

خطوط انتقال HVDC

مزایا-کاربرد و مشکلات

احمد امیدی-عباس رئیسی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون

Ahmad_1025@yahoo.com

چکیده: در این مقاله ابتدا مقدمه ای از سیستمهای HVDC بیان می شود و سپس در بخش اول مزایای خطوط انتقال HVDC مطرح می گردد در بخش دوم در ابتدا کاربردهای سیستم انتقال (خطوط انتقال) HVDC بیان می شود و سپس کاربردهای ولتاژهای فشار قوی DC یا همان HVDC ذکر می گردد. در بخش سوم به ذکر چند مشکل مربوط به اجزاء و مسائل خطوط انتقال HVDC بیان می گردد و در بخش چهارم سیستمهای انتقال HVDC (خطوط انتقال HVDC) از دیدگاه هزینه مورد بررسی قرار می گیرند.

کلمات کلیدی: HVDC، HVAC، $V_s c$ ، خطوط انتقال (سیستمهای انتقال) HVDC

۱- **مقدمه:** امروزه سیستمهای انتقال HVDC اهمیت ویژه ای دارند و به دلیل ویژگی های خاص آنها روز به روز مورد توجه بیشتری قرار می گیرند. این سیستمها در انتقال توان برای فواصل زیاد، خطوط انتقال زیرزمینی طویل و اتصال بین ۲ شبکه قدرت بدون عبور اغتشاشات کاربرد گسترده ای پیدا کرده اند. یکی از مشکلات این خطوط قیمت بالای تجهیزات مبدل AC به DC و بالعکس است که در مواردی انتقال HVDC دارای توجیه اقتصادی است به عنوان مثال در فواصل انتقال بیش از ۶۰۰ km و انتقال توسط کابل زیر زمینی (بیشتر از ۵۰ km) جهت اتصال جزایر به شبکه، شرایطی است که امکان توجیه اقتصادی سیستم HVDC را فراهم می سازد.

۲- مزایای استفاده از خطوط HVDC [۱-۲-۳-۵]

استفاده از خطوط HVDC مزایای زیر را به همراه خواهد داشت:

۱-۲ در خطوط HVDC فقط به ۲ هادی نیاز است که یکی با ولتاژ مثبت نسبت به زمین و دیگری با ولتاژ منفی نسبت به زمین، ولی در خطوط HVAC حداقل به سه هادی نیاز است. میزان قدرت و جریان انتقالی در خطوط AC و DC به شکل زیر تعیین می شود.

$$P_{AC} = \sqrt{3}VI_{AC}\cos\varphi \quad (2-1)$$

$$I_{AC} = P_{AC} / \sqrt{3}V\cos\varphi \quad (2-2)$$

$$P_{DC} = 2VI_{DC} \quad (2-3)$$

$$I_{DC} = P_{DC} / 2V \quad (2-4)$$

۲-۲ قابلیت اعتماد در خطوط HVDC بیشتر از خطوط HVAC است؛ زیرا با وقوع خطا در یکی از دو هادی خط، هنوز هم می توان قدرت انتقالی را بدون هیچ گونه مشکلی از طریق هادی دیگر منتقل نمود.

۳-۲) خط HVDC نیاز به فضای کمتری نسبت به خط HVAC مشابه دارد (به دلیل کم تر بودن تعداد هادی نسبت به حالت AC) و در نتیجه نیاز به پایه های کوچکتری است، بنابراین، هزینه نصب خطوط هم کاهش می یابند.

۴-۲) خطوط HVDC به عایق بندی کم تری نسبت به HVAC نیاز دارد، زیرا:

حداکثر دامنه ولتاژ هر سیستم AC برابر است با:

$$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{L-L} = 0.8 V_{L-L} \quad (۲-۵)$$

و حد اکثر ولتاژ سیستم DC برابر است با

$$\frac{1}{2} V_{L-L} = 0.5 V_{L-L} \quad (۲-۶)$$

بنابراین تلفات کرونا و تداخل رادیویی در HVDC کم تر از HVAC است به همین دلیل کابل های DC ارزان تر از کابل های AC می باشد.

۵-۲) مسئله حفظ سنکرونیزم بین دو سیستم AC که به وسیله یک خط HVDC به هم متصل شده اند، وجود ندارد. همچنین نیاز به یکسان بودن فرکانسهای دو شبکه AC که با خط DC به هم متصل شده اند، نمی باشد.

۶-۲) قدرت انتقالی از یک خط DC را می توان به راحتی توسط ترستورهای یک سو کننده آن کنترل نمود و در یک مقدار معین، ثابت نگه داشت.

۷-۲) اگر در یکی از دو شبکه AC که با یک خط DC به هم متصل شده اند، اتصال کوتاهی رخ دهد، جریان اتصال کوتاه به شبکه دیگر منتقل نمی شود؛ زیرا عموماً جریان اتصال کوتاه، یک جریان راکتیو است که در سیستم DC جریان راکتیو منتقل نمی شود ($\cos\phi=1$)

۸-۲) تلفات خطوط HVDC کم تر از خطوط HVAC است زیرا:

$$R_{dc} < R_{ac} \quad (۸-۱-۲)$$

۸-۲-۲) جریان راکتیو در خطوط DC وجود ندارد.

۹-۲) در خطوط HVAC، قدرت انتقالی برابر $P = \frac{V_1 V_2 \sin S}{X}$ است که به سبب حالت های گذرای موجود در این

خطوط، باید زاویه S در شرایط عادی کم تر از ۳۰ درجه باشد. بنابراین در خطوط AC با محدودیتهایی در طول خط و قدرت انتقالی مواجه هستیم که برای رفع این مشکل از خازن های سری استفاده می شود. اما در خطوط HVDC محدودیت پایداری وجود نخواهد داشت.

۱۰-۲) هر چند که هزینه خطوط HVDC، به دلیل هزینه بالای مبدل های AC/DC و DC/AC بسیار زیاد است، اما برای خطوط طولانی بین ۶۰۰-۹۰۰ km و قدرتهای بیش از ۱۰۰۰ MW، هزینه های خطوط DC کم تر از خطوط AC خواهد بود. این موضوع برای کابل های DC با رقام کمتری مواجه است، به طوری که برای فاصله های بیش از ۵۰-۱۰۰ km اقتصادی تر است.

۱۱-۲) در زمان اتصال دو شبکه AC آسنکرون همانطور که در مورد پنجم نیز ذکر شده سیستم HVDC استفاده می شود.

۱۲-۲) قابلیت کنترل جریان برق افزایش خواهد یافت. سطح و مسیر نیروی برق را می توان بسیار دقیق و وسیع کنترل نمود.

۱۳-۲) وجود منابع تولید انرژی DC در شبکه

۱۴-۲) عدم نیاز به کنترل فرکانس مشترک در شبکه

۱۵-۲) استفاده از زمین به عنوان سیم برگشت.

۲-۱۶) نبودن اثر پوستی:

در خطوط HVAC جریان به صورت یکنواخت در تماس سطح هادی پخش نمی شود و چگالی جریان در لایه خارجی هادی بیشتر است اما در خطوط HVDC با داشتن جریان dc یکنواخت جریان در کل سطح مقطع هادی، دیگر اثر پوستی نداریم و از کل هادی بهره برداری صورت می گیرد.

۳- کاربردهای HVDC و سیستم انتقال HVDC

۳-۱) کاربردهای سیستم انتقال HVDC [۱-۳-۵]

۳-۱-۱) کابل‌های زیردریایی (submarine cables) طولانی تر از ۳۰ km:

در این مورد به علت ظرفیت خازنی زیاد کابل که نیازمند پستهای واسطه ای جبران سازی است، استفاده از انتقال به صورت جریان متناوب عملی نیست.

۳-۱-۲) ارتباط هماهنگ (Asynchronous) بین ۲ سیستم جریان متناوب که به علت مسائل پایداری یا اختلاف در فرکانسهای اسمی دو سیستم، استفاده از خطوط جریان متناوب عملی نیست.

۳-۱-۳) انتقال مقادیر زیاد توان در مسافتهای طولانی به وسیله خطوط هوایی که در مسافتهای بالاتر از ۶۰۰ km، انتقال HVDC رقیبی برای انتقال جریان متناوب به شمار می رود.

۳-۲) کاربردهای HVDC [۲]

۳-۲-۱) انجام کارهای تحقیقاتی و مطالعاتی روی عایق ها:

برای مطالعه رفتار عایق ها از ولتاژهای DC استفاده می کنند اگر عایقی در برابر ولتاژهای فشار قوی DC، استقامت داشته باشد آن گاه حتماً در برابر ولتاژهای فشار قوی AC نیز استقامت دارد.

۳-۲-۲) در فیزیک برای شتاب دهنده ها: (مشابه شتاب دادن پروتون یا الکترون در تلویزیون) در میدان های الکتریکی قوی یکنواخت، به ذرات الکتریکی نیروی زیادی وارد شده و شتاب می گیرند.

۳-۲-۳) در پزشکی برای تولید اشعه X

۳-۲-۴) در صنایع برای فیلتر کردن دود خروجی نیروگاههای حرارتی و کارخانجات سیمان و پاشیدن رنگ.

۳-۲-۵) در مخابرات برای ایستگاههای پخش تلویزیونی

۳-۲-۶) برای آزمایش تجهیزات مورد استفاده در خطوط انتقال HVDC

۳-۲-۷) برای آزمایش کابل‌های فشار قوی AC یا طول زیاد:

اگر کابل های فشار قوی AC را بخواهیم با ولتاژهای بالای AC آزمایش کنیم به علت ظرفیت خازنی نسبتاً بالای کابل ها با طول زیاد، جریان زیادی نیاز می باشد. همچنین تخلیه های مکرر در حفره های داخلی احتمالی، باعث کاهش درجه عایقی آنها می شود. بنابراین آزمایش آن ها با ولتاژ DC مناسب تر است. اگرچه در این آزمایش ها از نظر شرایط کاری، کابلی که با ولتاژ AC کار می کند متفاوت می باشد، ولی اعتبار آن از دیدگاه تجربی پذیرفته می شود؛ زیرا هدف از این کار، بررسی توزیع شدت میدان درون عایق می باشد.

۴- مشکلات خطوط HVDC [۱-۵]

۴-۱) مبدل های گران قیمت:

در هر یک از دو انتهای خطوط انتقال HVDC نیاز به میدان های گران قیمت است.

۴-۲) توان راکتیو درخواستی

کانورترها نیاز به توان راکتیو دارند. هم در مبدل AC به DC و هم در مبدل DC به AC. در هر کدام از کارنورترها توان راکتیو تلف می شود. در حالت ماندگار توان مصرفی حدود ۵۰ درصد توان اکتیو انتقالی است. در حالت گذرا این مقدار ممکن است بسیار بیشتر باشد.

بنابراین منابع توان راکتیو نزدیک کانورترها مورد استفاده قرار می گیرند. در سیستمهای قوی جریان متناوب معمولاً به صورت خازنهای موازی هستند بسته به تقاضای وارد بر خط ارتباطی جریان مستقیم و بر سیستم جریان متناوب، بخشی از منبع توان راکتیو ممکن است به صورت کندانسورسنگرون با جبرانگراستاتیکی توان راکتیو (static var compensator) باشد. همچنین خازنهای مربوط به فیلترهای جریان متناوب بخشی از توان راکتیو مورد نیاز را فراهم می آورند.

۴-۳) تولید هارمونیک ها:

کانورترها در طرفهای جریان و جریان مستقیم ولتاژها و جریان های هارمونیک تولید می کنند این هارمونیک ها ممکن است موجب اضافه حرارت خازنها و ژنراتورهای نزدیک و نیز تداخل با سیستمهای مخابرات دور شود از این رو در هر دو طرف جریان متناوب و مستقیم از فیلتر استفاده می شود.

۴-۴) مشکل در کلیدهای قدرت

می دانیم که در کلید در لحظه باز شدن، قوس الکتریکی ایجاد می شود و بر اثر دور شدن کنتاکت ها از یکدیگر طول قوس بزرگتر می شود. در جریان متناوب در هر نیم پریود جریان صفر می شود. در این لحظه قوس سرد شده، امکان خاموش شدن آن وجود دارد. برای سرد شدن قوس از روغن یا گاز sf_6 کمک می گیرند. در جریان دائم جریان صفر نمی شود. لذا قوس الکتریکی بین کنتاکت ها را نمی توان خاموش کرد، آزمایشهایی برای خاموش کردن قوس جریان دائم با ولتاژ فشار قوی، از راههای مختلف انجام شده ولی به مرحله استفاده صنعتی نرسیده است. پس در حالت کلی کلید برای جریان دائم وجود ندارد به طوری که نمی توان یک شبکه فشار قوی دائم ساخت و خطوط را به دلخواه از آن منشعب نمود و قطع و وصل کرد از این رو فقط یک خط شعاعی با دو انتها وجود دارد که در هر انتها ولتاژ دائم به متناوب و متناوب به دائم تبدیل می شود.

۴-۵) مشکل در تبدیل سطوح ولتاژ

از نقایص خطوط HVDC یکی این است که باید از ولتاژ متناوب ولتاژ دائم شده ساخت و هنوز ژنراتور فشار قوی ولتاژ دائم با قدرت کافی ساخته نشده است. دیگر آن که تبدیل ولتاژ که در جریان متناوب با ترانسفورماتورها انجام می شود در جریان دائم امکان پذیر نیست و در حالت DC ترانسفورماتور عمل افزایش یا کاهش را نمی توانند انجام دهند به دلیل صفر بودن تغییرات فوران در حالت DC.

۵- ساختار هزینه در سیستمهای انتقال HVDC [۴]

هزینه یک سیستم انتقال HVDC بستگی به عوامل مختلفی چون:

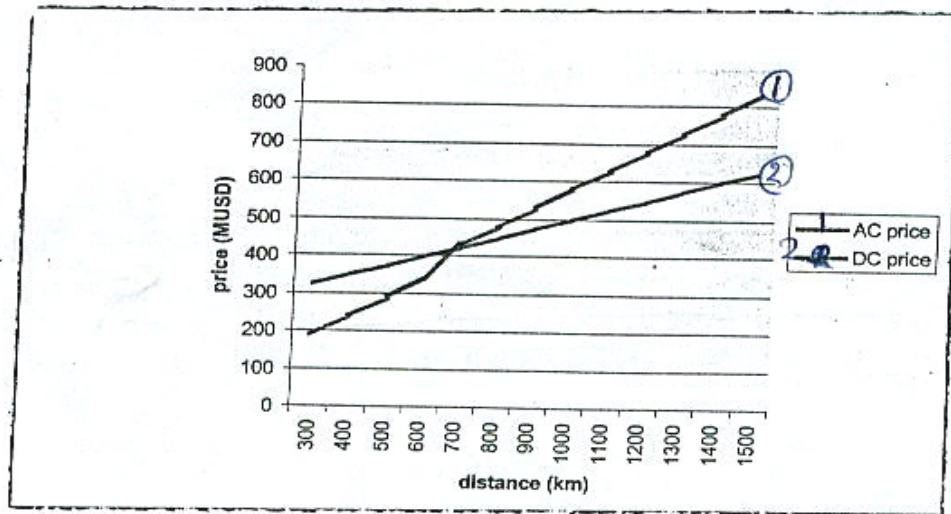
- ظرفیت مطلوب خط انتقال

- نوع تجهیزات مورد استفاده

- شرایط محیطی و جغرافیای

- ملاحظات ایمنی

دارد. منحنی شکل زیر نقطه بهینه هزینه بر حسب مسافت را برای سیستم های انتقال HVAC و HVDC نمایش می دهد.

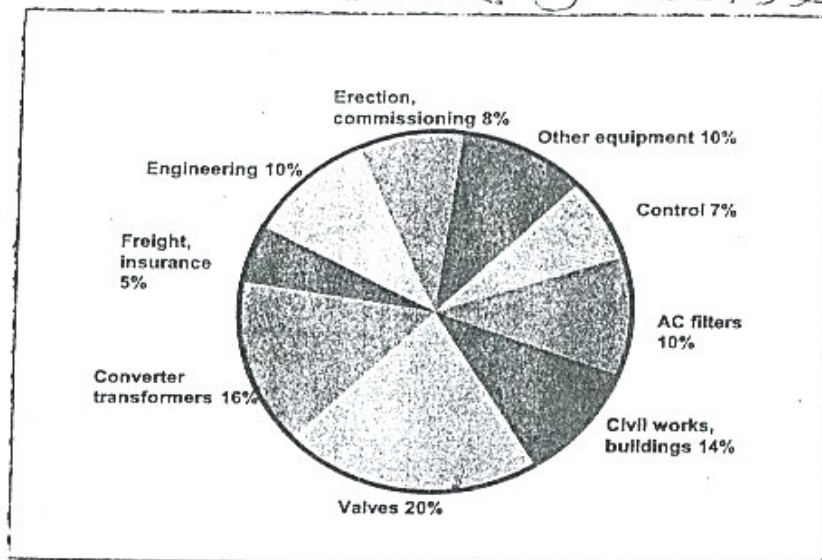


شکل ۵-۱ مقایسه هزینه بر حسب مسافت برای سیستمهای HVAC و HVDC

همانطور که در منحنی بالا ملاحظه می شود هر سیستم HVDC برای مسافت های بالاتر از ۶۰۰ km نسبت به سیستم HVAC اقتصادی تر است.

هزینه های مربوط به تجهیزات الکترونیک قدرت، یکسو سازی و معکوس سازی برای HVDC بیشتر از هزینه های پست های ترانسفورماتور برای سیستم های AC است ولی از دیدگاهی دیگر هزینه های مربوط به کابل های انتقال و تاسیسات مورد نیاز آنها خیلی کم تر از هزینه های مشابه در سیستم AC است. علاوه بر این هزینه های جاری و عملکرد و نگهداری در سیستم HVDC کمتر است. هزینه راه اندازی HVDC در ابتدا بیشتر از مشابه آن در سیستم AC است ولی هزینه ها با تغییرات طول خط انتقال تغییر نمی کند.

نمودار دایره ای زیر مقدار هزینه هر قسمت از خط HVDC را به طور کلی بیان می کند و مشخص می کند هر بخشی از تجهیزات چند درصد از قیمت کل را به خود اختصاص می دهند.

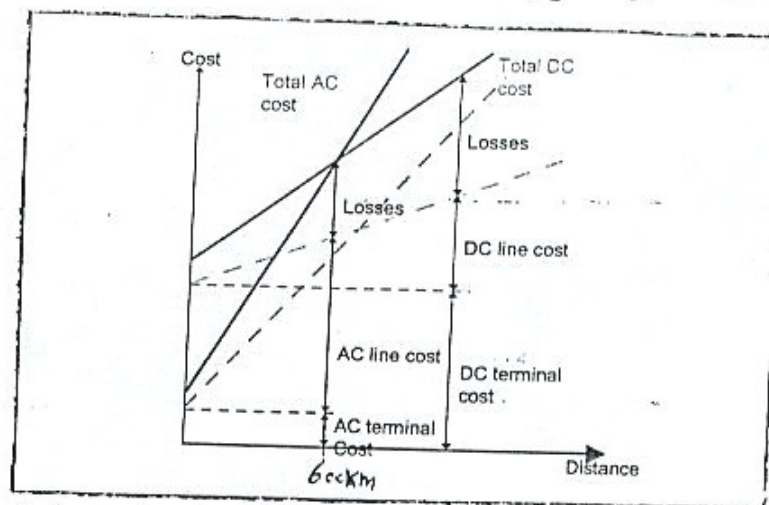


شکل ۵-۲ نمایی از هزینه هر قسمت از خط HVDC

دو مقایسه متفاوت برای نکات برجسته هزینه میان HVAC و HVDC مورد نیاز است. این دو مقایسه یکی میان سیستم های منفرد ترستور و سیستم انتقال ولتاژ AC و دیگری میان VSC مستقر بر HVDC و سیستم AC و منبع تولید محلی است.

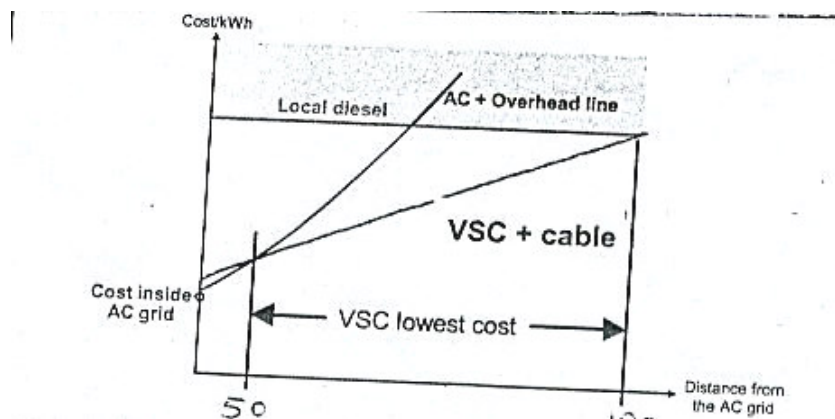
ترستور مستقر بر سیستم HVDC بر عکس سیستم HVAC است. هزینه های سرمایه گذاری مراکز تبدیل کننده HVDC بیشتر از هزینه های شبکه های مختلف سیستم HVAC است اما از طرف دیگر هزینه های خط انتقال HVDC کمتر است. علاوه بر این هزینه های اولیه در سیستم HVDC بیشتر هستند.

سطوح اتلاف در یک سیستم HVAC افزایش می یابد. تصویر شماره ۳-۵ کاهش ناگهانی قیمت رانشان می دهد. بعد رقابت تجاری به عوامل مختلفی، از جمله نوع خط انتقال و جنبه های گوناگون محلی بستگی دارد. مقایسه انتقال DC دو قطبی با انتقال دهنده دو مداری HVAC در هنگام مقایسه HVAC و HVDC مهم می باشد مخصوصاً زمانی که اعتبار و سودمندی مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۳-۵ کاهش قیمت HVDC با افزایش مسافت (البته در مسافتهای بیش از ۶۰۰ km)

سیستم HVDC مستقر بر VSC بر عکس منبع تولید محلی یا سیستم AC است سیستمهای HVDC مستقر بر VSC بر حسب کاربردهای اندک نیروی برق و فواصل نسبتاً کوتاهتر تجهیز و ساخته می شوند. شکل ۴-۵ نشان می دهد که سیستم HVDC مستقر بر VSC از لحاظ اقتصادی در زمان مقایسه با هر سیستم HVAC و منبع تولید محلی نسبت به مرکز بار الکتریکی مانند ژنراتور دیزلی یک پیشنهاد مناسب تر به شمار می رود.



شکل ۴-۵ نمایش و مقایسه سیستم HVDC همراه با VSC و سیستم HVAC از لحاظ هزینه

ملاحظات اقتصادی بیانگر این نکته است که برای حداقل فاصله انتقال معین (فاصله قابل رقابت در تجارت) قبل از اینکه سیستم HVDC مورد توجه قرار گیرد، قیمت آن مدنظر باشد. تخمین زده می شود فاصله تجاری قابل رقابت با خطوط HVAC برای خطوط بلند، در سیستم HVDC، خطوطی در حدود ۵۰۰ km می باشند که با توجه به مقدار قدرت انتقالی قیمتهای خطوط و تجهیزات اقتصادی می باشد. که این فاصله با توجه به پیشرفت قابل توجه در تکنولوژی، ساخت قطعات و تجهیزات جدیدتر کاهش در اندازه و قیمت آنها روز به روز کمتر می شوند. با توجه به فاصله انتقال می توان اختلاف قیمتی برای خطوط HVAC در حدود $\pm 5\%$ ، برای خطوط HVDC در حدود 10% فرض کرد. برای مثال در این مبحث می توان بیان کرد که برای خطوط طولانی بین ۶۰۰-۹۰۰ قدرت های بیش از ۱۰۰۰ Mw هزینه های خط DC کمتر از خطوط AC است. این موضوع برای کابل های DC یا رقام کمتری مواجه است. به طوری که برای فاصله های بیش از ۱۰۰-۵۰۰ km اقتصادی تر است. به عنوان مثالی عملی می توان به خط انتقال به کار برده شود بین ایالت اودکان لوس آنجلس به طول ۱۳۷۰ km با ولتاژ ۸۰۰ kv و قدرت انتقالی ۱۴۴۰ Mw اشاره کرد.

نتیجه گیری:

انتقال انرژی در فواصل دور و یا عبور خط از دریا و بالاخره ارتباط الکتریکی دوشبکه آسنکرون به هم از طریق انتقال انرژی با جریان مستقیم میسر شده است که اکنون به مراحل پیشرفته ی نیز رسیده است. به طور خلاصه مجموعه عللی که انتقال انرژی با جریان مستقیم را توجیح می کند عبارتند از

۱- تلفات نسبتاً زیاد عایقی در انتقال انرژی تحت فشار و جریان الکتریکی متناوب
۲- تزریق جریان حقیقی به شبکه جریان متناوب بدون آنکه با بالا رفتن توان الکتریکی شبکه شدت جریان اتصال کوتاه شبکه افزایش یابد.

۳- اتصال ۲ شبکه برق با فرکانس متفاوت و با روش متفاوت در تنظیم و کنترل فرکانس آنها

۴- امکان دادن به تغییر و کم و زیاد کردن دلخواه انرژی انتقال یافته در نقطه اتصال دو شبکه
در حقیقت انتقال HVDC یک روش برای غلبه بر محدودیتهای فنی و اقتصادی است که برای اتصال سیستم های قدرت بخصوص در شرایطی که آنها در نواحی مختلف واقع شده و یا در فرکانسهای متفاوت کار می کند کاربرد دارد.

منابع:

- ۱) پایداری و کنترل سیستمهای قدرت- پروفسور پرابهاسانکار کندور- مترجمین: دکتر حسین سیفی- دکتر علی خاکی صدیق - انتشارات دانشگاه تربیت مدرس- چاپ اول- ۱۳۷۶
- ۲) عایقها و فشار قوی- دکتر رحمت اله هورشمند- مهندس مهدی تقفی- انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز- چاپ اول- ۱۳۸۲
- ۳) نشریه علمی برق- سال پانزدهم- شماره ۳۵- صفحات ۷۷-۸۳
- 4) <http://www.Transehegie.Com>. au
- 5) <http://www.abb.se/power> systems