

# TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CORRIENTE CONTINUA

## TRANSPORTATION OF ELECTRICAL ENERGY IN DIRECT CURRENT

Víctor Gonzalo Rivera Acosta<sup>1</sup>, Mario José Valencia Salas<sup>1</sup>

(1) Universidad Católica de Santa María, Arequipa-Perú

**RESUMEN:** El presente trabajo pretende explicar las ventajas de transmisión de energía eléctrica en corriente continua, frente a la transmisión de energía eléctrica en sistemas de corriente alterna, como fuente energética en el uso sustentable para las viviendas y comercial. El uso alternativo de transmisión de energía en CD es una tendencia cada vez más predominante, especialmente para reducir las pérdidas que se presentan en sistemas en alterna y la mayor potencia de transmisión. Estos sistemas permiten reducir la tensión, en comparación con los sistemas trifásicos, como puede deducirse del peso relativo de conductor para una tensión máxima dada. Los métodos para conseguir grandes potencias a tensiones elevadas en corriente continua no han progresado al mismo ritmo que los adelantos en corriente alterna, y hoy día, casi no existen sistemas comerciales de alta tensión en corriente continua. El desarrollo de las aplicaciones industriales de la electricidad que iniciaron a fines del siglo XIX, se orientó sobre dos caminos, la corriente continua y la corriente alterna, esta última en distintas frecuencias que se fueron unificando en las hoy difundidas 50 y 60 Hz. Si se analiza cual es la mejor frecuencia para la transmisión de energía eléctrica a gran distancia, se observa que 50 Hz es mejor que 60 Hz, y si intenta optimizar se llega a la conclusión que a menor frecuencia, mejor transmisión.

**Palabras clave:** Sistemas trifásicos, Brillo Solar, Frecuencia, Transmisión de energía.

**ABSTRACT:** The present work tries to explain the advantages of transmission of electrical energy in direct current, compared to the transmission of electrical energy in alternating current systems, as an energy source in the sustainable use for homes and commercial. The alternative use of DC power transmission is an increasingly predominant trend, especially to reduce the losses that occur in AC systems and the higher transmission power. These systems allow the voltage to be reduced, compared to three-phase systems, as can be deduced from the relative weight of the conductor for a given maximum voltage. Methods of achieving high power at high voltages in direct current have not progressed at the same rate as advances in alternating current, and today there are almost no commercial high-voltage direct current systems. The development of the industrial applications of electricity that began at the end of the 19th century, was oriented along two paths, direct current and alternating current, the latter in different frequencies that were unified in the today widespread 50 and 60 Hz. It is analyzed which is the best frequency for the transmission of electrical energy over long distances, it is observed that 50 Hz is better than 60 Hz, and if it tries to optimize, it is concluded that the lower the frequency, the better the transmission.

**Keywords:** Three-phase systems, Solar brightness, Frequency, Power transmission.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transmisión de HVCD han tenido una evolución muy importante en el desarrollo de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en las últimas décadas, pero la limitación en su aplicación ha sido principalmente su costo. Los primeros sistemas de transmisión también eran de continua. Sin embargo, la energía que proporcionaban los sistemas DC no podía ser transmitida a largas distancias, lo que provocó el crecimiento de la tecnología de corriente alterna. Veamos los hechos históricos más importantes que han favorecido el desarrollo de HVDC:

- En 1901 aparecen los rectificadores de mercurio-vapor de Hewitt.
- Hasta 1940 se realizaron diversos experimentos con válvulas de arco de mercurio en Europa. De entre todos cabe resaltar los resultados obtenidos por el Dr. Uno Lamm, también conocido como "el padre de HVDC".
- El principal problema durante estos años era el desarrollo de válvulas que fuesen fiables y económicas

y que pudiesen convertir corriente alterna de alto voltaje en corriente continua y viceversa. El problema fue resuelto en 1929 en un artículo que posteriormente fue patentado y que puede considerarse la piedra de toque del desarrollo de las válvulas de arco de mercurio para altos voltajes.

- La aparición de los tiristores en los años 70 marcará de nuevo la historia de HVDC.
- En 1967 una de las válvulas de arco de mercurio del enlace Gotland fue remplazada por un tiristor, fue la primera vez que se usaba un tiristor con efectos comerciales.
- En 1979 se aplicó el primer control basado en microcomputador en una instalación HVDC.
- En 1984 se puso en funcionamiento el enlace de mayor tensión hasta el momento. Se trataba de la conexión en Itapú, Brazil. Con un voltaje de aprox. 600 KV y unos 6000 MW de potencia, con más de 1500 Km proporciona energía a la ciudad de Sao Paulo.
- En 1994 se utilizan por primera vez de forma comercial filtros activos de continua. El principio de funcionamiento de estos filtros es el inyectar una corriente generada por un amplificador en el circuito de continua y de esta forma cancelar los armónicos que proceden del convertidor HVDC.

Correspondencia:

Victor Rivera Acosta

E-mail: vg\_rivera\_acosta@hotmail.com

- La instalación del primer convertidor de capacidades conmutadas (CCC) en 1998 en la interconexión Argentina - Brasil es de nuevo un hecho importante en la historia reciente de HVDC.
- En 1999 de nuevo el enlace Gotland aparece en la historia de HVDC, esta vez por la instalación del primer convertidor conmutado de tensión (VSC) para transporte de energía. Los convertidores tradicionales se basaban en conmutación de línea o de fase, estos nuevos convertidores utilizan PWM junto con dispositivos de alta frecuencia, como IGBT, consiguiendo mejoras considerables en diversos aspectos de funcionamiento.

**DISCUSION**

**1. Características principales de HVDC**

Las razones para elegir HVDC en lugar de AC para transmitir energía en cada situación concreta suelen ser numerosas y complejas:

- **Bajos costes de inversión.** Una línea de transmisión HVDC es menos costosa que una línea de AC para la misma capacidad de transmisión. Sin embargo, las centrales utilizadas son más costosas debido al hecho de que se debe realizar la conversión DCAC y viceversa. Pero, a partir de una determinada distancia, la alternativa HVDC siempre es menos costosa. Esta distancia es mucho más pequeña para cables submarinos (aprox. 50 Km) que para líneas aéreas. Esta distancia crítica depende de diversos factores, tanto para cables submarinos como par líneas aéreas, y el análisis debe ser realizado para cada caso individual.

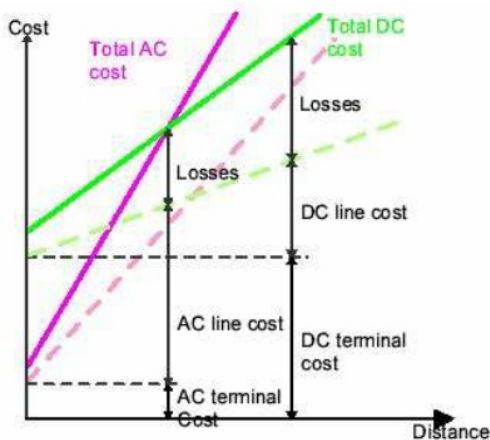


Fig. 1 Distancia crítica de corriente vs costos

- **Vanos marítimos de larga distancia.** No existen limitaciones técnicas para la longitud de las líneas de cable de HVDC. En una transmisión de AC de larga distancia, el flujo de energía reactiva debido a las grandes capacidades del cable limita la distancia máxima de transmisión. Por lo tanto, para realizar enlaces marítimos de larga distancia la única técnica viable es HVDC.
- **Bajas pérdidas.** Una línea de transmisión HVDC tiene menores pérdidas que las líneas de AC para una misma capacidad. Las pérdidas en las centrales convertoras deben ser sumadas, pero sólo suelen representar el 0.6% de la energía transmitida en cada central, las pérdidas totales en las transmisiones HVDC son menores que las pérdidas de AC para prácticamente todos los casos.

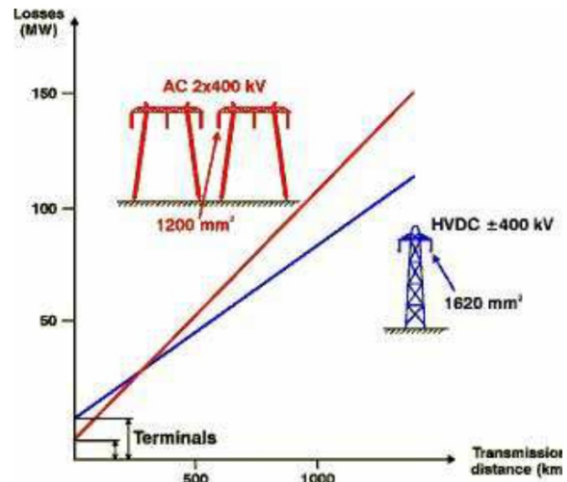


Fig. 2 Comparación en transmisión en AC y DC para distintas distancias

- **Conexiones Asíncronas.** Numerosos enlaces HVDC interconectan sistemas de AC que no funcionan en sincronía, incluso aun cuando usen la misma frecuencia. En estos casos el uso de HVDC es la única forma de realizar un intercambio de energía entre las redes involucradas.
- **Capacidad de control.** En la mayoría de proyectos HVDC, el control principal está basado en una transferencia constante de energía. Un enlace HVDC nunca puede llegar a estar sobrecargado. Los enlaces HVDC también son usados para mejorar el funcionamiento de los sistemas de AC mediante las facilidades de control que proporciona HVDC.
- **Limitación de las corrientes de cortocircuito.** Las transmisiones HVDC no contribuyen a las corrientes de cortocircuito de los sistemas AC que se interconectan. Cuando se conecta una planta generadora de energía con la carga principal, el nivel de corriente de cortocircuito aumenta en el sistema receptor. Si, por el contrario, la planta generadora se conecta a la carga mediante un sistema de transmisión HVDC, la situación es totalmente distinta, ya que HVDC no contribuye a las corrientes de cortocircuito.

**2. Tecnología**

El proceso fundamental que se produce en un sistema HVDC es la conversión de la corriente eléctrica AC en DC (rectificador) en el extremo transmisor, y de DC a AC (inversor) en el extremo receptor. Existen 3 formas de esta conversión:

- **Convertidores Conmutados.** El componente que permite este proceso de conversión es el tiristor, que es un semiconductor semicontrolable que puede trabajar con corrientes muy grandes (4000 A) y es capaz de bloquear tensiones muy altas (hasta 10 KV).
- **Convertidores de capacidades conmutadas.** Es una mejora de la conmutación basada en tiristores, el concepto de CCC se caracteriza por el uso de capacidades conmutadas colocadas en serie entre el transformador del convertidor y las válvulas de tiristores.
- **Convertidores conmutados forzados.** Este tipo de convertidores introducen una variedad de ventajas: alimentación de redes pasivas, control independiente de la potencia reactiva y activa, calidad de energía. Se conocen como convertidores conmutados de tensión (VSC) y generalmente se usan dos tipos fundamentales de dispositivos, los GTO o los IGBT.

**3. Principios Básicos:** los componentes de un sistema HVDC son:

### 3.1. Las centrales convertoras.

Se encuentran en ambos extremos del enlace, consistentes en todo el equipo necesario para convertir AC en DC y viceversa. Los principales elementos de una central convertora son:

- a. **Válvulas de tiristores:** Las válvulas de tiristores son las encargadas de realizar la conversión de AC a DC o viceversa. Las válvulas de tiristores pueden ser construidas de diversas formas dependiendo de la aplicación y del fabricante.
- b. **Válvulas VSC:** El convertidor VSC consiste en un convertidor de dos niveles o multinivel y filtros de alterna. Cada válvula individual del puente del convertidor es construida por un número de dispositivos IGBT conectados en serie junto con su circuitería auxiliar.
- c. **Convertidores de capacidades conmutadas:** Estos convertidores son los idóneos para centrales de alta potencia cuyos requisitos sean muy estrictos debido a sistemas de AC con cargas muy débiles o líneas muy largas.
- d. **Transformadores:** Los transformadores del convertidor se encargan de conectar la red de AC al puente de válvulas de tiristores, y ajustan el voltaje en el lado de DC al nivel requerido para la transmisión. Su estructura puede ser muy variada dependiendo de la potencia a transmitir, pero normalmente son del tipo de una fase a 3 devanados. Por ello se necesitan 3 transformadores idénticos por convertidor.



Fig. 3 Estación transformadora

- e. **Filtros de AC y bancos de capacidades:** En el proceso de conversión el convertidor consume energía reactiva en una cantidad que puede aproximarse al 50% de la energía activa que se transmite, para compensarla la solución más habitual es el uso de bancos de capacidades de deriva.
- f. **Filtros de DC:** Los convertidores usados en HVDC generan armónicos en todos sus modos de funcionamiento. Estos armónicos pueden crear perturbaciones en los sistemas de telecomunicación, por ello se instalan filtros de DC especialmente diseñados para reducir estas perturbaciones.
- g. **Control y protección:** El hardware y el software han sufrido un desarrollo conjunto. El hardware ha pasado de los tubos de vacío a los transistores, a los circuitos analógicos integrados, a los circuitos digitales integrados y a los ordenadores con varios procesadores, y siempre incrementando las frecuencias.
- h. **Pararrayos**

### 3.2. El Medio de Transmisión

Las líneas generalmente son bipolares, dos conductores con distinta polaridad. Los cables más utilizados son macizos o rellenos de aceite donde su aislamiento consiste en fundas de papel impregnadas de aceites de alta viscosidad. El otro tipo de cable, el relleno de aceite; utiliza aceites de baja viscosidad y siempre debe ser usado bajo presión. El desarrollo de la tecnología de cables se ha visto acelerado en los últimos años, y ya está disponible un nuevo cable compuesto de polietileno para su uso con VSC en sistemas HVDC de última generación.

## CONFIGURACIONES DE LOS SISTEMAS DE HVDC

- **Transmisiones Punto a punto.** Este tipo de transmisión es usada en cables submarinos o en líneas aéreas para conectar las estaciones convertidoras generalmente en líneas aéreas se utilizan esquemas bipolares y en cables submarinos esquemas monopolares. El voltaje más elevado utilizado en líneas aéreas a la fecha es de 600 kV y en cables submarinos es de 450 kV.
- **Conexiones Back-To-Back.** En este esquema no existe línea de transmisión, es decir las estaciones convertidoras son instaladas en el mismo predio, este esquema es utilizado para conectar sistemas asíncronos.
- **Sistemas multiterminal.** Este esquema cuenta con tres o más estaciones convertidoras.

## RESULTADOS DEL ESTUDIO

### APLICACIONES

- **Conexión de redes asíncronas.** La necesidad de conexión de redes surge generalmente por su proximidad, sin embargo; el uso de frecuencias distintas en el transporte de la electricidad limita sus posibilidades. HVDC permite el flujo de energía entre las redes conectadas de forma bidireccional sin afectar a las mismas, permitiendo mejorar el funcionamiento y el rendimiento de las redes conectadas.
- **Interconexión con cables aislados (submarinos).** Una aplicación, particularmente difundida en Escandinavia, es la interconexión en corriente continua mediante cables submarinos. Esta aplicación con corriente alterna no sería posible por la gran capacitancia de los cables que exigiría al sistema de corriente.
- **Conexión de cargas.** Son cargas que por condiciones geográficas no están conectadas a una red mayor pero deben depender de un generador local, aquí se opta por una transmisión mediante HVDC.
- **Alimentación de grandes ciudades de crecimiento rápido.** El tamaño de las cargas se incrementa de forma drástica debido al gran crecimiento urbanístico. Si usamos HVDC, como las corrientes de cortocircuito no aumentan, no hace falta cambiar los elementos de protección.
- **Interconexiones con largas líneas aéreas.** La corriente continua se puede usar para la transmisión de potencia de alta tensión entre puntos distantes, con líneas bipolares, que son más económicas, que las líneas aéreas trifásicas, esto, con su menor costo, compensan los equipos convertidores que el sistema de transmisión y recepción requieren.

- Transmisión en alta tensión para ferrocarril. Para la transmisión ferroviaria, fue ventajosa la alta tensión continua porque al ser menores las caídas de tensión (por no presentar caída reactiva), el radio de acción de la línea de contacto es mayor y se requieren menos puntos de alimentación para lograr alimentar los trenes.

## CONCLUSIONES

La transmisión en corriente continua está justificada en la presente investigación por alguna de las siguientes razones:

- Para líneas aéreas de transmisión sobre los 600 Km. de extensión la transmisión en corriente continua es más barata por unidad de longitud que una en alterna, pues se requieren solamente dos conductores en vez de tres.
- En el caso de la transmisión submarina o subterránea en cable aislado, con longitudes sobre los 50 Km., la mejor opción es transmitir la energía en corriente.
- Permite la interconexión entre sistemas asíncronos o entre sistemas que sí trabajan a igual frecuencia.
- La transmisión en corriente continua ofrece mucho mayor control sobre los sistemas eléctricos de potencia y con mucha mayor rapidez.
- En caso de fallo, las conexiones a través de líneas en corriente continua no contribuyen a las corrientes de cortocircuito.
- En lugares donde no sea posible establecer nueva generación o se necesite un aumento de la densidad de potencia ya existente, existe la opción de sustituir las líneas de CA por líneas de CC.

- El flujo de potencia puede modificarse o incluso invertirse en cuestión de milisegundos, variando el ángulo de disparo de los interruptores estáticos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [www.abb.com/HVDC](http://www.abb.com/HVDC), 2020
- [2] [www.siemens.com](http://www.siemens.com), 2020
- [3] [www.spectrum.ieee.org/publicaccess/9604teasr/pow1.html](http://www.spectrum.ieee.org/publicaccess/9604teasr/pow1.html)
- [4] [www.ing.unlp.edu.ar/sispot](http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot), 2018
- [5] Osinergmin (2018). Reporte Semestral del Monitoreo del Mercado Eléctrico-Primer Semestre. Lima, Perú: Osinergmin Editorial.
- [6] Osinergmin (2019). La Industria de la Electricidad en el Perú. Lima, Perú: Editorial de Osinergmin.
- [7] Sistemas Eléctricos de Potencia, William D. Stevenson, 2018
- [8] Ministerio de Energía y Minas (2018). Balance Nacional de Energía. Lima, Perú: Ministerio de Energía y Minas Editorial.
- [9] Código Nacional de Electricidad.
- [10] Análisis en la selección de aisladores para una línea de transmisión (Tesis de Doctorado). Ciudad Universitaria, Cd, Mx, 2019.

Recibido el 26 de abril del 2022 y aceptado para su publicación el 23 de mayo del 2022.