



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان نامه کارشناسی

گرایش کنترل

عنوان:

بررسی مسائل فنی و اقتصادی سیستم‌های انتقال HVDC

استاد راهنما: دکتر امیر باقری

نگارش: رضا رحمانی

تابستان ۹۶



## چکیده

رشد سریع در مصرف انرژی الکتریکی لزوم انتقال این انرژی را در ظرفیت‌های بالا از مراکز تولید به مصرف‌کننده ضروری ساخته است اما در سالهای اخیر مسائل محیط زیستی نظیر آلودگی بیش از حد در شهرهای بزرگ از یک طرف و مسائل اقتصادی در تولید و انتقال انرژی از طرف دیگر باعث شده است که نیروگاهها اکثراً در فواصل دور از مراکز مصرف عمده در محل منبع سوخت ارزان تأسیس شوند و خطوط انتقال با ظرفیت بالا و طول زیاد برای انتقال انرژی ایجاد شود.

مسائل فنی خطوط HVDC در انتقال مقادیر زیاد انرژی در فواصل دور ایجاد خطوط HVDC را ضروری ساخته است. در این پروژه ابتدا یک بررسی کوتاه از سابقه وضعیت کنونی خطوط HVDC ارائه می‌گردد سپس به توضیح در مورد مزایای فنی خطوط HVDC در مقایسه با خطوط HVAC پرداخته می‌شود. در پایان توسط نرم افزار MATLAB شبیه سازی یک نمونه خط انتقال HVDC ارائه می‌گردد.

## فهرست مطالب

فصل اول مقدمه .....	۱
۱-۱- تاریخچه HVDC .....	۲
۱-۲- دلایل نیاز به HVDC .....	۳
۳-۱- سیستم انتقال HVDC و نقش آن در آینده انرژی .....	۴
فصل دوم ساختار کلی سیستم HVDC .....	۶
۱-۲- ساختار سیستم HVDC .....	۷
۲-۲- اجزای سیستم HVDC .....	۷
۱-۲-۲- ایستگاههای تبدیلی .....	۷
۲-۲-۲- مبدل ها .....	۸
۳-۲-۲- ترانسفورماتورهای مبدل .....	۱۲
۴-۲-۲- راکتورهای هموارساز .....	۱۲
۵-۲-۲- فیلترهای هارمونیکی .....	۱۳
۱-۵-۲-۲- فیلترهای DC .....	۱۳
۲-۵-۲-۲- فیلترهای AC .....	۱۳
۶-۲-۲- منابع توان راکتیو .....	۱۴
۷-۲-۲- الکترودها .....	۱۴
۸-۲-۲- کلیدهای جریان متناوب .....	۱۵
۳-۲- طبقه بندی خطوط HVDC :	۱۵
۱-۳-۲- خطوط HVDC تک قطبی .....	۱۵
۲-۳-۲- خطوط HVDC دوقطبی .....	۱۷
۳-۳-۲- خطوط HVDC هم قطبی .....	۱۸
۴-۳-۲- اتصال پشت به پشت .....	۱۹
۴-۲- عملکرد مبدل ها .....	۱۹
۵-۲- نتیجه گیری .....	۲۷
فصل سوم مقایسه سیستمهای انتقال HVDC و HVAC .....	۲۹

- ۱-۳-۱ اتصال دو شبکه قدرت متفاوت ..... ۳۰
- ۳-۱-۱-۳ سیستم های بزرگ از هم جدا ..... ۳۰
- ۳-۱-۲ سیستم های با فرکانس های بهره برداری متفاوت ..... ۳۰
- ۳-۱-۳ تلفات توان کمتر ..... ۳۱
- ۳-۱-۴ هزینه ی سرمایه گذاری کمتر ..... ۳۲
- ۳-۱-۵ امکان انتقال زیر آب ..... ۳۳
- ۳-۲-۱ HVDC معایب ..... ۳۸
- ۳-۲-۲ پیچیدگی و پرهزینه بودن مبدل ها ..... ۳۸
- ۳-۲-۳ کرونا و تداخل رادیویی ..... ۳۹
- ۳-۲-۴ مصرف توان راکتیو توسط مبدل ها ..... ۳۹
- ۳-۲-۵ تولید هارمونیک توسط مبدل ها ..... ۳۹
- ۳-۲-۶ فصل چهارم سیستم های VSC-HVDC ..... ۴۰
- ۳-۲-۷ مزایای سیستم VSC-HVDC ..... ۴۱
- ۳-۲-۸ امکان کنترل مستقل دو جهت توان اکتیو و راکتیو بدون نیاز به تجهیزات جبران سازی خارجی ..... ۴۱
- ۳-۲-۹ حذف اغتشاشات کیفیت توان ..... ۴۲
- ۳-۲-۱۰ عدم حساسیت به اتصال کوتاه ..... ۴۲
- ۳-۲-۱۱ عدم نیاز به مخابرات داده ..... ۴۲
- ۳-۲-۱۲ تغذیه برق جزایر و شبکه های AC پسیو یا مرده ..... ۴۲
- ۳-۲-۱۳ ساختار سیستم های VSC-HVDC ..... ۴۳
- ۳-۲-۱۴ اجزای سیستم های VSC-HVDC ..... ۴۴
- ۳-۲-۱۵ مبدلها ..... ۴۴
- ۳-۲-۱۶ ترانسفورماتور ..... ۴۴
- ۳-۳-۱ راکتور فاز ..... ۴۵
- ۳-۳-۲ فیلترهای AC ..... ۴۵
- ۳-۳-۳ خازن DC ..... ۴۵
- ۳-۴-۱ عملکرد سیستم VSC-HVDC ..... ۴۵

۴۶	۵-۴- موارد استفاده VSC-HVDC.....
۴۷	۶-۴- مدولاسیون پهنای پالس.....
۴۹	فصل پنجم شبیه سازی و مطالعات عددی.....
۵۰	۵-۱- معرفی شبکه مورد مطالعه و قسمت های مختلف آن.....
۵۴	۵-۳- سیستم کنترل VSC.....
۵۷	۵-۴- اجرای برنامه و نمایش شکل های آن در حالات مختلف.....
۶۳	منابع.....
	پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه
	جدول (۳-۱): مقایسه پیوند های HVDC با پیوند EHV-AC برای اتصال شبکه های بزرگ به یکدیگر ... ۳۱
	پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه
	فهرست اشکال
۲	شکل (۱-۱): عوامل ظهور HVDC.....
۸	شکل (۱-۲): اجزای ایستگاه تبدیلی HVDC.....
۹	شکل (۲-۲): مبدل ۶ پالسه و ولتاژ خروجی آن.....
۹	شکل (۳-۲): مبدل ۱۲ پالسه.....
۱۰	شکل (۴-۲): شکل موج ولتاژ خروجی مبدل ۱۲ پالسه.....
۱۰	شکل (۵-۲): اجزای یک والو تریستوری.....
۱۱	شکل (۶-۲): سمبل های گرافیکی استاندارد برای والوها و پل ها.....
۱۳	شکل (۷-۲): مشخصه فیلتر DC.....
۱۴	شکل (۸-۲): مشخصه فیلتر AC.....
۱۶	شکل (۹-۲): نمایش یک سیستم انتقال HVDC تک قطبی با دو هادی.....
۱۶	شکل (۱۰-۲): ساختار اصلی یک سیستم تک قطبی.....
۱۷	شکل (۱۱-۲): ساختار اصلی یک خط دوقطبی.....
۱۸	شکل (۱۲-۲): ساختار اصلی یک خط هم قطب.....
۱۹	شکل (۱۳-۲): ساختار اصلی یک اتصال پشت به پشت.....
۱۹	شکل (۱۴-۲): مدار سه فاز تمام موج.....
	پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه برق دانشگاه زنجان دانشکده مهندسی گروه برق آزمایشگاه پروژه



.....	شکل (۲-۱۵): مدار پل سه فاز	۲۰
.....	شکل (۲-۱۶): علامت اختصاری ترستور	۲۲
.....	شکل (۲-۱۷): توزیع بار با اعمال ولتاژ معکوس	۲۳
.....	شکل (۲-۱۸): شکل مداری ترستور	۲۴
.....	شکل (۲-۱۹): مدار پل سه فاز تمام کنترل شده	۲۵
.....	شکل (۲-۱۹): مدار معادل اتصال HVDC	۲۶
.....	شکل (۳-۱): مقایسه برج های HVDC و HVAC	۳۳
.....	شکل (۳-۲): داده های سیستم	۳۴
.....	شکل (۳-۳): نقشه جغرافیایی ایرلند شمالی و ایسلند	۳۴
.....	شکل (۳-۴): انتقال زیردریایی کابلی با سیستم HVDC	۳۴
.....	شکل (۳-۴): تصویری از چند کشتی کابل گذار در زیر دریا	۳۶
.....	شکل (۳-۵): ربات مخصوص خوابانیدن کابل در بستر دریا	۳۷
.....	شکل (۳-۶): رباتی جهت گرفتن و بالا آوردن کابل	۳۸
.....	شکل (۴-۱): کنترل توان اکتیو و راکتیو در سیستم VSC-HVDC	۴۱
.....	شکل (۴-۲): بلوک دیاگرام VSC-HVDC	۴۴
.....	شکل (۴-۳): مبدل استفاده شده در VSC	۴۴
.....	شکل (۴-۴): اتصال VSC به شبکه AC و دیاگرام فازوری آن	۴۶
.....	شکل (۴-۵): عملکرد یک مبدل VSC با PWM	۴۸
.....	شکل (۵-۱): مدل سیستم VSC-HVDC	۵۱
.....	شکل (۵-۲): اجزای ایستگاه تبدیلی	۵۱
.....	شکل (۵-۳): اثر هارمونیک سوم بر شبکه برق	۵۳
.....	شکل (۵-۴): بلوک فوریه با ایجاد فیلتر AC	۵۳
.....	شکل (۵-۵): VSC Controlle	۵۵
.....	شکل (۵-۶): اجزای زیر سیستم Discrete VSC Controller	۵۵
.....	شکل (۵-۷): ولتاژها و جریان های پل سه سطح	۵۷
.....	شکل (۵-۸): ولتاژ AC سمت یکسوکننده با ایجاد فیلتر	۵۷
.....	شکل (۵-۹): جریان AC سمت یکسو کننده با ایجاد فیلتر	۵۸

- شکل (۵-۱۰): ولتاژ DC ایستگاه یک با ایجاد فیلتر ..... ۵۸
- شکل (۵-۱۱): ولتاژ AC سمت یکسوکننده بدون فیلتر ..... ۵۹
- شکل (۵-۱۲): جریان AC سمت یکسو کننده بدون فیلتر ..... ۵۹
- شکل (۵-۱۳): هارمونیک های ولتاژ AC سمت یکسوکننده با فیلتر ..... ۶۰
- شکل (۵-۱۴): هارمونیک های جریان AC سمت یکسوکننده با فیلتر ..... ۶۰
- شکل (۵-۱۶): هارمونیک های جریان AC سمت یکسوکننده بدون فیلتر ..... ۶۱
- شکل (۵-۱۷): ولتاژ DC سمت اینورتر در حالت ایجاد خطا ..... ۶۲



## فصل اول

### مقدمه

۱-۱- تاریخچه HVDC<sup>۱</sup>

اولین اختراعات و اکتشافات به همراه اولین کاربردهای عملی در انتقال انرژی الکتریکی با نوع جریان مستقیم DC صورت گرفته است. با این حال، صنعت AC بسیار سریع توانست به تعالی برسد و در آغاز قرن بیستم با پیشرفت‌هایی که در زمینه موتوره‌های القایی، ژنراتورهای سنکرون و قابلیت استفاده از ترانسفورماتورها حاصل شد، به اوج رسید. احیای مجدد صنعت DC به خاطر شماری از برتری‌های آن حادث شد که نیاز به انتقال انرژی در مسافت‌های طولانی و نیز انتقال به وسیله کابل، این مزیت‌ها را پررنگ‌تر کرد. توجه به این برتری‌ها و نیازهای صنعت ضروری است که در آن زمان نیز این برتری‌ها آشکار شده بود اما بنا به دلیل عدم دسترسی به قابلیت اطمینان کافی، نگهداری آسان، تولید ولتاژ در سطوح بالا و وسایل یکسوساز کنترل‌شده، بسط و توسعه این صنعت عقیم مانده بود.



شکل (۱-۱): عوامل ظهور HVDC

اولین سیستم قدرت الکتریکی به صورت DC و توسط ادیسون به بهره برداری رسید. اما احیای مجدد صنعت DC را باید از سال ۱۹۲۹ میلادی دانست. افزایش درخواست و نیاز به الکتریسیته پس از جنگ جهانی دوم، محرک تحقیقات بیشتر به ویژه در روسیه و سوئد شده و موجبات برانگیختن مطالعات، تحقیقات و آزمایش‌های بیشتر در این حیطه را فراهم آورد تا اینکه در سال ۱۹۵۰ میلادی یک خط آزمایشی به طول ۱۱۶ کیلومتر و ولتاژ ۲۰۰ کیلو ولت از مسکو به کاسیرا کشیده شد و تست گردید. تنها چهار سال بعد یعنی

<sup>۱</sup>High Voltage DC

در ۱۹۵۴ میلادی اولین خط تجاری HVDC با طول ۹۸ کیلومتر کابل در زیر دریا و برگشت زمین<sup>۲</sup> میان جزیره Gotland و سوئد نصب گردیده و به بهره برداری رسید.

از این رو ظهور صنعت HVDC را می توان در این سال دانست که متقارن با اولین استفاده ی عملی و تجاری از آن بود. پس از مدت کوتاهی چندین پروژه HVDC در جاهای دیگر به بهره برداری رسیدند که از جمله آن میتوان به لینک Cross Channel بین انگلیس و فرانسه و لینک پشت به پشت Sakuma در ژاپن اشاره کرد.

## ۱-۲- دلایل نیاز به HVDC

انتقال با جریان مستقیم یا HVDC برای انتقال انرژی الکتریکی در مقیاس های بسیار بزرگ و در طول مسیلهای طولانی یا برای اتصال دو شبکه ناهمگون AC مورد استفاده قرار می گیرد. زمانی که انتقال انرژی الکتریکی باید در مسیلهای طولانی صورت گیرد، انتقال به صورت DC به علت کمتر بودن تلفات، اقتصادی تر است. در این حالت کاهش تلفات و هزینه های مربوط به آن می تواند هزینه تبدیل انرژی الکتریکی از AC به DC را جبران کند. از دیگر مزایای استفاده از HVDC با ثبات کردن دو شبکه اتصال AC متفاوت است. در

صورتی که دو شبکه AC متفاوت برای مثال متعلق به دو کشور متفاوت به هم اتصال پیدا می کنند به علت ناهمگونی شبکه ها ممکن است این اتصال با مشکلاتی نظیر ایجاد بی ثباتی در شبکه همراه باشد اما با

استفاده از سیستم HVDC این مشکل بر طرف خواهد شد، بدین ترتیب که در کشور فروشنده انرژی الکتریکی به صورت DC درآمده و پس از طی مسیر انتقال در کشور مصرف کننده دوباره به صورت AC باز می گردد. (در فصل های بعد مزیت های HVDC بیان می گردد).

<sup>2</sup> Ground Return



### ۱-۳- سیستم انتقال HVDC و نقش آن در آینده انرژی

برای آن که دید بهتری از نقش فن آوری انتقال HVDC در قرن آینده به دست آوریم، نقش HVDC را از بدو پیدایش آن در ۵۰ سال پیش تاکنون و دلایل تغییر این نقش در طول این مدت را بررسی می‌کنیم.

خطوط HVDC به طور مرسوم در مناطقی استفاده می‌شود که مزیت اقتصادی استفاده از آن روشن یا اینکه تنها راه حل ممکن بوده است. ملاحظاتی نظیر قیمت ایستگاه‌های مبدل و محدودیت‌های مالی و فنی اتصال به خطوط HVDC کاربرد گسترده این فن‌آوری را محدود کرده است. کاربرد مرسوم انتقال HVDC عبارت بودند از:

- انتقال مقادیر بزرگ توان در مسافت‌های طولانی: عمدتاً در مسافت طولانی صرفه جویی اقتصادی، به

دلیل سادگی طراحی خطوط، هزینه زیاد ایستگاه‌های مبدل را جبران می‌کند. مطابق با قاعده تجربی و این مسافت ۶۰۰ کیلومتر بود که اکنون افزایش یافته است.

- انتقال توان با کابل‌های زیردریایی: چون DC به جریان شارژ کننده نیاز ندارد، محدودیتی در طول کابل DC اعمال نمی‌شود.

- اتصال غیرهمزمان شبکه‌ها: سطح توان را در اتصال می‌توان مستقیماً انتخاب کرد بدون اینکه ملاحظات دیگری مثل پایداری گذرا یا کنترل فرکانس حالت دائمی که در اتصال همزمان مهم‌اند مد نظر باشد. HVDC برای اتصال نواحی با عملکرد و قابلیت متفاوت به کار می‌رود.

- ایجاد مسیر قراردادی و تعریف شده: در هر حالت، انتقال توان مستقیماً کنترل پذیر است. بنابراین به سادگی مسیر کنترل به دست می‌آید بدون اینکه اثر حالت دائمی روی سیستم موازی یا AC بگذارد.

از سرعت کنترل و قابلیت انعطاف انتقال DC اغلب برای بهبود عملکرد سیستم استفاده می‌کردند تا آنجا که به این ترتیب عملکرد بهتری نسبت به اتصال AC به دست آید.

مطالب فوق پیش زمینه ای بود که برای آن که بتوانیم آینده HVDC را حدس بزنیم. پیشرفت های حال و

آینده نشان داده اند که موقعیت HVDC همچنان رقابتی ترین انتخاب توسعه دهندگان و بهره برداران

سیستم های انرژی در آینده خواهد بود. در پایان به این جمله مارک تواین اشاره می کنیم که: شایعات مرگ

HVDC بی اساس است.

در مجموع می توان گفت همه کاربردهای سنتی HVDC در آینده نیز برقرارند:

۱- انتقال توده ای توان در مسافت های طولانی

۲- اتصال های طولانی زیر دریا

۳- اتصال غیر همزمان

۴- مبدل های فرکانس

۵- بهبود پایداری

۶- بهبود مسیر عبور





## منابع

[1] Roberto Rudervall, "High Voltage Direct Current(HVDC)Transmission Systems Technology Review Paper", 2001

[۲] دکتر حسین سیفی، دکتر علی خاکی صدیق، "پایداری و کنترل سیستمهای قدرت"، جلد اول چاپ دوم، تهران، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۶

[3] Romesh Chander Khanna "EHV-AC, HVDC Transmission", Third Edition, Delhi, 1999

[4] <http://www.abb.com>, Thyristor valves, projects 1970-, Reference brochure.pdf

[5] [www.crosssoundcable.com](http://www.crosssoundcable.com)