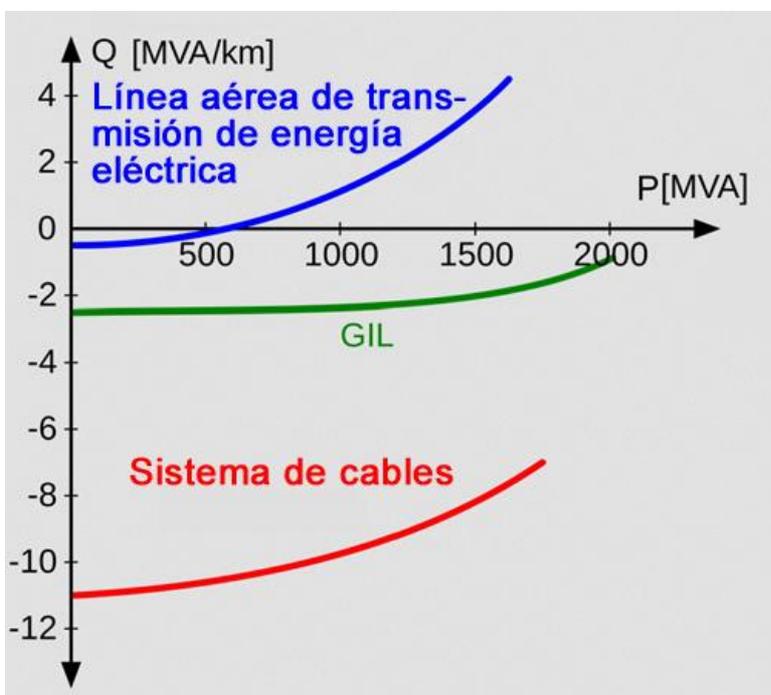


Corriente continua para transmisión a larga distancia

En el pasado, la energía eléctrica era transmitida a grandes distancias utilizando corriente alterna de alta tensión o corriente trifásica (3 fases). La razón para esto fue, históricamente hablando, la transformabilidad arbitraria de la corriente alterna a la tensión requerida. Para el transporte fue altamente transformada, y en el sitio pudo ser transformada de nuevo hacia abajo para propósitos de la distribución regional o local. Esta ventaja de la corriente alterna, que fue reconocida por Tesla y Westinghouse en los EE. UU., y por Oskar von Miller en Alemania y Europa, hizo posible en primer lugar la electrificación del mundo. Sin embargo, la situación está empezando a cambiar porque, si miramos con más cuidado, el transporte de energía mediante corriente alterna también tiene algunas desventajas. Hoy en día, la transmisión de corriente continua de alto voltaje (CCAV) con menor pérdida se utiliza cada vez más para el transporte de grandes potencias a largas distancias. La CCAV también se utiliza para los denominados acoplamientos cortos, es decir, para la conexión de redes asíncronas. Si se conectan varias fuentes de electricidad de corriente alterna juntas, la frecuencia y el ángulo de fase deben estar completamente sincronizados.

¡La transmisión de corriente alterna a grandes distancias conduce a mayores pérdidas!

La resistencia óhmica causa pérdidas en cualquier red de distribución de energía eléctrica, ya sea de CA (corriente alterna) o de CC (corriente continua). Además de estas pérdidas óhmicas, las redes de corriente alterna también experimentan pérdidas adicionales. Las razones de las pérdidas para corriente alterna relativamente grandes en comparación con la corriente continua (CC) residen en tres fenómenos diferentes particulares de la corriente alterna: La **resistencia capacitiva**, la **resistencia inductiva** y el llamado **efecto pelicular**.



La **pérdida capacitiva** es causada por el cambio constante en la dirección de la corriente, que se produce 50 veces por segundo en el caso de la red de distribución de energía eléctrica local. Esto tiene un efecto similar a la carga y descarga de un condensador (capacidad), para lo cual se requieren corrientes de carga adicionales (las llamadas corrientes reactivas). Como resultado se crea un efecto como si se presentara una resistencia capacitiva adicional. Esto significa que una parte de la potencia es empujada hacia delante y hacia atrás en la red como **“potencia reactiva”** (“reactiva” = no utilizable).

Fig. 1: Potencia reactiva requerida Q 89n MVA / km de una línea CA de 380 kV en función de la potencia transmitida.

Gráfico de wdwd - Trabajo propio, diagrama basado en conjunto de datos de: “Línea de Salzburgo de 380 kV, dictamen pericial de B. R. Oswald, Instituto para Ingeniería de Suministro de Energía y Alta Tensión, Universidad de Hannover, 27.12.2007” (licencia: CC BY-SA 3.0) editado por Siemens Stiftung

Esta potencia “reactiva” no sólo es inutilizable y bloquea la línea, por así decirlo; también está asociada con pérdidas óhmicas. Este efecto capacitivo es especialmente importante para los cables subterráneos y submarinos. Debido a las propiedades dieléctricas del agua y la tierra, que son muy diferentes a las del aire, estos cables tienen un mayor efecto condensador, y por lo tanto causan mayores pérdidas.

La pérdida inductiva es causada por el hecho de que una cierta parte de la red de distribución de energía eléctrica (la propia línea o ciertos consumidores) actúa como bobina. Por lo tanto, fluyen corrientes adicionales para crear o reducir campos magnéticos dentro de estas bobinas. Esto también implica una corriente reactiva inútil, pero con pérdidas resistivas.

La tercera fuente de pérdidas es **el efecto pelicular**. Por razones físicas, la corriente alterna no utiliza completamente la sección transversal del conductor. La corriente alterna genera corrientes parásitas en el conductor, que causan campos magnéticos dentro del mismo, donde frenan el flujo de corriente. La reducción de la sección transversal efectiva del conductor causada por el efecto pelicular depende de la frecuencia de la corriente. Esto significa que un conductor de la misma sección presenta una mayor resistencia para corriente alterna que para corriente continua.

En las redes eléctricas de alta tensión de corriente eléctrica, se calcula que la pérdida por cada 1.000 km de transmisión se sitúa entre el 6 % y el 10 %. En las redes eléctricas de alta tensión de corriente continua, por otra parte, en las que sólo se producen pérdidas óhmicas, se espera que la pérdida sea de alrededor del 4 % por cada 1.000 km.

¿Cómo funciona la transmisión de corriente continua de alto voltaje (CCAV)?

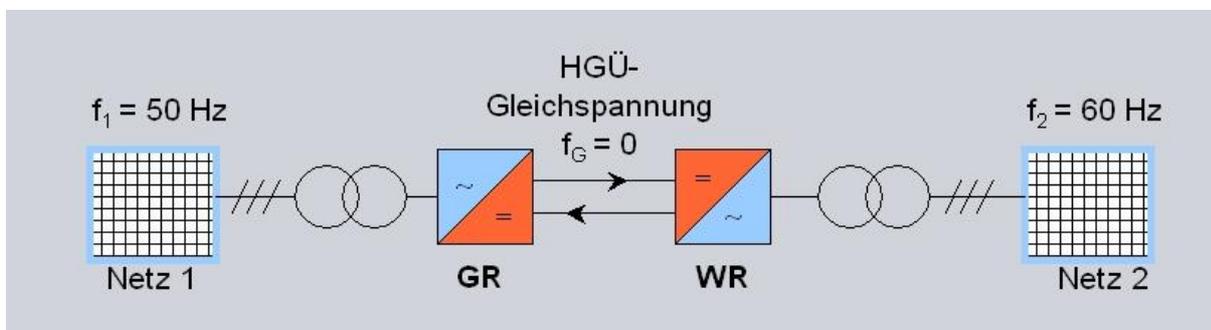


Fig. 2: Esquema funcional de CCAV. RE: Rectificador, IV: Inversor de potencia.

Por cierto, en inglés CCAV se abrevia como HVDC (High Voltage Direct Current). Inicialmente, la tensión de la central eléctrica (máximo 60 kV) se eleva a 800 kV para CCAV. Luego es convertida en voltaje de corriente continua con un rectificador (por ejemplo, un tiristor). Con esta corriente continua de 800 kV se realiza la transmisión con pérdidas relativamente bajas sobre 1.000 kilómetros y más. En el destino, la corriente continua se convierte de nuevo en corriente alterna con un inversor de potencia (tiristor) y se alimenta a la red de corriente alterna. La frecuencia y la fase son adaptadas con especial precisión a la red de corriente alterna.

CCAV también para la conexión síncrona de redes de distribución de energía eléctrica

Esta tecnología CCAV también presenta ventajas para la conexión de diferentes fuentes de electricidad o redes de distribución de energía eléctrica: La alimentación sincronizada en frecuencia y fase de la corriente alterna recuperada de la corriente continua es posible sin problemas, gracias al exacto control electrónico de la conversión.

Esto se hizo aparente, por ejemplo, durante el apagón (corte de electricidad) generalizado en América del Norte en 2003 cuando el sistema de suministro de Quebec permaneció intacto gracias a esta función de protección de sus enlaces de CCAV, mientras que Ontario, conectada síncronamente a los EE. UU. sufrió las consecuencias completas del apagón. Un apagón, como el que se extendió en Europa desde Frisia Oriental a Marruecos el 4 de noviembre de 2006, también podría evitarse con seguridad en el futuro construyendo redes troncales de CCAV a escala europea (principales líneas de interconexión).

Entretanto, la tecnología CCAV también se utiliza para la alimentación síncrona de energía eólica en la red. Debido a la fuerte fluctuación de las velocidades del viento, el esfuerzo de control para la velocidad de los generadores de las turbinas eólicas era extremadamente alto. (La frecuencia de una corriente alterna suministrada por el alternador depende de la velocidad. Para lograr exactamente 50 Hz con un generador de 2 polos tendría que ser constantemente de 3.000 rpm). Hoy en día, las corrientes alternas de voltaje relativamente bajo y frecuencia fluctuante generadas por las turbinas eólicas son primero transformadas y rectificadas y luego alimentadas a la red síncrona con frecuencia y fase síncronas, después de una inversión subsecuente. Hoy en día, los parques eólicos marinos también están conectados a la red de distribución de energía eléctrica del continente a través de CCAV.

¿Cuándo es digna de consideración la transmisión de CCAV?

Un sistema de CCAV es económicamente viable para líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica con una longitud de 600 km o más y una capacidad de potencia de 1.000 MW. Este punto de equilibrio se deriva de los parámetros siguientes de las diferentes tecnologías de transmisión:

- Tecnología CCAV: bajas pérdidas por transmisión, bajos costos de la línea pero costos básicos altos de la instalación del convertidor.
- Tecnología de corriente alterna (CA): pérdidas por transmisión más altas, costos más altos de la línea, pero costos básicos bajos en los extremos de la línea de transmisión.

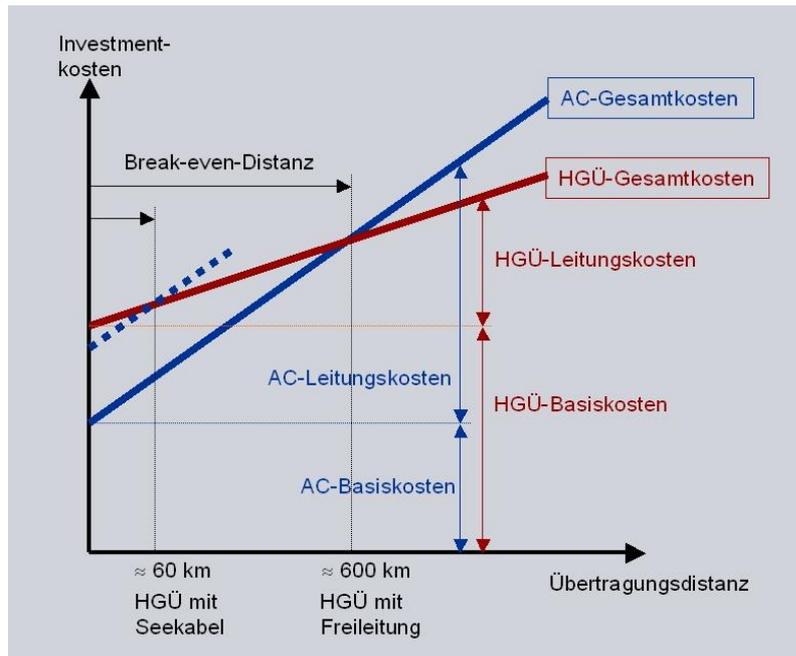


Fig. 3: Distancia al punto de equilibrio.

Cuando es necesario transportar grandes cantidades de energía eléctrica a través de un cable submarino, por ejemplo, desde un parque eólico costa afuera, entonces el punto de equilibrio es tan bajo como de 50 a 70 km. Para esto es suficiente utilizar un cable de solo un conductor si se incorpora el terreno o el agua marina en el circuito como el conductor de retorno.

Por razones de compatibilidad ambiental (migración de peces, etc.), sin embargo, por lo general se evita la conducción de retorno subterránea, o a través del agua de mar en los nuevos proyectos de cables submarinos, mediante el uso de al menos dos cables.

Menos líneas, anchura de vía más corta y campos de dispersión más débiles gracias a la CCAV

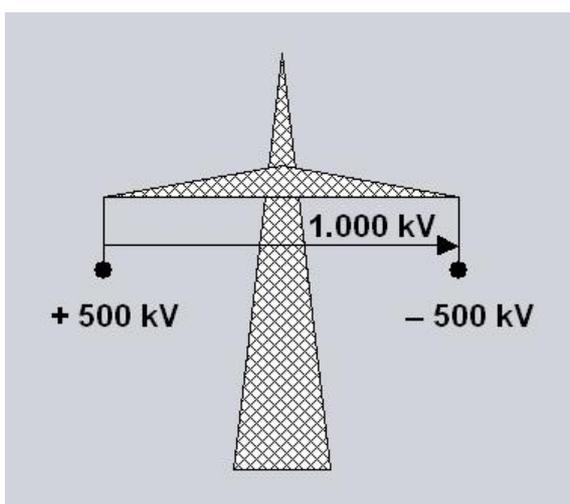


Fig. 4: Transmisión de energía bipolar para voltaje de corriente continua.

Otra ventaja de las tecnologías HVDC o CCAV es el menor número de cables requeridos.

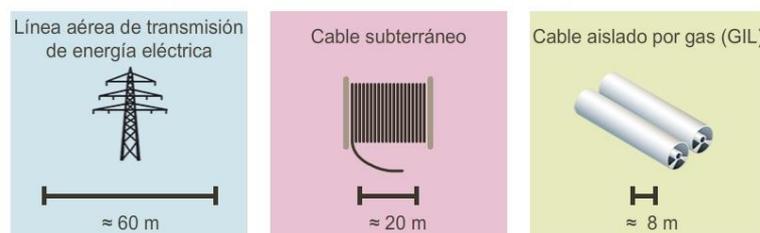
Para sistemas trifásicos se requieren al menos tres líneas. En la práctica, a menudo se encaminan en paralelo dos sistemas redundantes con tres líneas cada uno. La división de cada fase en varias líneas reduce el efecto pelicular en caso de tensión alterna y reduce las descargas de corona. (Una descarga de corona es una descarga eléctrica no deseada en un medio no conductor, por ejemplo, en el aire)

Con CCAV, sin embargo, sólo se requieren dos cables. Especialmente para las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica con postes y brazos, se pueden reducir considerablemente las necesidades de espacio y, por lo tanto, los costos.

Incluso en el caso de los cables subterráneos y submarinos, donde las necesidades de espacio son relativamente pequeñas, el menor número de cables necesarios para transmisión CCAV vale la pena. Además, los cables subterráneos y submarinos en la tecnología de corriente alterna trifásica sólo se utilizan para distancias de hasta 50 km, debido a los coeficientes capacitivos relativamente altos.

Ancho de línea y campos magnéticos en líneas de alta tensión

Ancho de línea requerida en diversas técnicas de conducción para CCAV en 4 GVA



Intensidad de campo magnético en función de la distancia al cable

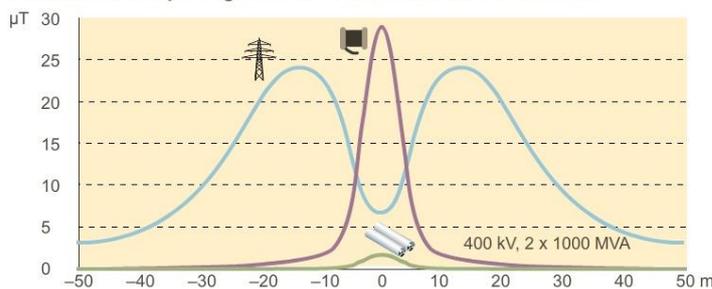


Fig. 5: Transmisión de energía bipolar para voltaje de corriente continua.

La electrónica detrás de la CCAV

El primer proyecto de transmisión comercial de corriente continua, que en aquel momento todavía utilizaba corriente continua e inversores de potencia basados en vapor de mercurio, se llevó a cabo en 1951 en la línea Kashira - Moscú en Rusia (100 kV, 100 km de línea aérea de transmisión de energía eléctrica, 30 MW) utilizando la planta alemana Elba / Berlín de Elektrowerke AG, que fue desmantelada tras el final de la guerra. El primer proyecto mundial de gran escala en CCAV con rectificadores e inversores de potencia basados en silicio (tiristores) fue el transporte de energía eléctrica desde la central hidroeléctrica Cahora Bassa en Mozambique, a través de 1.414 km, hasta Johannesburgo en Sudáfrica, a un voltaje de transmisión de 533 kV, con una capacidad de potencia de 1.920 MW.

Los tiristores convierten corriente alterna en corriente continua y viceversa

Una válvula rectificadora solo permite el paso de aquellas porciones de corriente alterna que tienen la polaridad correcta. La estructura de un tiristor es esencialmente la misma que la de un diodo. No se permite el paso de corriente en lo absoluto en la dirección opuesta a la de conducción.

Si se consideran puramente los costos, la línea aérea de transmisión de energía eléctrica es la mejor solución. Sin embargo, el uso del terreno, la desfiguración del paisaje y el impacto de los campos eléctricos y magnéticos sobre la población son también criterios importantes para la planificación de los principales tramos de transmisión a larga distancia.

Desde este punto de vista, la tecnología CCAV en forma de cables subterráneos resulta probablemente el mejor compromiso.

El tiristor puede ser transferido a un estado conductivo a través de una tensión de control en la puerta en la dirección de transmisión. La ventaja de esto es que el tiristor combina en un componente las funciones de un rectificador y de un conmutador de alta potencia.

Para mejorar el control de la tecnología del tiristor, la funcionalidad de los componentes de electrónica de corrientes fuertes han tenido un mayor desarrollo, de modo que hoy día hay disponibles componentes muy avanzados para uso en sistemas CCAV.

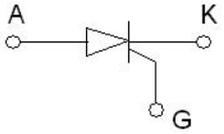
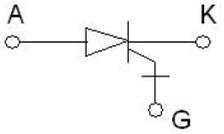
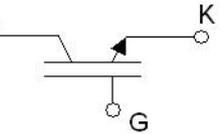
Ventiltyp	Thyristor	IGCT	IGBT
Schaltungs-symbol			
	A = Anode; K = Kathode; G = Steueranschluss (Gate)		
Ansteuerung	Ein: Stromimpuls an G Aus: Stromnulldurchgang zwischen A und K	Ein/Aus durch Stromimpuls an G	Gesteuert durch variable Spannung an G – K

Fig. 6: Comparación de componentes de electrónica de corrientes fuertes.

Se utilizan tiristores de activación eléctrica (desarrollo especial de tiristores de seis pulgadas para proyectos de gran escala en China con corrientes nominales de hasta 4,5 kA y capacidades de potencia de transmisión de CCAV de hasta 7.200 MW a ± 800 kV) así como tiristores de activación por luz láser hasta un tamaño de oblea de cinco pulgadas (corriente nominal de 4 kA).

La característica específica de los tiristores activados por luz láser es un circuito especial, con obleas integradas, de protección contra sobrevoltaje, el cual garantiza confiabilidad máxima de funcionamiento.

Los adelantos más recientes en CCAV son los módulos IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor - Transistor bipolar de puerta aislada). Pueden utilizarse para el funcionamiento auto conmutado, es decir, incluso sin voltaje de la red, para generar “sintéticamente” en pasos finos, a partir de la corriente continua una tensión de red “electrónica” prácticamente libre de armónicos.

Esta característica de “capacidad de puesta en marcha bajo condición de apagón (“Blackstart Capability”)” permite que las redes que han colapsado vuelvan completamente al régimen de servicio con la ayuda de la red aún “saludable”, sin ayuda alguna de centrales eléctricas o generadores. El intervalo de aplicación de esta moderna tecnología MMC actualmente se extiende hasta aproximadamente 1.000 MW; en otras palabras, es adecuada para capacidades medianas de potencia para líneas subterráneas y líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica.

Las ventajas de la transmisión CCAV, de un vistazo

La transmisión CCAV es técnicamente mucho más exigente que la transmisión convencional de corriente alterna de alto voltaje, pero tiene algunas ventajas clave:

- Es la única manera efectiva de transportar grandes cantidades de energía eléctrica a grandes distancias. Se eliminan todas las pérdidas de potencia reactiva causadas por corriente alterna, ya sea inductiva o capacitiva, y el efecto pelicular. La transmisión CCAV es económicamente factible para distancias mayores de 600 km. En el caso de cables submarinos, CCAV es competitiva para distancias de 50 a 70 km o más y para cables submarinos largos, no tiene alternativa.
- Los costos de la línea para una conexión CCAV son más bajos que para las líneas de transmisión de CA convencionales, ya que sólo hay que tender dos conductores. Por lo tanto, las torres para las líneas de alta tensión pueden tener un perfil más angosto.

- El sistema CCAV es la única opción para conectar técnicamente redes incompatibles con procesos de control o frecuencias de red diferentes, un criterio importante en la toma de decisiones en muchos países como China o India, donde existen una serie de redes regionales incompatibles. La capacidad de regular la potencia rápidamente en un sistema CCAV ayuda a estabilizar los sistemas trifásicos existentes a los cuales se conecta o se encamina paralelamente a los cuales.
- Por lo tanto, la CCAV es particularmente adecuada como “autopista energética” especialmente económica y estabilizadora para el transporte de grandes cantidades de energía eléctrica. En Alemania, por ejemplo, este es el caso de las tres líneas de extensión nort-sur previstas, que deben distribuir la energía eólica de forma uniforme en todo el país.