



عنوان تحقیق

سیستم های انتقال HVDC

استاد

جناب آقای مهندس خفافی

تهیه و جمع آوری

قاسم کاظمی علیشاه

دانشجوی رشته الکترونیک

مهندسی فشار قوی الکتریکی و بررسی مسائل انتقال انرژیهای بزرگ با جریان مستقیم

مقدمه

از چندین دهه پیش برای مهندسين الكترونيك پيوسته اين سؤال مطرح بوده است كه انتقال انرژی های بزرگ الكتريكي در فاصله های طولانی، با جريان متناوب مطلوب تر است يا با جريان مستقيم؟

نیاز به انرژی الكتريكي هر روز بيشتر مشهود می شود و در آینده نیز اين نیاز بطور قطع افزایش خواهد يافت. بالا رفتن مصرف انرژی الكتريكي در مناطق صنعتی از سوئی و دور بودن آنها از مراکز توليد، انتقال انرژی های بزرگی را در فاصله های طولانی الزام آور می سازد. محدود نگاه داشتن انرژی تلفاتی در طول چنین خطی، بالا بردن فشار الكتريكي را ديكته می كند و انتقال انرژی بزرگ تحت فشار الكتريكي قوی متناوب افزایش چشمگیر تلفات كورونا را نیز به همراه خواهد داشت. بعلاوه مسائل فنی و اقتصادی دیگری نیز مطرح می شود كه از آن جمله توان بزرگ بارگیری انتقال انرژی است كه با اتصال پيچك های القائی در خط اثر سوء آن را می توان خنثی ساخت. برای مثال در انتقال هزار میلیون وات در فاصله هزار كيلومتر، توان بارگیری خط می تواند تا حدود ۷۵۰ میلیون ولت آمپر بالغ گردد. به اضافه همانطور كه در بالا اشاره شد تلفات ناشی از كورونا در طول خط نیز خود مسئله ای قابل تعمق است.

همچنین جریان اتصال زمین که خود معلول افزایش مولفه حقیقی جریان مصرفی است، اثر سوء قابل توجهی باقی می گذارد. در این مورد Petersen نیز در محدود نگاه داشتن و خاموش کردن سریع آن کارایی کافی نشان نمی دهد. بنابراین در این موارد اجباراً باید علاوه بر آن پیچک از وسائل دیگری در کوچک کردن و میرایی جریان اتصال زمین استفاده کرد.

در خط انتقال انرژی ای که طول آن در حدود هزار کیلومتر است و در حد توان طبیعی خود بار الکتریکی انتقال می دهد، جریان اتصال کوتاه، در صورت وقوع باید در زمانی برابر چندین دهه ثانیه بوسیله کلید قدرت قطع گردد. بنابراین استقامت الکتریکی چنین کلیدی و نحوه ساختن آن از جمله مسائلی است که باید مورد توجه قرار گیرد. مشکلاتی چند از این قبیل در انتقال انرژی تحت فشار الکتریکی متناوب ۴۰۰ کیلو ولت به بالا و فواصلی در حدود هزار کیلومتر و بیشتر مطرح است. با توجه به آنچه گفته شد و بررسی راه حل های آن از لحاظ اقتصادی، حل مسئله انتقال انرژی از طریق یکسو کردن جریان نیز مطرح می شود. کوشش چندین دهه اخیر مهندسين در این زمینه مسائل فنی چندین جانبه ای را مطرح ساخته است که الکتروتکنیک جدید برای آنها تا حدود زیادی به راه حل های جالبی دست یافته است. از آنجمله انتقال انرژی در فاصله های دور و یا عبور خط از دریا و بلاخره ارتباط الکتریکی دو شبکه برق با هم از طریق انتقال انرژی با جریان مستقیم است که اکنون به

مراحل پیشرفته ای نیز رسیده است. بطور خلاصه مجموعه عللی که انتقال انرژی با جریان مستقیم را توجیه می کند در زیر می آوریم:

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 دو شبکه برق با فرکانس متفاوت و یا 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.

ویژگی های انتقال انرژی با فشار قوی و جریان مستقیم

می دانیم که در جریان مستقیم، در حالت پایداری، بین ظرفیت الکتریکی و مقاومت سلفی خط تبادل انرژی الکتریکی، مغناطیسی صورت نمی پذیرد و به همین دلیل در انتقال انرژی تحت فشار الکتریکی قوی با جریان مستقیم مولفه انرژی القائی منتقل نمی شود، بلکه تنها انرژی حقیقی است که توسط هادی انتقال می یابد. این مسئله بدان معنی است که در چنین طریقه از انتقال انرژی هرگز توان اتصال کوتاه بین دو شبکه جریان متناوب از یکی به دیگری منتقل نمی شود. در انتقال انرژی الکتریکی جریان مستقیم، انرژی انتقالی ناشی از

اختلاف فشار الکتریکی بین ابتدا و انتهای خط هادی است و نه مانند جریان متناوب ناشی از اختلاف زاویه بین فشار الکتریکی ابتدا و انتهای خط. دقیقاً به همین علت نیازی به اتصال خازن های سری و یا مقاومت سلفی در خط نیست. همچنین در انتقال انرژی الکتریکی با جریان مستقیم در سیم هادی شاهد پدید آمدن اثر پیوسته نخواهیم بود و بنابراین می توان از تمامی سطح مقطع هادی سود جست. بعلاوه در عایق کابل های ارتباطی تلفات عایقی ایجاد نمی شود و به همین طریق تلفات حرارتی ناشی از جریان القایی در غلاف فلزی آنها بسیار کوچک است. با توجه به شرایط بر شمرده در بالا می توان انتظار داشت که ایزولاسیون ضعیفتری برای کابلها کافی باشد.

در پستهای یکسو کننده و متناوب کننده، تأسیسات انتقال انرژی با جریان مستقیم احتیاج به توان الکتریکی القایی است که از مجموعه توان لازم برای فرمان دادن و توان برای تنظیم کردن تشکیل می شود. مقدار مجموعه این توان القایی در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد توان حقیقی است. این مقدار توان الکتریکی را نمی توان از شبکه جریان متناوب اخذ کرد و معمولاً در پست تهیه می شود. وسایل لازم برای تهیه این توان القایی عبارت است از باطری های خازنی و پیچک های القایی برای تغییر فاز. باطری های خازنی را در ارتباط سری با پیچک های القایی به مداری میرا برای کوچک کردن دامنه هارمونیها مبدل می سازیم. در پستهای انتقال انرژی با جریان مستقیم بین دو شبکه جریان متناوب با استفاده از مدار پل معمولاً هارمونی های از درجه $np+1$ پدید می آیند $n=1,2,...$ و $P=6$.

بوسیله تبدیل اتصالهای ستاره- ستاره و ستاره- مثلث در سیم پیچهای ترانسفورماتورهای قبل از یکسو کننده می توان $P=12$ را نیز به دست آورد. باید کوشش کرد میراثی را به حدی رساند که نوسانات روئی تا حدود یک درصد فشار الکتریکی شبکه تنزل یابد. این امر به ویژه برای جلوگیری از پدید آمدن اختلالات تلفنی لازم است.

گامهای تکاملی در انتقال انرژی تحت فشار قوی با جریان مستقیم

نخستین گام در راه تکامل شیوه انتقال انرژی تحت فشار قوی با جریان مستقیم در سال ۱۸۸۲ میلادی برداشته شد. در این سال در کشور آلمان بین دو شهر مونیخ و میس باخ انرژی الکتریکی با جریان مستقیمی را تحت فشار الکتریکی ۲ کیلو ولت به فاصله ۵۷ کیلومتر انتقال دادند. سپس در طول سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۹۱۰ انرژی الکتریکی ای با توان بین ۱۵۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلو ولت رت تحت فشار الکتریکی مستقیم ۶ تا ۷۰ کیلو ولت، در فواصلی از ۷۰ تا ۲۰۰ کیلومتر منتقل کردند. از آنجا که در آن سالها بالا بردن فشار الکتریکی مستقیم در محل تولید و پایین آوردن آن در محل مصرف آسان نبود، طبعاً در انتقال انرژی جریان متناوب سه فاز گامهای سریع تکاملی برداشته شد و انتقال انرژی جریان مستقیم تقریباً به فراموشی سپرده شد. لیکن از آنجا که انتقال انرژی جریان مستقیم دارای مزایای چندی بود، طبیعی است که در هر فرصت مناسب مجدداً مطرح می گردید. به همین جهت در سالهای دهه ۳۰ میلادی با ساختن یکسو کننده جیوه ای مجدداً گامهایی در راه امکان دادن به انتقال انرژی با جریان مستقیم برداشته شد. ثقل چنین گامهای تکاملی در کشورهای سوئیس و آلمان بود. از جمله در

آلمان بین سالهای ۱۹۳۷ تا ۱۹۴۵ انرژی الکتریکی معادل ۱۶ میلیون وات تحت پتانسیل ۸۰ کیلو ولت یکسو شده، در نزدیکی شهرها نور انتقال یافت و همچنین آزمایشگاهی برای تکامل و ساخت یکسو کننده های جیوه ای در برلن پایه گذاری گردید. در سال ۱۹۳۹ شرکت براون باوری نیز در سویس نیروگاهی با توان الکتریکی نسبتاً محدود و جریانی مستقیم معادل ۳۰ آمپر تحت فشار الکتریکی ۵۰ کیلو ولت تأسیس کرد. در همین سالها شرکت زیمنس بین دو نیروگاه برق در برلن ۱۴ میلیون وات را با جریان مستقیم ۱۴۰ آمپر تحت فشار الکتریکی ۱۰۰ کیلو ولت انتقال داد. اولین خط انتقال انرژی با جریان مستقیم برای تغذیه مصرف کننده های شهری قبل از جنگ جهانی دوم بین نیروگاهی متعلق به شرکت AEG و شبکه برق شهر برلن به طول ۱۱۵ کیلومتر تحت فشار الکتریکی ۲۰۰+ کیلو وات طرح و ساخته شد و بوسیله این خط نیروئی معادل ۶۰ میلیون وات منتقل شد. لیکن با شکست آلمان در پایان جنگ جهانی اخیر این شبکه برچیده شد و بین دو شهر مسکو و کاشیرا نصب گردید که امروزه پایه خط انتقال انرژی بین این دو شهر با ۱۵۰ آمپر جریان مستقیم می باشد. پس از پایان جنگ جهانی دوم شرکت سوئدی ASEA تکامل این طریقه انتقال انرژی الکتریکی را پیگیری و ادامه داد، به نحوی که امروزه در کشورهای صنعتی جهان مانند آمریکا، انگلستان، فرانسه و در مراکز صنعتی در راه تکامل بیشتر آن قدمهای موثری برداشته شده است. به عنوان مثال در آمریکا ۱۰۰۰ میلیون وات تحت فشار الکتریکی ۴۰۰+ کیلو ولت با جریان مستقیمی برابر ۱۲۵۰ آمپر

در فاصله ای برابر ۶۶۰ کیلومتر انتقال می یابد و در انگلستان انرژی ای معادل ۶۴۰ میلیون وات و جریان مستقیمی برابر ۱۲۰۰ آمپر تحت پتانسیلی برابر ۲۲۶+ کیلو ولت انتقال می یابد.

شرکت سویسی- سوئدی AAB ، در کشور برزیل در ITAIPU ، توان الکتریکی معادل ۱۲۶۰۰ میلیون وات تحت فشار الکتریکی ۶۰۰KV+ در طول ۲۴۰۰ کیلومتر با توانی برابر ۶۰۰۰ MW تحت فشار الکتریکی ۷۵۰+ کیلو وات اجرا شده است و برنامه گسترش آن با توانی تا ۴۰۰۰۰ میلیون وات برای فاصله ای تا ۴۵۰۰ کیلومتر طرح ریزی شده است. فشار الکتریکی آن در حدود ۱۱۰۰+ تا ۱۲۵۰+ کیلو ولت انتخاب شده است. موازی با تکامل انتقال انرژی تحت فشار الکتریکی مستقیم، در انتخاب وسائل و دستگاههای مربوط به آن نیز گامهای تکاملی چندی برداشته شد، از آن جمله استفاده بیشتر از ترისტورها به جای یکسو کننده های جیوه ای. از جمله خطوط انتقال انرژی تحت فشار الکتریکی مستقیم که در آن از تریسستور استفاده شده است، خط انتقال انرژی Cabora – Bassa در افریقا و خط برونسویک در فاره آریکای شمالی است. اضافه کنیم که از سالهای ۱۹۶۸ میلادی به بعد تنها از تریسستورها در این نوع خطوط استفاده شده است.

انتقال انرژی با یک رشته هادی می تواند تأثیر سوئی بر روی اجسام و وسائل فلزی مانند لوله ها که در نزدیکی آنها دفن شده باشد باقی گذارد، بنابراین از زنگ زدگی و خوردگی اجسام مانند لوله های آب و گازرسانی که در زمین قرار گرفته اند، با رعایت فاصله و کارگزاری الکترودهای ویژه جلوگیری می شود.

در زمینه خوردگی فلزات بر اثر انتقال انرژی یک قطبی کارهای تحقیقاتی چندی در کشورهای آمریکا، آلمان و سوئد انجام گرفته است.

در مواردی که یکی از قطبها را دریا تشکیل می دهد، در کنار زنگ زدگی و خوردگی فلزات، میدان الکتریکی ایجاد شده در آب بر روی قطب نمای کشتی ها نیز تأثیر سوء گذارده و جهت یابی در کشتیرانی را مختل می سازد. به همین علت در خط انتقال انرژی بین انگلستان و فرانسه از راه دریای مانش دو رشته کابل در فاصله نزدیک به هم زیر آب قرار داده شده است.

شناسایی مشخصات الکتریکی تأسیسات انتقال انرژی - جریان مستقیم با فشار قوی

با توجه به این واقعیت که هدف ما در این بخش شناسایی بیشتر مشخصات الکتریکی تأسیسات انتقال انرژی با جریان مستقیم از دیدگاه مهندسی فشار قوی می باشد، می کوشیم که به اختصار مهمترین بخش و حتی هسته اصلی این تأسیسات را که عبارت از یکسو کننده و متناوب کننده ها می باشد، بررسی کنیم و گامهای تکاملی در این زمینه را نیز گذرا بشناسیم. بزرگترین گامی که در این زمینه برداشته شده است، ساخت یکسوکننده های جیوه ای، اتصال آنها در مدار پل و جانشینی آنها با تریستورهائی است که در این چند دهه اخیر گام به گام تکامل یافته است. تریستورهای تکامل یافته امروزی در اغلب مدارهای الکتریکی فشار و

جریان قوی جانشین یکسو کننده های جیوه ای شده است. تریستورهای امروزی اکثراً در محفظه های حاوی روغن جای گرفته اند و بنابراین می توانند در فضای باز نیز نصب گردند.

ساختمان این تأسیسات عبارت است از گروههای تریستور که در طبقات متعدد قرار گرفته و با هم در مداری سری اتصال یافته اند. هر گروه از تریستورهای فشار الکتریکی لازم برای فرمان گرفتن را از مقسم های اهمی - خازنی دریافت می کند.

از آنجا که فشار الکتریکی مستقیم از یکسو کننده های اتصال یافته در مدار سری جریان بزرگی را عبور می دهد و این یکسو کننده ها خود نسبت به زمین عایق بندی شده است. بنابراین انرژی الکتریکی وسائل و تأسیسات جنبی مثلاً انرژی کمکی برای فرمان و تنظیم یکسوکننده ها و انرژی لازم برای خنک کننده ها به وسیله مولدهای جداگانه ای تأمین می شوند و از این راه نیازی به اخذ پتانسیل در مقسم های اهمی - خازنی پست نیست تا الزاماً عایق بندی هر طبقه نسبت به زمین انجام گیرد. بنابراین به آسانی قابل درک است که از این راه در حجم عایق بندی صرفه جویی قابل ملاحظه ای پدید می آید.

در تأسیسات یکسوکننده و متناوب کننده ها که در فضای سرپوشیده نصب می گردد مدارهای هر طبقه را می توان بر روی هم سوار کرد و در فضای اشغال شده صرفه جویی به عمل آورد.

از آنجا که ترستورها در مقابل فشار الکتریکی اضافی و جریان های لحظه ای بسیار حساس می باشند، در مراحل اولیه تکاملی، در مدار ترستورها، از برقگیر استفاده می شود. برقگیرها در صورت بالا رفتن غیر مجاز شدت جریان در ترستور، در زمانی برابر چندین میلی ثانیه در دو سر ترستور اتصال کوتاهی پدید می آورند و آن را از مدار تغذیه کننده شبکه جدا می سازد. در صورت پدید آمدن فشار الکتریکی اضافی نیز برقگیرهای ب موازی اتصال یافته ترستور را حفاظت می کنند.

تنظیم توان الکتریکی انتقالی بوسیله تنظیم فشار الکتریکی شبکه یکسو کننده و تغییرآهسته پتانسیل ترانسفورماتورهای تغذیه کننده انجام می گیرد. از این طریق می توان با فرض ثابت ماندن فشار الکتریکی شبکه ها، فشار الکتریکی یکسو شده ثابتی نیز داشت. تغییرات پدید آمده در دامنه فشار الکتریکی یکسو شده را نیز می توان با تغییر و تنظیم ولتاژ متناوب کننده ها تنظیم کرد.

انتقال انرژی الکتریکی با جریان مستقیم به وسیله خطوط هوایی

در طرح های انتقال انرژی با جریان مستقیم که تا کنون اجرا شده است از خط هوایی و یا کابل و در پاره ای از موارد از هر دو استفاده شده است. در طرح های وُلگوگراد – دنباس و یا کوبوراباسا از خط هوایی استفاده شده است.

بدیهی است در انتقال انرژی برابر، خط انتقال انرژی دو سیمه از لحاظ اقتصادی بمراتب با صرفه تر از خط انتقال انرژی سه فازه است. بویژه آنکه خطوط سه فازه اغلب نیز گروهی می باشند. در مورد انتقال انرژی با جریان مستقیم مضافاً می توان در صورت از کار افتادن یک خط از زمین به عنوان قطب دیگر استفاده کرد. بنابراین به سهولت می توان علت این صرفه جوئی را دریافت زیرا در مورد جریان مستقیم سرمایه گذاری بر روی هادی ها و عایق بندی و دکل ها کمتر می شود، و از این راه می توان سرمایه گذاری در پستهای یکسو کننده را جبران کرد.

محاسبه نشان میدهد که عایق بندی خطوط انتقال انرژی با جریان مستقیم نسبت به خط مشابه جریان سه فاز ضخیم تر است. این به علت تأثیر رسوب بیشتر خاک و دوده زغال بر روی سطح عایق شده هادیها است.

برای مثال فاصله دو هادی در یک خط انتقال انرژی با جریان مستقیم ۴۰۰ کیلو ولتی بین قطب مثبت و زمین ۴/۵ متر فاصله در نظر گرفته می شود و در طرح خط انتقال انرژی با جریان مستقیم تحت فشار الکتریکی ۷۵۰ کیلو ولتی فاصله قطب مثبت با زمین ۱۰/۵ تا ۱۵/۵ متر پیش بینی شده است.

انتقال انرژی الکتریکی با جریان مستقیم بوسیله کابل

کابل های انتقال انرژی با جریان مستقیم در مقابل کابل های جریان سه فاز دارای مزایای زیر می باشند.

الف: کابل های جریان مستقیم دارای توان الکتریکی بارگیری نیستند.

ب: اثر پیوسته در کابل های جریان مستقیم پدید نمی آید.

ج: تلفات عایقی ناشی از قطب بندی ایجاد نمی شود.

بنابراین بدلائل بالا، در کابل های جریان مستقیم چه در سطح مقطع هادی و چه در عایق بندی آن می توان صرفه جوئی کرد. برای مثال: ضخامت عایق کابل ۴۰۰ کیلو ولتی جریان مستقیم برابر عایق کابل جریان متناوب برای ۱۱۰/۶۳ کیلو ولت محاسبه می شود. از آنجا که کابلهای جریان مستقیم نیازی به پست های بین راه، به منظور تعبیه پیچک های متعادل کننده جریان خازنی ندارد، در ارتباط الکتریکی فاصله های طولانی از طریق دریا راه حل صحیحی می باشد.

عایق کابل های جریان مستقیم تا ۳۰۰ کیلو ولت معمولاً کاغذ - روغن می باشد و در فشار الکتریکی بالاتر از گازها برای خنک کردن کابل استفاده می شود. با استفاده از کابل های که با گاز خنک می شوند از پدید آمدن حباب های مجوف در عایق کابل ناشی از تغییرات بار الکتریکی جلوگیری می شود.

گامهای تکاملی در "انتقال انرژی با جریان مستقیم"

در گذشته نه چندان دور استفاده از روش انتقال انرژی با جریان مستقیم به ارتباط دو شبکه با فرکانس های مختلف و یا ارتباط بین دو نقطه از زیردریا منحصر می شد. لیکن امروزه استفاده از این روش بیشتر در مواردی است که شرایط اقتصادی این روش از انتقال انرژی اکتريکی را توصیه کند، مانند انتقال انرژی الکتریکی بزرگ در فواصل طولانی. بعنوان مثال، ارتباط بین نیروگاههای آبی با فاصله بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر و بیشتر. امروزه طرح هایی برای انتقال انرژی بین شرق و غرب کشورهای وسیع مانند آمریکا و یا اتحاد جماهیر شوروی سابق در دست مطالعه است که باید چندین گیگا وات را به فاصله چندین هزار کیلومتر انتقال داد.

همچنین ارتباط آسنکرون شبکه های انتقال انرژی الکتریکی که به لحاظ رعایت مسائل اتصال کوتاه و پایداری شبکه نتوان آنها را سنکرون متصل ساخت از جمله مواردی است که از راه ارتباط با جریان مستقیم می توان آن را عملی ساخت. لازم به تذکر است که صرفه جوئی در انرژی و تبعه انرژی اضافی برای موارد لزوم از جمله مواقعی است که ارتباط دو شبکه را ضروری می سازد. زمینه دیگری که در آن از انتقال انرژی جریان دائم می توان سود برد، انتقال انرژی نیروگاههای بزرگ به شبکه پخش انرژی است ، بدون آنکه اتصال کوتاه در شبکه جریان متناوب افزایش یابد.

با توجه به مسائل برشمرده در بالا روشن است که گامهای آتی در تکامل انتقال انرژی با جریان مستقیم در زمینه های مختلفی امکان پذیر است چه در فاصله های طولانی بین مولد و مصرف کننده و چه تغذیه مصرف کننده ها در نقاط ثقل بار.

در تمامی این موارد تغذیه از راه انتقال جریان مستقیم شامل هزینه کابل و وسائل ارتباطی الکتریکی بمراتب ارزانتر از ارتباط با جریان متناوب خواهد بود. در نقاط ثقل بار الکتریکی مراکزی نظیر پستهای ترانسفورماتور، در جریان متناوب، به منظور نصب یکسو و متناوب کننده ها مورد نیاز می باشد.

معرفی انتقال HVDC

خطوط انتقال الکتریسیته در ابتدا با جریان مستقیم گسترش پیدا کرد. دسترسی ترانسفرم ها و پیشرفت و ترقی موتورهای القائی در ابتدای قرن بیستم سبب تقاضای بیشتر برای استفاده از انتقال ac شد.

این تحقیقات و گسترش آن در سوئد در Allmana Sevenska Electriska Aktiebolaget (ASEA) صورت گرفت و یک شبکه مولتی الکتروود کنترل شده لامپ های خلاء قوس جیوه بهینه شده برای فشار قوی و ولتاژ از ۱۹۲۹ گسترش یافت.

نمونه دستگاه های ماشین آلات آزمایشگاهی در سال ۱۹۵۰ در سوئد و ایالات متحده ساخته شدند تا به بررسی استفاده از لامپ های خلأ قوس جیوه در پردازش های نو بنیاد برای انتقال و تغییرات فرکانس پردازند.

خطوط انتقال DC هم اکنون به صورت عملی در آمده اند وقتی که فواصل دور باید تحت پوشش قرار گیرند یا جایی که کابل ها مورد نیاز هستند.

افزایش نیاز به الکتریسیته بعد از جنگ جهانی دوم باعث ایجاد محرک برای تحقیقات خصوصاً در سوئد و روسیه شد. در سال ۱۹۵۰ یک خط انتقال آزمایشی به طول 116 km بین مسکو و Kasira با ولتاژ 200kv راه اندازی شد.

نخستین خط HVDC تجاری در سال ۱۹۵۴ یک کابل زیر دریایی با خط برگشت زمینی به طول 98 km بین جزیره Gotland و جزیره ی اصلی سوئد ایجاد شد.

Thyristor ها در اواخر ۱۹۶۰ در خطوط انتقال به کار برده شدند و لامپ های خلأ فیزیک حالت جامد به واقعیت پیوستند. در ۱۹۶۹ قراردادی برای Eel River d.c. Link در کانادا اعطا شد به عنوان اولین کاربرد لامپ های خلأ فیزیک حالت جامد برای خطوط انتقال HVDC امروزه بالاترین ولتاژ dc برای انتقال 600 kv \pm می باشد که برای یک خط انتقال به طول 785 km، Itaipu Scheme در برزیل می باشد.

انتقال dc هم اکنون یک بخش سازنده انتقال الکتریسیته در بسشیاری کشورها در سراسر جهان است.

چرا از انتقال DC استفاده می کنیم؟

سوالی که معمولاً پرسیده می شود: «چرا از انتقال DC استفاده می کنیم؟»

یک پاسخ این است که تلفات کمتر است ولی این صحیح نیست. میزان تلفات در یک سیستم انتقال طراحی می شود و تنظیم می شود بر مبنای اندازه ی هادی انتخاب شده.

هادی های (رساناهای) DC و ac هر دو شامل خطوط هوایی انتقال و یا کابل های زیر دریایی هستند که می توانند تلفات کمی داشته باشند، اما در هر حال هزینه های بالا در اثر افزایش سطح مقطع برای کاهش تلفات باعث قیمت گران می شود.

وقتی مبدل ها برای خطوط انتقال dc استفاده می شوند برای رجحان دادن نسبت به خطوط انتقال dc صرفاً دلایل اقتصادی دارند که یکی از دلایل زیر را در هر حال صادق است:

- ۱- در خطوط انتقال هوایی dc با دکل های انتقال این دکل ها می توانند طوری طراحی شوند که به ازای هر واحد طول آن ها قیمت کمتری هزینه می شود و در مقایسه با نمونه های مشابه خطوط ac که طراحی می شوند برای انتقال سطح توان مشابه با dc. اما به هر حال ایستگاه های مبدل های dc در هر انتها بسیار گران تر از ایستگاه های ac می باشند.

به هر حال یک سر به سر (یک تعادل سود و زیان) بین قیمت تمام شده خطوط انتقال dc و ac نشان می دهد که خطوط dc مقرون به صرفه می باشند.

خط انتقال dc از دید ظاهری دارای هزینه پایین تری نسبت به خط ac مشابه است و تاثیرات محیطی پایین تری نیز دارد. البته منافع محیطی دیگری نیز برای خطوط انتقال dc در زمینه الکتریکی و اندازه ی میدان وجود دارد نسبت به ac.

۲- اگر خط انتقال زیر سطحی یا کابل های زیر زمینی باشد. بسیار مقرون به صرفه تر از نوع خط انتقالی هوایی است. عملاً امکان پذیر نیست که سیستم کابل ac را در حالت بیش از 50 km بررسی کنیم. اما خطوط انتقال کابلی dc در طول صدها کیلومتر قابل سرویس دهی و بررسی آن برای فواصل 600 km و حتی بیش از آن امکان پذیر است.

۳- بعضی از سیستم های قدرت ac با شبکه های همجوار سنکرون نیستند. حتی با وجود این که فواصل فیزیکی بین آن ها بسیار کوچک است. این مسئله در ژاپن اتفاق افتاده وقتی که نیمی از کشور دارای شبکه 60 Hz و نیمی دیگر دارای سیستم 50 Hz است.

از لحاظ فیزیکی امکان اتصال این دو به یکدیگر وجود ندارد البته با متدهای ac و به صورت مستقیم و امکان مبادله توان الکتریکی بین آن ها امکان پذیر نیست.

به هر حال در صورتی که ایستگاه تبدیل dc در هر سیستمی قرار گیرد با یک رابط میانی بین آن ها امکان پذیر است که جریان در آن مورد نیاز انتقال یابد حتی اگر سیستم های ac متصل شده آسنکرون باقی بمانند (غیر هم زمان).

پیکربندی

یک بخش اساسی مبدل های توان HVDC لامپ خلاء یا بازوی سوپاپ است که ممکن است غیر قابل کنترل باشد اگر ساخته شده از یک یا تعداد بیشتری دیودهای قدرت به صورت سری باشد یا قابل کنترل اگر از یک یا چند Thyristor به صورت سری شناخته شده باشد.

شکل شماره ۱: سمبل های گرافیکی کمیسیون الکتروتکنیک بین المللی (IEC) به تصویر می کشد.

پل استاندارد یا مبدل ارتباطی به صورت اتصال دو مسیری تعریف می شود که در هر گیرنده ی شش لامپ خلاء (دریچه، سوپاپ) یا لامپ خلاء که مطابق شکل ۲ متصل شده اند. چنانکه شکل ۲ به تصویر می کشد.

توان الکتریکی شارش می یابد بین لامپ خلاء HVDC و سیستم ac سه فاز وقتی توان الکتریکی از سیستم ac به سیستم گروهی سوپاپ ها (لامپ های خلاء) شارش می یابد.

سیستم به صورت یکسو ساز بررسی می شود. اگر توان از گروه (ولوها) به سیستم ac شارش کند سیستم معکوس کننده است. هر ولو شامل تعداد زیادی Thyristor های متصل شده به صورت سری است در بخش Thyristor ها.

شکل ۲ یک آرایش گروهی ولوها به صورت ۶ پالسی را در یک شبکه مداری الکتریکی به تصویر می کشد. آرایش گروهی ۶ پالسی متداول است که ولوها قوس جیوه هستند. گروه ولوهای ۱۲ پالسی:

همه ی مبدل های قدرت HVDC با ولوهای Thyristor در یک آرایش مبدل پل ۱۲ پالسی گرد آمده اند.

شکل ۳ استفاده ی دو ترانسفورمرهای مبدل سه فاز با یک بخش سیم پیچی dc به عنوان اتصال ستاره ی زمین نشده و دیگری آرایش مثلث.

بنابراین ولتاژ ac اعمال شده به هر یک از ولوهای گروهی پالسی که یک گروه ولوی ۱۲ پالسی ایجاد می کنند که اختلاف فازی برابر ۳۰ درجه دارند با آنچه که به کار برده می شود که هارمونیک های پنجم و هفتم جریان و در سمت dc هارمونیک ششم ولتاژ را از بین ببرد. بنابراین در یک ذخیره ی معنی دار در فیلترهای هارمونیک نتیجه می شوند. شکل ۳ همچنین خطوط اصلی اطراف هر یک از گروه های سه تایی از چهار ولو را در یک پشته عمودی تکی نشان می دهد.

اینها چهارتایی نامیده می شوند و سر هم بندی می شوند به عنوان ساختار تک ولوی با پشته کردن چهار ولو به صورت سری.

از آنجایی که نرخ ولتاژ Thyristor ها چندین kv است، یک ولو چهار تایی 500kv ممکن است صدها Thyristor منفرد داشته باشد که به صورت گروه سری از ولوها یا بخش های قطعات Thyristor متصل شده اند.

ولوهای چهارتایی برای یک مبدل ولتاژ بالا به صورت مکانیکی دراز است و ممکن است که از سقف اتاق ولوها (Valve Han) آویزان (معلق) شود خصوصاً در مکان هایی که حساس به زلزله هستند.

بخش Thyristor یا ولو آن قسمت از ولو در ساختار مکانیکی است که Thyristor ها را متصل کرده و ضروریات امدادی شامل Heat Sink های خنک شونده با هوا، آب یا گلیکول، مدارات رطوبت سنج و ساختار الکترونیکی راه اندازی ولو بخش Thyristor معمولاً برای غیر قابل تغییر برای اهداف نگهداری است و مطابق شکل ۴ شامل تجهیزات الکتریکی است.

چیدمان (ساختار) پست فرعی:

ابزار مرکزی پست فرعی dc مبدل های Thyristor هستند که معمولاً در Valve Hall قرار گرفته اند. بیرونی ترین ولو همانند خط انتقال Cahora Bassa dc که بین Mozambique و آفریقای جنوبی به کار برده شده است.

شکل ۵ مثالی از تجهیزات الکتریکی مورد نیاز برای پست فرعی dc را نشان می دهد. در این مثال در قطب نشان داده شده اند که یک مورد معمول می باشد و به عنوان ساختار «Bipole» شناخته می شود. برخی سیستم های کابل dc تنها شامل یک قطب یا همان ساختار «Mono Pole» هستند و ممکن است از زمین به عنوان مسیر برگشت استفاده کنند وقتی که از کابل اضافی استفاده می شود جهت پیش گیری از جریان های زمین.

از شکل ۵ تجهیزات ضروری در پست فرعی به اضافه ی گروه ولوی شامل ترانسفورمرهای مبدل دیده می شود.

منظور آنها تبدیل ولتاژ سیستم ac به سیستم dc ای که متصل شده است که ولتاژ dc صحیح توسط پل های مبدل راه اندازی می شود.

برای پست های فرعی نرخ بالا اصلاح کننده های مبدل برای عملیات ۱۲ پالسی معمولاً تشکیل می شوند از واحدهای تک فاز که یک راه موثر کاهش قیمت برای جلوگیری از واحدهای اضافی برای افزایش اطمینان.

سیم پیچ های ثانویه یا همان dc از یک ترانسفورمر مبدل به پل های مبدل متصل اند.

ترانسفورمرهای مبدل در Switch Yard قرار گرفته اند که اگر پل های مبدل در Valve

Hall قرار گرفته باشند اتصال از طریق آن دیوار صورت می گیرد. (ساخته می شود)

این در هر دو مورد به نتیجه رسیده است.

اولاً به گذرگاه های باریک منفردی فاز جایی که گذرگاه هادی ها قرار گرفته اند در صورت

یک کانال عبوری عایق با روغن یا به عنوان متوسط عایق یا دوماً با پوشینگ های دیوار.

وقتی کاربرد در ولتاژ 400kv dc یا بیشتر است پوشینگ های دیواری نیاز به یک طراحی

قابل ملاحظه و چشم گیر دارند و باید مراقب بود تا از شکست های داخلی و خارجی عایق

پیش گیری شود.

فیلترهای هارمونیک در سمت ac و معمولاً در سمت dc مورد نیاز هستند. مشخصه های

هارمونیک های جریان سمت ac توسط مبدل پالسی ایجاد می شوند. به صورت $n+/-1$

هستند و به صورت $12n+/-1$ برای مبدل های پالسی وقتی که n برابر یک عدد صحیح است.

فیلترهای ac برای ۱۲ پالسی معمولاً بر روی هارمونیک های ۱۱ و ۱۳ و ۲۳ و ۲۵ تنظیم می

شوند.

در ساختار ۶ پالسی روی هارمونیک های پنجم و هفتم صورت می گیرد.

فیلترهای هارمونیک سمت ac ممکن است توسط قطع کننده های مدار یا سوئیچ های مداری، سوئیچ شوند. برای سازگار کردن استراتژی نیاز به توان راکتیو از آنجایی که این فیلترها در فرکانس های اولیه (عمده و مهم) (مقدماتی) توان راکتیو تولید می کنند. رزونانس موازی به طور طبیعی بین خازن فیلترهای ac و امپدانس القائی سیستم ac ایجاد می شوند.

در یک مورد خاص وقتی چنین رزونانسی به آرامی سرد می شود و بر روی فرکانسی بین هارمونیک دوم و چهارم تنظیم می شود یک فیلتر هارمونیک پایین گذر در هارمونیک دوم یا سوم مورد نیاز خواهد بود. حتی در عملیات مبدل ۱۲ پالسی.

مشخصه هارمونیک ولتاژ بخش dc که توسط مبدل ۶ پالسی تولید می شود ششمین و هنگامی که توسط مبدل ۱۲ پالسی تولید می شود دارای دوازدهم است.

فیلترهای بخش dc سبب کاهش هارمونیک های شارش جریان در خطوط انتقال dc می شود تا کوپلینگ و تداخل را به مدارات مخابراتی فرکانس صدا کاهش دهد.

هنگامی که خط dc ای وجود نداشته باشد مانند ساختار back – to – back فیلترهای dc بخش dc نیاز نخواهند بود.

راکتورهای dc معمولاً در هر قطب از مبدل پست به حساب می آیند. آنها به فیلترهای dc در جهت فیلتر هارمونیک جریان و هموار سازی بخش dc جریان کمک می کنند. متوقف کننده های ناگهانی روی هر ولو در پل مبدل روی هر پل مبدل ورودی Switch Yard، ac و dc

به صورت هماهنگ کار می کنند تا تجهیزات را در تمام اضافه ولتاژها بدون توجه به منبع آنها حفظ کنند.

لیست های فرعی HVPC بدون متوقف کننده های اکسید فلز را استفاده می کنند و انتخاب آنها و طراحی شان از عایق هایی با دقت زیاد صورت می گیرد.

کاربردهای مبدل HVDC:

اولین کاربرد برای مبدل های HVDC تامین نقطه ی توان الکتریکی اتصالات بین شبکه های توان ac آسکرون است. کاربردهای دیگری نیز وجود دارند که می توانند توسط مبدل خطوط HVDC صورت گیرند که شامل:

۱- ارتباط داخلی بین سیستم های غیر همزمان. برخی سیستم های قدرت الکتریکی قاره ای

شامل شبکه های غیر همزمان هستند مانند East, West, Texas and Quebec

networks در آمریکا شمالی و Island Loads مانند جزیره Gotland در دریای

بالتیک استفاده ی خوبی از ارتباط های داخل HVDC است.

۲- انتقال انرژی از منابع دور افتاده وقتی که تولید توسط منابع دور توسعه می یابد انتقال

HVDC دورای توجیح اقتصادی برای انتقال الکتریسیته به مراکز بار است. تولیدات

سوخت فسیلی می توانند در کنار مراکز قرار گیرند و می توانند چشم پوشی کنند از منابع

انرژی منزوی در نقاط نزدیک.

۳- انتقال انرژی الکتریکی به فضاهای پر ازدحام. در مکان هایی که تولیدات جدید امکان

سرویس دادن ندارند برای به دست آوردن رشد اقتصادی یا جا به جایی کارایی انتقال

کابلی dc به صورت زیر زمینی یک راه کار آمد برای انتقال الکتریسیته است.

۴- کاهش ظرفیت انتقال ac موجود با تبدیل به انتقال dc.

انتقال Rights – of – way ممکن است نشدنی باشد.

خطوط انتقال ac فعلی کار آمدتر شده اند یا دوباره سازی شده اند توسط انتقال dc که اساساً

می توانند ظرفیت انتقال توان از دهند در Rights – of – way های موجود.

۵- کنترل شارش جریان

شبکه های ac به راحتی کنترل شارش توان مورد نظر را به دست نمی دهند. توزیع کننده

های توان و عملکردهای سیستم ممکن است به کنترل شارش توان نیاز داشته باشند که

ظرفیت آنها توسط انتقال HVDC تامین شده است.

۶- تثبیت شبکه های توان الکتریکی

بعضی شبکه های توان ac با کاربرد وسیع کار می کند تحت محدودیت های پایداری. انتقال

HVDC وسیله ای است برای بررسی کاهش بهره برداری از رساناهای شبکه در طول

کنترلرهای الکترونیکی گوناگون توان که توسط انتقال ac به کار برده می شود.

چیدمان های مبدل های HVDC:

پل های مبدل HVDC و خطوط یا کابل ها می توانند بر چندین صورت و ساختار جهت بهره برداری موثر وجود داشته باشند.

پل های مبدل می توانند مرتب شوند هم به صورت تک قطبی و هم دو قطبی همانطور که در چیدمان ۱۲ پالسی در شکل ۶ دیده می شود.

انواع گوناگون انتقال HVDC مورد استفاده به صورت ساده شده در شکل ۷ نشان داده شده و شامل موارد زیر است:

۱- Back – to – Back برخی کاربردها وجود دارند همانند وقتی که دو سیستم ac به صورت داخلی متصل اند و از نظر فیزیکی در یک مکان یا پست فرعی قرار می گیرند در این حالت هیچ خط انتقال یا کابلی نیاز نیست بین پل های مبدل در این مورد و اتصال می تواند به صورت تک قطبی یا دو قطبی باشد.

ارتباط Back – to – Back از نوع dc در ژاپن به کار برده شده برای اتصال داخلی بین شبکه سیستم قدرت با فرکانس های متفاوت 50 Hz , 60 Hz. آنها همچنین به کار می روند برای اتصال داخلی بین شبکه های آسنکرون Adjacent.

۲- انتقال بین دو پست فرعی:

وقتی که توان الکتریکی به صورت انتقال dc یا کابل ها از یک مکان جغرافیایی به مکان دیگر اقتصادی باشد یک انتقال HVDC، Two – terminal یا Point – to – Point به کار برده می شود.

به بیان دیگر توان dc از یک یکسوساز ترمینال به صورت اختصاصی به یک ترمینال دیگر به صورت معکوس کننده عمل می کند. این یک صورت معمول از بسیاری از سیستم های انتقال HVDC است.

۳- سیستم های انتقال چند ترمینال

وقتی سه یا بیشتر پست های فرعی HVDC به صورت جغرافیایی توسط کابل ها یا خطوط انتقال داخلی جدا شده اند سیستم انتقال HVDC مولتی ترمینال است.

اگر تمامی پست های فرعی متصل شوند به یک ولتاژ مشابه، در آن صورت سیستم dc چند ترمینال موازی است.

اگر یک یا چند پل مبدل به صورت سری در یک یا هر دو پل اضافه شدند در آن صورت سیستم مولتی ترمینال سری dc است.

انتقال dc چند ترمینال موازی به کار برده شد وقتی که ظرفیت پست فرعی از ۱۰٪ ظرفیت کلی پست فرعی یکسوساز فراتر رفت. یک ترکیب از اتصالات سری و موازی از پل های مبدل یک سیستم هیبریدی چند ترمینال است.

سیستم های dc چند ترمینال به سختی می توانند دارای توجیح اقتصادی باشند به دلیل پست های فرعی اضافی.

۴- ارتباط واحد

وقتی که انتقال dc درست در نقطه تولید صورت گیرد اتصال ترانسفور و مبدل از یکسوساز به صورت مستقیم به ترمینال های ژنراتور وجود دارد. که توان تولید شده به خطوط انتقال dc تغذیه می شوند. این می تواند توسط توربین های بادی که ژنراتورها را درایو می کنند به کار می رود بیشترین مقدار کارایی از توربین می تواند با کنترل سرعت به دست آید. بدون توجه به سرعت توربین توان در ترمینال معکوس کننده به سیستم دریافت ac در فرکانس های اصلی 50 Hz, 60 Hz رسانده می شود.

۵- دیود یکسو ساز

توضیح داده شد که در برخی کاربردها جایی که انتقال توان dc فقط در یک مسیر است ولوها در پل های مبدل یکسوساز می توانند توسط دیودهای ساخته می شوند به جای استفاده از Thyristor ها. کنترل شارش توان باید در معکوس کننده به دست آید و در یک نمونه جایی که ارتباط واحد استفاده می شود. کنترل ولتاژ از طریق تحریک کننده ی میدان ژنراتور می تواند عملی باشد برای تنظیم توان dc. این اتصال (ارتباط) نیاز به یک مدار قطع کننده ی

سرعت بالای ac دارد بین ژنراتور و پل های مبدل یکسو کننده برای حفاظت از دیودها از جریان های اضافی در نتیجه ی اتصال کوتاه های ماندگار خط انتقال dc به وجود می آیند.

یک مطالعه برای Oak Ridge Rational Laboratory گزارش بررسی برای ۳ تا از تامین کنندگان HVDC برای مسایل آماده به کار برای تامین دو تا پست فرعی دو قطبی برای چهار نمونه سیستم.

بررسی های اقتصادی:

هر پست فرعی نیاز به یک الکتروود dc و اتصال آنها به یک سیستم ac با یک اتصال کوتاه با ظرفیتی چهار برابر بیش از سیستم HVDC دارد. چهار سیستم بیان شده خلاصه شده اند در جدول ۱ جدول ۲ شامل تجهیزات اساسی شکست بر اساس متوسط ارزش مشتق شده از پاسخ تامین کنندگان است. هزینه های آماده به کار در سال های ۹۶-۱۹۹۵ دلار آمریکا هر ترمینال فقط با فرض این که هر دو ترمینال از یک تامین کننده مشابه تهیه شود. قیمت Back to - Back - برای رابط dc برای نصب کامل است.

قیمت های خطوط انتقال خیلی راحت قابل تعریف نیستند. نوسانات قیمت وابسته به استفاده پهنای Right - of - way مورد نیاز، نرخ کارایی ساختار و روی هم گذاشتن آنهاست.

بر طبق اصل و قاعده ی سر انگشتی می توان گفت که قیمت تمام شده ی خط انتقال dc در حدود ۸۰٪ تا ۱۰۰٪ قیمت خطوط ac است که نرخ ولتاژ آن مشابه با نرخ قطب به زمین (Pole – to – Ground) ولتاژ خط dc است.

منافع قیمتی خط انتقال DC برای عبور کردن از مسیرهای طولانی آن است که آن می تواند نرخ بندی شود دوبار ظرفیت شارش توان خط ac با ولتاژ مشابه.

وقتی که الکتریسیته باید توسط خطوط انتقال زیرزمینی یا کابل های زیر دریایی باید منتقل شود کابل های ac دارای وظیفه ای غیر عملی هستند به خاطر ظرفیت جریان شارش اگر بیش از طول بحرانی که برای کاربردهای زیر دریایی کمتر از 50 km است به کار برده شوند. برای ساخت های بیش از این طول بحرانی با تکنولوژی امروز کابل های dc را می طلبد انتخاب مشخصات دقیق سیستم است و هزینه های اقتصادی قانع کننده است.

بررسی های محیطی:

تاثیرات الکتریکی محیطی از خطوط انتقال HVDC می تواند تقسیم بندی شود میدان و تاثیرات یون همانند تاثیرات کرونا. میدان الکتریکی هم از بار الکتریکی موجود در رساناها و هم برای خطوط انتقال هوایی HVDC از بار هوایی و افشانه های اطراف هادی بر می خیزد. میدان های مغناطیسی که با جریان dc ایجاد می شوند در طول هادی ها یون های هوایی که توسط HVDC به وجود می آیند به ابرها شکل می دهند که شتاب بگیرند در خطوط وقتی که

با وزش باد باید حرکت کنند و همچنین وقتی که مورد تماس قرار می گیرند توسط انسان ها، حیوانات و گیاهانی که بیرون از خطوط انتقال Right – of – Way یا در گوشه کنار هستند تأثیرات کرونا می تواند تداخل سطح پایین رادیویی را ایجاد کند که قابل شنیدن است و سبب تولید گاز ازن می شود.

عملیات مبدل dc:

مبدل پل ۶ پالسی شکل ۲ مبدل پایه واحد خط HVDC است که استفاده می شود برای اصلاح جایی که شارش توان از ac به dc و معکوس کردن جایی که شارش توان از dc به ac است.

ولوهای Thyristor عمل می کنند به عنوان سوئیچ هایی که روشن می شوند هدایت می کنند جریان را وقتی که پالس اصطلاحاً Fire یعنی شروع می رسد و به صورت مستقیم بایاس می شوند. یک ولو Thyristor می تواند جریان را هدایت کند و در یک مسیر و نخستین بار هدایت می کند فقط با خاموش شدن که به صورت معکوس با شده است و جریان صفر سقوط می کند.

این پردازش به عنوان مبادله ی خط ساخته می شود.

یک خاصیت مهم ولوهای Thyristor آن است که یک بار که جریان هدایت آنها به صفر سقوط می کند وقتی که به صورت معکوس بایاس می شوند و پالس ورودی (دروازه) جا به جا می شود.

افزایش خیلی سریع در اندازه ی ولتاژ با مستقیم اتفاق می افتد که سبب می شود Thyristor بطور تصادفی روشن شده و هدایت کند. طراحی ولو Thyristor و پل مبدل باید این مسئله را تضمین کند که چنین حالتی در عملکرد معکوس کننده ی مورد نیاز پیش گیری می شود. یکسوسازی یا معکوس سازی برای مبدل های HVDC طی پردازشی تحت عنوان خط یا مبادله ی (جا به جایی) طبیعی کامل می شود.

ولوها به منزله یک سوئیچ عمل می کنند که ولتاژ ac به صورت پیوسته و متوالی به صورت ولتاژ dc سوئیچ می شود.

با خط انتقال ولتاژ ac در هر دو حالت یکسوسازی و معکوس کنندگی باید توسط شبکه ac تامین شود در هر انتها و باید به صورت سه فاز بوده و نسبتاً آزاد از هارمونیک ها چنانچه در شکل نمایش داده شده است. هنگامی که هر ولو به صورت روشن سوئیچ می شود این به معنای شروع هدایت است. مادامی که جریان رو به کاهش است به سمت صفر در ولو بعدی به سمت خاموش شدن.

مبادله پروسه ای از انتقال جریان بین هر دو ولوهای مبدل است با هر در حالت ولو حامل جریان بطور همزمان در طول این پروسه.

پروسه ی یکسوسازی را بررسی می کنیم:

هر ولو به حالت روشن می رود وقتی که **Pulse** شروع به ورودی آن می رسد و ولتاژ با یاس مستقیم آن بسیار مثبت تر از ولتاژ با یاس مستقیم ولو هدایت است.

جریانی که درون یک ولو هدایت شارش دارد بلافاصله و فوری تغییر نمی یابد. بلکه آن به ولو دیگری جا به جا می شود زیرا که انتقال بر روی سیم پیچی های ترانسفورمر صورت می پذیرد. راکتانس نشتی یک سیم پیچی ترانسفورمر همچین راکتانس جا به جایی خیلی پس از آنکه که فیلترهای **ac** در بخش اصلی یا سمت **ac** یک ترانسفورمر مبدل قرار گرفتند می باشند.

راکتانس جا به جایی در یکسوساز و معکوس کننده به صورت راکتانس هم از مانند آنچه در شکل ۸ نشان داده شده نمایش داده می شود.

مجموع جریان تمام ولوها به سمت **dc** منتقل شده و در راکتور **dc** جریان مستقیم وجود دارد که نسبتاً مسطح است به خاطر اندوکتانس راکتور **dc** و ترانسفورمر مبدل.

در معکوس گر ولتاژ سه فاز اعمال شده توسط سیستم ac ورودی هر یک ولوهای پل مبدل حالت با یاس مستقیم و معکوس ایجاد می کند تا به جا به جایی جریان بین ولوها مشابه یکسوساز اجازه دهد.

ولو معکوس کننده فقط می تواند روشن شده و هدایت کند و آن هم در زمانی که ولتاژ مستقیم مثبت از خط dc بزرگ تر از ولتاژ منفی ای است که جا به جایی ولتاژ ac سیستم در معکوس گر ایجاد می کند. در پروسه ی سوئیچینگ ولوها در جا به جایی خط یک جریان غیر سینوسی از سیستم ac دریافت می گردد و از یکسوساز (I_{vr} در شکل ۸) و به سیستم ac در معکوس گر منتقل می گردد (I_{vi} در شکل ۸) هر دو جریان I_{vr} و I_{vi} برای ولتاژ متناوب عایق بندی می شوند.

این جریان غیر سینوسی شکل موج ها شامل فرکانس های بنیادی تجهیزات ac به علاوه هارمونیک های بالاتری است که گرفته شد و تزریق شده در هر سیستم ac.

فیلترهای ac هارمونیک های وارد شده به سیستم ac را منحرف می کنند با ایجاد یک با عبور دادن خط سیری کهولتاژ جا به جایی نسبتاً دارای هارمونیک کمتری است.

بر عکس شارش توان در یک خط جا به جایی امکان لینک dc توسط معکوس کردن جهت جریان امکانپذیر نیست.

ولوها به هدایت تنها در یک جهت اجازه می دهند شارش توان تنها می تواند در پل های مبدل خط جا به جایی dc تغییر یابد (معکوس شود) آن هم با تغییر ولتاژ مستقیم. عملیات دوگانه ی پل های مبدل که هم به عنوان یکسوساز و هم به عنوان معکوس کننده کار می کنند در طی کنترل پالس های راه اندازی شبکه به دست می آیند.

زوایای پل مبدل:

شکل ۸ زوایای الکتریکی گوناگونی را نشان می دهد که عملیات پل های مبدل را تعریف می کنند. این زوایا در سمت ولتاژ سه فازی ولو اندازه گیری می شوند و بر اساس حالت های ثابت و ماندگار و بدون هارمونیک پایه گذاری می شوند و ولتاژ جا به جایی سه فاز را ایده آل سازی می کنند.

آنها هم برای معکوس کننده ها و هم یکسوسازها به کار برده می شوند.

زاویه ی تاخیر زمان نوشته شده (ثبت نشده) در اندازه گیری زاویه ی الکتریکی از ولتاژ جا به جایی سینوسی ایده آل شده با عبور از صفر تا حالت جریان مستقیم آغازی.

این زاویه با پالس شروع کننده ی ورودی کنترل شده و اگر کمتر از ۹۰ درجه باشد پل مبدل یکسوساز و اگر بیش از ۹۰ درجه باشد یک معکوس کننده است. این زاویه اغلب به عنوان زاویه ی آغازی (Firing) در نظر گرفته می شود.

زاویه β پیشرفته رفان ثبت شده در اندازه گیری زاویه ای الکتریکی رفان آغاز حالت جریان مستقیم تا عبور از صفر بعدی از ولتاژ جا به جایی سینوسی ایده آل شده.

زاویه β پیشرفته وابسته به زاویه α تاخیر است به صورت زیر:

$$\beta = 180.0 - \alpha$$

زاویه μ همپوشانی: دوره μ جا به جایی بین دو بازوی ولو که در اندازه گیری زاویه ای الکتریکی ثبت می شود.

زاویه خاموش کردن ϕ : زمان ثبت شده در اندازه گیری زاویه ای الکتریکی پایان هدایت جریان تا عبور از صفر بعدی ولتاژ جا به جایی سینوسی ایده آل شده.

ϕ وابسته به زاویه β پیشرفته و زاویه μ هم پوشانی است و به صورت رابطه ی زیر

$$\phi = \beta - \mu$$

تعریف می شود:

معادلات حالت دائم پل مبدل dc:

لازم به ذکر است که راکتانس جا به جایی پل مبدل ۶ پالسی در هر واحد ترانسفورمر مبدل به

$$SN = \sqrt{2} U_{vn} I_{dn}$$

صورت نرخ بندی می شود:

وقتی که I_{dN} جریان مستقیم و U_{vN} نرخ ولتاژ فاز به فاز در ولو یا سمت ثانویه از ترانسفورمر مبدل است. معمولاً نرخ توان پل مبدل dc از روی نرخ جریان I_{dN} و نرخ ولتاژ U_{vN} ، dc شناخته می شود.

طراحی پل مبدل و ولو وابستگی زیادی به راکتانس جا به جایی و همچنین معمولاً به مقدار تثبیت شده و شناخته شده دارد.

در پل های مبدل HVDC بدون معمولاً در رنج $0.1 < x_c < 0.15$ در هر واحد وقتی که یک واحد $(U_{vn})^2 / S_N$ اهم است.

یک تقریب خوب قابل قبول از فاکتور توان پل مبدل در جا به جایی ac با بیان زیر برای یکسوساز داده می شود.

باید توجه داشت که زاویه α معمولاً داده می شود یا اندازه گیری شده است.

به عنوان مثال رنج متوسط زاویه تاخیر برای یکسوساز می تواند $10^0 < \alpha < 18^0$ و کمترین فاکتور عملیاتی نرمال می تواند اتفاق بیفتد وقتی که $\alpha = 18^0$.

$$\text{Power Factor} = \cos(\theta) = \cos(\alpha) - 0.5 X_c (I_d / I_{dN})$$

و برای یک معکوس کننده:

$$\text{Power Factor} = \cos(\theta) = \cos(\phi) - 0.5 X_c (I_d / I_{dN})$$

وقتی که I_d جریان بار dc و I_{dN} بر اساس جریان dc نرخ بندی می شود و θ زاویه فاکتور توان است.

برای معکوس کننده زاویه ϕ زمان خاموش کردن در طراحی پل مبدل تثبیت شده است معمولاً بر روی $\phi = 18^\circ$.

با چشم پوشی از تلفات پل مبدل توان شارش یافته در پل P_d برابر است با:

$$P_d = I_d U_d$$

به طوری که I_d جریان dc نقطه کار و U_d ولتاژ dc نقطه کار از طریق پل تبدیل می شود.

با داشتن زاویه قدرت محاسبه شده از طریق معادلات ۴ یا ۵ و توان خروجی پل تبدیل از طریق معادله ۶ توان راکتو Q_I مطالبه شده از طریق پل تبدیل در کموتاسیون ولتاژ با سبار در یکسو کننده یا معکوس کننده عبارت است از:

$$Q_I = P_d \tan(\theta)$$

ممکن است ولتاژ فاز به فاز اهمی در طرف dc و یا طرف دوم ترانسفورماتور تبدیل U_{vn} معلوم نباشد. محاسبه مقدار U_{vn} با دانستن مقدار ضریب قدرت از طریق معادله 4 یا 5 در پل تبدیل، میسر است. و با این ملاحظه، یک تقریب خوب از U_{vn} عبارت است از

$$U_{vn} = U_{dn} / [1.35 \cos \theta]$$

با معلوم بودن U_{vn} ، محاسبه ریتینگ ترانسفورمر تبدیل از طریق معادله 3 امکان پذیر است.

تعیین زاویه همپوشانی μ ضروری به نظر می رسد. در یکسو کننده عبارت تقریبی زیر موقعی که، I_d جریان بار، X_c راکتانس پر یونیت کموتاسیون و α یعنی زاویه تأخیر معین باشد به کار می رود:

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos\alpha - X_c \cdot I_d / I_{dn}$$

به طور مشابه در اینورتر، زاویه خاموشی γ برای حالت دائمی معمولاً مشخص است.

$$\cos(\gamma + \mu) = \cos\gamma - X_c \cdot I_d / I_{dn} \quad \text{بنابراین:}$$

زاویه تأخیر α در اینورتر ممکن است به طور ذاتی مشخص نباشد ولی با تعیین

$$\alpha = 180 - (\gamma - \mu) \quad \text{زاویه } \gamma \text{ و زاویه } \mu \text{ داریم:}$$

وقتی که ولتاژ اهمی ثانویه U_{vn} و ولتاژ اهمی اولیه ac فاز به فاز U_{In} معلوم باشند،

محاسبه نسبت دور اهمی ترانسفورمر تبدیل امکان پذیر است. به طوری که نسبت دور ترانس تبدیل عبارت است از:

$$TR_N = \frac{\text{Valve side phase-to-phase rated voltage}}{\text{A.c. side phase-to-phase rated voltage}}$$

وقتی که افزایشی در جریان dc مشخص می شود، کنترل آتش پل مبدل برای افزایش زاویه α می تواند طراحی شود. و این تا کمترین زاویه خاموشی γ میتواند موثر باشد.

راه دیگری برای محدود کردن جریان و شارژ کابل، به کار انداختن پل تبدیل با یک خازن سرس سه فاز که در طرف ac ترانس تبدیل قرار دارد، می باشد. هر جریان و شارژ از کابل dc از طریق عملکرد معمولی پل تبدیل به سیستم ac گذر خواهد کرد و پس از آن از طریق خازنهای سری به شارژ کابل اضافه خواهد شد. در نتیجه ولتاژ خازنهای سری افزایش خواهد یافت تا با شارژ کابل مخالف کند و از طریق پل تبدیل منعکس خواهد شد و ولتاژ مستقیم U_d را افزایش خواهد داد. و این به عنوان نیروی ضد محرکه عمل خواهد کرد که جریان و شارژ را محدود می کند و در نتیجه از خطای کموتاسیون جلوگیری می کند.

محل قرارگیری پیشنهادی خازن های سری در دیاگرام تک خطی شکل ۹ نشان داده شده اند. با خازنی که بین ترانس تبدیل و پل dc قرار داده شده است و با نام "مبدل کموته شده با خازن" (CCC) شناخته شده است. اگر خازن در طرف ac ترانس تبدیل قرار گیرد به نام "مبدل خازن سری کنترل شده" معروف است. هر دو ترکیب عملکرد کموتاسیون اینورتر را بهبود می بخشد ولی نوع $CSCC$ برای حذف فرورزونانس بین خازن سری و ترانس تبدیل به طراحی نیاز دارد.

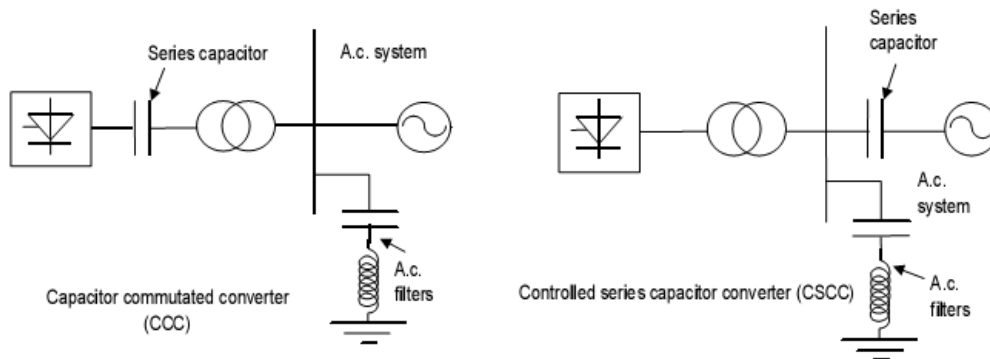


Figure 9. Configurations for applying series capacitors at HVDC substations

"کنترل و حفاظت"

سیستمهای HVDC باید مقدار زیادی از توان الکتریکی را منتقل کنند که تنها تحت شرایط کنترلی سخت انجام می گیرد. جریان و ولتاژ dc بطور دقیق کنترل می شود تا توان انتقالی مطلوب موثر واقع شود. بنابراین اندازه گیری کمیات سیستم بطور دقیق و پیوسته لازم و ضروری است. این کمیات عبارتند از: پل تبدیل، جریان dc و ولتاژ dc مربوط به آن، زاویه تأخیر α و زاویه γ سیستم های انتقال دو پایانه معمول و متعارف هستند و این سیستم ها تحت فشار کار عادی دارای کنترل معمولی و ترجیح داده شده هستند. تحت شرایط حالت دائم، مبدل، وظیفه کنترل ولتاژ dc را به عهده دارد و این با نگه داشتن زاویه خاموشی γ در مقداری ثابت انجام می گیرد که با کاهش ولتاژ U_d و افزایش جریان I_d همراه است. بطوریکه در شکل ۱۰ بصورت کمترین مقدار ثابت γ در مشخصه **A-B-C-D** نشان داده شده است. در مبدل، سیستم ac ضعیفتر، افت زیادتری دارد.

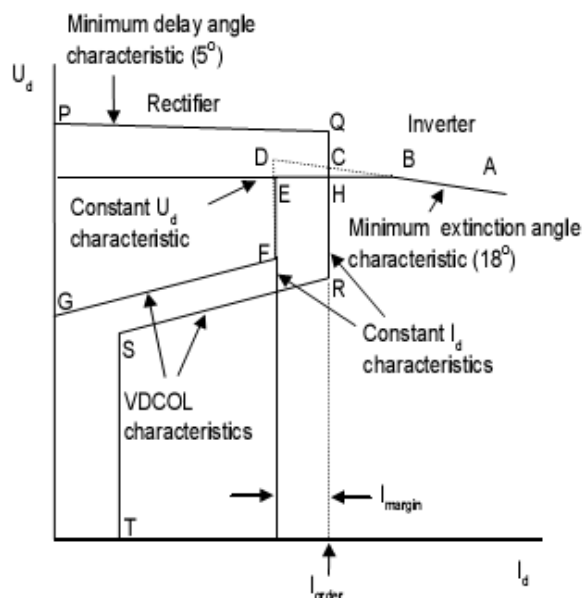


Figure 10. Steady state U_d - I_d characteristics for a two terminal HVDC system.

در طول عملکرد یک پل تبدیل، تپ چنجر ترانس تبدیل باید تنظیم شود تا زاویه تأخیر α در یکسو کننده در محدوده کار طبیعی مطلوب قرار گیرد. بطور مشابه در اینورتر، تپ چنجر آنالین، باید تنظیم شود تا ولتاژ مستقیم U_d و زاویه γ را در حد مطلوب نگه دارد.

تمامی پارامترهای بیان شده به طریق زیر به یکدیگر مربوط می شوند:

$$TR = \frac{U_d + U_{dN} \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{X_C}{(2\cos(\varphi) - X_C)}}{1.35 TR_N U_L \cos(\varphi)}$$

بطوریکه X_C را کتانس کموتاسیون پل تبدیل بر حسب پریونیت، $\varphi = \alpha$ برای

یکسوکننده و $\varphi = \gamma$ برای معکوس کننده، I_{dN} جریان dc نامی برای پل تبدیل و U_{dN} ولتاژ dc

نامی می باشد.

معادلات ۱ تا ۱۳ پالس را در شرایط ایده آل و در حالت دائمی تعریف می کنند.

تعریف عملکرد یک پل تبدیل در حالت دینامیک و گذرا به برنامه شبیه سازی گذرای الکترومغناطیسی مناسب، با قابلیت مدلسازی طرف dc، ترانسفورمرهای تبدیل، سیستم کنترل تولید کننده پالسهای آتش و شبکه های ac و dc همزمان نیاز دارد.

نسبت اتصال کوتاه:

قدرت شبکه ac در شینه پست HVDC می تواند با "نسبت اتصال کوتاه" یا به طور مختصر SCR، بیان شود، که به صورت رابطه ای بین سطح اتصال کوتاه در شینه پست HVDC با واحد MVA به صورت ولتاژ ac یک پریونت و قدرت dc با واحد MW مگا وات تعریف می شود.

خازنها و فیلترهای ac که به شینه ac وصل شده اند، SCR را کاهش می دهند. عبارت "نسبت اتصال کوتاه مؤثر" ESCR، برای سطح اتصال کوتاه کاهش یافته بوسیله توان راکتو بانک خازنی موازی، و فیلترهای ac که به شینه ac وصل شده اند و توان dc اهمی، استفاده می شود. مقدار کمتر SCR و یا ESCR، تأثیر متقابل بیشتر بین شبکه ac و پست HVDC را بیان می کند. شبکه های ac، با توجه به قدرتشان به گروههای زیر تقسیم بندی می شوند:

سیستم های قوی با ESCR بالا : $ESCR > 3$

سیستم های با ESCR پایین : $2 < ESCR < 3$

سیستم های ضعیف با ESCR خیلی کم : $ESCR < 2$

در سیستم هایی که ESCR بالائی دارند (یعنی گروه ۱) تغییرات توان اکتیو یا راکتیو پست HVDC به تغییرات کم وملایمی در ولتاژ ac منجر می شود. بنابراین کنترل ولتاژ گذرای اضافی در شینه اصلی، بطور طبیعی لازم نیست. توان راکتیوی که بین شبکه ac و پست HVDC تعادل ایجاد می کند، به وسیله سوئیچ کردن المانهای قدرت راکتیو به دست می آید.

در سیستمهای با ESCR پایین و یا ESCR خیلی پایین، تغییرات در شبکه ac و یا در توان انتقالی HVDC به نوسان ولتاژ منجر می شود وبه کنترل مخصوصی نیاز دارد. در کنترل قدرت راکتیو دینامیک در شینه ac یا در نزدیکی پست HVDC کنترل کننده های توان راکتیو الکتونیکي مثل "جبران ساز وارااستاتیکی" یا "جبران ساز سنکرون استاتیکی" لازم می باشند. امروزه کنترل توان راکتیو دینامیکی با جبران سازهای سنکرون انجام می گیرد.

خطای کموتاسیون

وقتی که یک پل تبدیل یه صورت یک اینورتر عمل می کنند (همامطوری که در شکل ۸ نشان داده شد) وقتی که جریان مستقیم صفر شود، پل طرف dc خاموش خواهد شد و ولتاژ پل طرف dc منفی خواهد ماند. مدت زمانی که پل طرف dc تحت بایاس معکوس قرار می گیرد همان زاویه γ می باشد. بعد از این مدت زمان طرف dc در گرایش مستقیم قرار می

گیرد. بدون پالس آتش، حتی اگر ولتاژ دو سر پل طرف dc مثبت باشد باز هم پل بلوکه خواهد بود.

تمامی پلها باید بار داخلی را که موقع بایاس مستقیم به دست آورده اند، قبل از اینکه پل دوباره در بایاس مستقیم قرار گیرد تخلیه کنند. هدایت پل، حتی در بایاس مستقیم با فرمان پالس آتشی که ما ایجاد می کنیم شروع می شود. اگر در بایاس مستقیم، بدون پالس آتش، پل در حالت هدایت قرار بگیرد، این را خطای کموتاسیون خواهیم گفت. وقتی که پل تبدیل به صورت یک اینورتر عمل می کند، خطای کموتاسیون به علت یکی از دلایل زیر ایجاد می شود:

۱. وقتی که جریان dc وارد شونده به اینورتر از نظر دامنه افزایش می یابد که این افزایش به نوبه خود باعث می شود کخ زاویه همپوشانی افزایش یابد، زاویه خاموشی γ کاهش می یابد و ممکن است به نقطه ای برسد که پل طرف dc نتواند در حالت سد کنندگی مستقیم باقی بماند. افزایش اندوکتانس مسیر جریان dc از طریق مبدل، به وسیله راکتور هموار dc و راکتانس کموتاسیون، نرخ تغییرات جریان dc را کاهش می دهد که این مطلب تأثیر زیادی در شروع خطای کموتاسیون دارد.

۲. وقتی که دامنه طرف ولتاژ در یک فاز (و یا بیشتر) کاهش می یابد و یا محو می شود باعث می شود که زاویه خاموشی برای انجام کموتاسیون ناکافی باشد.

۳. یک شیفت فاز در ولتاژ کموتاسیون ac می تواند باعث خطای کموتاسیون شود. به هر حال کاهش دامنه ولتاژ ac و عدم تطبیق شیفت فاز، فاکتورهای غالبی هستند که شروع نقص کموتاسیون را برای "خطاهای تکفاز" معین می کنند.

۴. مقدار زاویه خاموشی γ حالت پایدار بیش اغتشاش در حساسیت مبدل به خطای کموتاسیون تأثیر می گذارد. برای بسیاری از مبدلها مقدار $\gamma = 18^\circ$ می باشد. افزایش γ به 25° یا 30° و یا بیشتر، امکان نقص کموتاسیون را کاهش می دهد. (به بهای افزایش توان راکتو مورد مطالبه اینورتر).

۵. مقدار جریان پل طرف dc قبل از کموتاسیون، شرایطی را که در آن خطای کموتاسیون اتفاق می افتد، تحت تأثیر قرار می هد. اگر جریان پیش اغتشاش در مقایسه با بار کم، در بار کامل باشد خطای کموتاسیون ممکن است به سادگی اتفاق بیافتد.

بطر کلی در غیاب اغتشاش و با ثابت بودن ولتاژ ac که اینورتر را تغذیه می کند، با احتمال کمتری خطای کموتاسیون وجود خواهد داشت.

"خازنهای سری یا مبدلهای dc در پستهای HVDC"

وقتی که یک افت ولتاژ مستقیم .. در مبدل به وجود می آید، سیستم های انتقال HVDC که دارای کابل های طولانی هستند بیشتر در معرض خطای کموتاسیون قرار می گیرند. کابل های dc ظرفیت بزرگی دارند و جریان تخلیه باعث افت ولتاژ در مبدل می شود.

ولتاژ ac که از طریق شینه کموتاسیون ولتاژ dc را تحریک می کند جریان تخلیه را محدود می کند. (مثل راکتور هموار و راکتانس کموتاسیون)

اگر جریان تخلیه کابل خیلی سریع افزایش یابد، باعث وقوع خطای کموتاسیون تخلیه کامل کابل می شود. شارژ مجدد کابل که آنرا به شرایط عادی ولتاژ نقطه کار برساند باعث تأخیر می شود.

بطور متناوب ممکن است مبدل به عنوان کنترل کننده ولتاژ dc عمل کند که در شکل ۱۰ بصورت مشخصه ثابت $B - H - E$ نشان داده شده است. این به معنی آن است که زاویه خاموشی... باید از مقدار مینیمم اش افزایش یابد.

اگر مبدل در Y_{min} و یا U_d ثابت کار کند در این صورت باید یکسوکننده جریان مستقیم I_d را کنترل کند. این کار ممکن است آنقدر طولانی شود که زاویه تأخیر α از حد پائینش فراتر رود (معمولاً 5°). مشخصه جریان ثابت حالت دائم یکسوکننده در بخش قائم شکل ۱۰، به صورت $Q.C.H.R$ نشان داده شده است. جایی که مشخصه مبدل و یکسو کننده همدیگر را قطع می کنند یعنی در نقاط C یا H ، که نقطه کار سیستم HVDC می باشد.

با استفاده از تپ چنجر آنالین (on – line tap changer) ترانس مبدل، نقطه کار قابل دسترسی است. مبدل با تنظیم تپ چنجر آنالین، ولتاژ dc مورد نظر U_d را برقرار می کند تا سطح کاری مطلوب حاصل شود. (اگر Y مینیمم مقدار باشد). اگر U_d مقدار ثابتی باشد، تپ

چنجر آنالین باید تنظیم شود تا مقدار کنترل شده ای از U_d با زاویه خاموشی برابر 18° یا به طور مختصری کمتر از آن در دسترس می باشد.

تپ چنجر آنالین ترانسفورمرهای مبدل در یکسوکننده برای تنظیم انشعاب آنها کنترل شده هستند، تا زاویه تأخیر α مقداری بین 10° و 15° داشته باشد برای نگه داشتن I_{order} . اگر اینورتر در نقطه کار H در ولتاژ dc ثابت کار می کند و اگر جریان dc ، I_{order} افزایش یابد در این صورت نقطه کار H به طرف نقطه B حرکت می کند و مبدل به زاویه γ بر می گردد تا در مشخصه $A - B$ کار کند. ولتاژ مستقیم U_d از مقدار مطلوبش کمتر می شود و تپ چنجر آنالین ترانس مبدل در اینورتر ولتاژ dc را تقویت خواهد کرد تا زمانی که ولتاژ dc کنترل دوباره حاصل شود. کنترل همه سیستم های HVDC با ولتاژ dc انجام نمی گیرد. و بجای آن زاویه خاموشی γ که مشخصه $A.B.C.D$ را کنترل می کند و نیز تپ چنجر، کنترل ولتاژ dc را فراهم می کند.

حاشیه جریان

جریان مستقیم I_{order} به هر دوی یکسو کننده و اینورتر فرستاده می شود. معمولاً مقدار کوچکی از جریان را از I_{order} کم می کنند و به اینور فرستاده می شود و این به عنوان حاشیه جریان شناخته شده است و در شکل ۱۰ به صورت I_{margin} نشان داده شده است. اینور یک کنترل کننده جریان نیز دارد که وظیفه اش کنترل جریان مستقیم I_d به مقدار I_{order}

I_{margin} است. ولی کنترل کننده جریان در یکسو کننده می خواهد جریان مستقیم را در مقدار I_{order} نگه دارد. این تفاوت در حالت دائم کار اینورتر دوباره حل می شود وقتی که کنترل کننده جریان آن قادر نیست جریان مستقیم را در مقدار مطلوب $I_{order}-I_{margin}$ نگه دارد. کنترل جریان در اینورتر فقط زمانی فعال می شود که کنترل جریان در یکسو کننده متوقف شود. وقتی که زاویه تأخیر α در حد پایین اش ثابت نگه داشته شده است. و این به سادگی قابل مشاهده است. در مشخصه کاری شکل ۱۰ جایی که حد پایین زاویه تأخیر در یکسو کننده مشخصه $P - Q$ است. اگر بنا به دلایلی مثل ولتاژ کموتاسیون ac پایین در انتهای یکسو کننده مشخصه $P - Q$ نزول کند و به نقطه D یا E برسد نقطه کار از نقطه H به جایی روی مشخصه $D - E - F$ انتقال پیدا می کند که توسط مشخصه $P - Q$ پایین تر قطع می شود. اینورتر به کنترل کننده جریان تبدیل می شود تا مقدار جریان مستقیم I_d را به مقدار $I_{order}-I_{margin}$ کنترل کند. و یکسو کننده نیز ولتاژ dc را کنترل کند بطوریکه نقطه کار با کمترین مقدار زاویه تأخیر در مشخصه $P-Q$ قرار بگیرد. کنترلها می توانند طوری طراحی شوند که گذر از کنترل جریان با یکسو کننده به کنترل جریان با اینورتر بطور اتوماتیک و نرم انجام گیرد.

کنترل ولتاژ AC :

نگه داشتن سیستم ac و ولتاژ شینه کموتاسیون در مقدار ثابت برای عملکرد بهتر سیستم انتقال $HVDC$ مطلوب و ضروری است. و این خواسته به آسانی قابل دسترسی است

اگر نسبت اتصال کوتاه با γ باشد. اگر نسبت اتصال کوتاه کم و یا خیلی کم باشد مشکلات با تغییراتی در بار شروع می شود. با تغییرات سریع بار، در شینه کموتاسیون ac افزایش و یا کاهش توان راکتو را خواهیم داشت که به ترتیب باعث اضافه ولتاژ و کمبود ولتاژ می شوند. وقتی که سیستم ac ضعیف است تغییرات در ولتاژ ac شینه مبدل که در اثر اغتشاش است ممکن است خارج از حدود قابل قبول باشد. در چنین مواردی بنا به دلایل زیر یک کنترل کننده ولتاژ ac مورد نیاز است:

۱. محدود کردن اضافه ولتاژ گذرا و پایدار در حدود قابل قبول که با استانداردها و مشخصات تجهیزات نیروگاه تعریف می شود.

۲. برای جلوگیری از نوسانات ولتاژ ac خنکام سوئیچینگ بار و فیلتر.

۳. برای بالا بردن بهبودی سیستم انتقال HVDC ، وقتی که سیستم ac تحت اغتشاشات شدید قرار دارد.

۴. برای جلوگیری از ناصیاداری سیستم.

استفاده از جبران سازه‌های همزمان، روش مناسبی برای کنترل ولتاژ ac می باشد و می توانند نسبت اتصال کوتاه را افزایش دهند و به عنوان "منبع قدرت راکتو متغیر" کار کنند و معایب آن شامل تلفات بالا و نگه داری است که باعث می شود قیمت کلی آن افزایش یابد.

کنترل کننده های ولتاژ ac دیگری نیز وجود دارد که عبارتند از:

۱. جبران سازه‌های استاتیک که از تریتور استفاده می کنند تا جریان را از طریق القاگرها و روشن و خاموش کردن سطح مختلفی از خازنها کنترل کنند. با این روش می توان توان راکتیو را کنترل نمود تا ولتاژ ac در سطح مطلوبی باقی بماند، عمده تری عیب ان این است SCR افزایش نمی یابد.

۲. کنترل مبدل از طریق کنترل زاویه تأخیر امکان پذیر است تا بتوانیم توان راکتیو تقاضا شده پل تبدیل را تنظیم کنیم. برای این منظور باید ولتاژ ac مشخصی را به عنوان سیگنال فیدبک در کنترل dc استفاده کنیم. و نیز زاویه تأخیر α برای تنظیم ولتاژ ac کموتاسیون شینه به طور گذرا مدوله شده است. وقتی که جریان dc وجود ندارد این روش کنترل کارایی ندارد.

۳. استفاده از " واریستورهای اکسید فلز " مخصوص با فیلترها، خازها و راکتورهای سریع. این واریستورها سیستم HVDC را در مقابل اضافه ولتاژ گذرا محافظت می کنند و سوئیچینگ المانهای قدرت راکتیو، توازن قدرت راکتیو را میسر می کند. عیب این روش این است که کنترل ولتاژ به صورت پیوسته نیست همچنین کند بودن سوئیچینگ مکانیکی باعث ایجاد تأخیر در کنترل توان راکتیو می شود. و نیز نسبت اتصال کوتاه افزایش نمی یابد.

۴. راکتورهای اشباع برای محدود کردن اضافه ولتاژ و دستیابی به قدرت راکتیو متعادل، بکار میروند. برای اشباع کردن راکتورها، خازن های شنت و نیز فیلترها مورد نیاز می باشند. در این حالت نیز SCR افزایش نمی یابد.

۵. خازن های سری بصورت CCC و CSCC میتوانند نسبت اتصال کوتاه افزایش دهند و همچنین برای بهبود تنظیم کموتاسیون ولتاژ شینه بکار می روند .