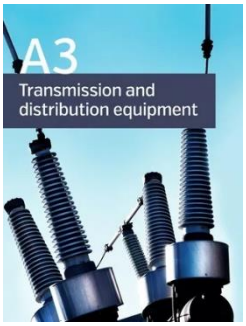
بروشور فنی TB 931 – مجله الکترا 334

کمیته مطالعاتی تجهیزات انتقال و توزیع

نیازمندیهای فنی و تجربیات میدانی با تجهیزات کلیدزنی ولتاژ متوسط جریان مستقیم



cigre
Iran

گزارش شماره ۴

۱- مقدمه و سوابق موضوع

تبادل توان الکتریکی در شبکه های برق امروزی، عموماً با برق متناوب یا AC صورت میگیرد. جریان و توان الکتریکی از تولید در نیروگاه ها و با عبور از شبکه های انتقال و توزیع، به مصرف کننده های نهائی میرسد. این ساختار در حال حاضر با افزوده شدن سایتهای متنوع تولید برق، بتدریج در حال تغییر و توسعه است. این تغییر، بر ظرفیت تبادل توان شبکه، میزان سطح اتصال کوتاه، و قابلیت کنترل آن تأثیر زیادی اعمال می کند. اما انتقال توان با برق جریان مستقیم DC می تواند مجموعه‌ای قوی از ویژگی‌ها برای شبکه‌های برق از جمله تلفات کمتر در شبکه های انتقال و توزیع و ظرفیت حمل توان بیشتر را به همراه داشته باشد.

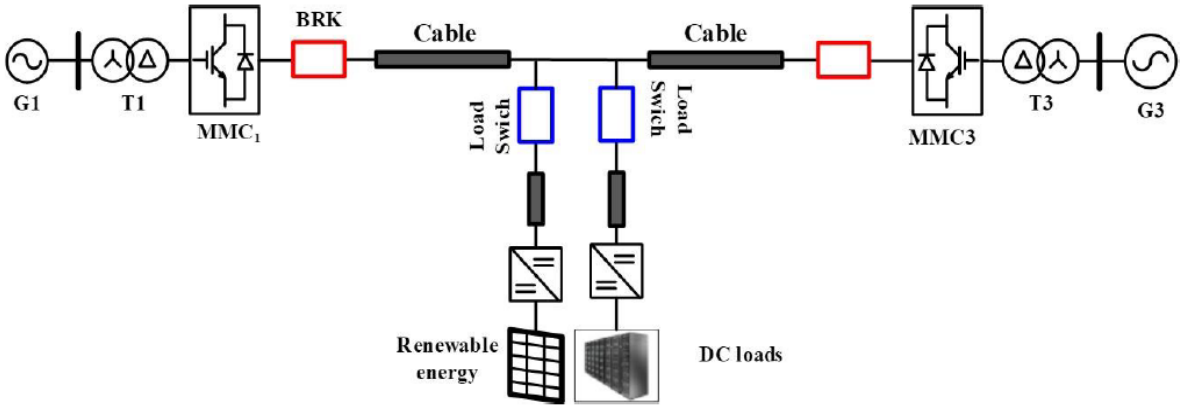
امروزه مقدار قابل توجهی از برق مصرفی به صورت DC به نقطه پایانی استفاده خود می‌رسند. همچنین، برق DC در کاربردهای صنعتی، حمل و نقل برقی، صنایع نفت، گاز و... بسیار مفید و سودمند قرار گرفته اند و همراه با پیشرفت‌های اخیر در تولید انواع نیمه‌هادیها، طراحی و ساخت انواع مبدل‌های منبع ولتاژی، خوشبختانه فرصت قابل توجهی را برای امکان استفاده بیشتر از سیستمهای DC فراهم کرده است.

با توسعه سریع اقتصادی و مشکلات زیست محیطی برجسته، کشورهای جهان بیش از پیش به توسعه انرژی های پاک توجه می کنند. در این راستا انرژی باد و فتوولتائیک به عنوان فناوریهای اصلی استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، به یک راهکار مهم برای تامین انرژی تبدیل شده اند. شبکه های توزیع ولتاژ متوسط DC مزایای آشکاری نسبت به شبکه های AC سنتی، در چگونگی اتصال به شبکه انرژی تجدیدپذیر، بهبود ظرفیت سیستم، کنترل جریان برق انعطاف پذیر، و بهبود پایداری سیستم دارند. افزایش قابلیتهای قطع کننده های مدار DC، ایستگاه های مبدل، ترانسفورماتورهای DC و سایر فناوری های مرتبط، موجب شده تا شبکه های توزیع DC ، به یک راه حل امیدوار کننده برای توسعه شبکه هوشمند در آینده تبدیل شوند.

در دهه اخیر علاوه بر توسعه تدریجی شبکه های جریان مستقیم، با پیشرفت‌های اخیر در زمینه های مختلفی همچون نیمه‌هادی‌های باند پهن، مبدل‌های منبع ولتاژ، و مبدل‌های DC به‌DC، فرصت قابل توجهی برای امکان استفاده بیشتر از شبکه های DC فراهم شده است. سیستم توزیع DC اغلب توسط Modular Multi-Level Converter (MMCs) مبدل های چند سطحی مدولار چندگانه به شبکه برق متناوب متصل می شوند که هر یک می توانند در حالت یکسو کننده و یا اینورتر کار کنند. سیستم شبکه توزیع معمولاً سیستمهای انرژی تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ، ذخیره انرژی با ظرفیت بالا، و مصرف کننده جریان DC را شامل میشوند. با تنظیم انعطاف پذیر اندازه

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

جریان برق و جهت ایستگاه مبدل، و سیستم ذخیره انرژی، راندمان اتصال به شبکه انرژی تجدیدپذیر را می توان به طور کامل بهبود بخشید و انرژی تجدیدپذیر - ذخیره انرژی - قدرت شبکه برق را می توان در تعادل نگه داشت تا از عملکرد پایدار سیستم اطمینان حاصل شود. در شکل (۱)، ساختار یک سیستم توزیع DC ولتاژ متوسط چند ترمینالی معمولی نشان داده شده است.



شکل۱: ساختار نمونه یک شبکه توزیع جریان مستقیم چند ترمینالی

در کنار تمایل جدی به توسعه شبکه های جریان مستقیم، خطر تداوم خطای الکتریکی در شرایط اضافه بار و اتصال کوتاه، به عنوان مانعی برای جلوگیری از رشد گسترده شبکه های DC مطرح شده است. از آنجا که در شبکه های AC، جریان الکتریسیته به طور متناوب تغییر جهت می دهد، لذا به طور طبیعی و پریودیک "عبور جریان از صفر" ایجاد می شود، که اجازه می دهد خطاهای الکتریکی ایجاد شده در سیستمهای متناوب به راحتی توسط انواع فن آوری های کلیدزنی، خاموش شوند، در صورتیکه در شبکه‌های DC، جریان برق در طول زمان بدون عبور از صفر ارائه می‌گردد، و همین وضعیت برای قطع شدن جریان در شرایط بار و یا خطا، در اکثر تجهیزات کلیدزنی مبتنی بر جریان متناوب، مشکل آفرین می باشد.

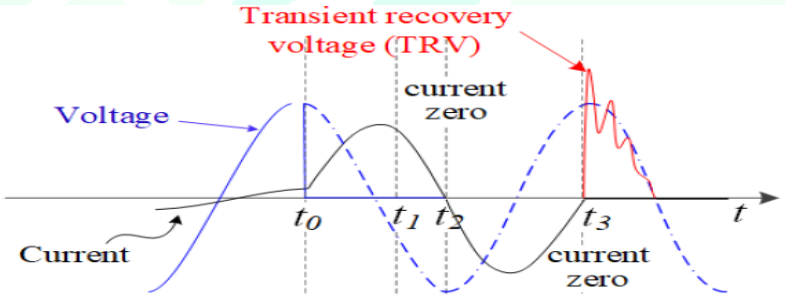
۲- مکانیزم خاموش شدن قوس در کلیدها

در سیستم برق متناوب، جریان دارای شکل موج سینوسی با فرکانس ۵۰-۶۰ هرتز است که منجر به عبور پریودیک جریان از مقدار صفر می شود. این یک مزیت بزرگ از نظر قطع جریان است (شکل۲-الف). اکثر کلیدهای قدرت های AC از همین ویژگی برای قطع جریان خطا استفاده می کنند. با اشاره به CB مکانیکی، هنگامی که جریان

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

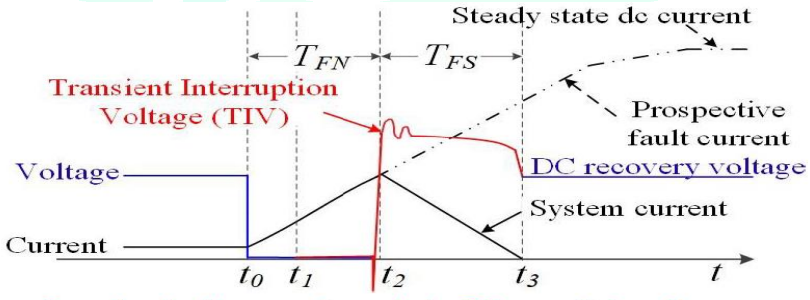
خطا وجود دارد، الکترودهای یک مدارشکن مکانیکی از یکدیگر جدا شده و فاصله بین الکترودها شروع به افزایش می کند. حال اگر فاصله بین الکترودهای کلید، تا جائی افزایش یابد که براثر آن قدرت دی الکتریک نیز به اندازه کافی کاهش یافته و انرژی قوس در یک سطح معین کنترل شده باشد، جریان الکتریکی کلید در نزدیکی نقطه صفر جریان که در آن انرژی قوس حداقل است، بطور طبیعی قطع شده و قوس الکتریکی نیز خاموش می گردد.

در شبکه های برق DC، جریان خطا تا حد معینی بدون هیچ نقطه صفر جریان به افزایش خود ادامه می دهد. در نتیجه، برای قطع جریان DC که بطور معمول از صفر عبور نمی کند، لازم است به صورت اجباری، نقطه صفر جریان ایجاد شود (شکل۲-ب). لذا همزمان با اعمال نیروی مکانیکی جهت باز شدن کنتاکتها و در راستای ایجاد ولتاژ مخالف برای ایجاد یک تقاطع عبور از صفر جریان، جریان خطا از شاخه اصلی، به یک شاخه RLC موازی و یا به شاخه حاوی کلیدهای تریستوری موازی با وریستور اکسید فلزی MOSA انتقال داده میشود (شکل ۳). با افزایش جریان، ولتاژ کنتاکتها از ولتاژ منبع فراتر رفته (در زمان t2 ضد ولتاژ (counter-voltage)، از مقدار ولتاژ منبع بیشتر شده و جریان سیر نزولی آغاز کرده تا به صفر برسد، که در آن لحظه جریان خطا قطع می گردد. در واقع تفاوت بین مقدار ولتاژ وارد شده و ولتاژ منبع در سیستم قدرت، جریان خط را اجبار می کند تا به سمت صفر بازگشت نماید.



: Current and voltage waveforms during AC current interruption

الف: جریان متناوب،

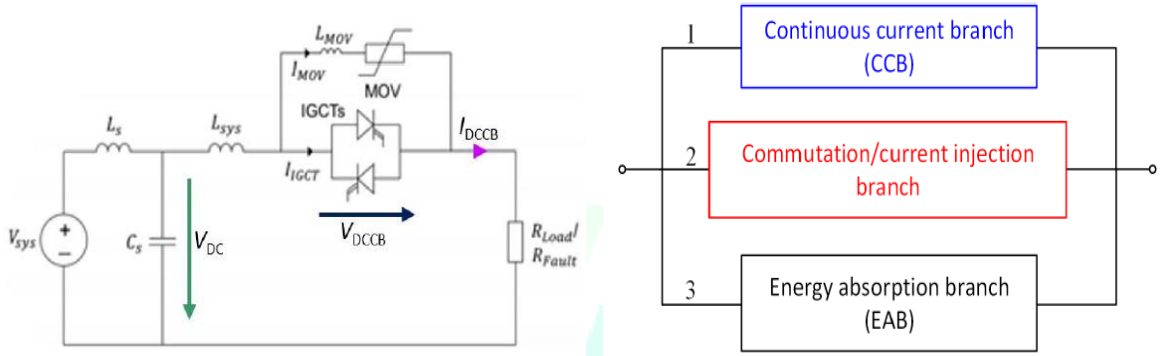


Current and voltage waveforms during DC current interruption

ب: جریان مستقیم

شکل ۲: نمایش جریان خطا در سیستمهای الکتریکی جریان متناوب و جریان مستقیم

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com



الف: شاخه کموتاسیون جریان ب: شماتیک و المانهای یک کلید DC

شکل ۳: ساختار و عناصر کلید ولتاژ متوسط جریان مستقیم

البته امروزه نوآوری‌ها و پیشرفت‌ها، در دستگاه‌های کلیدزنی در سطح فشار متوسط جریان مستقیم MVDC بسیار بهبود و بهره‌وری ایجاد کرده و نحوه تحویل و کنترل برق در سراسر شبکه الکتریکی را تغییر داده و براستی شبکه های برق DC برای مدتهای زیادی در سطح فشارقوی، و برای اتصال شبکه ها در مسافت های طولانی و یا در اتصال شبکه با فرکانسهای مختلف، کاربرد جدی داشته و خواهند داشت. از آنجا که ساختار غربالی شبکه‌های DC بطور بالقوه در حال توسعه و گسترش است، لذا استفاده از تجهیزات کلیدزنی DC تا سطح مشابهی که از سیستم‌های AC موجود شناخته شده است، مورد نیاز خواهد بود. چالش‌های شبکه‌های برق امروزی و نیاز به عملکرد کارآمدتر انرژی، به ظهور شبکه های MVDC منجر شده است. بدین خاطر در بروشور TB-931، موارد استفاده بالقوه، و کاربردهای تجهیزاتMVDC، چالشها، و الزامات آن در شبکه های برق، تشریح شده است.

۳- سرفصلهای اصلی بروشور فنی

این بروشور فنی در پنج سرفصل تنظیم شده که رئوس مطالب هر یک این سرفصلها به اختصار در زیر اشاره شده اند.

۳-۱ مقدمه:

در این فصل، انگیزه، فرصت ها، چالش ها، و مزایای MVDC در ترکیب با سیستم های متناوب، تفاوت اساسی دو شبکه جریان متناوب و جریان مستقیم، و مکانیزم قطع جریان در دو سیستم مذکور تشریح شده است. انتظار می‌رود، سیستم‌های توزیع MVDC بتوانند تبادل انرژی بین تعداد زیادی از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید پراکنده (مانند سیستم جمع‌آوری نیروگاه‌های بادی خشکی و فراساحلی و مزارع خورشیدی) که نیاز به رابطهای الکترونیک قدرت دارند را با تعداد قابل توجهی از بارهای DC (مانند شارژ با توان بالا و ذخیره انرژی)، تسهیل کنند ضمن اینکه

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

یکی از موانع فنی در این شبکه ها، موضوع سوئیچینگ بخصوص در شرایط اضافه بار و اتصال کوتاه میباشد. در شبکه های AC، جریان به طور متناوب تغییر جهت داده و به طور طبیعی یک "تقاطع صفر" را ایجاد می کند که در آن هیچ جریانی برای مدت کوتاهی جاری نیست، که اجازه می دهد تا بارها براحتی از مدار خارج و خطاهای الکتریکی نیز خاموش شوند. در حالیکه در شبکه‌های DC، برق بدون عبور از صفر ارائه می‌گردد، که باعث می‌شود اکثر راه‌حل‌های موجود برای قطع جریان DC سخت، گران، و کنترل آنها نیز دشوار باشد.

۳-۲ کاربرد کلیدزنی در سیستم فشار متوسط DC:

در این فصل، اصول کلیدزنی جریان مستقیم در سطوح ولتاژ ضعیف، متوسط، و فشارقوی، چگونگی توزیع انرژی در شبکه های راه آهن و دریائی، ساختار شبکه های جمع کننده انرژی خورشیدی و بادی، زیرساخت های شارژ اتومبیل و تجهیزات برقی ارائه شده اند. سیستمهای DC ولتاژ پایین و متوسط عموما دارای قابلیت اطمینان بالایی بوده و می توانند به طور گسترده در سیستم های حمل و نقل ریلی، اتصال منابع فتوولتائیک، ... استفاده شوند. انتقال DC فوق فشارقوی نیز می تواند چندین شبکه برق AC با فرکانس متفاوت را متصل کرده و پشتیبانی متقابل آنها را تحقق بخشد. همچنین پروژه های انتقال DC چند ترمینالی که ساخته شده و یا در حال ساخت هستند، نیز عبارتند از: South Australia Island(±160kV)، Zhoushan (± 200kV) و Zhangbei (±500kV) ....

۳-۳ پروژه ها و نصب سیستمهای MVDC:

در این قسمت پروژه ها و سیستمهای با کلیدزنی DC و بدون کلیدهای DC در شبکه های برق، محدودسازهای جریان خطا، کشتیهای باربری و مسافرتی،... و شبکه های هایبریدی جریان متناوب و مستقیم، از کشورهای مختلف چین، آلمان، و... ذکر شده اند. کاربرد سیستم های MVDC امروزی را می توان به چهار حوزه اصلی زیر تقسیم کرد.

- شبکه‌های مستقل یا محدود برای سیستم‌های راه‌آهن، کشتی‌ها، شبکه‌های کوچک یا ...
- کاربرد برای تقویت شبکه AC موجود به منظور بهبود کیفیت برق و پایداری ولتاژ
- اتصال یا انتقال توان بین سیستم های AC با طول زیاد و یا فرکانس متفاوت
- شبکه نهایی MVDC که منابع و بارهای DC را با یک طرح بهینه شده ترکیب می کند، تا عملکرد انعطاف پذیر و کاهش تلفات را در مقایسه با سیستم های AC متداول، داشته باشد.

۳-۴ اصول حاکم بر قطع جریان و نیازمندیهای تجهیزات کلیدزنی DC:

تشریح انواع تجهیزات کلیدزنی قابل قطع زیر بار و یا تحت شرایط اتصال کوتاه، کلیدهای اتصال زمین، ریکلوزرها، و... مقایسه کلیدها و مبدلها، پارامترهای تجهیزات کلیدزنی شامل تعاریف مرتبط با شکل موج و زمان، اصول و کاربرد

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

کلیدهایMVDC ، مقادیر ولتاژ نامی تجهیزات جریان مستقیم، اصول و پیاده سازی کلیدهای جریان مستقیم، انواع کلیدهای DC الکترومکانیکی، و استاتیکی Solid-State، مونیتورینگ کلیدها و حفاظت در برابر خرابی، و استانداردهای مرتبط با کلیدهای جریان مستقیم در این بخش بیان شده اند.

۳-۵ تست تجهیزات کلیدزنی MVDC:

در این قسمت نیز انواع تستهای مرتبط با کلیدهای جریان مستقیم، مانند تستهای عایقی، تست توان بالا، ... الزامات و دستورالعمل تستها، مدارهای تست کلیدهای جریان مستقیم فشار متوسط، و اصول گزارش نویسی نتایج تست ها،... تشریح شده اند.

۴- نتیجه و جمع بندی

این بروشور فنی، وضعیت فعلی سیستم توزیع MVDC از دو منظر ۱: ولتاژهای استاندارد، ۲: تجهیزات تست کلیدزنی استاندارد، مطرح کرده است. شباهت‌های زیادی در روش‌های تست تجهیزات سوئیچینگ MVDC در مقایسه با تجهیزات سوئیچینگ MVAC وجود دارد، از جمله لحاظ کردن رفتار و عملکرد بخش عایقی قبل و بعد از آزمایش‌ها با وجود ضربه و جرقه های مکرر. ضمنا، تفاوت‌های زیادی نیز وجود دارد، از جمله ضرورت ساخت مدارهای آزمایشی در آزمایشگاه‌ها و الزامات اولیه برای تجهیزات MVDC که انواع توپولوژی های آن که در این بروشور ذکر شده است و می توانند برای ایجاد جریان خطا مورد نیاز در ارزیابی تجهیزات سوئیچینگ MVDC مورد استفاده قرار گیرند. انواع پارامترهای عملیاتی را که باید کلیدزنی MVDC، آنها را برآورده کند، نیز دسته بندی و خلاصه شده اند.

کمیته مطالعاتی تجهیزات انتقال و توزیع SC A3
سیگره ایران

دی ماه ۱۴۰۳

مرجع اصلی: CIGRE Electra No. 334– دسترسی به مراجع از طریق سایت https://www.e-cigre.org

تهیه کننده : سیگره ایران - کمیته مطالعاتی SC A3 – آقای دکتر جوادی

برای کسب اطلاعات تکمیلی با دبیرخانه سیگره ایران تماس بگیرید.

این گزارش شامل خلاصه ای برای معرفی یکی از بروشورهای فنی منتشر شده توسط سیگره بین الملل و منبع معرفی آن، مجله الکترا می باشد.

Electra, reprinted/translated with permission from CIGRE, © 2025

دبیرخانه سیگره ایران: تهران – خیابان ولیعصر – بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار – پلاک ۱۲ – شرکت مونتکو ایران
تلفن: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

کمیته های مطالعاتی متناظر سیگره ایران	کمیته های مطالعاتی سیگره بین الملل
Group A – Equipment	
ماشین‌های الکتریکی دوار و تولید برق	**A1** Power Generation and Electromechanical Energy Conversion
ترانسفورماتورها و راکتورها	**A2** Power transformers and reactors
تجهیزات انتقال و توزیع	**A3** Transmission and distribution equipment
Group B – Technologies	
کابل‌های عایق شده	**B1** Insulated cables
خطوط انتقال	**B2** Overhead lines
پست‌های فشار قوی	**B3** Substations and electrical installations
سیستم‌های DC و الکترونیک قدرت	**B4** DC systems and power electronics
حفاظت و اتوماسیون	**B5** Protection and automation
Group C – Systems	
توسعه سیستم قدرت و جنبه های اقتصادی	**C1** Power system development and economics
سیستم بهره برداری و کنترل	**C2** Power system operation and control
---	**C3** Power System Sustainability and Environmental Performance
---	**C4** Power system technical performance
بازار برق و تنظیم گری	**C5** Electricity markets and regulation
شبکه‌های توزیع فعال و منابع انرژی توزیع شده	**C6** Active distribution systems and distributed energy resources
Group D – New Materials and IT	
---	**D1** Materials and emerging test techniques
مخابرات و فناوری اطلاعات	**D2** Information Systems Telecommunications and Cybersecurity

cigre Iran

با ما در ارتباط باشید:

دبیرخانه سیگره ایران:

تهران - خیابان ولیعصر- بالاتر از میدان ونک - خیابان عطار- پلاک ۱۲ - شرکت مونتکو ایران

شماره تماس: ۸۱۹۶۱-۰۲۱ ایمیل: cigre@monencogroup.com وب سایت: www.cigreiran.com

مونتکو ایران
Monenco Iran