فصلنامه آموزش مهندسی ایران، شماره ۳۵، سال نهم، ص ۱۰۲- ۸۳

# روشی نوین برای انتقال توان در ولتاژهای زیاد

**عبدالرضا رحمتی، سید ادیب ابریشمی فر، ابراهیم عبیری [۱] و حسین مهربان جهرمی [۲]**

**۱. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران**

**۲. دانشگاه آزاد اسلامی ( واحد جهرم)**

**چکیده:** امروزه، از برق DC با ولتاژ زیاد (HVDC) به دلایل مزایای زیست محیطی، صرفه اقتصادی در فواصل زیاد، کنترل دقیق توان، پایداری و کیفیت توان، تلفات کمتر و همچنین، انتقال انرژی در شبکه‌هایی که دارای فرکانسهای متفاوت هستند، استفاده می شود. مزیتهای انتقال به روش DC (برق مستقیم) نسبت به AC (برق متناوب)، از جمله کنترل پذیری بهتر، باعث شده است تا در انتقال انرژی یا اتصال سیستم های قدرت ناهمگون از این روش انتقال استفاده شود. یکی از روشهای انتقال انرژی با استفاده از جریان DC روش VSC-HVDC است. از این روش بیشتر برای اتصال دو شبکه که از نظر AC اتصال آنها ناممکن است، استفاده می‌شود. در این مقاله سیستم HVDC بر مبنای مبدل منبع ولتاژ (VSC-HVDC) که روشی نوین در انتقال توان در ولتاژهای زیاد است، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، این سیستم با HVDC مرسوم یا سنتی و نیز سیستم انتقال AC مقایسه و روشهای شبیه‌سازی و کنترل آن بیان شده است.

**واژه‌های کلیدی: HVDC ، پایداری، انتقال انرژی و مبدل منبع ولتاژ.**

### ۱. مقدمه

یکصد سال قبل ترانسفورمرها و سیستم‌های سه فاز این امکان را فراهم آوردند که بتوان توان تولیدی نیروگاههای کوچک را به فواصل دور انتقال داد و به مصرف کننده‌های مختلف رساند. به مرور زمان و با پیشرفت فناوری، نحوه انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نیز تغییر کرد. یکی از کارهای انجام شده در این زمینه، قرار دادن مراکز تولید انرژی در محل بهینه و انتقال انرژی تولید شده با راندمان بالا به مصرف کننده‌ها بود. برای مثال، نیروگاههای حرارتی در جاهایی قرار داده می‌شد که بتوان سوخت مصرفی را با کمترین هزینه و آلودگی به آن رساند. امروزه، سیستم‌های انتقال و توزیع نسبت به صد سال پیش تغییر کرده و ترتیب تولید و توزیع انرژی الکتریکی به صورت: تولید توان در نیروگاهها، افزایش ولتاژ با ترانسفورمرها، انتقال توان، کاهش ولتاژ با استفاده از ترانسفورمرها و توزیع توان است. با پیچیده‌تر شدن بارهای متصل به سیستم‌های انتقال و سیستم‌های توزیع کنترل این شبکه‌ها سخت‌تر شده است. همچنین، منطبق کردن سیستم‌های انتقال و توزیع با مراکز متعدد تولیدی کوچک که ساخته شده یا در حال ساخته شدن هستند، کاری دشوار و هزینه‌بر است. از طرفی، مقررات محیطی و محلی وضع شده در بسیاری از کشورها محدودیتهای زیادی را برای نصب و راه‌اندازی نیروگاههای کوچک دیزلی یا نیروگاههایی که با سوخت فسیلی کار می‌کنند، ایجاد کرده است. این محدودیتها لزوم ایجاد یک شبکه الکتریکی وسیع را که بتوان تغییرات بزرگ بار و فرکانس را اعمال کرد، مشخص می سازد. برای ایجاد پایداری در این شبکه‌ها و همچنین، به صرفه بودن آنها لزوم داشتن یک سیستم کنترل دقیق که بتواند ولتاژ و توان را کنترل کند، احساس می‌شود[۱].

صنعت الکترونیک، به ویژه با پیشرفتهای چشمگیر آن در چند دهه اخیر، موجب بروز تحولات عظیمی در اغلب صنایع شده است. بر خلاف گذشته‌های دور، این پیشرفتها سیر نمایی به خود گرفته است. نقش صنعت الکترونیک و الکترونیک قدرت در دستیابی به چنین پیشرفتهایی بسیار حایز اهمیت است.

سیستم انتقال توان در سطح ولتاژ DC به عنوان شاخه‌ای کوچک از کاربرد الکترونیک قدرت در صنعت است که استفاده از آن در کشورهای پیشرفته یا رو به رشد از نظر صنعتی سابقه نه چندان طولانی دارد. مزیتهای انتقال به روش DC[۱] نسبت به AC[۲]، از جمله کنترل پذیری بهتر، باعث شده است تا امروزه در انتقال انرژی یا اتصال سیستم‌های قدرت ناهمگون از این روش انتقال استفاده شود[۱]. در سال ۱۹۷۰ سیستم انتقال توان DC در سطح ولتاژ بسیار بالا که HVDC[۳] کلاسیک یا سنتی نامیده می‌شود، معرفی شد. این سیستم معمولاً برای انتقال توان در فواصل طولانی و از نقطه‌ای به نقطه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. درسال ۱۹۹۸ سیستم HVDC جدیدی به‌نامVSC-HVDC[۴] معرفی شد[۱]. انتقال توان در این نوع از سیستم‌ها با استفاده کابلهای زیرزمینی صورت می‌گیرد. در این روش ولتاژ، فرکانس و توانهای خروجی کنترل می‌شوند. در این سیستم جدید، بر خلاف سیستم HVDC سنتی، می‌توان توان دلخواه را دریافت یا ارسال کرد. به علاوه، استفاده از این سیستم در نقاط میانی سیستم‌های توزیع و فوق توزیع باعث بالا بردن مقاوم پذیری سیستم می‌شود. همچنین، از این سیستم برای اتصال شبکه‌های تولید انرژیهای تجدیدپذیر و اتصال جزایر به برق سراسری استفاده می‌شود[۲]. با توجه به متفاوت بودن فرکانس برق مورد استفاده در بعضی از کشورهای همسایه و همچنین، وجود جزایر متعدد در ایران استفاده از این سیستم در آینده اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، لزوم آشنایی خبرگان صنعت با این نوع از سیستم انتقال انرژی مزایا و معایب آن احساس می‌شود.

---

۱ . ولتاژ خروجی در این سیستم‌ها ثابت است و با زمان تغییر نمی‌کند.

۲ . ولتاژ خروجی در این سیستم‌ها متغیر است و با زمان تغییر می‌کند.

۳ . شرکت ABB این سیستم را برای اولین بار معرفی کرد و نام HVDC Light را برای آن برگزید.

4 .Voltage Source Converter- High Voltage DC

در این مقاله علاوه بر معرفی سیستم VSC-HVDC، مقایسه‌ای بین آن و HVDC مرسوم یا سنتی و نیز سیستم HVAC صورت گرفته و روشهای کنترل و شبیه‌سازی آن بیان شده است. همچنین، فواید استفاده از این نوع سیستم انتقال نیز بیان شده است.

**۲. مقایسه سیستم HVDC با HVAC**

مزایای واقعی یک سیستم HVDC هنگامی آشکار می‌شود که این سیستم با یک سیستم انتقالHVAC[1] مقایسه شود. قدرت فعال انتقال داده شده بر روی خطوط ac با اختلاف فاز میان دو سیستم ac متصل شده به یکدیگر تعیین می‌شود. بنابراین، حداکثر قدرت انتقالی به طور معکوس متناسب با راکتانس خط است. به همین دلیل، حداکثر طول خط به حدود ۵۰۰Km برای خطوط جبران نشده محدود می‌شود. لکن، چنین محدودیتی برای سیستم‌های انتقال HVDC وجود ندارد، چرا که افت ولتاژ کلی خط فقط تحت تأثیر ابعاد هادیهای انتقال و اتصالات مربوط به آنهاست. همچنین، خط dc به خودی خود قدرت راکتیو تولید یا مصرف نمی‌کند، اما مبدلهای(تبدیل کننده‌های ولتاژ AC به DC و برعکس) موجود در سیستم HVDC قدرت راکتیو مصرف می‌کنند. این به آن مفهوم است که نیاز به قدرت راکتیو مصرفی مستقل از طول خط است. این عدم وابستگی سیستم HVDC به راکتانس خازنی خط مزایای دیگری را نیز برای سیستم‌های HVDC فراهم می‌آورد که به‌طور خلاصه عبارت اند از:

- ظرفیت انتقال قدرت بزرگ‌تر بدون محدودیت عملی در فاصله انتقال؛
- قابلیت اعتماد بیشتر در سیستم‌های HVDC؛
- انتقال قدرت میان دو سیستم ac در حال کار با فرکانسهای متفاوت یا هم فرکانس و غیر همزمان؛

---

1. High Voltage AC

- کنترل قدرت فعال انتقالی از طریق یک راه انعطاف‌پذیر و سریع؛
- مزایای زیست محیطی.

عمده‌ترین عیب HVDC نسبت به HVAC قیمت بیشتر تجهیزات آن به ویژه مبدلها و اتلاف در آنهاست. همچنین، ترانسهای مورد نیاز سیستم انتقال HVAC نسبت به HVDC ساده‌ترند. به‌علاوه، برای حذف هارمونیکهای تولیدی در سیستم HVDC فیلترهایی در خطوط ac و dc نیاز است.

با در نظر گرفتن مزایا و معایب بر شمرده، سیستم HVDC روش مناسبی برای انتقال توان به‌ویژه در حالتهای زیر به حساب می‌آید:

- انتقال قدرت در فواصل دور؛
- انتقال قدرت میان دو شبکه ac با مشخصات متفاوت؛
- انتقال قدرت به جزایر؛
- اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه.

### ۳. انواع سیستم HVDC

در ساختمان اصلی یک سیستم انتقال HVDC از دو مبدل استفاده شده است که به کمک یک خط انتقال یا کابل به یکدیگر متصل شده‌اند. این مبدلها یکسوکننده و اینورتر نامیده می‌شوند. یکسوکننده‌ها ولتاژ تولیدی در مبدأ را از AC به DC و اینورترها ولتاژ دریافتی در مقصد را که از نوع DC است، به AC تبدیل می‌کنند[۳]. برای تبدیل ولتاژ از AC به DC و بر عکس، مبدلهای دو طرف سیستم HVDC توان راکتیو مصرف می‌کنند. این توان راکتیو تا اندازه‌ای به وسیله راکتورها یا بانکهای خازنی جبران می‌شود. ساختار ساده شده یک سیستم HVDC در شکل۱ نشان داده شده است[۴].

به‌طور کلی، می‌توان سیستم HVDC را به دو دسته زیر تقسیم کرد:

- **HVDC سنتی**
- **VSC-HVDC**

کلیدهای مورد استفاده در مبدلهای HVDC سنتی تریستور نام دارد؛ این کلیدها را می‌توان در زمانهای دلخواه روشن کرد، اما خاموش شدن این کلیدها به راحتی امکان‌پذیر نیست. از اوایل دهه ۷۰ تاکنون از، از تریستورهای توان بالای زیاد برای کنترل یا سوئیچ کردن عناصر قدرت راکتیو در سیستم‌های قدرت الکتریکی استفاده شده است. به همین دلیل، امروزه تریستور در صنعت توان بالا جایگاه ویژه‌ای دارد. طی ۲۵ سال گذشته خانواده‌های جدیدی از نیمه هادیهای قدرت زیاد به‌وجود آمده‌اند؛ این ادوات با قابلیت خاموش شدن طرح و تولید شده‌اند. با استفاده از این وسایل درجه آزادی دیگری به دست آمد و امکان طرح انواع مبدلها با همان اصول اولیه، ولی مدارهای ساده‌تر فراهم شد. اولین نیمه‌هادی قدرت کنترل شونده GTOها بودند که در دهه ۱۹۷۰ ظهور یافتند و به سرعت در صنعت راه‌اندازی موتورها رسوخ کردند. امروزه، نمونه دیگری از عناصر کنترل شونده؛ یعنی IGBTها کاملاً بر راه‌اندازهای صنعتی سلطه یافته‌اند. عیب عمده GTOها در مقایسه با IGBTها زمان تأخیر نسبتاً زیاد آنها به ویژه هنگام قطع است. IGBTها قابلیت سوئیچ‌زنی در فرکانس بالا را دارند. با توجه به ظهور این نیمه هادیهای قدرت، امکان کنترل راحت‌تر و سریع‌تر سیستم انتقال DC فراهم شده است. فرکانس کلیدزنی این سوئیچ‌ها در حدود چندین کیلوهرتز است. البته، از یک نظر تریستورها هنوز بی رقیب هستند و توانایی حمل قدرت آن همراه با سادگی موازی یا سری شدن آنها، این وسیله را انتخاب ارجح برای کارهای ولتاژ زیاد-جریان زیاد، ولی با سرعت کم می‌گرداند. اما برای کاربردهای قدرت زیاد- سرعت زیاد در حجم کم، استفاده از IGBTها نه تنها یک ضرورت به نظر می‌رسد، بلکه کارایی دینامیکی بهتری نیز حاصل می‌شود.

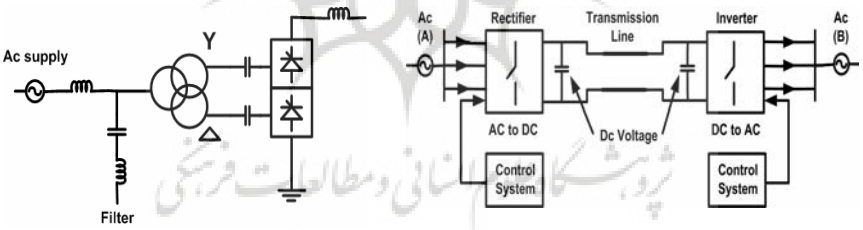
در سالهای اخیر فناوری HVDC سنتی در دو شاخه گسترش یافته است[۳]:

### ۳ . ۱. HVDC سنتی اصلاح یافته

تریستورهای جدید مورد استفاده در این نوع HVDC تا سطح جریان ۴KA و ولتاژ ۱۰KV گسترش یافته‌اند. در سالهای اخیر، تجهیزات این سیستم از جمله کلیدهای قدرت و فیلترها اصلاح شده‌اند.

### ۳. ۲. سیستم HVDC سنتی با مبدل (CCC) [۱]

این نوع از سیستم HVDC از یک خازن سری استفاده می‌کند که بین ترانسهای مبدل و تریستورها واقع می‌شود. این خازنها عمل تبدیل وضعیت کلیدها را از حالت خاموش به روشن و برعکس، وقتی به شبکه ضعیف وصل می‌شوند، بهبود می‌بخشند[۴]. توان راکتیو برای عمل تبدیل ولتاژ به وسیله خازنهایی جبران می‌شود که به طور سری میان مبدلها و ترانسفورمرها نصب شده‌اند. با حذف شدن تجهیزات جبران توان راکتیو، فضای مورد نیاز برای یک ایستگاه HVDC با CCC در مقایسه با HVDC سنتی کاهش می‌یابد. در شکل۲ این سیستم نشان داده شده است.




**شکل۱: سیستم HVDC** **شکل۲: سیستم HVDC با مبدل CCC**

### ٤. استفاده از مبدل منبع ولتاژ (VSC) در سیستم HVDC

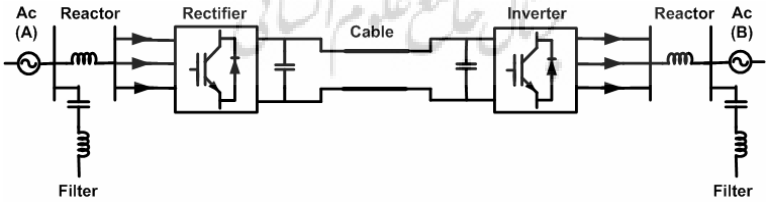
در این نوع از سیستم HVDC که به VSC-HVDC معروف است، از سوئیچهای IGBT در مبدل آن استفاده می‌شود. قطع و وصل این سوئیچها با

---

1 . Capacitor Common Commutated

استفاده از یک سیستم ایجاد پالس به نام PWM[1] صورت می‌پذیرد. با این سیستم قادر خواهیم بود که هر ولتاژ با هر زاویه‌ای را در خروجی تولید کنیم. معمولاً ارتباط بین سیستم کنترل با کلیدهای قدرت با فیبر نوری صورت می‌گیرد. هدف از طراحی این سیستم کنترل، ایجاد ولتاژ دلخواه در خروجی است. مبدلهای به‌کار رفته در این نوع از سیستم‌ها به نام مبدل منبع ولتاژ معروف هستند. این مبدلها به طور ذاتی امکان جاری شدن توان را از سمت یکسوکننده به سمت اینورتر و برعکس فراهم می‌کنند. با توجه به اینکه از این سیستم در شبکه انتقال توان، با ولتاژ و جریان زیاد استفاده می‌شود و این ولتاژ و جریان از محدوده ولتاژ و جریان قابل تحمل IGBTها بیشتر است، باید به تعداد لازم از IGBTها به‌صورت سری و موازی استفاده کرد. در سری یا موازی شدن IGBTها مسئله اصلی چگونگی تعادل ولتاژ میان ادوات در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی است. در واقع، عملکرد سری یا موازی کردن ادوات IGBT به دلیل مشخصات سوئیچینگ نامساوی ادوات، جریانهای نشتی غیر یکسان، اندوکتانس نشتی نا برابر و تأخیرهای غیر مساوی در مدارهای راه‌انداز گیت کار ساده‌ای نیست.

تجهیزات سیستم VSC-HVDC شامل مبدلها، سیستم کنترل، سیستم خنک کننده، خازنهای ولتاژ بالا، راکتورها، فیلترهای ساده و تجهیزات جانبی دیگرند[۵]. درشکل۳ یک سیستمVSC-HVDC نشان داده شده است.




**شکل۳: تجهیزات یک سیستم VSC-HVDC**

1. Pulse Width Modulation

در حالت ایده‌آل شکل موج خروجی یک اینورتر باید سینوسی باشد، ولی در اینورترهای عملی این شکل موج شبه سینوسی است و در نتیجه، حاوی مؤلفه‌های هارمونیکی است که از سوئیچینگ IGBTها ناشی شده‌اند. دامنه این هارمونیکها از دامنه سیگنال اصلی خیلی کوچک‌تر و فرکانس آنها چندین برابر فرکانس سیگنال اصلی است. برای مثال، فرکانس هارمونیک سوم سه برابر فرکانس اصلی است. انتشار این هارمونیکها در شبکه AC باعث عملکرد نامناسب تجهیزات موجود در سیستم AC و همچنین، اعوجاجهای مخابراتی و رادیویی می‌شود. برای حذف این هارمونیکها از فیلتر مناسب استفاده می‌شود. این فیلترها علاوه بر حذف هارمونیکهای فرکانس بالا، عمل تولید قدرت راکتیو را به ویژه در سیستم‌های دو طرفه(انتقال توان از سمت یکسوکننده به سمت اینورتر و برعکس) بر عهده دارند. به همین دلیل، فیلترهای طرف ac به‌طور چشمگیری بزرگتر از طرف dc خواهند بود. گاهی اوقات و به ویژه در قدرت کم در طرف dc به ساختار ویژه برای فیلترها احتیاج نیست و در این حالت استفاده از خازن با ظرفیت مناسب کفایت می‌کند.

در سمت DC دو دسته خازن با اندازه یکسان وجود دارد. اندازه این خازنها به ولتاژ DC مورد نیاز وابسته است. هدف اولیه این خازنها فراهم کردن یک انرژی ذخیره شده است که بتواند توان جاری را کنترل کند. همچنین، این خازن ضربان ولتاژ را در سمت DC کاهش می‌دهد.

از آنجایی‌که در طرف dc ضربان جریان نسبتاً شدید است، برای کاهش آن باید از راکتورهای متعادل‌کننده استفاده شود. در واقع، این راکتورها به عنوان قسمتی از فیلتر ورودی عمل می‌کنند. کار مهم دیگر این وسیله کاهش تغییرات جریان گذراست. اندوکتانس مورد نیاز راکتور به عوامل مختلف به ویژه ولتاژ و جریان مجاز مبدل بستگی دارد و معمولاً برای ولتاژهای کوچک در حدود چند میلی هانری و با عایق هوا ساخته می‌شوند.

علاوه بر موارد یاد شده، مبدلها باید به تجهیزات ویژه‌ای برای کنترل و حفاظت مجهز باشند. واحد اصلی تجهیزات کنترل، بخش کنترل آتش است که پالسهای تحریک مناسب را برای کلیدهای قدرت مبدل تولید می‌کنند.

### ۵. مشخصات و تجهیزات سیستم‌های HVDC سنتی و VSC-HVDC

یک سیستم HVDC از یک یکسوکننده و یک اینورتر، سیستم کنترل و تجهیزات جانبی دیگر تشکیل شده است.

- **ایستگاههای مبدل**

در مبدلهای موجود در سیستم HVDC معمولی از تریستور استفاده شده است. تمام ارتباط بین تجهیزات کنترل در سیستم HVDC معمولی و تریستورها با استفاده از فیبر نوری انجام می‌پذیرد. این سیستم‌ها برای کاربرد مخصوص ساخته می‌شوند و دارای سطح اشغال شده استانداردی نیستند.

در سیستم VSC-HVDC از IGBT استفاده شده است. مبدلها، جهیزات کنترل و خنک کننده‌ها در ابعاد استاندارد ساخته و در یک محفظه نصب می‌شوند که حمل و نقل و نصب آن را آسان می‌کند. این سیستم‌ها دارای اندازه استانداردند و فضای بسیار کمی را اشغال می‌کنند. در شکل۴ اندازه یک سیستم VSC-HVDC برای توان ارسالی ۵۰ مگاوات نشان داده شده است[۶].

- **فیلترهای AC و بانک خازنی**

در سیستم دوازده پالسه HVDC معمولی، هارمونیکهای ۲۵،۲۳،۱۳،۱۱ و بالاتر تولید می‌شوند. این هارمونیکها با نصب فیلترهای AC نسبتاً حجیم و گران محدود می شوند. فیلترها و بانکهای خازنی نصب شده توان راکتیو را نیز کنترل می‌کنند.

در CCC توان راکتیو به وسیله خازنهای سری که بین مبدل و ترانس نصب می‌شوند، کنترل می‌شود. جبران توان راکتیو نیاز به سیستم سوئیچینگ AC و مدارهای بریکر را حداقل می‌کند که باعث کاهش سطح ایستگاه HVDC می‌شود.

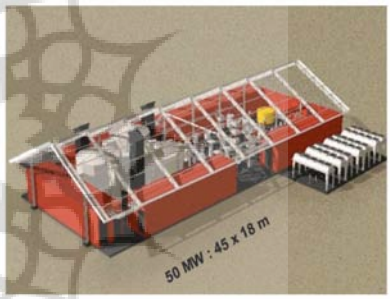
مقدار جریان هارمونیکی وارد شده به شبکه از طرف مبدلهای منبع ولتاژ نسبت مستقیم با مقدار ضربان جریان دارد. هرچقدر مقدار ضربان جریان وارد شده به شبکه کمتر باشد، جریان هارمونیکی وارد شده به شبکه نیز کمتر خواهد شد. مقدار ضربان جریان وارد شده به شبکه نیز با مقدار سلف متصل به مبدل و همچنین، فرکانس سوئیچینگ نسبت عکس دارد. بنابر این، مقدار جریان هارمونیکی در مبدلهای VSC به فرکانس PWM بستگی دارد. همچنین، هر چقدر مقدار سلف بیشتر باشد، هارمونیک ایجاد شده توسط سوییچها کمتر به شبکه وارد می شود و تلفات نیز کمتر است. از طرفی، برای داشتن پاسخ دینامیکی مناسب و قابلیت دنبال کردن جریان باید مقدار سلف را کوچک انتخاب کرد. لذا، انتخاب مقدار مناسب برای سلف مصالحه‌ای مابین حداکثر ضربان جریان مجاز و پاسخ دینامیکی سریع خواهد بود[۶].

- **هادیها**

کابلهای مورد استفاده در سیستم HVDC به دو نوع روغنی و غیر روغنی تقسیم می‌شوند. محدودیت مسافت کابل‌کشی برای کابلهای روغنی تا ۶۰ کیلومتر است. کابلهای غیر روغنی چنین محدودیتی ندارند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌ترند. مزایای این کابلها شامل قدرت تحمل در برابر میدانهای DC، قدرت تحمل در برابر جریان زیاد، قدرت تحمل چگالی بالای جریان، عدم ریسک نشتی روغن، زمان کم برای تولید، اتصالات ساده و نصب ساده است[۶].

کابل‌های جدید با ساختار پلی اتیلن ساخته شده‌اند که برای دریا (تا عمق ۱۰۰۰متر) و زیرزمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این کابلها برای سیستم VSC-HVDC استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این کابلها در شکل ۵ نشان داده شده است.

در سیستم HVDC معمولی بیشتر از خطوط هوایی برای انتقال انرژی استفاده می‌کنند. استفاده از کابل در مقایسه با خط هوایی با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌ها [از جمله خرید زمین] مقرون به صرفه‌تر است[۷].




**شکل٤: اندازه سیستم -VSCبرای توان ارسالی ۵۰ مگاوات**

**شکل۵: کابلهای دریایی و زمینی برای سیستم VSC-HVDC**

- **طراحی و نگهداری**

معمولاً توان انتقالی، طول سیستم انتقال و سطح ولتاژ، شرایط محیطی و وضعیت ایستگاه دریافت انرژی برای طراحی مهم هستند. اگر توان خروجی انواع سیستم‌های HVDC را یکسان در نظر بگیریم، به طور متوسط زمان مورد نیاز برای طراحی یک سیستم HVDC سنتی سه سال و برای سیستم VSC-HVDC تقریباً یک سال است.

استفاده از سیستم VSC-HVDC برای جاهایی با نیروی کار ماهر کم بسیار مناسب است. این سیستم‌ها طوری طراحی می‌شوند که بتوان آنها را از راه دور کنترل کرد. بنابراین، با تعداد کمی اپراتور می‌توان چندین مرکز را کنترل کرد.

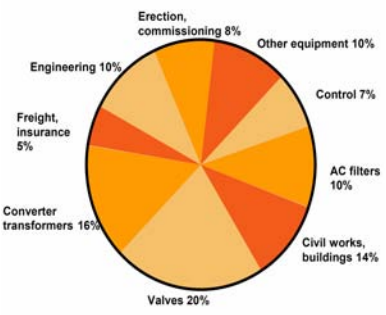
همچنین، برای ارتباط ایستگاهها در سیستم HVDC به کانالهای مخابراتی سریع نیاز است، اما در سیستم VSC-HVDC به کانال مخابراتی احتیاج نداریم[۷].

- **قیمت**

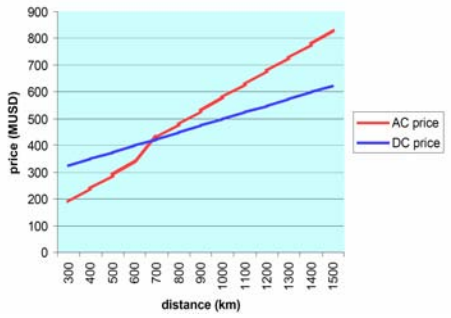
بسیاری از پارامترها در مشخص کردن هزینه انتقال انرژی به روش HVDC تأثیرگذارند. این پارامترها شامل توان انتقالی، شرایط محیطی، نوع خط انتقال، ایمنی و تجهیزات تسطیح ولتاژ هستند. حتی با در نظر گرفتن این پارامترها نمی‌توان به راحتی قیمت یک سیستم HVDC را تعیین کرد. در شکل۶ تخمینی از هزینه نصب این سیستم‌ها نشان داده شده است.

هزینه‌های انتقال توان به وسیله خط DC یا خط AC برای یک سیستم ۲۰۰۰ مگاوات در شکل۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل۷ مشخص است، قیمت یک خط HVDC معمولی در مسافتهای طولانی کمتر از HVAC است.

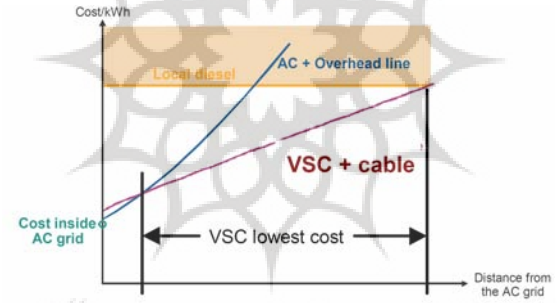
در شکل ۸ نشان داده شده است که انتقال برق برای یک نقطه در دریا با استفاده از سیستم VSC-HVDC از نظر اقتصادی ارزان‌تر از خط AC یا تولید برق با استفاده از ژنراتور دیزلی است[۳].




**شکل٦: هزینه طراحی و ساخت سیستم HVDC**




**شکل۷: مقایسه بین خط HVAC و HVDC بر حسب فاصله**




**شکل۸: مقایسه انتقال برق با استفاده از سیستم VSC-HVDC ، HVAC و نیروگاه محلی**

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

- **پایداری**

برای پایداری فرکانس و ولتاژ در سیستم VSC-HVDC بر خلاف HVDC معمولی تکیه بر شبکه AC لازم نیست[۳].

- **کنترل توان**

در سیستم VSC-HVDC می‌توان به طور همزمان توان اکتیو و راکتیو را کنترل کرد. به دلیل استفاده از PWM قادر خواهیم بود که هر ولتاژ با هر زاویه‌ای را در خروجی تولید کنیم. بنابراین، کنترل توان اکتیو و راکتیو می‌تواند به طور مجزا صورت پذیرد. در این سیستم‌ها جهت توان از سمت یکسوکننده به سمت اینورتر و برعکس به صورت سریع می‌تواند تغییر کند. هر چقدر سرعت نمونه‌برداری و سرعت سوئیچینگ IGBTها بیشتر باشد، پاسخ دینامیکی سریع‌تر است و بنابراین، مقدار و جهت توان با سرعت بالاتری می‌تواند به حالت پایدار برسد. معمولاً مقدار فرکانس سوییچینگ IGBTها ۲KHZ تا ۱۰KHZ انتخاب می‌شود. این محدودهٔ فرکانسی هارمونیکهای فرکانس بالا را به‌وجود می‌آورد که باعث آشفتگی در تجهیزات و بارهای متصل به شبکه خواهد شد. استفاده از یک سلف مناسب در طرف AC راه حل این مشکل است. اما این سلفها که به‌عنوان راکتور نیز به‌کار می‌روند، نسبتاً بزرگ، سنگین و گران قیمت هستند و محدودهٔ عملکرد دینامیکی مبدل را تحت تأثیر قرار می‌دهند[۳].

- **قدرت**

در قدرتهای بالاتر از چند صد مگا وات بیشتر از HVDC سنتی استفاده می‌شود. سیستم‌های VSC-HVDC در قدرتهای چند ده مگاوات تا ۳۳۰ مگاوات تولید شده است. ولتاژ DC خروجی این سیستم‌ها از ده تا ۱۵۰ کیلو ولت است[۳].

- **اتصال**

در VSC-HVDC می‌توان چند ایستگاه را به هم متصل کرد، اما اتصال چند ترمینال به یکدیگر در HVDC سنتی به سختی صورت می‌گیرد.

## ٦. روشهای کنترل VSC-HVDC

روشهای مختلفی برای کنترل سیستم‌های HVDC بر پایه VSC بیان شده است. در مرجع [۸] کنترل کننده‌ای بر پایه مدل معکوس حالت پایدار سیستم VSC-HVDC بیان شده است. از این روش کنترل برای ایجاد حلقه کنترلی مجزا و مستقل از هم استفاده شده است. در مرجع [۹] فرض شده است که سیستم HVDC به یک خط بی‌نهایت وصل باشد، اما ممکن است که در بعضی از مواقع یکی از ایستگاههای VSC-HVDC به یک ژنراتور متصل باشد[۱۰]. در این روشها فقط به طراحی روش کنترل پرداخته شده و اثر متقابل سیستم AC بر روی سیستم DC در نظر گرفته نشده است. یک روش کنترلی بهینه برای اتصال سیستم VSC-HVDC به ژنراتور در مرجع [۱۱] بیان شده است. به دست آوردن و محاسبه معادلات کنترلی در این روش پیچیده و بغرنج است. برای بهینه کردن پارامترهای سیستم کنترل پس از محاسبه آنها روش کنترلی بر مبنای الگوریتم ژنتیک [۱۲] بیان شده است. همچنین، از روش کنترلی فاز و دامنه [۱۳و۱۴] و روش غیر خطی [۱۵] نیز برای سیستم VSC-HVDC استفاده شده است. در همه روشهای گفته شده به هر دو سنسور ولتاژ و جریان نیاز است.

یکی از روشهای کنترل مبدلهای الکترونیک قدرت که مبتنی بر کنترل لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو و با استفاده از بردار ولتاژ است، به DPC [1] معروف

---

1 . Capacitor Common Commutated

است [۲۰-۱۶]. در این مراجع از روش کنترل مستقیم توان ( DPC) بدون استفاده از سنسور ولتاژ خط و با کمک تقریب شار مجازی برای کنترل سیستم VSC-HVDC استفاده شده است. استفاده از تخمین شار، مقاوم بودن سیستم کنترل در برابر اعوجاج خط را تضمین می‌کند. همچنین، جریان سینوسی با هارمونیک کم به دست می‌آید و استفاده از روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM)[1] با توجه به بالا رفتن سرعت سوئیچینگ ادوات الکترونیک قدرت باعث بالا رفتن سرعت سیستم، افزایش کیفیت توان و کاهش هزینه خواهد شد. این روش به سادگی در پردازشگرهای دیجیتالی قابل اعمال است.

### ۷. محیطهای شبیه‌سازی

معمولاً سیستم‌های VSC-HVDC در دو محیط مختلف نرم‌افزاری شبیه‌سازی می‌شوند:

- **برنامه‌هایی که بر پایه روابط الکترومغناطیسی-الکتریکی نوشته شده‌اند،** برای مثال برنامه‌های PSCAD/EMTDC و EMTP. این برنامه‌ها با توجه به مقدار لحظه‌ای پارامترهای مدار کار می‌کنند و برای بررسی حالتهای گذرا مناسب هستند.
- **برنامه‌هایی که بر پایه روابط مکانیکی-الکتریکی نوشته شده‌اند.** از این برنامه‌ها می‌توان به PSS/E، PSLF، BPA، PSASP و MATLAB اشاره کرد. این برنامه‌ها محدوده وسیعی از شبیه‌سازیها را در برمی‌گیرد. با این برنامه‌ها می‌توان هم سیستم‌های بزرگ و هم سیستم‌های جزئی را شبیه‌سازی کرد. همچنین، ابزارهای متنوعی در این نوع از محیطهای شبیه‌سازی در دسترس است.

---

1 . Space Vector Modulation

## ۸. نتیجه‌گیری

سیستم انتقال VSC-HVDC ترکیبی از جدیدترین فناوریها در زمینه نیمه‌هادی، کنترل و کابلهای انتقال توان است. با استفاده از این سیستم می‌توان کیفیت توان را در سیستم‌های انتقال بهبود بخشید. اتصال به شبکه غیر فعال (passive)، اتصال چند ترمیناله شبکه‌های DC و امکان اتصال شبکه‌های انتقال توان با فرکانسهای متفاوت از کاربردهای VSC-HVDC به شمار می رود. مزایا و مشخصات این سیستم را می‌توان بدین صورت خلاصه کرد:

- کنترل سریع مقدار و جهت توان
- وابسته نبودن به شبکه AC برای پایداری فرکانس و ولتاژ
- امکان اتصال به شبکه غیر فعال (passive)
- عدم نیاز به کانال مخابراتی برای ارتباط بین دو ایستگاه
- هزینه نگهداری کم
- انجام دادن آزمایشهای لازم بر روی ساختار در کارخانه
- احتیاج به فضای بسیار کم
- زمان ساخت کم
- عدم نیاز به نیروی کار ماهر

با توجه به این که فرکانس برق مورد استفاده در بعضی از کشورهای همسایه ایران ۶۰ هرتز است و همچنین، وجود جزایر متعدد در ایران و نیز با توجه به مزایای متعدد این سیستم در مقایسه با سیستم HVDC، در آینده نه چندان دور شاهد به کارگیری این سیستم انتقال برای اتصال برق جزایر و همچنین، اتصال برق کشورهای همسایه به برق سراسری خواهیم بود.

تشخیص زاویه ولتاژ ورودی در اتصال سیستم VSC-HVDC به یک شبکه نامتقارن یا اعوجاج‌دار امری مشکل و پیچیده است. عدم تشخیص صحیح زاویه باعث ایجاد خطا در سیستم کنترل مبدلها می‌شود. برای کارکرد صحیح

سیستم VSC-HVDC و بالا بردن کارایی آن در اتصال به شبکه‌های غیرایده‌ال، پیشنهاد می‌شود از یک حلقه قفل فاز در سیستم کنترل استفاده شود. حلقه قفل فاز هنگامی که ولتاژ شبکه دارای اعوجاج یا نامتقارن است، زاویه ولتاژ ورودی را به درستی تشخیص می‌دهد.

## مراجع


1. R. Grunbaum, "Enhancing of Power quality and Availability in Distribution Systems by Means of Voltage Source Converters," IEE2001, No. 482, pp.167-167, June 2001.
2. G. Asplund, "Application of HVDC Light to Power System Enhancement," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 4, pp.2498-2503, Jan. 2000.
3. R. Rudervall & R. Sharma, "High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper," ABB Power Technology, pp.1-19.
4. L. Carloss & L. Weimers, "Recent Evolution in Classic HVDC," The 4th International Conference on Power Transmission & Distribution Technology, pp.1-6, 2003.
5. G. Asplund, "Sustainable Energy Systems with HVDC Transmission,", pp.1-5, 2003.
6. P. Christensen & N. Andersen, "Technical and Economical Analysis on the Optimization of the High Voltage Electrical System on the Balearic Islands," NVE HVDC Group, pp.1-20, April,2002.
7. D. A.Woodford, "HVDC Transmission," Manitoba HVDC Research Centre, pp.1-27, March 1998.
8. G.B. Zhang, Z.Xu & G. Z. Wang, "Steady State Model and its Nonlinear Control of VSC-HVDC System," Proceedings of the CSEE, No. 22, pp.17-22, 2002.
9. Q. Chen, G. Tang & M. Hu, "Steady-state Model and Controller Design of a VSC-HVDC Converter Based on dq0- axis," Automation of Electrical Power Systems, No. 28, pp. 61-66, 2004.
10. G. Asplund, K. Eriksson & K. Svensson, "HVDC Light-DC Transmission Based on Voltage Sourced Converters," CIGRE SC14 Colloguium, South Africa, pp. 1-8, 1997.
11. Z. Q.Hu, C.X. Mao & J. M. Lu, "Application of an Optimal Control Strategy to a New Type of HVDC System Based on Voltage Source Converters," Power System Technology, No. 28, pp. 38-41, 2004.
12. H. Zhaoqing, M. Chengxiong, L. Jiming & C. Man, "Genetic Algorithm Based Control for VSC HVDC," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, pp. 1-6, 2005.

13. G. Zhang & Z. Xu, "Steady-state Model for VSC based HVDC and its Controller Design," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, No. 3, pp. 1085-1090, 2001.
14. B. T. Ooi & X. Wang, "Boost-type PWM HVDC Transmission System," IEEE Transactions on Power Delivery, No. 6, pp. 1557-1563, 1991.
15. G. I. Li, S. Ruan, L. Peng, Y. Sun & X. Li, "A Novel Nonlinear Control for Stability Iprovement in HVDC Light System," IEEE Power Engineering Society, No. 1, pp. 837-845, 2005.
16. A. Rahmati, A. Abrishamifar & E. Abiri, "Direct Power Control of an HVDC System Based on VSCs," IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 2984-89, 2006.
17. Mariusz Malinowski, "Sensorless Control Strategies for Three-phase PWM Rectifiers," Ph. D. Dissertation, Inst. Control Ind. Electron., Warsaw Univ. Technol., Warsaw, Poland, 2001.
18. B. H. Kwon & J. H. Lim, "A Line-voltage-sensorless Synchronous Rectifier," IEEE Trans. Ind. Applicant, Vol.14, pp. 966-972, Sept. 1999.
19. T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, & I. Takahashi, "Direct Power Control of PWM Converter Without Power-source Voltage Sensors," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.34, PP.473-479, May/June 1998.
20. Mariusz Malinowski, PP. Kazmierkoweski & M.Trzynadlowski, "A Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in ac Adjustable Speed Drives," IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 18, No. 6, November 2003.

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۰ /۱۳۸۶/۲)

(تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۶/۵/۱۴)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی