

Corriente continua en líneas de alta y extra alta tensión

Ing. Leonardo Casteras
UTN Regional Buenos Aires
lcasteras@frba.utn.edu.ar

Nota de la redacción. El artículo aquí presentado fue elaborado por Editores SRL en base a la presentación que el ingeniero Leonardo Casteras hizo en la reunión del 12 de noviembre convocada por el Instituto Argentino de Energía "Gral. Mosconi", disponible en YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=e6kiOU2WaQE>). El trabajo, además, se formula en el marco de proyectos de investigación sobre corriente continua de UTN Buenos Aires, junto con UTN Pacheco, el centro de investigaciones de Pacheco y la colaboración de la UCA.

La corriente alterna ha predominado en las redes eléctricas, y así sigue siendo. Pero a partir del desarrollo de la electrónica de potencia, la corriente continua en extra alta tensión viene a solucionar problemas de complejidad de redes de corriente alterna. Las redes de corriente alterna se volvieron muy complejas, muy malladas y tienen problemas de estabilidad, entre otros, que puede resolver de manera muy efectiva la corriente continua, como se verá en lo que sigue.

Ventajas del sistema HVDC

- » Transmisión de grandes bloques de potencia a grandes distancias
- » Posibilidad de acoplar asincrónicamente dos sistemas eléctricos
- » Posibilidad de operar con un solo polo
- » Mejora la estabilidad de la red, dado el acoplamiento asincrónico.
- » Reducción de franja de servidumbre
- » Reducción de costos operativos
- » Aislamiento de transmisión de señales inestabilizantes entre sistemas

Actualmente, en el mundo hay instalados sistemas HVDC por un potencia total de 317.721 MW.

Los sistemas que están vinculados en corriente alterna se pueden vincular en continua, o se puede alimentar radialmente otro sistema con la posibilidad de tener un vínculo asincrónico con dos objetivos principales: adaptar la frecuencia (en alterna, interconectar redes de distinta frecuencia no es posible) o aislar fallas o problemas de estabilidad en redes aledañas.

Otra ventaja destacada es la posibilidad de operar sin un polo. La corriente alterna es trifásica y si se pierde una fase, no se puede seguir transmitiendo con las otras dos. En continua, en cambio, si se pierde un polo, aún hay posibilidad de seguir transmitiendo, se reduce a la mitad, pero no se pierde el vínculo.

Principales aplicaciones

- » Transmisión entre dos subestaciones
- » Conversoras back-to-back (adaptadores de frecuencia)
- » Sistema de transmisión HVDC multiterminal
- » Conexión de unidades de generación (energía renovable) a la red
- » Interconexión con sistemas aislados remotos (islas)



Una cadena típica de HVDC puede considerarse con un generador en un extremo, línea de transmisión de alterna que llegan hasta la estación convertidora, un electroducto, otra estación convertidora para hacer la ondulación, la red de alterna de llegada, las líneas de distribución, y el otro extremo, los lugares de consumo.

HVDC en el mundo

Actualmente, en el mundo hay instalados sistemas HVDC por un potencia total de 317.721 MW, de los cuales 285.397 son de electroductos (95.705 km), y 32.324, de sistemas back-to-back. En proyecto, hay 56.230 MW (15.799 km).

Como se puede observar, esta tecnología tiene gran relevancia, sobre todo en países de grandes superficies, por el beneficio que significa para cubrir grandes potencias y grandes distancias. La proporción de potencia instalada HVDC en el mundo es la siguiente:

- » África: 1%
- » América del Norte: 10%
- » América del Sur: 6%
- » Asia: 70%
- » Europa: 12%
- » Oceanía: 1%

En el ranking de sistemas instalados de mayor potencia, llama la atención la aparición, en el sépti-

mo lugar, de la instalación de Río Madeira, en Brasil (ver tabla 1).

Comparación entre sistemas de corriente alterna y de corriente continua

La franja de servidumbre es el principal motivo de que la corriente continua implique un electroducto para unir dos regiones punto a punto. Para la misma potencia transportada, la cantidad de líneas en alterna es superior a la de continua. Mientras mayor sea la distancia que se necesita cubrir, mayor será el ahorro implicado.

Por otro lado, se sabe que la corriente alterna tiene un límite de distancia en la transmisión de potencia, por efecto de la reactancia de la línea según la fórmula 1.

$$P = [(V_s V_r) / X_{L(l)}] \cdot \text{sen}(\delta) \quad [1]$$

Como se observa, la potencia depende de la longitud, por lo tanto, si se desea transmitir potencia en grandes distancias, es necesario colocar estaciones intermedias de maniobra y compensación. En corriente continua, este problema no existe. El sistema permite transmitir por largas distancias con un solo vínculo.

En continua hay pérdidas por efecto corona, porque depende del gradiente del potencial alrededor del conductor. Pero si bien ese efecto no se elimina,

Puesto	Continente	País	Longitud	Tensión	Potencia	Año de inicio	Tipo de conversión
1	Asia	China	3.324 km	1.100 kV	12.000 MW	2019	Thyr
2	Asia	China	1.620 km	800 kV	10.000 MW	2017	Thyr
3	Asia	China	2.192 km	800 kV	8.000 MW	2014	Thyr
4	Asia	China	1.660 km	800 kV	8.000 MW	2014	Thyr
5	Asia	China	1.489 km	800 kV	8.000 MW	2021	Thyr/IGBT
6	Asia	China	2.090 km	800 kV	7.200 MW	2013	Thyr
7	América del Sur	Brasil	2.375 km	600 kV	7.100 MW	2013	Thyr
8	Asia	China	2.000 km	800 kV	6.400 MW	2015	Thyr
9	Asia	China	1.980 km	800 kV	6.400 MW	2010	Thyr
10	Asia	China	1.800 km	800 kV	6.400 MW	2016	Thyr

Tabla 1. Ranking de potencia de sistemas HVDC instalados en el mundo

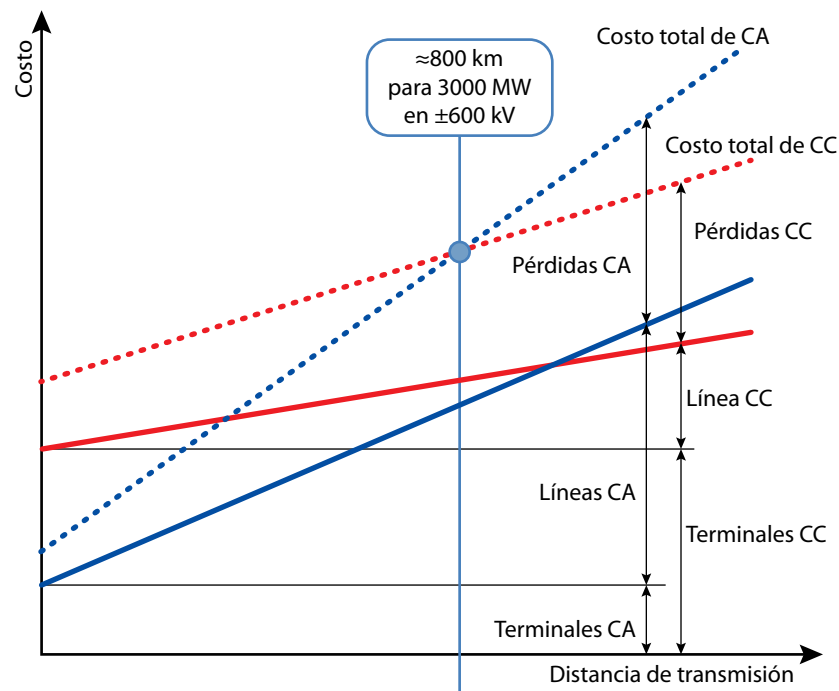


Figura 1. Costo total de una línea de alta tensión en alterna y en continua en función de la distancia

las pérdidas son menores. Las pérdidas joule son de corriente puramente resistiva, por lo que la corriente no se incrementa por el transporte de reactiva.

Una comparación entre alterna y continua se muestra la figura 1.

Las líneas rellenas no consideran las pérdidas, y la punteadas sí. Si se evalúa el costo con respecto a la distancia, mientras mayor es la distancia, más conveniente es la continua, es decir, realizar el electroducto y la interconexión con corriente continua. La pendiente depende de la franja de servidumbre, y llega un punto de conveniencia en el que para distancias mayores a ese punto, conviene económicamente trazar la línea de corriente continua.

La distancia del punto clave puede variar, pero está aproximadamente entre los 800 y los 1.000 km. Dependerá del nivel de tensión y de la potencia que se transmitirá. En países con grandes distancias entre fuente de generación y demanda, se convierte en una opción interesante.

Respecto de costos, un proyecto en alterna de 5.000 MW en una distancia de 1.400 km y con vida

útil de 30 años, considera el total del costo, del cual el 34% son pérdidas, el 54% son costos de línea y el 12% son costos de estación transformadora. Pero para la misma potencia en corriente continua, con nivel de tensión de 500 kV, el costo total se reduce un 17% respecto de alterna, y los costos serán de 30% de pérdidas, 37% de línea y 33% de estaciones convertidoras. También en continua, pero con un nivel de tensión de 800 kV, los costos totales implican un 64% de lo que sería en alterna, de lo cual 36% se va en pérdidas, 25% de costos de línea y 39% de costos de la estación convertidora.

Mientras mayor es la distancia, llega un punto en el que es más conveniente la continua, es decir, realizar el electroducto y la interconexión con corriente continua.

Tecnologías existentes

En la estación convertidora se necesita electrónica de potencia que realice la rectificación en un extremo para transmitir en corriente continua por la línea, y en el otro extremo, un esquema similar para realizar la ondulación. Entonces, se utilizan dos grandes tipos de tecnologías HVDC:

- » LCC (del inglés, "Line Commutated Converter")
 - Conmutación de válvulas realizada por la tensión de línea
 - Tiristores como elemento de conmutación
- » VSC (del inglés, "Voltage Source Converter")
 - Autoconmutados con convertidor IGBT
 - Utiliza PWM

LCC es la considerada como clásica, y maneja altos niveles de tensión y potencia. VSC es la conocida como tecnología nueva o moderna, limitada a niveles de tensión, pero con la particularidad de no necesitar potencia reactiva del sistema. LCC toma un gran nivel de potencia reactiva del sistema, en el orden del 50 o 60% de la potencia activa transmitida, dado el principio de funcionamiento de un tiristor. Para lo que es multiterminal se suele recurrir a VSC y para punto a punto, LCC.

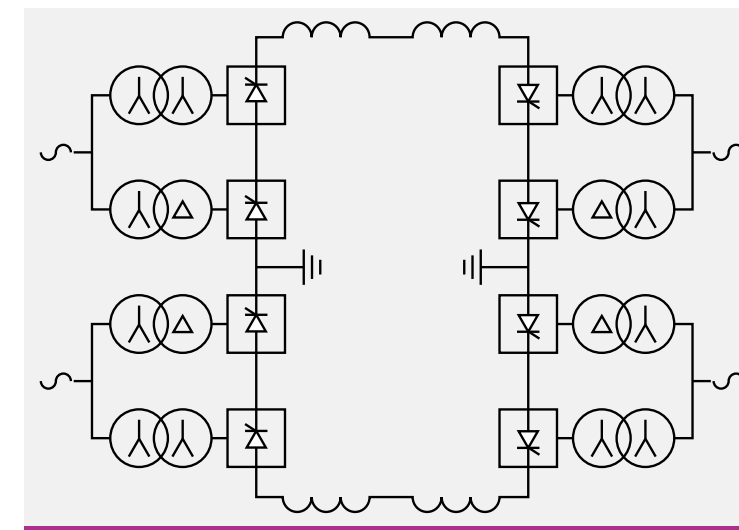


Figura 2. Configuración bipolar típica

[En alterna,] si se desea transmitir potencia en grandes distancias, es necesario colocar estaciones intermedias de maniobra y compensación. En corriente continua, este problema no existe.

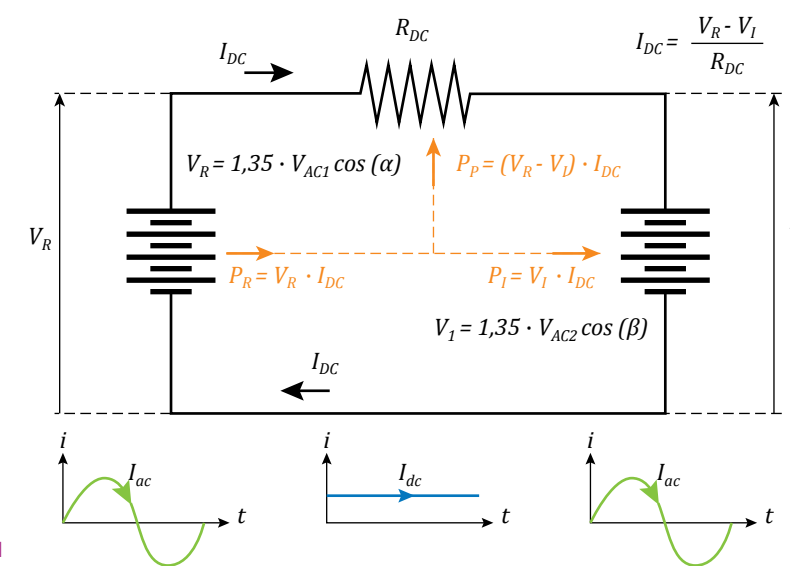


Figura 3. Esquema circuital del sistema de transmisión

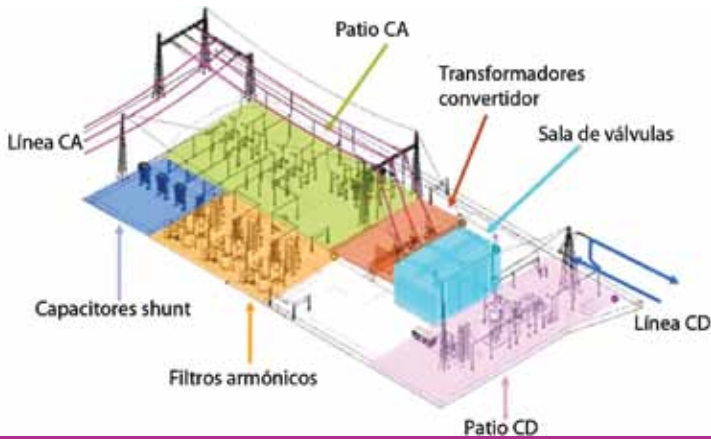


Figura 4. Estación convertidora monopolar de 600 MW/450 kV, cc, arreglo clásico, 80 x 180 m

Configuraciones típicas

La bipolar es una de las configuraciones típicas. Tiene un polo por el que va la corriente y otro por el que vuelve, ambos conectados a un sistema de convertoras que toman de la red de alterna de un extremo, y con la posibilidad, a partir de electrodos de puesta a tierra, realizar un camino de retorno de la corriente en caso de que falle alguno de los dos polos (ver figura 2).

Otro esquema es el de multiterminal, aunque no se utiliza mucho dado que es muy limitado, y se suele utilizar la tecnología VSC.

Otra configuración es la convertora back-to-back, que es la que está presente en la interconexión Argentina-Brasil a través de la convertora en Garabí (Brasil), de 2.100 MW instalados. El circuito de corriente continua es una fuente que inyecta una corriente en continua, que va por un polo, regresa por el otro y transmite potencia en ese sentido. La únicas pérdidas son las resistivas de la línea (ver figura 3).

Las variaciones de tensión deben estar limitadas. Y de hecho, la potencia de cortocircuito del nodo es inversamente proporcional a las variaciones de tensión, entonces mientras mayor potencia de cortocircuito haya, mejor será el nodo donde se interconecte la convertora, porque las variaciones de tensión estarán acotadas.

Otro punto que se debe evaluar a la hora de conectar una convertora es el nivel de ESCR ("Effective Short Circuit Ratio"), que tiene en cuenta la potencia reactiva, y en general se suele evaluar como potencia de cortocircuito sobre potencia activa a transmitir por el vínculo. Si el ESCR es mayor que 3 el nodo es muy fuerte; si es mayor que 2 y menor que 3, el sistema es moderadamente fuerte, y si es menor que 2, el sistema es débil, no aconsejable.

Estructuras utilizadas en líneas HVDC

La estación convertidora cuenta con la llegada de la red de alterna, el sistema de barras, la aparatamiento de seccionadores e interruptores, un campo para capacitores, filtro de armónicos, transformador para altas tensiones, sala de válvulas y la playa de continua (ver figura 4).

Es importante el sistema de enfriamiento. La electrónica de potencia genera gran calentamiento en las instalaciones, y esto requiere un sistema muy robusto de refrigeración, quizá duplicado o triplicado, porque termina siendo el núcleo vital del funcionamiento de la instalación.

En cuanto a electroductos, están las torres típicas con bipolos, estructuras autosoportadas de retención angular y de retención, o el cable subterráneo o submarino. En el caso de estos últimos, vale aclarar que la longitud de conveniencia está alrededor de los 40 km. En todo este artículo, se ha hablado siempre haciendo foco en redes aéreas. ■