

Capítulo VI. Análisis de las alternativas de solución, ventajas y desventajas.

TRANSMISIÓN EN CORRIENTE ALTERNA

1. La tensión de transmisión se ve fuertemente limitada en los sistemas de extra y ultra alta tensión por el **efecto corona** y la **radiointerferencia**. Una vez que el gradiente de potencial del conductor excede cierto valor crítico, ocurren descargas eléctricas. Si bien las pérdidas pueden ser minimizadas, recurriendo por ejemplo a conductores en haz, es posible que las perturbaciones de radiointerferencia continúen siendo inaceptables.
En la práctica se observa que para niveles de transmisión de 230 KV es necesario recurrir, en algunos casos, a los conductores en haz, mientras que en Corriente Continua esto se da a partir de los 400 KV.
2. La generación de reactivos en líneas muy largas conlleva a efectos indeseables, como por ejemplo el efecto Ferranti.
El incremento de tensión en el extremo receptor cuando la línea opera en vacío o con poca carga, demanda la aplicación de condensadores en serie o reactores en derivación, lo cual encarece la transmisión en Corriente Alterna.
3. En vista de que el límite de estabilidad se obtiene para $\beta=90^\circ$, se aconseja limitar en la práctica este ángulo a 30° bajo condiciones de régimen estacionario, de manera que los vectores característicos de las tensiones al comienzo (U_1) y al final de la línea (U_2) puedan oscilar libremente, sin pérdida de la estabilidad, ante variaciones bruscas en las condiciones de transmisión y hasta que se establezca otra condición en régimen estacionario, es decir,
 - lo que implica que una línea de interconexión solo puede transmitir la mitad de su potencia nominal de transmisión para garantizar la estabilidad de la misma. El uso de condensadores en serie alivia este inconveniente, siempre y cuando la compensación no exceda el 50%. La no observancia de este sencillo criterio puede conducir a la pérdida del sincronismo de los sistemas, produciéndose grandes fluctuaciones de potencia.

TRANSMISIÓN EN CORRIENTE ALTERNA 765 KV

1. Una línea de un solo circuito de 765 KV puede llevar tanta potencia como tres líneas de doble circuito de 345 KV, o seis líneas de un solo circuito de 345 KV, reduciendo el número de líneas y los derechos de vía necesarios para ofrecer una capacidad equivalente.
2. La gran capacidad del sistema de 765 KV puede facilitar la integración económica y eficiente de los proyectos de generación de gran tamaño en la red de transmisión de una nación.
3. La línea típica tiene una altura de la torre de aproximadamente 39.0 a 42.0 m. Estos es 9.0 a 12.0 m más corta que la torre de la típica línea de doble circuito de 345 KV.
4. Con hasta seis conductores por fase, de 765 KV están virtualmente libres de riesgo de sobrecarga térmica.

Nota: Estos planteamientos se hacen basándose en la experiencia de otros países (sobretudo la de EUA) ya que en México el nivel de tensión más alto corresponde a 400 KV.

TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA (High Voltage Direct Current, HVDC)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. No existen problemas de estabilidad, mientras que en Corriente Alterna puede existir pérdida de sincronismo. 2. En los sistemas de Corriente Alterna las longitudes críticas oscilan entre 400 y 1000 km para las líneas aéreas y entre 30 y 60 km para los cables. A partir de estas longitudes las soluciones en Corriente Continua pasan a ser más económicas, ya que el desarrollo de las líneas compensa entonces la inversión en las estaciones rectificadoras e inversoras. La transmisión en corriente alterna por cable submarino está limitada a ~130 kilómetros por la reactancia propia del cable. La transmisión HVDC es la más eficiente y es el único medio para largas distancias. Los sistemas HVDC con cables submarinos interconectan sistemas en distancias mayores a 600 kilómetros con potencias hasta 1.000 MW, establecidos a profundidades no mayores a 80 m. 3. En el extremo opuesto de líneas de gran distancia se encuentran los convertidores espalda con espalda, los cuales interconectan grandes sistemas de Corriente Alterna adyacentes con una línea de transmisión de Corriente Directa que mide unos cuantos metros de largo. Los convertidores espalda con espalda permiten que los dos sistemas operen a sus frecuencias y ángulos de fase respectivos. Como resultado, las perturbaciones en un sistema no tienden a desestabilizar el otro sistema. Además, el flujo de potencia entre los dos sistemas puede ser modificado e incluso invertido en cuestión de milisegundos. 4. No existe el efecto pelicular, efecto Kelvin o efecto Skin, con lo cual el conductor puede transmitir una mayor densidad de	1. Entre las principales desventajas resalta la carencia de un interruptor de potencia, que permita interrumpir las elevadas intensidades de corriente a las elevadas tensiones de transmisión. 2. Resulta muy costoso y algunas veces imposible, la derivación de energía, para alimentar otras cargas. En caso de ser factible, la derivación implica gastos elevados para los equipos adicionales de inversión. Por tales razones la transmisión se efectúa de terminal a terminal, típicamente de una gran planta de generación a un gran centro de consumo de energía. Esto dificulta gravemente la creación de un sistema de Corriente Continua interconectado mediante uniones en forma de T. Sin embargo, es posible el empleo de enlaces múltiples con estaciones convertidoras en serie o en paralelo entre si utilizando las válvulas como interruptores. 3. Formación de armónicos al rectificar la Corriente Alterna, los cuales se reflejan perjudicialmente sobre el sistema de 50 ó 60 Hz. Se requieren filtros en ambos lados del sistema a Corriente Directa. 4. Por más que se filtre la Corriente Continua, resulta imposible obtener un rizado ideal, en vista de lo cual siempre habrá cierta

corriente activa, ya que la sección del conductor se aprovecha en un 100%, además esto provoca que la resistencia sea mayor en Corriente Alterna.	ondulación.
5. Como la línea de Corriente Directa no incrementa el nivel de corto circuito, permite interconectar sistemas de manera síncrona, asíncrona y/o sistemas que trabajan a diferentes frecuencias.	5. Cuando los convertidores actúan como rectificadores requieren que la corriente de entrada esté en retraso respecto a la tensión, y cuando operan como inversores que la corriente se adelante a la tensión.
6. En las transmisiones subterráneas o submarinas se espera que el aislamiento de los cables denote una vida útil más larga debido al esfuerzo unidireccional en el dieléctrico.	6. El hecho de que los sistemas de Corriente Continua no transmitan potencia reactiva no debe contemplarse estrictamente como una ventaja, pues esto obliga en la práctica a generar potencia reactiva en los extremos, tanto para cubrir la demanda de la conmutación y la regulación (inversores y rectificadores) como la de las mismas cargas.
7. Las líneas de Corriente Continua constan únicamente de dos conductores , salvo que se tenga retorno por tierra, en cuyo caso sólo se requiere de un conductor . La inversión por concepto de estructuras, aisladores y derechos de paso es, en consecuencia, inferior a la de Corriente Continua. Estos conductores tienen una sección 1.5 veces mayor que la de Corriente Alterna aunque el peso es el mismo.	7. El dispositivo mas barato es el de un conductor con retorno por tierra. Sin embargo, tiene varias desventajas. La corriente de retorno por tierra origina la corrosión de tuberías enterradas, envueltas de cables, etc. debido a la electrolisis. En el caso de cables submarinos el campo magnético establecido puede producir errores de importancia en las lecturas de las brújulas de los barcos, especialmente cuando el cable esta en la dirección N-S.
8. En Corriente Continua, los sistemas de longitud elevada no se ven afectados por la intensidad de corriente capacitiva de carga, mientras que en Corriente Alterna existen fuertes limitaciones al respecto.	8. Las estaciones convertidoras de Corriente Directa son mucho más caras que las subestaciones de Corriente Alterna convencionales.
9. El menor número de fases en Corriente Continua presupone igualmente menor número de fallas. Operativamente se tiene la ventaja, además, de que en caso de fallas en uno de los polos el retorno por tierra garantiza por lo menos 50% del suministro. En Corriente Alterna la avería de una de las fases exige la desconexión del sistema de transmisión.	
10. La frecuencia de transmisión es igual a cero, por lo tanto, la línea no transporta reactivos.	
11. La pérdida por efecto corona en una línea	

de Corriente Continua, funcionando a una tensión correspondiente al valor pico de la tensión alterna equivalente, es sustancialmente inferior al correspondiente a la línea de Corriente Alterna. Esto es importante, no tanto debido a la pérdida de potencia como por las interferencias que resultan con las comunicaciones de radio y televisión.

Aquí tenemos un comparativo de los costos de transmitir 12000 MW a una distancia de 2000 km entre una transmisión en Corriente Directa y una transmisión en Corriente Alterna.

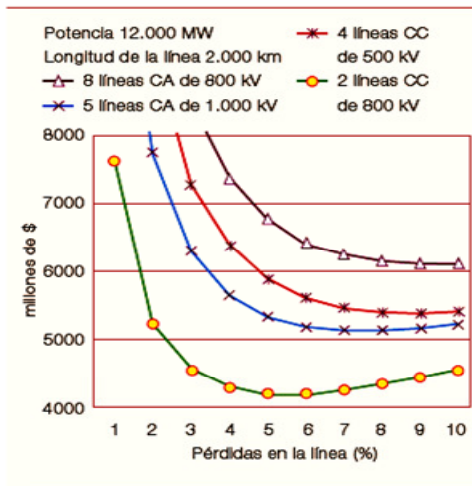


Figura 6.1. Costo de estaciones, líneas y pérdidas en función de las pérdidas de la línea.

El sistema HVDC de 800 KV proporciona el menor coste total y el punto óptimo está en la zona de menores pérdidas de la línea.

La principal **ventaja** de la corriente alterna es la flexibilidad con que se pueden conectar cargas y estaciones de generación a lo largo de la ruta.

Esto es especialmente importante si la ruta de transmisión pasa por un área muy poblada y si hay instalaciones de generación emplazadas en muchos puntos a lo largo de la ruta.

Un **inconveniente** de la corriente alterna es su costo. El sistema arriba descrito es bastante caro puesto que, de hecho, se ha de construir una infraestructura eléctrica completa a lo largo de la ruta.

Otro **inconveniente** es la necesidad de terrenos y derechos de paso. Dado que la transmisión de Corriente Alterna no puede utilizar por completo la capacidad térmica de cada línea cuando ésta es muy larga, habrá que instalar una línea en paralelo.

Una importante **ventaja** de la corriente continua de alta tensión (HVDC) es el bajo costo de transmitir potencias muy altas a distancias muy grandes.

Una segunda gran **ventaja** es que las pérdidas son bastante bajas. Las pérdidas totales en la transmisión de energía a una distancia de 2.000 km son del orden del 5%.

La tercera gran **ventaja** es que se necesitan menos líneas, con menores requisitos de derecho de paso. Según se ha mencionado antes, la transmisión de 12.000 MW se puede conseguir con dos

líneas utilizando HVDC de 800 KV. Transmitir la misma potencia con 800 KV de Corriente Alterna requeriría ocho líneas.

El principal **inconveniente** del sistema HVDC es que la energía se transmite de un punto al otro y que es bastante caro construir estaciones de derivación (aunque esta solución es posible y ya se ha aplicado).

¿Qué pasaría en una transmisión combinada de Corriente Alterna y Corriente Continua?

Como se ha dicho más arriba, el principal inconveniente de HVDC es el elevado costo de la derivación de potencia a lo largo de la línea. Sin embargo, una combinación de transmisión masiva de energía HVDC, de bajo costo, en paralelo con una red de Corriente Alterna de menor tensión, podría resultar en muchos casos la solución óptima al proporcionar tanto bajo costo y alta flexibilidad como capacidad para abastecer a los clientes a lo largo de la ruta.

No obstante, existen algunos problemas técnicos con la solución combinada de Corriente Continua y Corriente Alterna. Las perturbaciones en la transmisión de Corriente Continua dispararán en muchos casos la conexión de Corriente Alterna, ya que los ángulos de fase se hacen demasiado grandes. Este problema se puede resolver de varias formas, según se muestra en la siguiente figura:

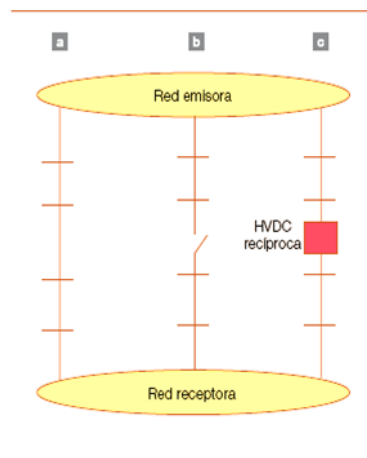


Figura 6.2. Tres alternativas para combinar HVDC y Corriente Alterna para conectar dos redes:

- a) Un fuerte enlace de Corriente Alterna soporta la Corriente Continua
- b) Las dos redes de Corriente alterna están separadas
- c) La distancia se salva mediante un enlace recíproco HVDC

- a) La opción **a** utiliza una conexión de Corriente Alterna suficientemente fuerte para resistir la mayoría de las perturbaciones producidas en la conexión de Corriente Continua sin necesidad de desconectarla.

A modo de ejemplo se supone que el sistema HVDC transmite 12000 MW a 2000 km de distancia en dos bipolos, con cuatro grupos convertidores cada uno. Se supone también que la línea HVDC puede soportar una sobrecarga temporal del 50% en caso de que se disparen uno o más grupos. Además, se supone que existe una red paralela de líneas de 500 KV de Corriente Alterna que tendrá que captar la potencia que la línea HVDC no pueda transmitir. Los resultados se muestran en la siguiente figura:

Cifra de grupos CC perdidos	Cifra de líneas 500 KV en paralelo										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
	2	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
	3	no	si	si	si	si	si	si	si	si	si
	4	no	no	no	no	si	si	si	si	si	si
	5	no	no	no	no	no	no	no	si	si	si
	6	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
	7	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
	8	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no

Figura 6.3. Capacidad de la transmisión combinada de Corriente Alterna y Corriente Continua para mantener la estabilidad a pesar de la pérdida de enlaces de Corriente Continua.

- Esta tabla muestra que el sistema permanecerá dinámicamente estable después de la pérdida de varios grupos de Corriente Continua. Cada grupo tiene una potencia de 1500 MW. El resultado depende de la carga previa de las líneas Corriente Alterna. Aquí se ha supuesto que están cargadas hasta un 34% antes del fallo.
- b) La opción **b** permite que las dos redes operen de forma asíncrona, cada una alimentando a la mitad de los clientes a lo largo de la ruta. En este caso no hay problemas de estabilidad, ya que los sistemas son asíncronos.
 - c) La opción **c** es la misma que **b** pero usa una conexión recíproca HVDC para aumentar la flexibilidad del suministro de energía sin necesidad de sincronizar los dos sistemas. Preferentemente, este dispositivo con conexión recíproca es un convertidor de fuente de tensión (HVDC Light), que estabilizará las tensiones y aumentará la transferencia de potencia de las líneas de Corriente Alterna.

Para transmitir gran cantidad de energía a largas distancias (más de 500–1000 km), el sistema HVDC de 800 KV es normalmente la opción más rentable.

El mayor inconveniente de HVDC es el alto coste de derivar potencia a lo largo de la ruta. Un método combinado, que suministra potencia masiva mediante HVDC y la potencia necesaria a lo largo de la ruta por medio de Corriente Alterna parece ser la solución más rentable y flexible. El sistema de 1000 KV de Corriente Alterna resulta más adecuado como red superpuesta a redes existentes de 400 ó 500 KV de Corriente Alterna en áreas con gran densidad de población.

En general, el uso de la corriente continua es factible cuando los ahorros en costo de una línea en corriente continua compensan los costos de las unidades convertidoras (Rectificador-Inversor). Para la misma potencia a transmitir, el costo por unidad de longitud de una línea en corriente continua es más bajo que el de una línea en corriente alterna.

En la figura siguiente se muestran los costos comparativos de líneas aéreas en corriente continua y corriente alterna, en función de la distancia de transmisión.

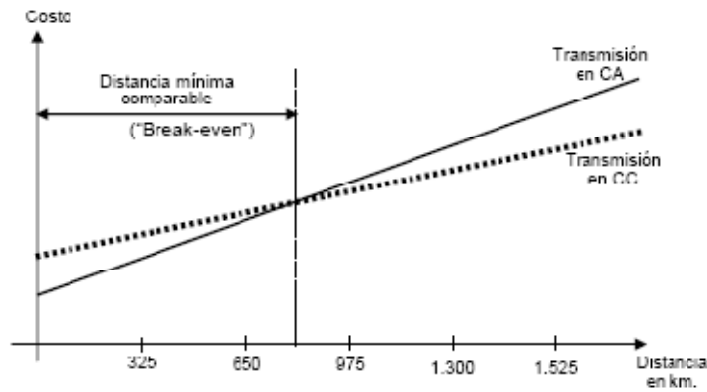


Figura 6.4. Costo comparativo en líneas de transmisión aéreas en HVDC y Corriente Alterna.

Existen otros estudios como el de la Sociedad de Estudios de Alta Tensión de Heidelberg, Alemania, más conocida como FGH, que ha llevado a cabo numerosos estudios de esta naturaleza para potencias de 800 y 1600 MW en donde muestran que en función de estos bloques de energía se obtiene una mayor ventaja para la transmisión en corriente continua a partir de los 900 y 1200 km de transmisión, respectivamente.

Pero además, otros estudios, realizados en Estados Unidos y en la extinta Unión Soviética, indican una ventaja a favor de la corriente continua a partir de los 1000 km de transmisión en bloques de 1000 y 2000 MW, respectivamente.