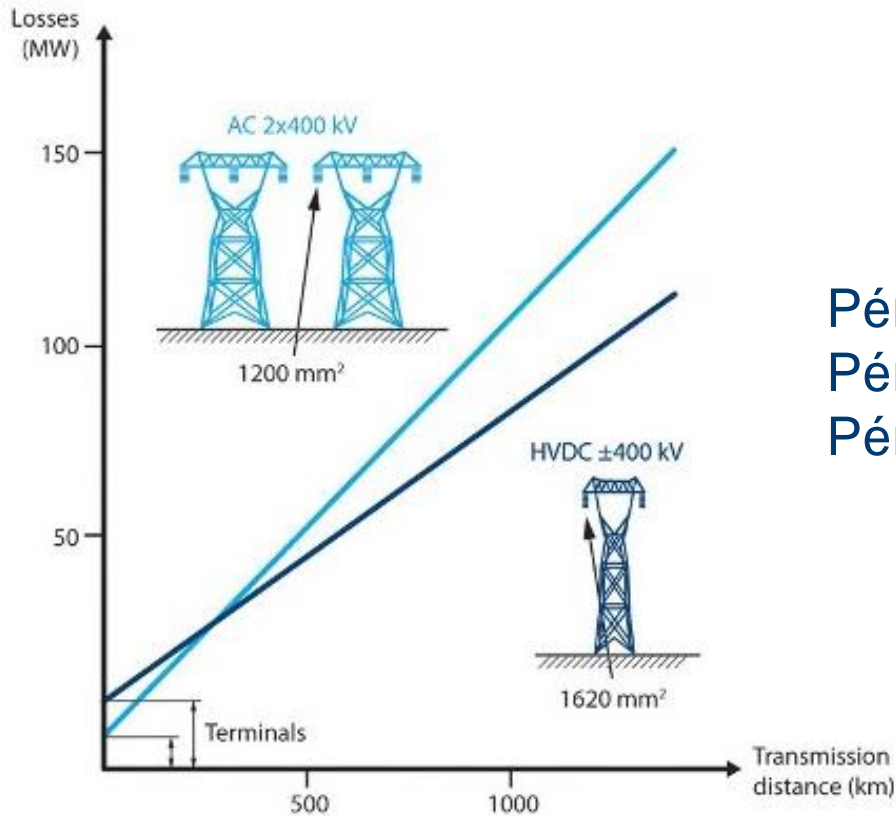


Potencia transferida: 2000 MW

Fuente:
<http://www.energy.siemens.com/br/en/power-transmission/hvdc/applications-benefits/hvdc-benefits.htm#content=Environmental%20Benefits>

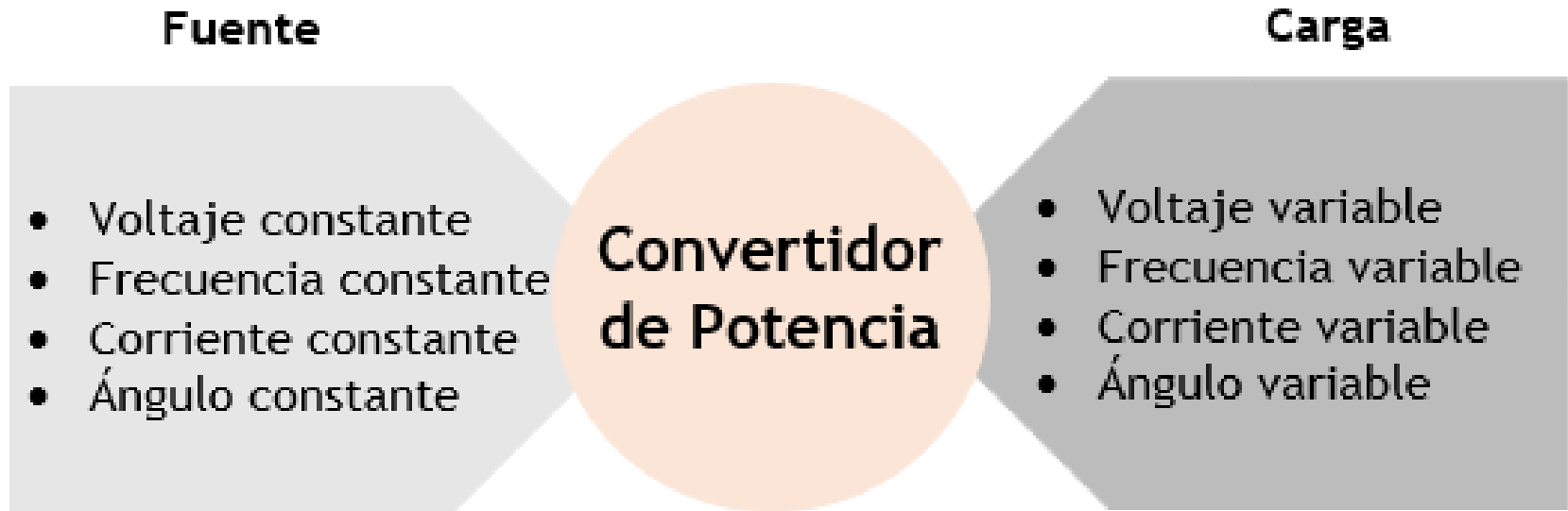
HVDC en los sistemas de transmisión

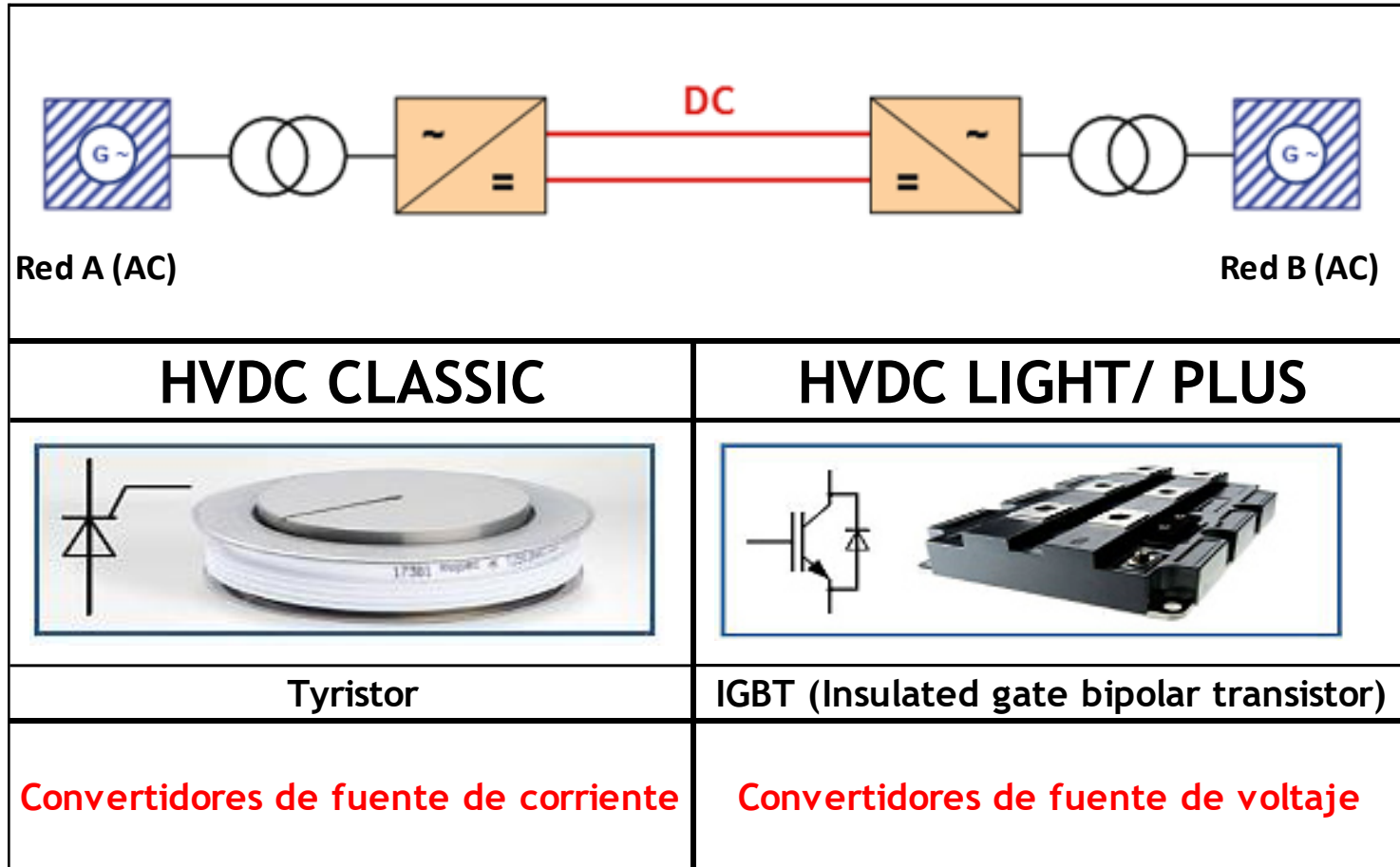
Pérdidas en líneas de transmisión AC y DC



Pérdidas en LT (DC) < LT (AC)
 Pérdidas en convertidores (CSC) $\approx 0.6 \%$
 Pérdidas en convertidores (VSC) < 1 %

Pérdidas en una línea de transmisión de 1200 MW





Fuente:

[www.engineering.pitt.edu/Sub-Sites/Conferences/EPIC/_Documents/2013-Conference-Documents/11-11-PM-Session-1---Gemmell-\(Siemens\)_pdf/](http://www.engineering.pitt.edu/Sub-Sites/Conferences/EPIC/_Documents/2013-Conference-Documents/11-11-PM-Session-1---Gemmell-(Siemens)_pdf/)

Consideraciones:

- Control de energía activa y reactiva
- Desempeño con líneas aéreas,
- Interacción con la red
- Estado del arte.

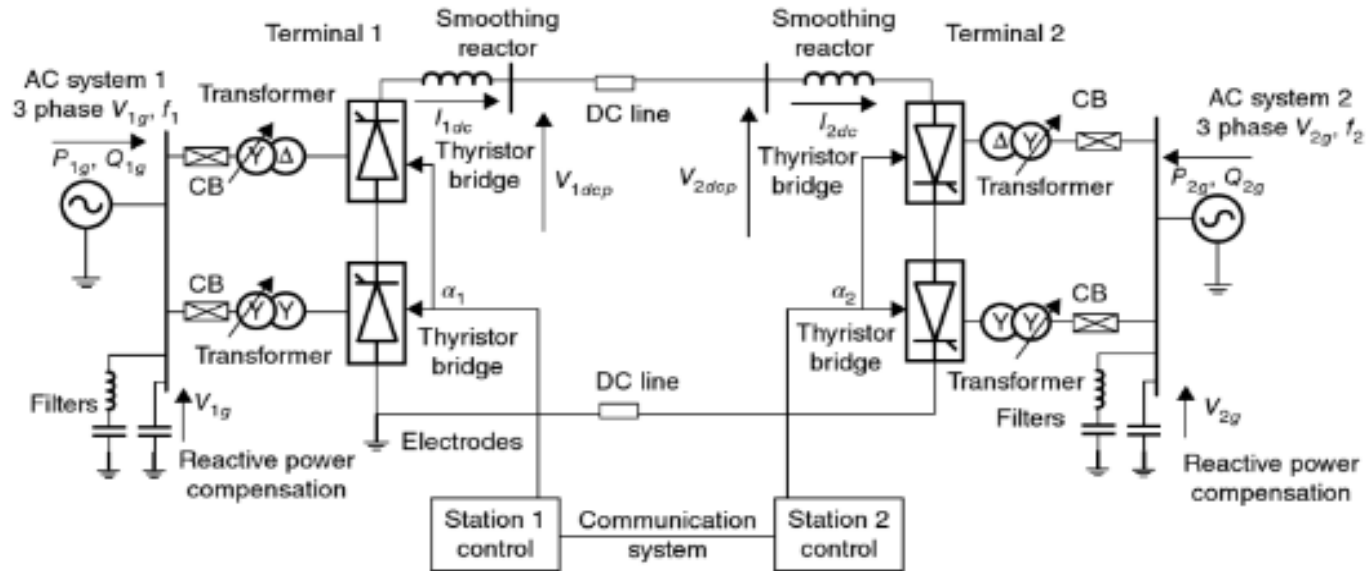


Diagrama esquemático de un sistema HVDC CSC [11]

Índice de corto circuito efectivo (ESCR)

- If $ESCR > 3$; (Fuerte)
- If $2 < ESCR < 3$ (Débil)
- If $ESCR < 2$. (Muy débil)

$$SC \text{ MVA} = \frac{E_{ac}^2}{Z_{th}}$$

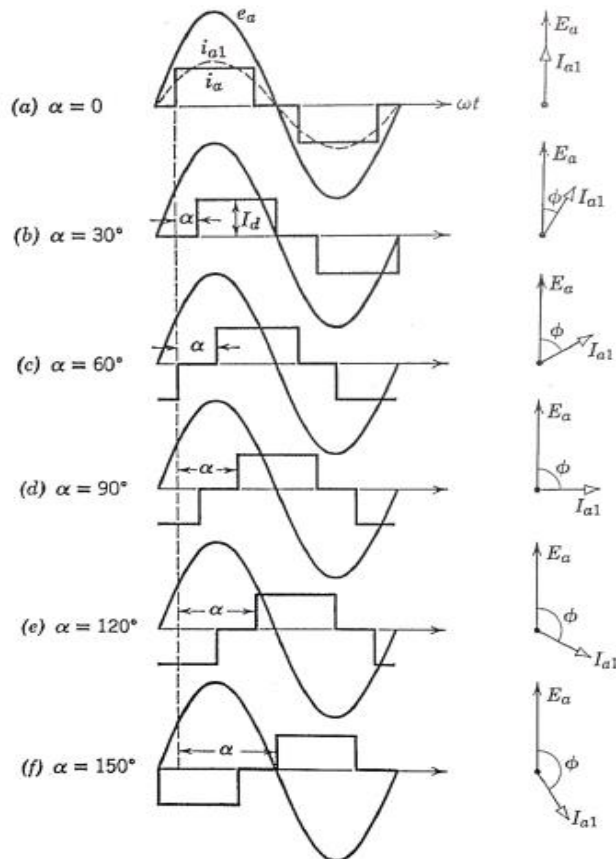
$$ESCR = \frac{SC - Q(60\%)}{DC \text{ power}}$$

Fuente: D. Jovcic and k. Ahmed, High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids, 2015.

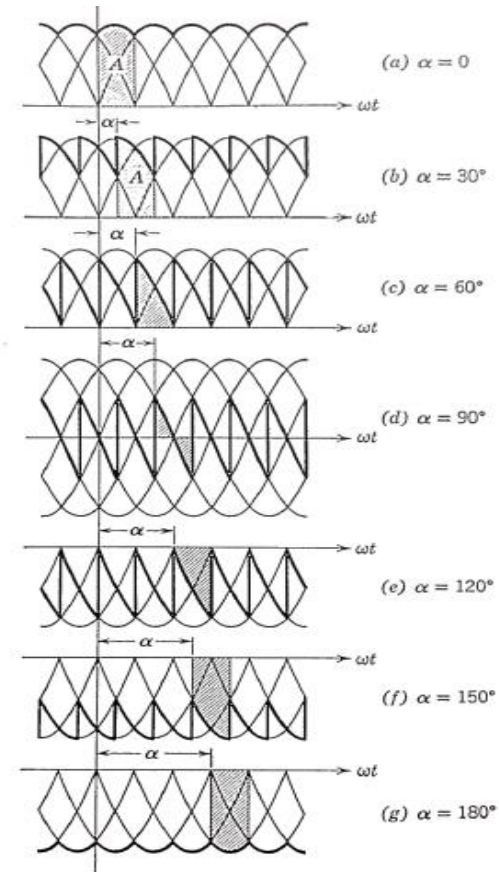
Convertidores de fuente de corriente (CSC)

Operación de los convertidores

Relación entre el ángulo de disparo y el desplazamiento de fase (AC)



Voltaje DC instantáneo
(Sin conmutación o solapamiento)



Convertidores de fuente de corriente (CSC)

Ventajas:

- Tiristores tienen **mayor capacidad de corriente y voltaje**
- Menor costo y **menores pérdidas** por conducción
- **Fallas en DC** son despejadas por el **sistema de control** y no afectan el sistema AC

Desventajas:

- Requiere filtros para eliminar los armónicos
- Requiere bancos de compensación de potencia reactiva (60%)
- No pueden ser conectados a redes débiles ($SCR < 2$)
- Fallas de conmutación pueden presentarse

Ventajas en comparación con los convertidores de corriente:

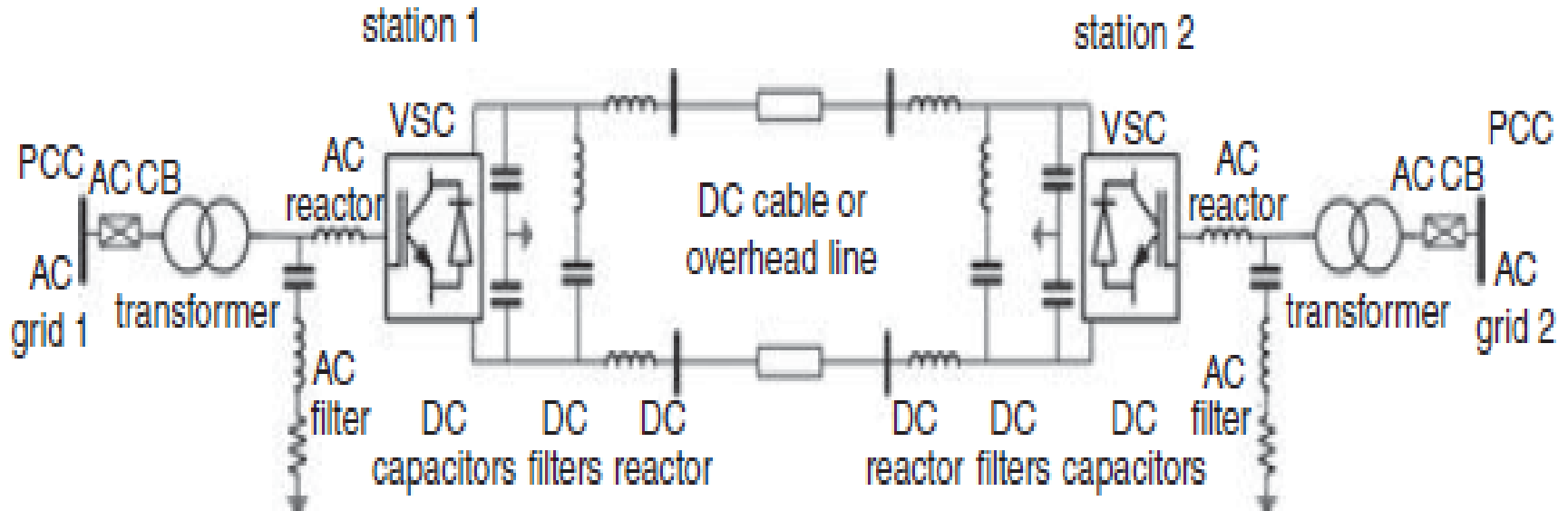
- La **potencia activa y reactiva** puede ser **controlada independientemente**. Puede generar o absorber potencia reactiva independiente de la transmisión de potencia activa.
- **Flujo de potencia** puede ser **invertido** sin la necesidad de invertir la polaridad de la tensión DC. (XLPE pueden ser usados)
- Capacidad para **Black start**

Desventajas:

- **Mayor costo** (Mayor número de semiconductores)
- **Pérdidas** por conducción son **mas altas** (IGBTs)
- **IGBT** tiene **menor capacidad** de potencia y sobrecarga que los tiristores.
- Durante fallas DC, se requieren **interruptores de corriente directa**.

Convertidores de fuente de Voltaje

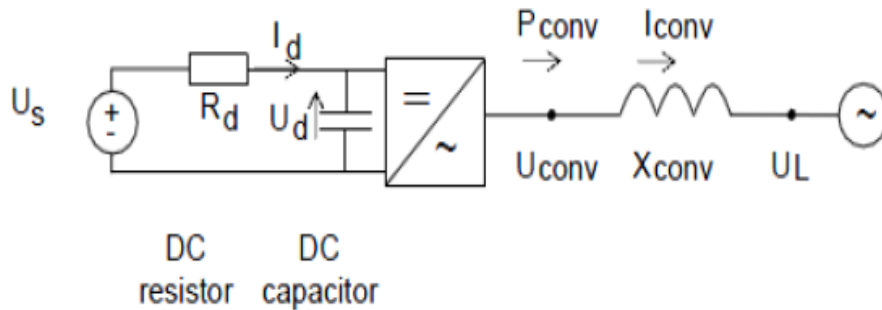
Convertidores de Voltaje (VSC)



Componentes del convertidor de voltaje de dos niveles

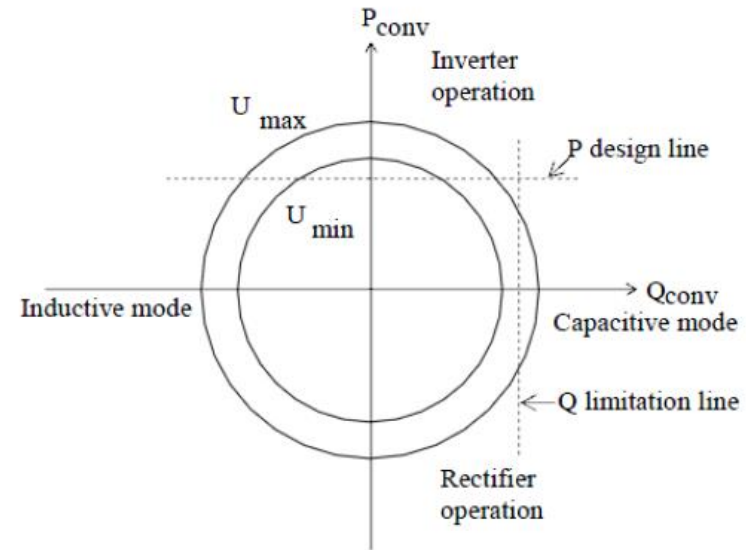
Consideraciones: Control de energía activa y reactiva, desempeño con líneas aéreas, interacción con la red y estado del arte.

Convertidores de fuente de Voltaje Control PQ (VSC)



$$Q = \frac{U_L \cdot (U_L - U_{Conv} \cdot \cos \delta)}{X}$$

$$P = \frac{U_{Conv} \cdot U_L}{X} \cdot \sin \delta$$



Control de un Sistema HVDC (VSC) [6]

U_{conv} (Ángulo) atrasa U_L (Ángulo) → Absorbe potencia activa, opera como rectificador

U_{conv} (Ángulo) adelanta U_L (Ángulo) → Inyecta potencia activa, opera como inversor

U_{conv} (Magnitud) < U_L (Magnitud) → Absorbe energía reactiva (Inductor)

U_{conv} (Magnitud) > U_L (Magnitud) → Inyecta energía reactiva (Condensador)

Convertidores de voltaje

Dos niveles - Año 1996 (PWM)

Tres niveles - Año 2000 (PWM)

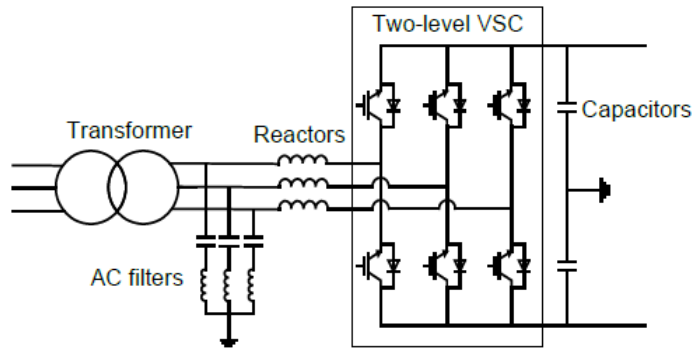
- Diodo enclavado al neutro
-

Convertidores multinivel modulares – Año 2010 (Modulación vectorial)

- Sub-módulo de medio puente
 - Sub-módulo de puente completo
-

Convertidores de fuente de Voltaje

Convertidores de fuente de voltaje (2 Niveles)



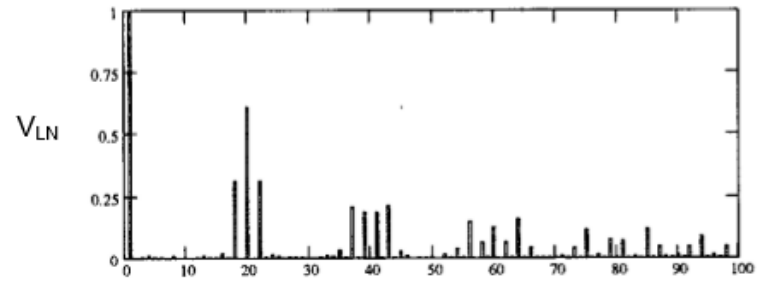
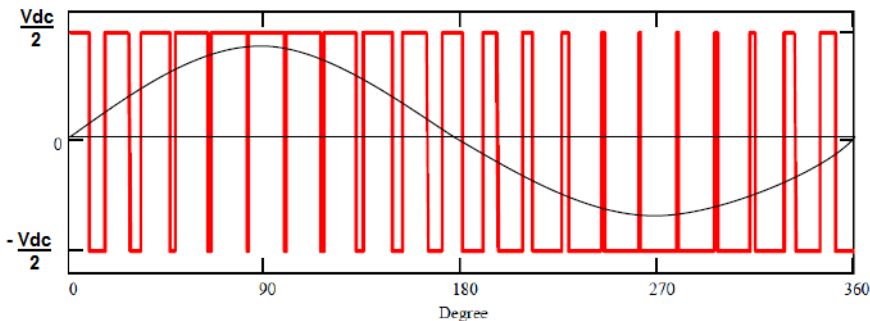
Convertidores de 6 pulsos de 2 niveles (VSC) [8]



- ✓ Válvulas **IGBTs** conectados **en serie**
- ✓ Área \approx 50% de las estaciones CSC
- ✓ **Menor** número de **válvulas**
- ✓ **Construcción** y sistema de **control simple**



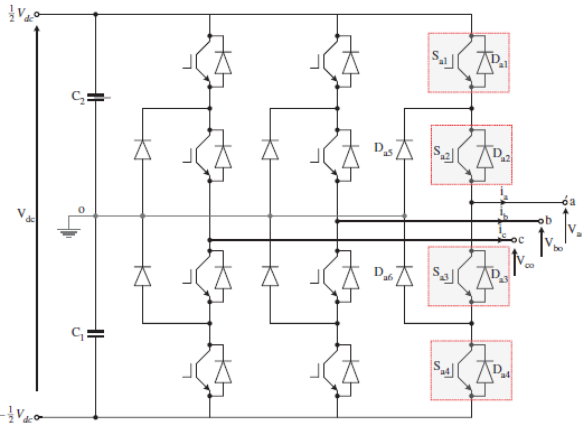
- ✓ Altas **pérdidas de conmutación** (1.5kHz)
- ✓ Requiere **filtros en AC**
- ✓ Alta $\frac{dv}{dt}$ por el ΔV en los switches
- ✓ Requiere **interruptores DC**



Voltaje de fase y espectro armónico de un convertidor de 2 niveles (VSC) [6]

Convertidores de fuente de Voltaje

Convertidores de fuente de voltaje de 3 niveles con diodo enclavado al neutro



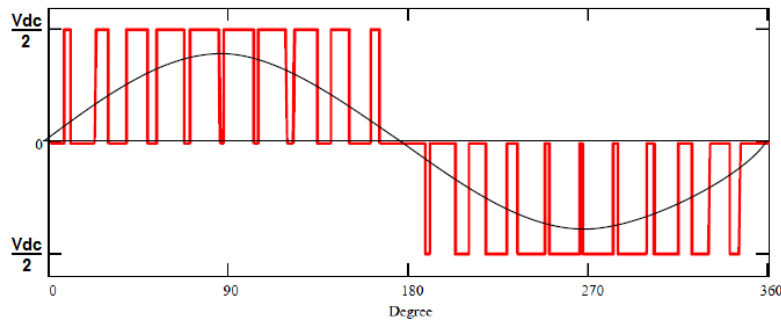
Convertidor con diodo enclavado al neutro [6]



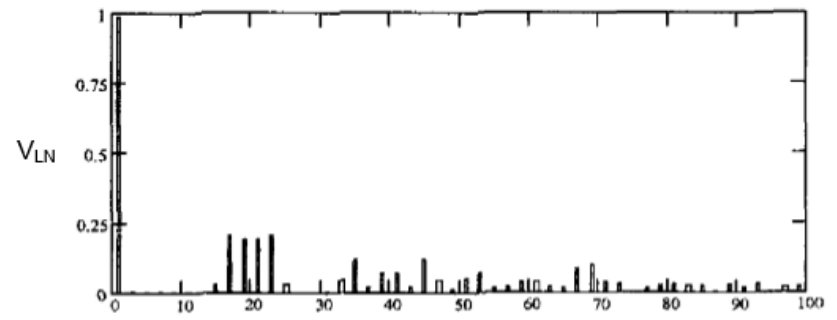
- ✓ Menor THD y $\frac{dv}{dt} \rightarrow$ Filtros menor tamaño
- ✓ Menores pérdidas por conmutación



- ✓ Dificultad para balancear voltaje capacitor
- ✓ Mayores pérdidas por conducción
- ✓ Mayor complejidad en el Circuito de control



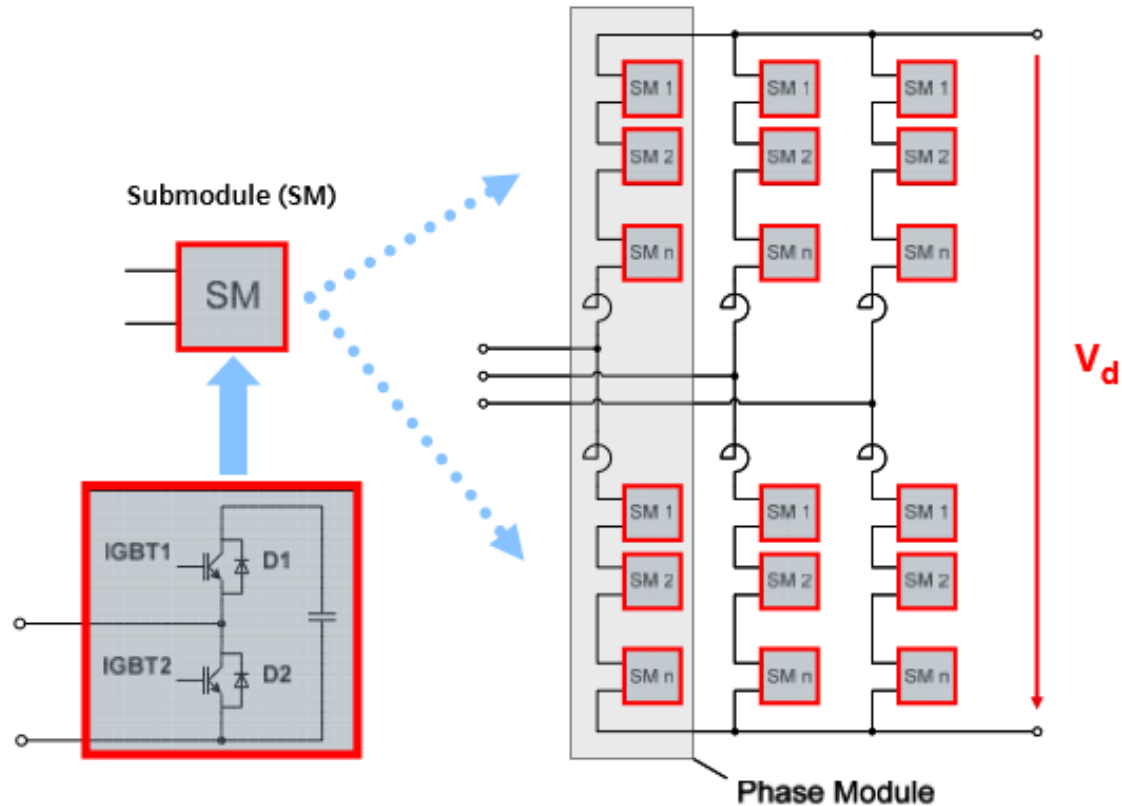
Voltaje de fase de un convertidor de 3 niveles [6]



Espectro armónico [6]

Convertidores de fuente de Voltaje

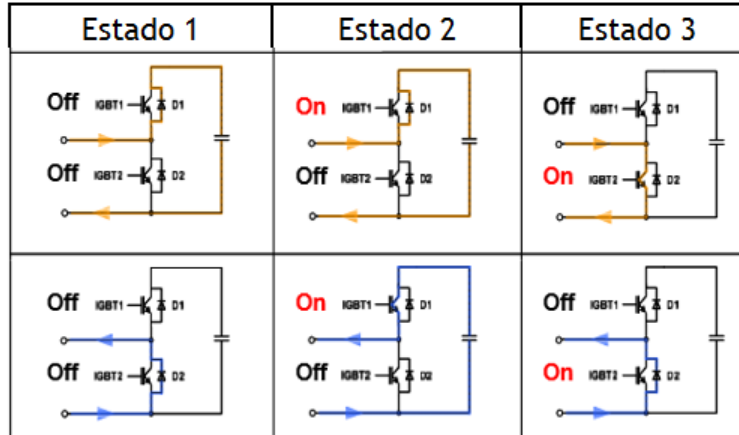
Convertidores modulares multinivel (Medio Puente)



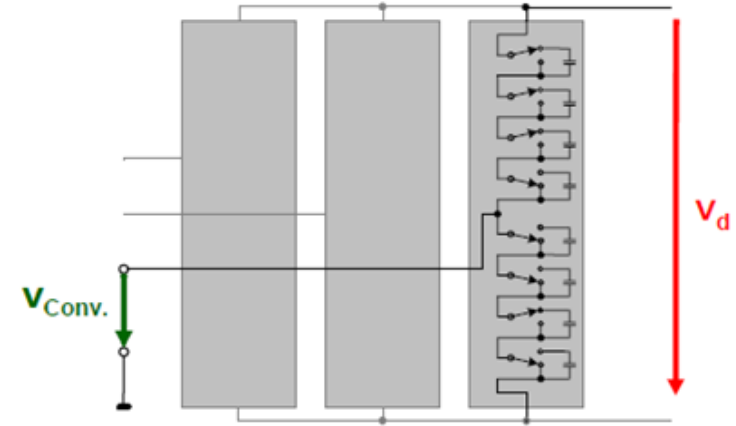
Arquitectura del convertidor para un Sistema HVDC PLUS [2]

Convertidores de fuente de Voltaje

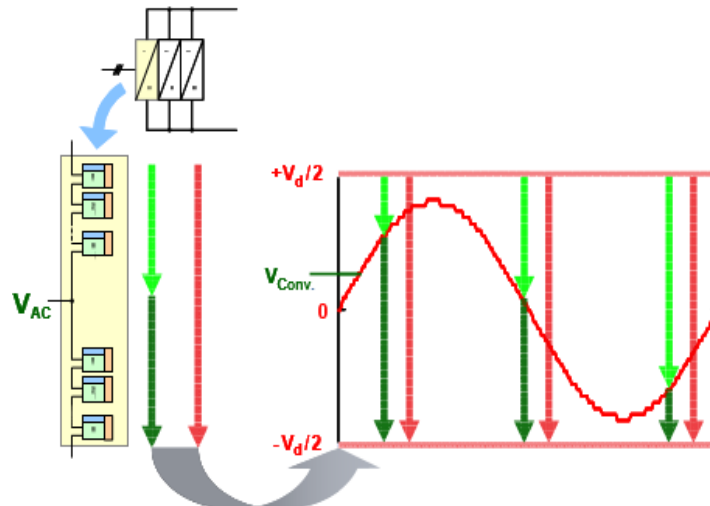
Operación de los convertidores modulares



Estados de operación y dirección de la corriente [2]



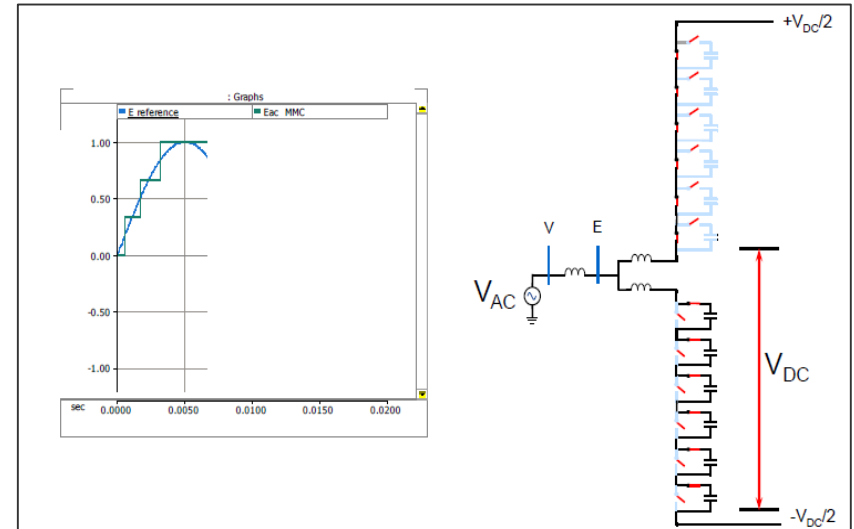
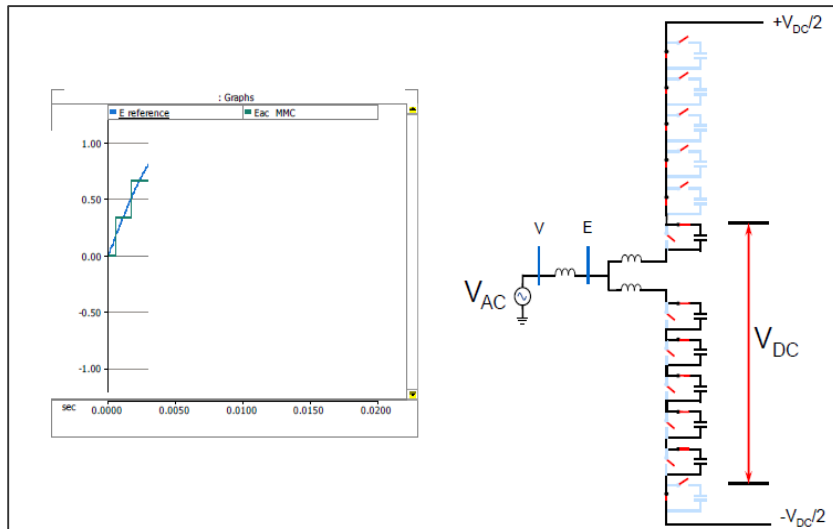
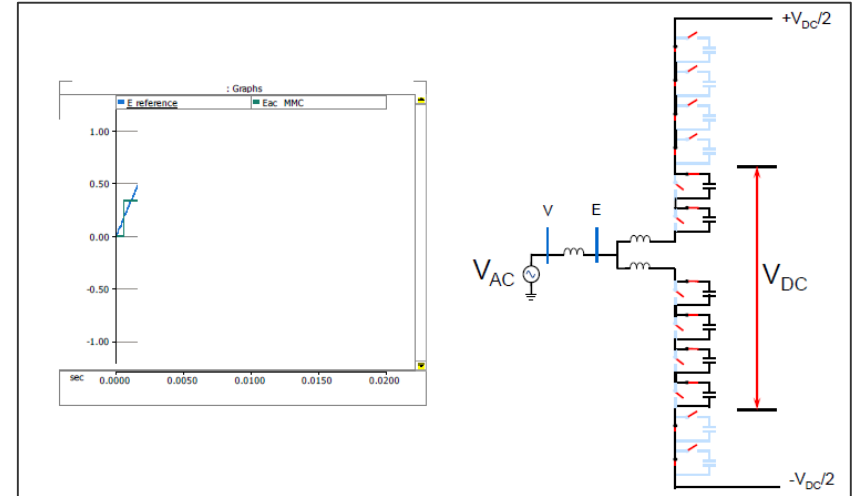
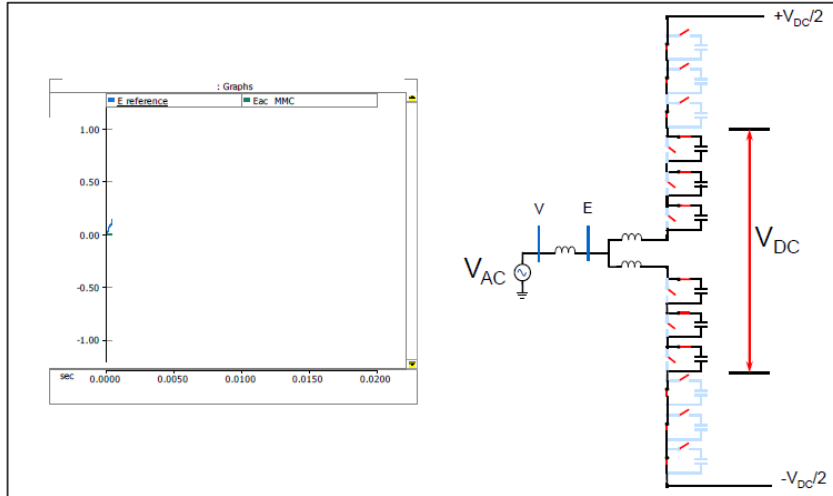
Principio de operación [2]



Generación de la onda de tensión [2]

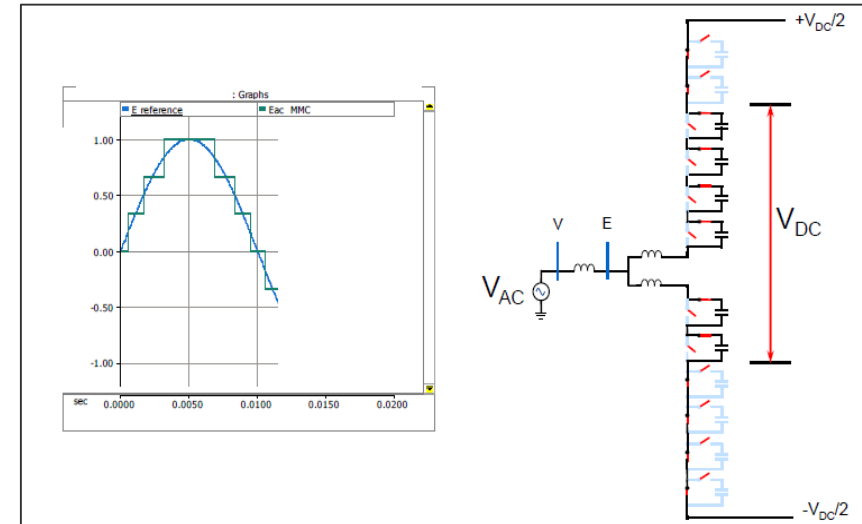
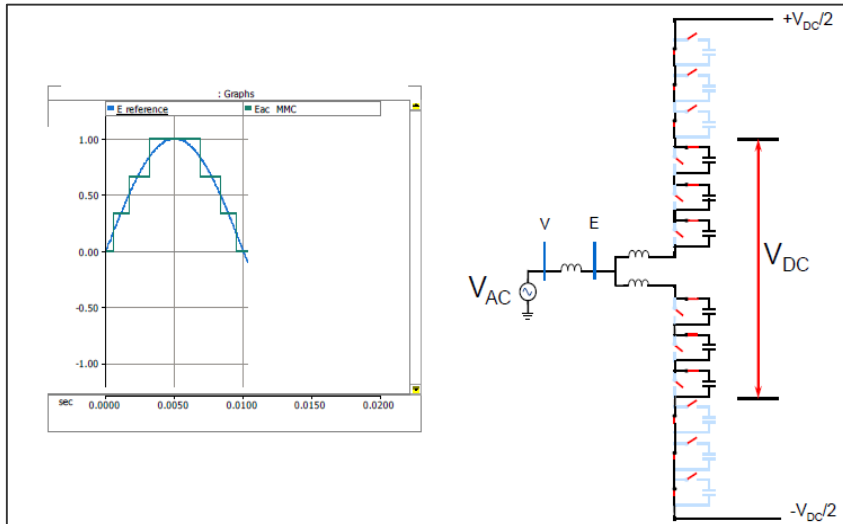
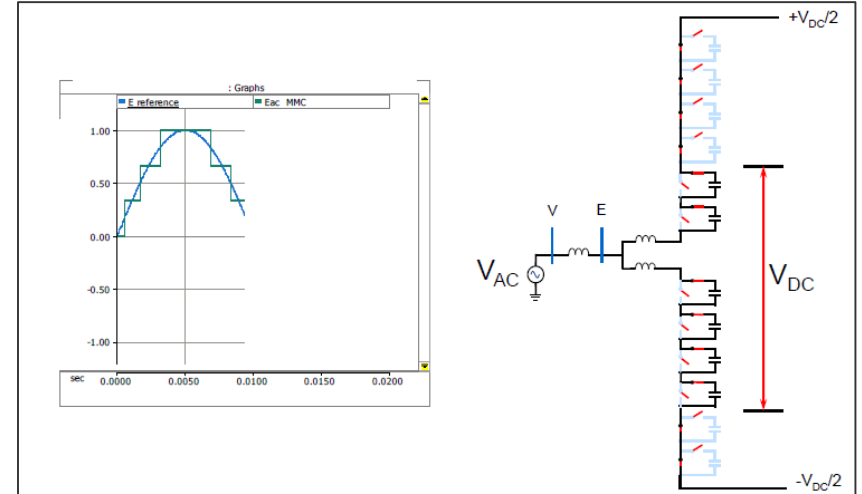
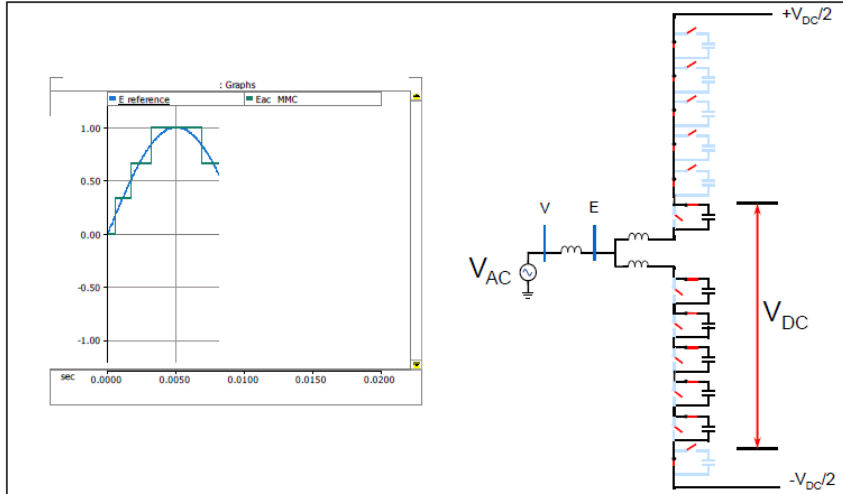
Convertidores de fuente de Voltaje

Construcción de la señal de tensión MMC (1)



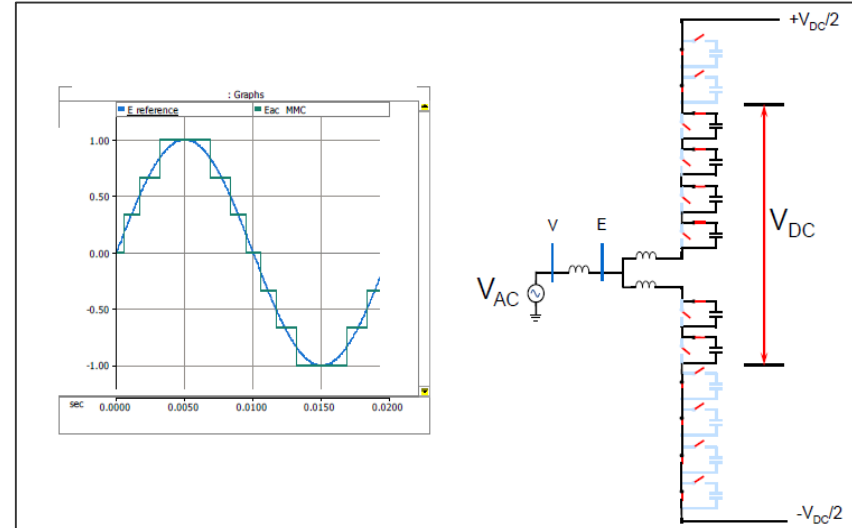
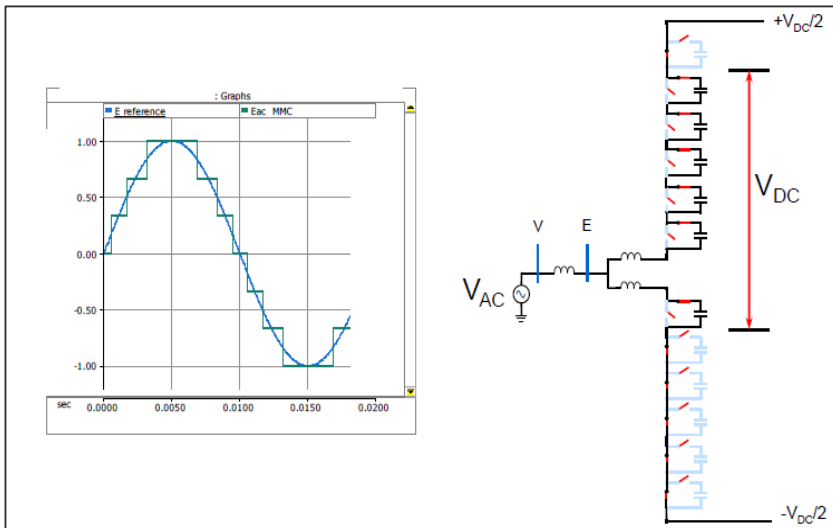
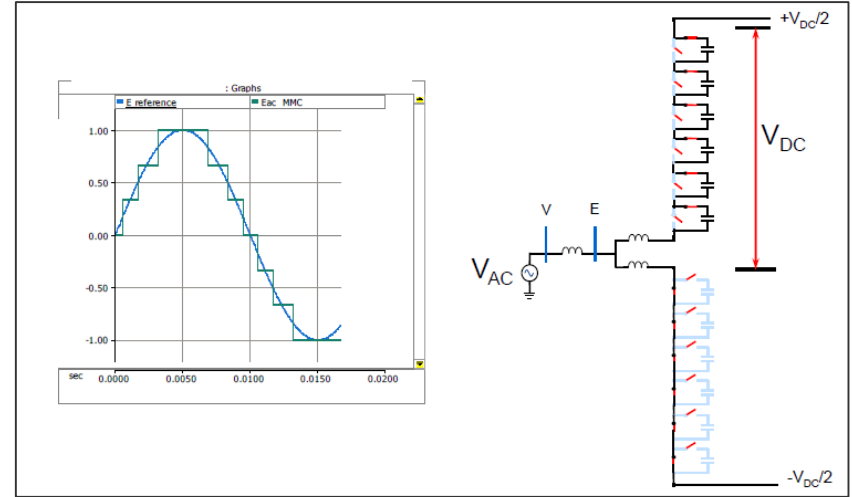
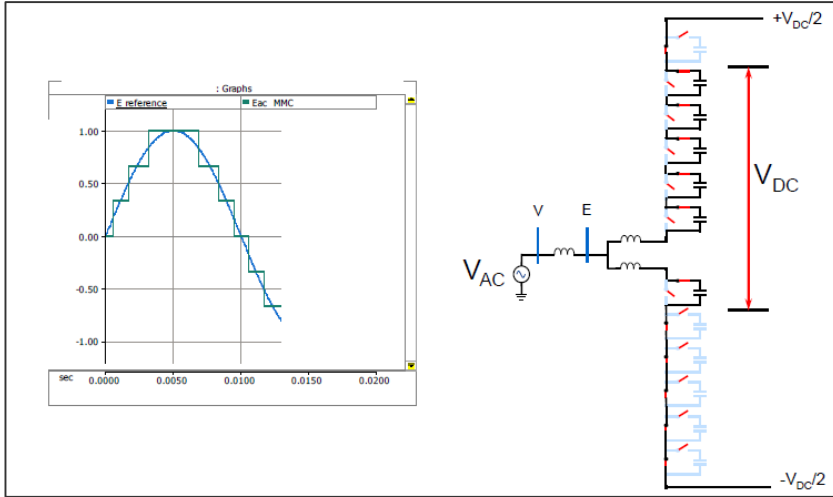
Convertidores de fuente de Voltaje

Construcción de la señal de tensión MMC (2)



Convertidores de fuente de Voltaje

Construcción de la señal de tensión MMC (3)

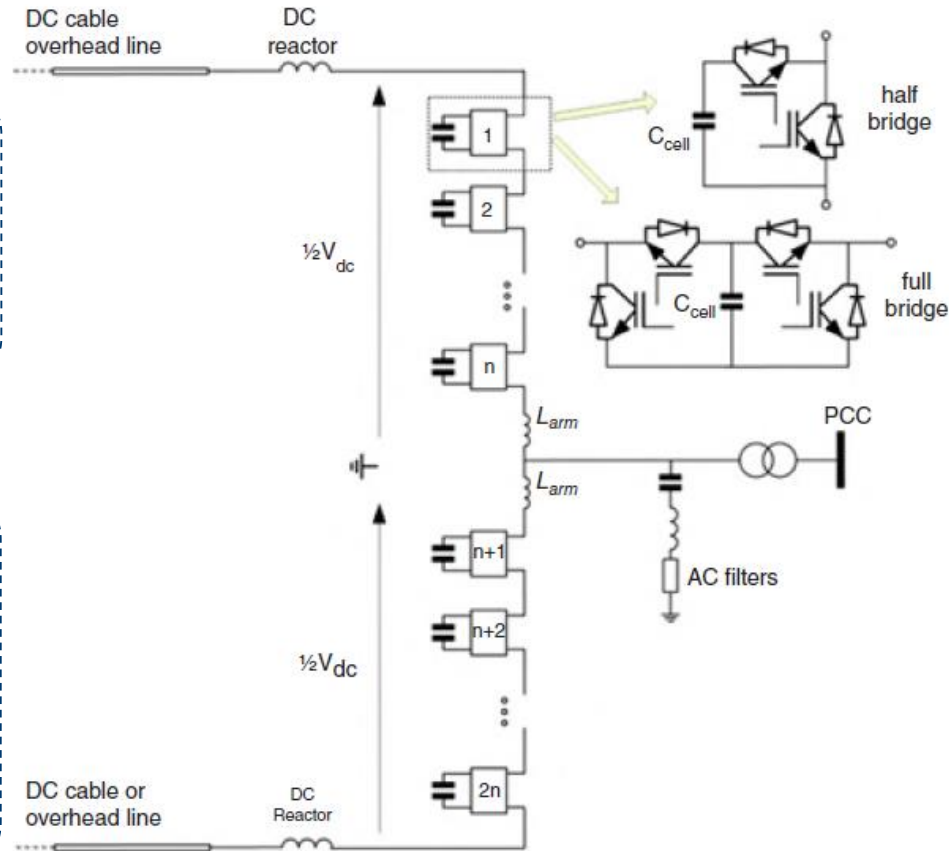


Convertidores de fuente de Voltaje

Convertidores modulares multinivel (MMC)

- ✓ Menor requerimiento de filtrado
- ✓ Aumentar los niveles → Menor
- +** THD y $\frac{dv}{dt}$
- ✓ Transformadores estándar

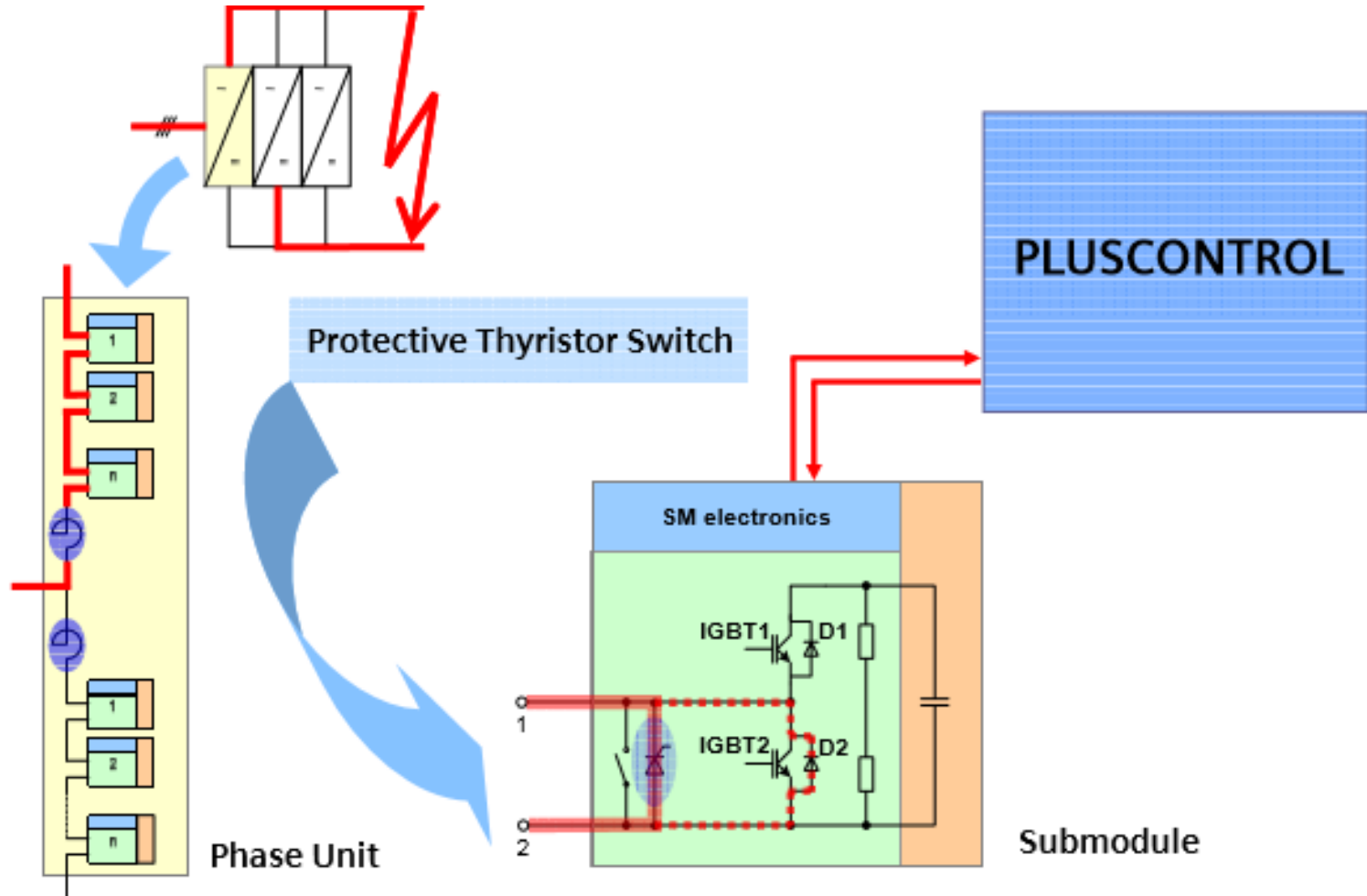
- ✓ Doble de semiconductores (VSC, 2 niveles)
- Para fallas transitorias en la línea DC, se requiere apertura total del enlace. (Excepto usando sub-módulos de puente completo)



Estructura del convertidor

Convertidores de fuente de Voltaje

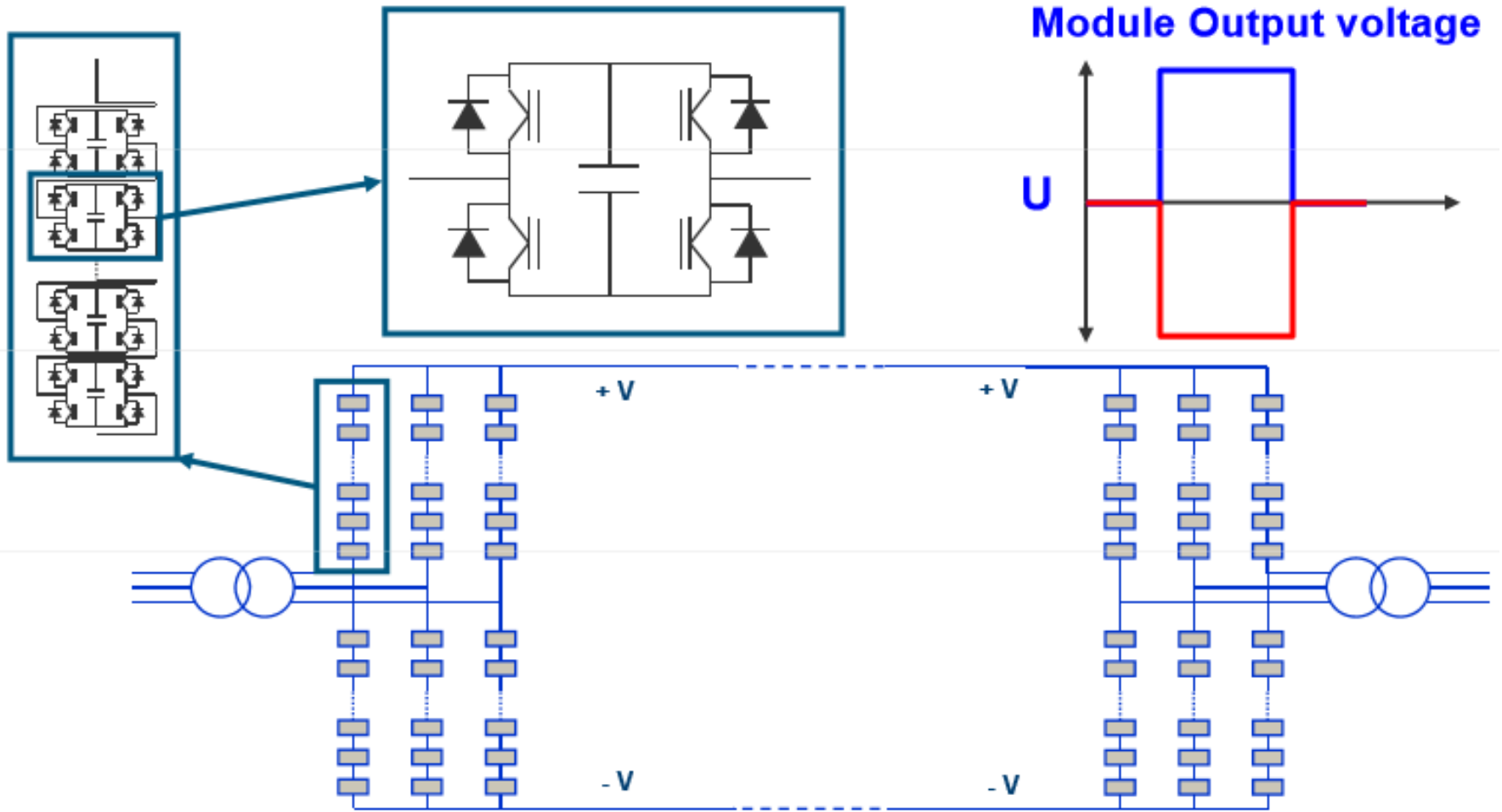
Comportamiento durante fallas MMC (línea DC)



Aplicaciones para línea aéreas (Falla entre fases) [2]

Convertidores de fuente de Voltaje

Convertidores modulares de puente completo



Convertidor multinivel modular de puente completo [10]

Convertidores de fuente de Voltaje

Tabla comparativa entre ambas tecnologías

Tabla comparativa	Convertidores de corriente (Classic)	Convertidores de voltaje (light, Plus)
Tecnología	Desarrollada (Suecia y la Isla de Gotland 20 MW, 1954)	En desarrollo (Isla de Gotland 50 MW, 1999)
Transferencia de potencia	800 kV, 7200 MW	320 kV, 1000 MW
Sistema AC	SCR > 2	SCR = 0
Semiconductor	Tiristor	Transistor bipolar de puerta aislada
Control de potencia	Activa	Activa y reactiva
Filtros (Armónicos)	Si (AC y DC)	No
Transformador de potencia	Características especiales	Convencional
Costo	Menor	Mayor
Pérdidas (Convertidores)	Aprox. 0.6%	Aprox. 1 %
Inversión del flujo de potencia	Polaridad de los convertidores	Dirección de flujo de corriente
Redes DC	No son consideradas posibles	Posibles
Arranque autónomo	No	Si



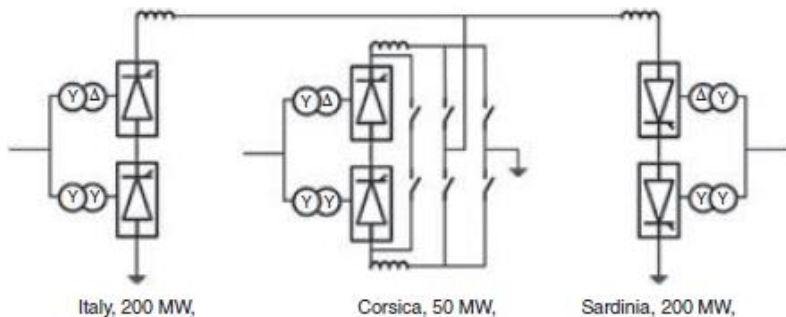
Aplicaciones

INTERCOLOMBIA

- **Redes asíncronas (50/60 Hz)/ HVDC**, interconectar las redes y conexión de redes síncronas (comercio de electricidad entre países)
- **Aumento de la demanda de energía**, necesidad de redes eléctricas en áreas urbanas, alto costo y escases de la tierra (Servidumbres)/ HVDC, **Menor uso de la tierra**, cable subterráneo. **Evita la construcción de generadores** en la ciudad.
- **Aplicaciones en alta mar.** (Alimentación de plataformas petrolíferas o de gas)/HVDC, Cable submarino, menor peso, espacio, CO₂, generadores en mar abierto.

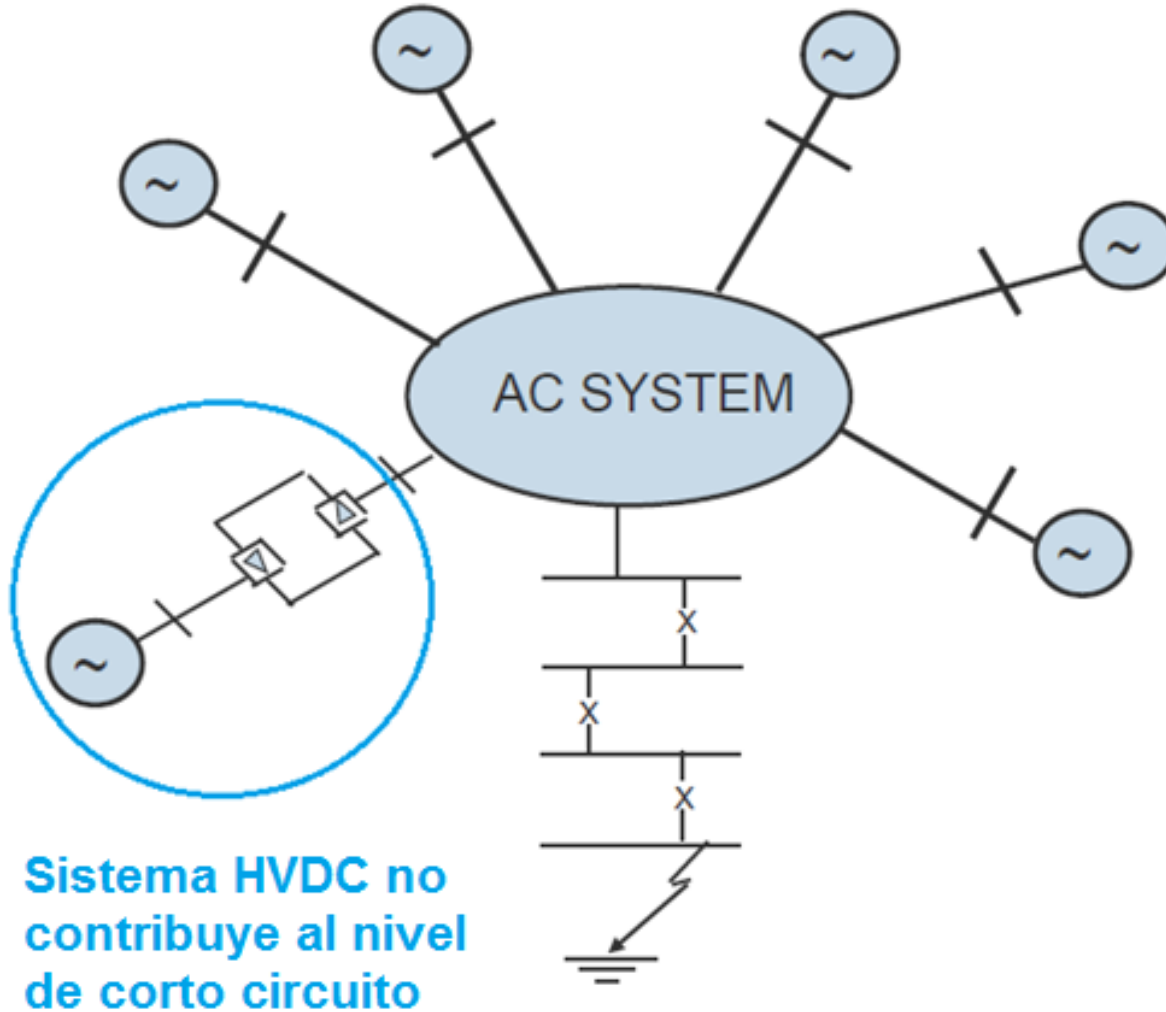


- Incorporar fuentes de energía eólica a la red (VSC). Arranque autónomo (Oscilador), menor espacio.
- Sistemas multiterminales



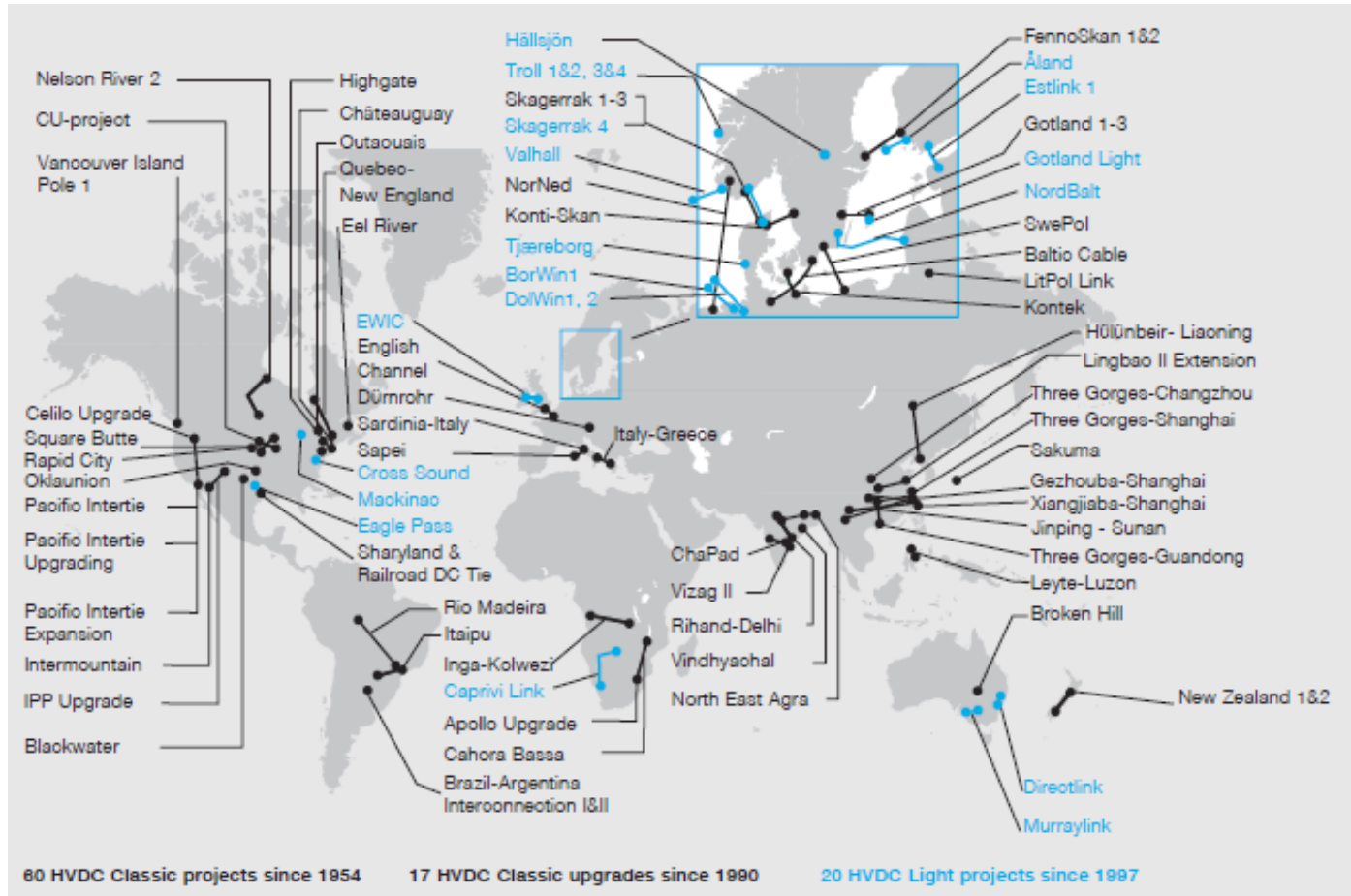
- Mejora la **estabilidad de voltaje** (VSC, Capacidad de intercambio de potencia reactiva) y **previene Black-outs** (Flujo de potencia controlado, Sistemas HVDC actúan como Firewalls para eventos en cascada).
- Mejora la **estabilidad de la frecuencia** (Control puede ser configurado para regular el intercambio de potencia)

Aplicaciones



Nivel de corto circuito de una red AC

Fuente: http://www.nuevamineria.com/site/sm/pre_bonchang.pdf



Fuente:

https://library.e.abb.com/public/aff841e25d8986b5c1257d380045703f/140818%20ABB%20SR%2060%20years%20of%20HVDC_72dpi.pdf



Aplicaciones HVDC en Colombia

INTERCOLOMBIA

Interconexión con Panamá

¿Por qué usar HVDC para la interconexión Colombia - Panamá?

De acuerdo estudios de conexión realizados para este enlace, las **soluciones en AC** tienen importantes **restricciones**:

- Se presentan **modos de oscilación con amortiguamiento negativo**, que comprometen la estabilidad de los sistemas
- Se encuentran **problemas en el control de tensión** en la **fase de energización** y en **condiciones de baja carga**

Fuente: Interconexión Eléctrica Colombia Panamá S.A.



Interconexión con Panamá

INTERCOLOMBIA

Descripción del Proyecto

- El proyecto será desarrollado **en tecnología HVDC**, la cual representa grandes beneficios técnicos, económicos y ambientales.
- **Línea de transmisión eléctrica desde la subestación Cerromatoso 500 kV** (Departamento de Córdoba) **hasta la subestación Panamá II 230 kV** (Provincia de Panamá)
- El recorrido aproximado será de **500 kilómetros** y su capacidad de **transporte de energía de 400 MW**, a un nivel de **tensión de 300 kV**
- Su desarrollo se enmarca dentro de los objetivos de integración de la Región Andina con Centroamérica

Fuente: Interconexión Eléctrica Colombia Panamá S.A.



Fuente: Interconexión Eléctrica Colombia Panamá S.A.

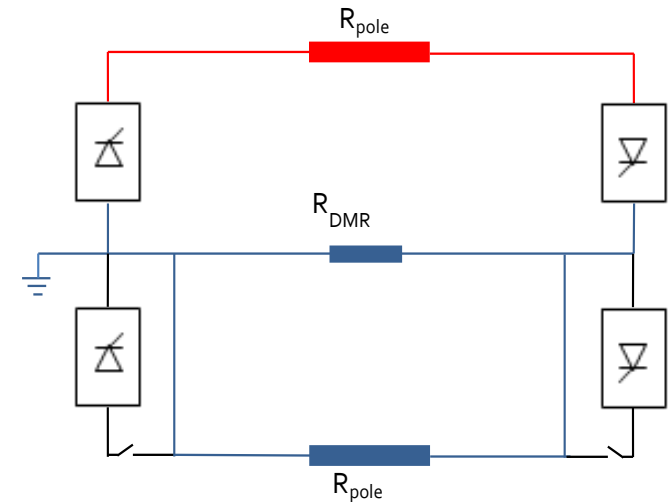
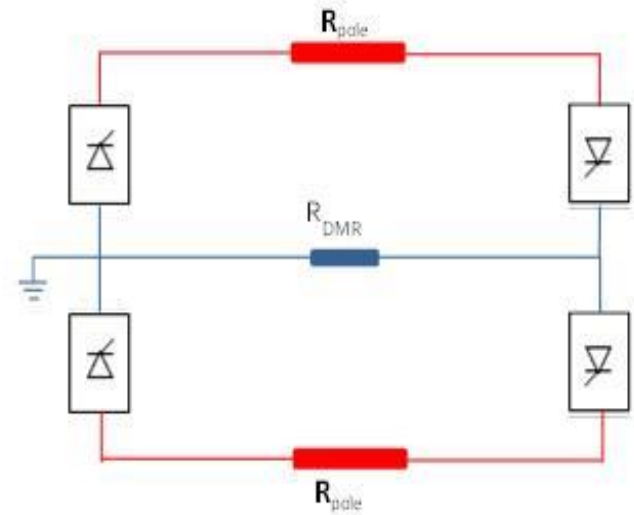
Configuración operativa bipolar

- Operará en un modo bipolar con retorno metálico dedicado (DMR)

Configuración operativa monopolar

En caso de contingencia de cualquier polo de la estación conversora:

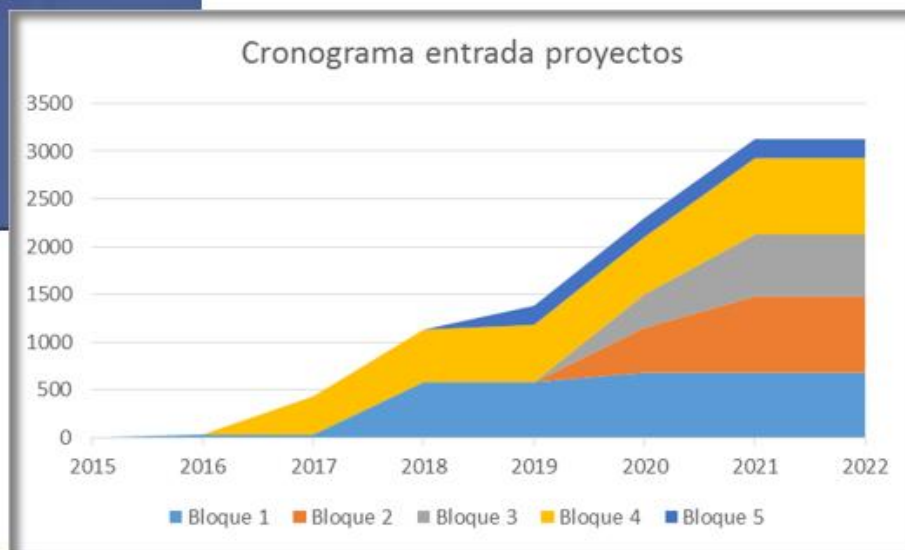
- Monopolar con el camino de retorno a través de la línea de polo en paralelo con el DMR.
- Monopolar con el camino de retorno a través de la línea de polo o a través del conductor metálico



Fuente: Interconexión Eléctrica Colombia Panamá S.A

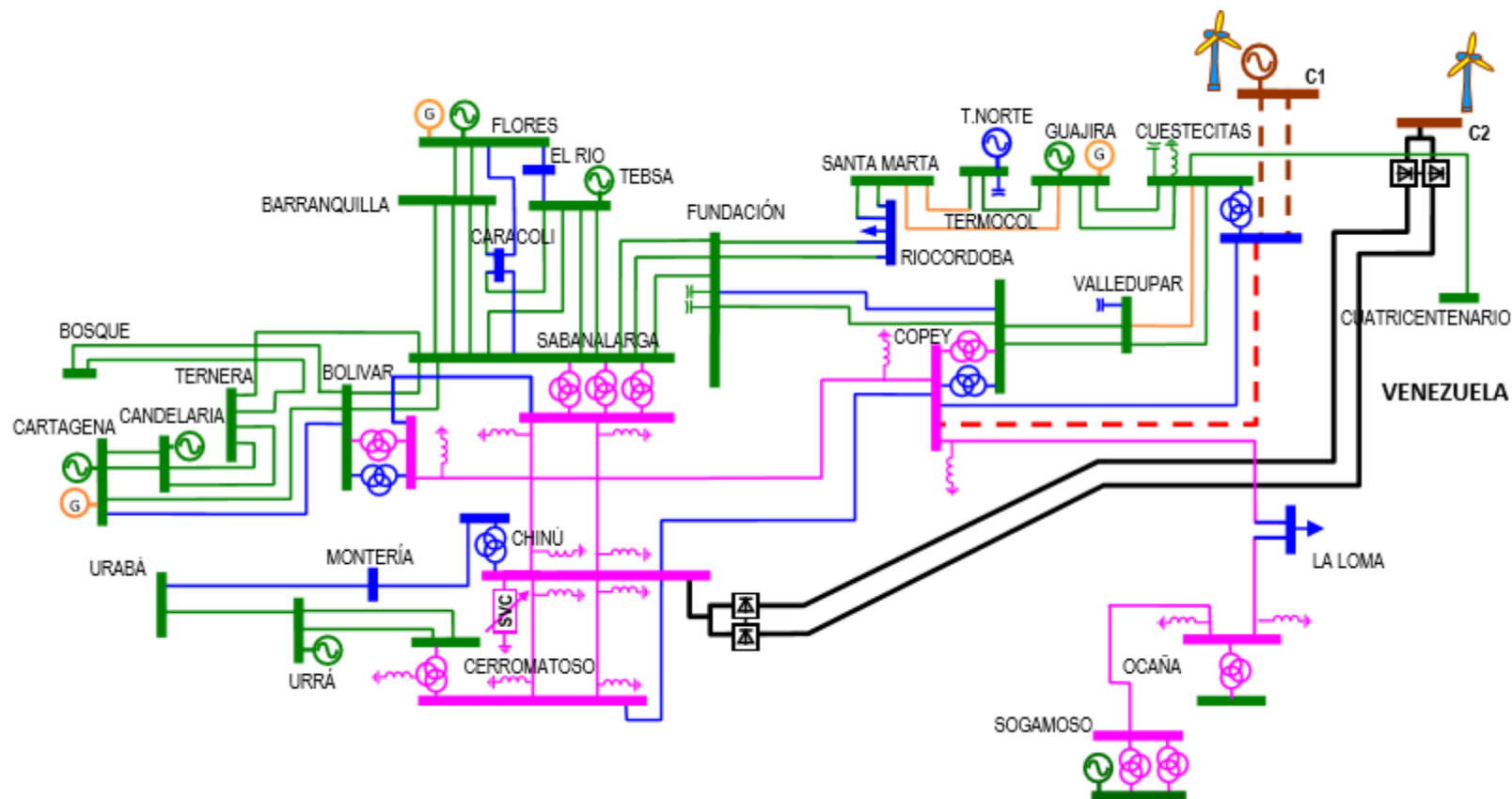
Bloques de generación eólica en la Guajira

INTERCOLOMBIA



Fuente: www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/noticias/plan-de-expansion-de-referencia-generacion-y-transmision-2015-2029

Posible capacidad de transmisión: 3131 MW



Conexión del recurso eólico en la Guajira (Análisis 7)

¿Preguntas?

1. C. Joe-Uzuegbu and G. Chukwudebe , "High Voltage Direct Current (HVDC) Technology:An Alternative Means Of Power Transmission," 2011.
2. B. Gemmell, J. Dorn, D. Retzmann and D. Soerangr, "Prospects of Multilevel VSC Technologies for Power Transmission".
3. A. Timofejevs, D. Gamboa, M. Liserre, R. Teodorescu and S. K. Chaudhary, "Control of transformerless MMC-HVDC during asymmetric grid faults," IEEE, Aalborg East, 2013.
4. A. Timofejevs and D. Gamboaa, "Control of MMC in HVDC Applications," 2013.
5. ABB, "Special Report 60 years of HVDC," 2014.
6. M. Monterrubio Diez, "Transporte de energía eléctrica en corriente continua. Enlaces HVDC-VSC.," 2013.
7. M. Barnes and A. Beddard, "Voltage Source Converter HVDC Links - The state of the Art and Issues Going Forward," Elsevier, 2012
8. F. Wang, L. Bertling and T. Le, "An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems," Cigré, 2011
9. N. Moham, T. M. Undeland and W. Robbins P., Power Electronics, converters, aplicaciones and design, John Wiley & sons, 1995.

10. Alstom, Agosto 2011. [Online]. Available:
http://mydocs.epri.com/docs/publicmeetingmaterials/1108/6XNSUMJE9MT/Alstom_-_MacLeod-_VSC_HVDC_Converter_Design_with_Fault_Blocking_Capability.pdf.
[Accessed Julio 2016].
11. D. Jovcic and k. Ahmed, High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids, 2015.
12. J. Arrillaga, High voltage direct current transmission, London: The institution of Electrical Enginners , 1998.