

## استفاده از نرم افزار شبیه سازی EMTP-RV جهت طراحی یک نوع فیلتر برای حفاظت عایقی از ترانسفورماتور کوره قوس در مقابل اضافه ولتاژ

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۸

کد مقاله: ۸۶۴۹۹

فریدون ادیب صابر<sup>۱\*</sup>، جواد آزمون<sup>۲</sup>، عبدالرضا توکلی<sup>۳</sup>

### چکیده

در گذشته استفاده از فیلترهای پسیو برای نگهداشتن هارمونیک‌ها در یک حد معقول، مرسوم بود. اما این فیلترها دارای مضراتی از قبیل اندازه‌ی بزرگ، رزونانس و جبران‌سازی ثابت می‌باشند. بنابراین فیلتر پسیو نمیتوانست مشکل هارمونیک‌ها را بطور کامل حل کند. اضافه ولتاژ گذرا ناشی از قطع کلید خلاء ترانسفورماتور کوره، به مراتب بیشتر از اضافه ولتاژ در هنگام وصل کلید است. در این پژوهش با ارائه مدل کلید خلاء و شبکه برق مجتمع صنعتی ذوب آهن پاسارگاد، با استفاده از شبیه سازی حالت گذرا، اسنابر RC مناسب جهت کاهش اضافه ولتاژ گذرا در زمان قطع کلید خلاء طراحی شده است. در این مقاله کلید خلاء ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که مقدار اضافه ولتاژ فازی ایجاد شده روی پایانه ی ترانسفورماتور در زمان قطع کلید خلاء در حالت بی باری ۳۹ کیلو ولت بود، این مقدار با استفاده از اسنابر RC بکاررفته در مجتمع ذوب آهن پاسارگاد با مقادیر مقاومت ۲۵ اهم و خازن ۰٫۲۶ میکروفاراد به مقدار ۳۱ کیلو ولت کاهش یافت که مطلوب است. هنگامی که از مقاومت سری ۶۷ اهم در مدار اسنابر RC استفاده می‌کنیم دیده می‌شود که اضافه ولتاژ پایانه ترانسفورماتور در زمان قطع کلید خلاء در حالت بی باری به ۲۷/۹ کیلو ولت کاهش یافته است. یعنی حدود ۱/۴ کیلو ولت کاهش اضافه ولتاژ صورت گرفته است. با وجود اینکه اضافه ولتاژ کاهش کمی داشته است که در نوع خود بسیار مطلوب است، با استفاده از مقاومت سری ۶۷ اهم به جای ۱۱۰ اهم، تلفات حرارتی نیز کاهش یافته و خرابی مقاومت سری کمتر صورت می‌گیرد، علاوه بر این در هزینه نیز صرفه جویی شده است.

واژگان کلیدی: بریکر خلاء، اضافه ولتاژ برگشتی گذرا، برش جریان، اسنابر RC.

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت، کارمند شرکت توزیع برق استان گیلان  
Feriadibsaber@gmail.com

۲- کارشناس مهندسی برق قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد لشت نشا، Javad.azmoon58@gmail.com

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، دکتری مهندسی برق قدرت، A.tavakoli70@gmail.com

در گذشته استفاده از فیلترهای پسیو برای نگهداشتن هارمونیک‌ها در یک حد معقول، مرسوم بود. اما این فیلترها دارای مضراتی از قبیل اندازه‌ی بزرگ، رزونانس و جبران‌سازی ثابت می‌باشند. بنابراین فیلتر پسیو نمیتوانست مشکل هارمونیکها را بطور کامل حل کند (۱). با بالا رفتن قابلیت‌های عناصر سوئیچینگ و پردازشگرهای دیجیتال، وسایل استاتیکی جبران‌گر مورد توجه بسیار قرار گرفته است. فیلترهای اکتیو از جمله ادواتی هستند که طی سال‌های اخیر جهت کاهش هارمونیک‌های سیستم‌های قدرت بکاررفته‌اند و به دو صورت سری و موازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فیلترهای موازی بصورت موازی با بار دارای اغتشاش متصل میشوند و جهت جبران‌سازی ضریب توان، متعادل‌سازی جریان بار و تقلیل هارمونیک‌های جریان کشیده شده از شبکه استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه می‌توان از اینورترهای متصل به شبکه بصورت فیلتر اکتیو استفاده کرد (۲). از این‌رو تکنیکی که انتقال توان منبع تجدیدپذیر متصل به شبکه و فیلتر اکتیو قدرت را ترکیب می‌کند ارائه شده است. ساختار اینورتر قدرت را میتوان بر اساس ذخیره‌ساز انرژی DC، تعداد فازها و تعداد سیم‌های سیستم طبقه‌بندی کرد. یکی از متداولترین ساختارها در سیستم‌های چهارسیمه، ساختار سه شاخه چهارسیمه با خازن سر وسط است. این ساختار دارای دو خازن ذخیره‌ساز DC می‌باشد. نقطه اتصال دو خازن به سیم خنثی بار متصل است که مسیری را جهت جریان توالی صفر ایجاد می‌کند. از این‌رو می‌توان از این ساختار در سیستم‌های سه‌فاز چهار سیمه که در تزریق جریان‌های توالی صفر مورد نیاز است، استفاده نمود (۳). نتایج شبیه‌سازی صحت کارایی الگوریتم طراحی شده را تأیید می‌کند. در صنایع فولاد سازی ترانسفورماتور کوره در یک پریود زمانی توسط اپراتور بطور مکرر قطع و وصل می‌گردند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با قطع و وصل کلید خلاء، اضافه ولتاژهای شدیدی رخ می‌دهد، که به مرور زمان در اثر آن ترانسفورماتور کوره دچار افت شدید عایقی در سیم پیچ اولیه‌ی خود می‌شود. اضافه ولتاژ گذرا ناشی از قطع کلید خلاء ترانسفورماتور کوره، به مراتب بیشتر از اضافه ولتاژ در هنگام وصل کلید است. با بررسی پدیده‌های گذرای ایجاد شده هنگام قطع کلید خلاء و محاسبه‌ی اضافه ولتاژ به‌وجود آمده در پایانه‌ی ترانسفورماتور، می‌توان مدار حفاظتی مناسبی را در برابر این اضافه ولتاژها طراحی نمود. در این مقاله با ارائه مدل کلید خلاء و شبکه‌ی برق، با استفاده از شبیه‌سازی حالت گذرا، اسباب RC مناسب جهت کاهش اضافه ولتاژ گذرا در زمان قطع کلید خلاء طراحی شده است. هر در زمان قطع کلید خلاء، پدیده‌هایی بوجود می‌آید که منجر به افزایش ولتاژ در پایانه‌ی ترانسفورماتور کوره و صدمه به سیم پیچ ترانسفورماتور می‌شود. این پدیده‌ها به ترتیب رخ داد تشریح می‌گردد. برش جریان به معنای متوقف سازی ناهنگام جریان (جریان بار یا اتصال) در فرکانس قدرت قبل از جریان صفر نامی (طبیعی) در بریکر خلا است. یا به عبارتی فرآیند برش جریان، صفر شدن اجباری جریان فرکانس قدرت قبل از صفر طبیعی جریان است که ناشی از ناپایداری قوس الکتریکی در کلیدهای خلاء در جریان کم می‌باشد. به دلیل پدیده برش جریان در اثر برش جریان در کلید خلاء، اضافه ولتاژ گذرا پدید می‌آید، اگر این اضافه ولتاژ برگشتی گذرا از نرخ ولتاژ برگشتی مقاوم بیشتر باشد سبب شکست عایق و ایجاد پیش‌جرقه و جاری شدن جریان و در نتیجه وصل مجدد مدار می‌شود. هنگامی که ولتاژ برگشتی گذرا از نرخ ولتاژ برگشتی مقاوم بیشتر باشد باعث ایجاد جرقه بین کنتاکتهای کلید و وصل مجدد مدار می‌شود. فرکانس در این حالت دیگر فرکانس مرجع ۴۵ هرتز نیست بلکه فرکانس این جرقه و جریان حاصل دارای فرکانسی در حدود ۸۰ کیلو هرتز است. این اولین جرقه است که در اثر شکست عایق بین پلهای کلید رخ داده است که باعث عبور مولفه‌های فرکانس بالای جریان از مدار کلید میشود. برش جریان مجازی بوسیله‌ی اثر متقابل بین دو فاز وابسته به کاپاسیتانس کوپل شده بین فازها، ایجاد می‌شود. اگر یک جرقه مجدد در یکی از فازها موجب یک جریان فرکانس بالا شود، بخشی از این جریان گذرا ممکن است در فاز B و C از طریق کاپاسیتانسهای شبکه جاری شود، این اتفاق می‌تواند موجب یک گذر از صفر جریان در این دو فاز شود. این پدیده جریان صفر اجباری، برش جریان مجازی نامیده می‌شود. بعد از برش مجازی جریان به علت عدم همزمانی باز شدن کنتاکتها و نتیجتاً قطع جریان فرکانس بالا جرقه ایجاد می‌شود و از آنجایی که هنوز ولتاژ مقاوم عایقی بین کنتاکتها از اضافه ولتاژ گذرا کمتر است این جرقه زنی ادامه می‌یابد. تقریباً حدود ۱۰ مرتبه و هر دفعه شدت اضافه ولتاژ ایجاد شده از دفعه‌ی پیشین بیشتر می‌شود و تا جایی ادامه پیدا می‌کنند که کنتاکتها فاصله‌ی لازم را از هم بگیرند. این پدیده در هر سه فاز ممکن است اتفاق بیفتد زیرا به دلیل عدم همزمانی باز شدن پل‌ها جرقه‌ی حاصل از کلید در یک پل از طریق کاپاسیتانس وارد فازهای دیگر شده و با باز شدن پل آن فاز تولید جرقه می‌نماید. این پدیده جرقه زنی چند تایی نام دارد که باعث ایجاد اضافه ولتاژهای بیشتری نسبت به قبل می‌شود که در صورت نبود وسیله حفاظتی مناسب باعث صدمه به عایق ترانسفورماتور کوره‌ی قوس می‌شود.

## ۲- مواد و روش و بررسی های صورت گرفته

### ۲-۱- طراحی فیلتر

اسنابر یا فیلتر RC ترکیب سری مقاومت و خازن است که به موازات ترانسفورماتور کوره نصب می شود. همانطور که قبلاً گفته شد در اثر برش جریان ناشی از قطع جریان بی باری ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی اضافه ولتاژ و هم چنین جریانهای فرکانس بالا ایجاد می شود که روی سیم پیچ ترانسفورماتور اثر نامطلوب می گذارند و در طولانی مدت موجب از کار افتادگی ترانس می شوند. در نتیجه نیاز به طراحی المانی می باشد که قابلیت دمپ چنین امواج گذرای فرکانس بالایی را داشته باشد. ایده طراحی اسنابر RC از اینجا نشأت می گیرد.

### ۲-۲- نقش خازن در مدار فیلتر

الف: تخلیه انرژی مغناطیسی ذخیره شده در ترانسفورماتور

با توجه به اینکه بعد از کلید خلاء، ترانسفورماتور کوره و یک بار به شدت اندوکتیو (سلفی) که شامل بازوهای الکتورها (آرم) الکتروود و آرک وجود دارد هم چنین با توجه به بارسلفی پس از قطع کلید خلاء، پیوستگی جریان وجود دارد که این پیوستگی جریان باعث ذخیره انرژی مغناطیسی در هسته ترانس می گردد که به انرژی به تله افتاده معروف است. بنابراین اولین ایده مبنی بر دلیل استفاده از RC فیلتر در اولیه ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی حذف یا تخلیه یا انرژی مغناطیسی ذخیره شده در سیم پیچ ترانسفورماتور می باشد. به الطبع عنصری که بتواند این انرژی ذخیره شده را دمپ و در خود تخلیه نماید یک خازن است که به صورت موازی با ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی قرار میگیرد.

ب: کاهش شیب جریانهای فرکانس بالا ناشی از شکست

دومین هدف استفاده از خازن در مدار RC، ایجاد مسیری است که از القای جریان فرکانس بالای ایجاد شده در اثر باز شدن اولین کنتاکت، بر روی دو فاز دیگر جلوگیری کند. که این کار با کم کردن شیب جریانهای فرکانس بالا انجام می پذیرد.

### ۲-۳- نقش مقاومت سری در مدار فیلتر RC

نتایج آزمایشات نشان می دهد، استفاده از مقاومت به صورت سری با خازن، اضافه ولتاژها را به طور مطلوبی کمتر می کند. هنگامی که انرژی مغناطیسی ترانسفورماتور در خازن تخلیه می شود، وجود مقاومت سری با خازن باعث کم کردن دامنه ی جریان تخلیه می شود و از تخلیه ناگهانی انرژی جلوگیری می کند. هم چنین وجود مقاومت باعث می شود انرژی درون ترانسفورماتور بیشتر درون مقاومت تلف شود و به نوعی با سرعت بیشتری تخلیه شود. هم چنین وجود مقاومت باعث کم کردن دامنه ی جریانهای فرکانس بالایی می شود که به دلیل عدم همزمانی باز شدن کنتاکتها در فازهای دیگر القاء می شوند می گردد. در نتیجه برش جریان مجازی صورت نمی پذیرد و جرقه زنی های چند تایی و ازدیاد ولتاژ صورت نمی پذیرد.

### ۲-۴- شبیه سازی

بعد از محاسبه مقدار اضافه ولتاژ ایجاد شده در زمان قطع کلید خلاء و ظرفیت خازن و مقاومت اسنابر، اینبار با مدلسازی اجزاء شبکه و کلید خلاء در نرم افزار EMTP-RV مقدار مناسب ظرفیت اسنابر را برای کاهش مطلوب اضافه ولتاژ بررسی می کنیم. شبیه سازی به صورت مدل تکفاز عناصر انجام شده است. با وجود اینکه مدل سه فاز نتایج دقیق تری به ما می دهد ولی از آنجایی که هدف از طراحی اسنابر، کاهش اضافه ولتاژ ناشی از برش جریان و کم کردن دامنه جریانهای فرکانس بالا ایجاد شده بعد از وصل مجدد در یک فاز قبل از القاء در فازهای دیگر است، مدلسازی تکفاز نیز نتایج دقیق و صحیحی از سیستم به ما ارائه میدهد. مدل تکفاز شبکه برق مجتمع صنعتی برای بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از قطع کلید خلاء ترانسفورماتور کوره قوس آورده شده است. این مدل شامل منبع به همراه راکتانس منبع، جبرانساز استاتیکی توان راکتیو، مدل کابل، مدل کلید خلاء، مدل دینامیکی کلید خلاء، مدل باسبار، مدل دینامیکی راکتور و ترانسفورماتور کوره قوس می باشد. مقادیر المانها به ترتیب در جداول زیر آورده شده است. ولتاژ منبع KV19 و اندوکتانس آن ۲۶۷ مگا هنرتر است.

### ۲-۵- مدل کلید خلاء

پارامترهای این مدل توسط دستگاههای اندازه گیری نصب شده در محل کلید، به دست آمده است. به هر حال این مدل دارای پایداری استاتیکی در جریان برش و جریانهای فرکانس بالا می باشد. ولتاژ مقاوم عایقی بین کنتاکتهای کلید ۱۲۰ کیلو ولت است و ولتاژ دو سر کلید خلاء ۵/۳۴ کیلو ولت می باشد. برای شبیه سازی مدل کلید خلاء از مدل شکل زیر استفاده شده است. در این مدل کلید خلاء با یک سویچ مدل شده است (VCB) و پدیده جرقه ی برگشتی ناشی از شکست عایقی خلاء با

استفاده از یک سویچ بنام (ReVCB) بریکر اصلی همان VCB است و کلید موازی با آن (ReVCB) برای نشان دادن جرقه حاصل از شکست عایقی خلاء در اثر اضافه ولتاژ برگشتی ناشی از VCB در نظر گرفته شده است. در حقیقت ReVCB جزئی است که از رفتار برگشتی (Restriking) مراقبت می‌کند.

برای شبیه سازی جرقه برگشتی کلید خلاء و ایجاد جریانهای فرکانس بالا از دو کلید موازی با هم استفاده شده است. کلید VCB کلید اصلی مدل می باشد، هنگامی که VCB در زمان  $t_1$  می شود، در اثر برش جریان، ولتاژ برگشتی گذرا در پلهای کلید افزایش می‌یابد و با گذشت زمان به حدی می‌رسد که از ولتاژ مقاوم عایقی بین پلهای بیشتر می‌شود. در این حالت در زمان  $t_2$  مقاومت عایقی بین کنتاکتها شکسته شده و جرقه ایجاد می‌شود و اتصال کنتاکتها این بار از طریق جرقه برقرار می‌گردد. برای نشان دادن جرقه حاصل و برقراری جریانهای فرکانس بالا از کلید دیگری که به موازات کلید خلاء است (ReVCB) استفاده شده است. این کلید در حالت عادی باز است و در زمان  $t_2$  بسته می‌شود. جرقه ایجاد شده است اتصال کنتاکتهای کلید برقرار شده است. با بسته شدن کلید ReVCB جریانهای فرکانس بالا ایجاد شده و بایستی شاهد اضافه ولتاژ در پایانه ی ترانسفورماتور و کلید خلاء باشیم. ظرفیت خازن بین پلهای کلید در حالتی که کاملاً باز است با استفاده از اندازه گیری  $0.003\text{nf}$  در نظر گرفته شده است.

## ۲-۶- راکتور سری

راکتور سری با ترانسفورماتور کوره و قبل از آن قرار گرفته است و پارامترهای مورد نیاز آن برای مطالعه در حالات گذرا و تاثیر گذار روی شبیه سازی عبارتند از: خازن پراکنده، مقاومت اهمی سری و اندوکتانس سری

## ۲-۷- مدل ترانسفورماتور کوره قوس

جهت تعیین پارامترهای عناصر در مدل ترانسفورماتور کوره ابتدا با بایستی مدار معادل ترانسفورماتور را در حالتی که شرایط گذرا در شبکه وجود دارد بررسی کنیم. عناصری از مدل که در حالت گذرا در نتایج شبیه سازی دخیل هستند و اطلاعات درستی از رفتار ترانسفورماتور در حالت گذرا به ما می‌دهند در مدل آورده شده است.

## ۳- نتیجه گیری و بحث

### -حالتهای انجام شبیه سازی

همانطور که در محاسبات طراحی اسنابر دیده شد مقادیر خازن برقیگیر و مقاومت سری از طریق روابط محاسبه شد و مقادیر زیر به دست آمد.

$$R = 36\Omega \quad C = 13.5\mu\text{F}$$

مقادیر اسنابر RC به کار رفته در مجتمع ذوب آهن پاسارگاد نیز به قرار زیر است.

$$R = 116\Omega \quad C = 0.28\mu\text{F}$$

پژوهش صورت گرفته با کمک نرم افزار شبیه سازی حالتی گذرا (EMTP-RV) در ۲ حالت انجام گرفته است.

### حالت اول:

در حالت نخست مقادیر خازن و مقاومت اسنابر RC را که از طریق محاسبات و روابط ریاضی به دست آمد، در مدل شبیه سازی شبکه قرار میدهیم و اثر اضافه ولتاژهای قطع کلید خلاء را بر روی پایانه های اولیه ی ترانسفورماتور کوره ی قوس بررسی می‌کنیم. به دلیل اینکه اضافه ولتاژها همانطور که در شکل حالت ۱ مشخص است در حالت بی باری ترانسفورماتور کوره ی قوس بیشتر است، تنها نتایج شبیه سازی با حضور اسنابر را در حالت بی باری مهم است.

### حالت دوم:

با تغییر مقادیر خازن و مقاومت در محدوده ی استاندارد و چک کردن اضافه ولتاژهای ناشی از قطع کلید خلاء در پایانه ی اولیه ترانسفورماتور، مقادیر مناسب مقاومت و خازن را که با کمترین مقدار اضافه ولتاژ روی ترمینال ترانسفورماتور همراه باشد به دست می‌آوریم. بایستی توجه داشته باشیم که مقدار خازن در محدوده مجاز و مقدار مقاومت نیز متناسب با مقدار خازن انتخاب شود.

مقدار اضافه ولتاژ فازی ایجاد شده روی پایانه ی ترانسفورماتور در زمان قطع کلید خلاء در حالت بی باری ۳۹ کیلو ولت بود، این مقدار با استفاده از اسنابر RC بکاررفته در مجتمع ذوب آهن پاسارگاد با مقادیر مقاومت ۳۵ اهم و خازن ۰.۲۵ میکروفاراد به مقدار ۳۰ کیلو ولت کاهش یافت که مطلوب است. هنگامی که از مقاومت سری ۶۸ اهم در مدار اسنابر RC استفاده می‌کنیم دیده می‌شود که اضافه ولتاژ پایانه ی ترانسفورماتور در زمان قطع کلید خلاء در حالت بی

باری به ۲۸/۴ کیلو ولت کاهش یافته است. یعنی حدود ۱/۴ کیلو ولت کاهش اضافه ولتاژ صورت گرفته است. با وجود اینکه اضافه ولتاژ کاهش کمی داشته است که در نوع خود بسیار مطلوب است، با استفاده از مقاومت سری ۶۸ اهم به جای ۱۱۰ اهم، تلفات حرارتی نیز کاهش یافته و خرابی مقاومت سری کمتر صورت می‌گیرد، علاوه بر این در هزینه نیز صرفه جویی شده است.

### -مطالب تکمیلی

#### -علت اضافه ولتاژ در سیستم های الکتریکی

یکی از نکات مهم در بحث ایمنی در برق، حفاظت در برابر اضافه ولتاژ است. اضافه ولتاژ به وجود آمده در خطوط برق و وسایل الکتریکی، خطرات بسیار زیادی را برای وسایل و افراد مجاور آن ایجاد می‌کند. اضافه ولتاژ تولیدی در خطوط، توسط عوامل داخلی یا بیرونی ایجاد می‌شود. عامل داخلی ممکن است در اثر اختلالات در شبکه نظیر سوئیچینگ (قطع و وصل خطوط)، اتصال کوتاه، رزونانس در شبکه، وصل مدار جریان بر روی سیم های طولی یا موتورها، تأسیسات با جبران کننده مرکزی و غیره به وجود آید.

#### -انواع اضافه ولتاژ

این اضافه ولتاژ داخلی به دو نوع اضافه ولتاژهای موقت ناشی از نوسانات فرکانس قدرت یا هارمونیک ها (که در شرایط بی باری یا بار بسیار کم رخ می‌دهند) و اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی (که دارای دوره کوتاه بوده و به شدت میرا هستند) تقسیم می‌شود. عوامل بیرونی مانند صاعقه و رعد و برق، بیرون از شبکه قدرت وجود دارند که برخورد آنها به ادوات الکتریکی به خصوص در شبکه های دارای سیم های هوایی، یکی از دلایل عمده اضافه ولتاژ محسوب می‌شوند. دامنه اضافه ولتاژهای صاعقه اساساً مستقل از طرح سیستم ها است. در حالی که اضافه ولتاژهای ایجاد شده به وسیله عوامل داخلی مانند کلیدزنی با افزایش ولتاژ کاری سیستم افزایش می‌یابند.

#### -حفاظت تأسیسات در برابر اضافه ولتاژ

از جمله مواردی که ممکن است موجب بروز آسیب به عملکرد درست تجهیزات و دستگاه های شبکه های تأسیسات برق و خسارت به آن ها و حتی خطراتی برای جان انسان ها شود، اضافه ولتاژهای گذرا در تأسیسات برق یا همان پست های برق و تأسیسات فشار ضعیف و اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی و هم چنین اضافه ولتاژهای فوق گذرا که در اثر صاعقه به وجود می‌آیند، هستند.

#### ۱- حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای گذرا در شبکه های توزیع

در صورتی که در تجهیزات شبکه برق فشار متوسط اتصال زمین رخ دهد، بر شبکه برق فشار ضعیف هم تأثیر می‌گذارد. حال به منظور پیش گیری از بروز اضافه ولتاژ در شبکه برق فشار ضعیف باید اولاً به منظور جلوگیری از اثر حوزه ولتاژ روی یکدیگر، الکتروود اتصال زمین تجهیزات شبکه فشار متوسط و الکتروود اتصال زمین شبکه فشار ضعیف از یکدیگر مجزا و مستقل باشند و فاصله بین آن ها از ۲۰ متر کمتر نباشد. هم چنین الکتروود زمین دیگری نیز تا این شعاع اطراف آن ها نباشد. ثانیاً در فاصله بین دو الکتروود هیچ ارتباط رسانی نباشد. یعنی به طور مثال لوله های فلزی آب و گاز و ... در این فاصله وجود نداشته باشند.

اگر تابلوهای برق فشار ضعیف از تابلوهای برق فشار متوسط، ترانسفورماتور و سازه فلزی پست تفکیک شده باشند و نسبت به یکدیگر عایق باشند، یعنی به طور مثال تابلو برق فشار ضعیف از طریق کف پوش عایق از اسکلت فولادی و تجهیزات برق فشار متوسط مجزا شده باشند، آن گاه باید بدنه تابلو برق فشار ضعیف و نقطه خنثی (نول) برق فشار ضعیف به یک الکتروود زمین که در اصطلاح به آن الکتروود زمین ایمنی می‌گوییم، در فاصله حداقل ۲۰ متری با سازه پست وصل شود و بدنه تابلوی فشار متوسط و بدنه ترانسفورماتور و اجزای فلزی ساز پست به الکتروود حفاظتی داخل پست متصل شوند.

حال در صورتی که امکان تفکیک عایقی تابلوهای برق فشار ضعیف نسبت به تجهیزات برق فشار متوسط و سازه فلزی پست نباشد، باید بدنه های تابلو برق فشار ضعیف، تابلو فشار متوسط و ترانسفورماتور و همه اجزای فلزی ساز پست به الکتروود حفاظتی وصل شوند و نقطه خنثی (مرکز ستاره) برق فشار ضعیف به وسیله کابلی که غلاف عایق (غیر فلزی) داشته باشد به الکتروود زمین ایمنی که در فاصله ۲۰ متری از پست برق است، متصل شود.

در ضمن در این حالت باید تابلوهای برق فشار ضعیف از نظر درجه عایق بندی، نسبت به ولتاژ نامی بین فاز و نول، درجه عایق بندی بالاتری داشته باشند.

اگر هیچ یک از شرایط گفته شده امکان پذیر نباشد و نتوان از دو الکتروود زمین مستقل و مجزا استفاده کرد، می‌توان از یک الکتروود هم برای حفاظت و هم برای ایمنی استفاده کرد؛ به شرط آن که مقاومت کل الکتروود زمین از یک اهم بیشتر نشود.

#### ۲- حفاظت در برابر اضافه ولتاژ در تأسیسات برق فشار ضعیف

سیستم نیروی برق از یک شبکه توزیع فشار متوسط که انواع مختلفی دارد به شبکه توزیع فشار ضعیف می‌رود و مطابق شکل به خانه‌های ما می‌رسد. ولتاژ ۲۰ کیلو ولت شبکه‌های توزیع سه فاز، توسط ترانسفورماتور به ولتاژ ۴۰۰ ولت بین دو فاز و ۲۳۰ ولت بین فاز و نول کاسته شده و در اختیار مصرف‌کننده‌ها قرار می‌گیرد (از به هم وصل شدن یک سر سیم پیچ ثانویه ترانسفورماتور نقطه مرکزی N یا نول به وجود می‌آید).

در این نوع ترانسفورماتورها نقطه مرکزی (N) به زمین وصل می‌شود. اتصال یک قسمت از شبکه الکتریکی، مستقیماً یا توسط امپدانس را با زمین (اتصال زمین الکتریکی) می‌نامند.

به علت وجود نقطه اتصال به زمین در سیستم فشار متوسط، در صورت اتصال یک فاز به بدنه فلزی دستگاه اختلاف پتانسیل بین بدنه و زمین به وجود می‌آید. حال اگر شخصی بدنه دستگاه را لمس کند مدار بسته‌ای شامل سیم فاز، بدن شخص، زمین و اتصال بین زمین و نقطه مرکزی ترانسفورماتور تشکیل می‌شود. جریان به وجود آمده در این مدار، از بدن شخص عبور می‌کند و چنانچه مقدار این جریان از ۰.۰۵ آمپر بیشتر شود، خطرناک خواهد بود و ممکن است سبب برق‌گرفتگی و مرگ آن شخص شود و اهمیت حفاظت الکتریکی مشخص می‌شود.

- هر چه مقدار جریان عبور بدن زیادتر شود خطر مرگ از برق‌گرفتگی بیشتر می‌شود.
  - ولتاژ تماس عبارت است از اختلاف پتانسیلی که در بدن شخص در هنگام برق‌گرفتگی ایجاد می‌شود.
- قطع نول موجب موج شدن ولتاژ بین فازها و نول (نول شناور) می‌شود که از بین رفتن عایق بندی و سوختن حدود ۳/۲ لوازم و تجهیزات برقی را به دنبال دارد. بنابراین برای جلوگیری از قطع نول باید تمهیدات لازم انجام گیرد.
- در صورت اتصال اتفاقی فاز به سیستم اتصال زمین شبکه کامپیوتر و IT، تغییرات شدید ولتاژ در این شبکه‌ها رخ می‌دهد که به منظور جلوگیری از آن باید مسیر و محل عبور مدارهای برق فشار ضعیف باید به گونه‌ای طراحی و اجرا شوند که این اتفاق رخ ندهد.

#### -رله کنترل فاز

در مورد مصارف برقی سه فاز موتوری یا دیگر وسایل برقی مشابه که قطع فاز یا جا به جایی فاز موجب بروز آسیب و خسارت در این دستگاه‌ها می‌شود (به طور مثال جا به جایی دو فاز در موتور موجب تغییر جهت چرخش موتور می‌شود)، باید وسیله حفاظتی مناسبی در نظر گرفته شود که در این راستا به طور معمول از رله کنترل فاز استفاده می‌شود.

#### -رله کنترل ولتاژ

تجهیزات مورد استفاده در یک شبکه الکتریکی برای کار در یک ولتاژ مشخصی طراحی شده‌اند. بنابراین نباید ولتاژ اعمالی به آنها از حد مشخصی کمتر یا بیشتر شود محدوده این تغییرات به نوع دستگاه بستگی دارد. برای حفاظت شبکه‌های الکتریکی در برابر تغییرات ولتاژ از رله‌ای برای مشخص کردن کاهش یا افزایش ولتاژ استفاده می‌شود که به آن رله کنترل ولتاژ می‌گویند.

رله در حالت کنترل کاهش ولتاژ برای حفاظت تجهیزاتی که در اثر افت ولتاژ آسیب می‌بینند (مانند الکتروموتورها) به کار برده می‌شود. این رله معمولاً دارای یک تنظیم ولتاژی - تنظیم زمانی است و در صورت افت ولتاژ شبکه تا حد تنظیم شده و پس از زمان تنظیم شده عمل می‌کنند. رله در حالت کنترل اضافه ولتاژ برای حفاظت شبکه در برابر اضافه ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولاً دارای دو تنظیم زمانی و ولتاژی است. در صورت افزایش بیش از حد ولتاژ شبکه و رسیدن به هدف تنظیم شده در زمان تنظیم شده عمل می‌کند. این رله‌ها معمولاً در خروجی ژنراتورها و روی باس بار اصلی نصب می‌شود.

#### -کوپلاژ خازنی

با ایجاد میدان الکتریکی در نزدیک نقطه تخلیه صاعقه، کابل‌ها و هادی‌ها در نقش خازن و هوا به عنوان دی الکتریک بین آن‌ها قرار می‌گیرد که در این حالت نیز کابل‌ها دچار یک افت ولتاژ بالا می‌شوند.

### ۴- حفاظت سیستم‌های قدرت در برابر اضافه ولتاژ

بنا به دلایل ذکر شده لازم است از وسایل حفاظتی محدود کننده جریان ضربه برای حفاظت سیستم‌های قدرت در برابر اضافه ولتاژ استفاده شود. یک وسیله حفاظتی محدود کننده ضربه باید اضافه ولتاژهای گذرا یا ولتاژهایی که باعث تخریب تجهیزات شبکه می‌شوند را محدود کرده و به زمین هدایت کند. هم چنین باید بتواند این کار را بدون آنکه آسیبی ببیند به دفعات تکرار کند.

بر این اساس، دو نوع سیستم حفاظت خارجی و داخلی برای حفاظت از عوامل خارجی و داخلی ایجاد اضافه ولتاژ تعریف می‌شوند. وسایل حفاظتی مانند برقیگیرها، سیم‌های زمین (برای حفاظت خطوط و تجهیزات از برخورد مستقیم صاعقه)، جرقه گیرها، خازن‌های ضربه و مقاومت‌های زمین‌کننده، وریستورها (Zno, Sic)، دیودهای بهمنی (برای تغییر و دگرگونی شکل موج اضافه ولتاژها) و فیلترهای RC برای حذف موج ضربه نمونه‌ای از این سیستم‌های حفاظتی هستند.

## انواع برقگیر

### برقگیر میله ای

از معایب اصلی برقگیر میله ای (جرقه گیر با فواصل هوایی)، عدم توانایی در خاموش نمودن جرقه است و هنگامی که بر اثر برخورد صاعقه جرقه زده شد، این جرقه تا زمانی که دستگاه بی برق گردد، باقی خواهد ماند در نتیجه پس از هر بار ایجاد جرقه باید شبکه بی برق شده و مجدداً برق دار گردد. تنها مزیت این نوع برقگیرها ارزان بودن (به خاطر سادگی ساختارشان) است.

### برقگیر سیلیکن کاربید

در این نوع برقگیر برخلاف جرقه گیرها، پس از عمل کردن آن شبکه قدرت قابلیت بازگشت به حالت اولیه را خواهد داشت. برقگیرهای SiC به هیچ عنوان نباید تحت اضافه ولتاژهای با فرکانس قدرت شبکه عمل کنند، زیرا باعث ایجاد اتصال کوتاه به زمین و عبور انرژی زیاد از آن شده و از بین می روند. برقگیرهای SiC سطح اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و کلید زنی را به حد مشخصی کاهش می دهند که این حد بستگی به ولتاژ نامی برقگیر دارد.

### برقگیر نوع اکسید فلزی

این نوع برقگیرها در عمل کمتر از برقگیرهای دارای فاصله هوایی گرم می شوند و تکرار عملکرد آنها کمتر مشکل ایجاد می نماید. از مزایای دیگر این نوع برقگیرها، سرعت عملکرد در پیشانی موج است. به این معنی که تأخیری که در برقگیرهای دارای فاصله هوایی وجود دارد، در این نوع برقگیرها خیلی کمتر است. با توجه به عدم وجود فاصله هوایی، امکان موازی کردن برقگیر اکسید روی وجود دارد. به این ترتیب می توان تحمل برقگیر در مقابل جریان های زیاد را افزایش داد. یکی از مشکلات برقگیرهای اکسید روی جریان نشی در فرکانس قدرت است. از مهمترین عیب های برقگیر اکسید روی قیمت زیاد آنها نسبت به دیگر برقگیرها است. علاوه بر آن برقگیرهای اکسید روی در سیستم های با نوسانات ولتاژ قابل ملاحظه، بیشتر از برقگیرهای اکسید روی در معرض خطر آسیب دیدگی قرار می گیرند.

### برقگیر قوس طولانی (LFA)

نصب برقگیر خط بین فاز - دکل به صورت موازی با زنجیره مقره یا به جای مقره هزینه سنگینی را در بردارد. بنابراین، باید به دنبال کاهش هزینه نصب برقگیرها بود و جلوی خروج خطوط بر اثر تخلیه اضافه ولتاژهای ناشی از تخلیه جوی بر خط را گرفت. روش جدید حفاظت خطوط انتقال استفاده از یک سطح طولانی جهت هدایت قوس الکتریکی ناشی از تخلیه می باشد برقگیرهای قوس طولانی می توانند بین هادی و زمین و یا بصورت سری با مقره قرار بگیرند. ساختار این برقگیرها ساده بوده و در نتیجه نسبت به سایر برقگیرها ارزانتر و مقرون به صرفه تر هستند، به طوری که قیمت آن در حدود یک دهم قیمت برقگیرهای ZnO است. یکی دیگر از مزایای عمده این برقگیرها عدم جاری شدن جریان با فرکانس شبکه (PAF) پس از اتمام تخلیه جریان موج گذرا و بروز قوس بر روی مقره است. طول برقگیرهای LFA از طول مقره ای که باید حفاظت شود، بیشتر است.

### علت اضافه ولتاژ در سیستم های الکتریکی چیست؟

یکی از نکات مهم در بحث ایمنی در برق، حفاظت در برابر اضافه ولتاژ است. اضافه ولتاژ به وجود آمده در خطوط برق و وسایل الکتریکی، خطرات بسیار زیادی را برای وسایل و افراد مجاور آن ایجاد می کند. اضافه ولتاژ تولیدی در خطوط، توسط عوامل داخلی یا بیرونی ایجاد می شود. عامل داخلی ممکن است در اثر اختلالات در شبکه نظیر سوئیچینگ (قطع و وصل خطوط)، اتصال کوتاه، رزونانس در شبکه، وصل مدار جریان بر روی سیم های طولی یا موتورها، تاسیسات با جبران کننده مرکزی و غیره به وجود آید.

### برای حفاظت در برابر اضافه ولتاژ در تاسیسات فشار ضعیف به چه تجهیزاتی احتیاج داریم؟

۱- کلید مینیاتوری: در صورت بروز اتصالی بین فاز و نول، به منظور پیش گیری از اضافه ولتاژ در نول باید وسایل حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ در مدار قرار داده شود. در این راستا از کلید مینیاتوری استفاده می شود که اجازه نمی دهد ولتاژ روی نول باقی بماند. ۲- رله کنترل فاز: در مورد مصارف برقی سه فاز موتوری یا دیگر وسایل برقی مشابه که قطع فاز یا جا به جایی فاز موجب بروز آسیب و خسارت در این دستگاه ها می شود (به طور مثال جا به جایی دو فاز در موتور موجب تغییر جهت چرخش موتور می شود)، باید وسیله حفاظتی مناسبی در نظر گرفته شود که در این راستا به طور معمول از رله کنترل فاز استفاده می شود. رله کنترل ولتاژ تجهیزات مورد استفاده در یک شبکه الکتریکی برای کار در یک ولتاژ مشخصی طراحی شده اند. بنابراین نباید ولتاژ اعمالی به آنها از حد مشخصی کمتر یا بیشتر شود محدوده این تغییرات به نوع دستگاه بستگی دارد. برای حفاظت شبکه های الکتریکی در برابر تغییرات ولتاژ از رله ای برای مشخص کردن کاهش یا افزایش ولتاژ استفاده می شود که به آن رله کنترل ولتاژ می گویند.

### انواع عایق بندی، تامین حفاظت پایه با استفاده از محفظه، رفتار عایق در برابر ریزقوس

عایق بندی حفاظتی برای جلوگیری از ایجاد ولتاژ تماس خطرآفرین در قسمت های هادی قابل دسترسی تجهیزات برقی هنگام خراب بودن عایق بندی پایه است.

### -عایق بندی

پایه عایق بندی پایه بر روی قسمت های برقدار کشیده می شود تا از تماس مستقیم انسان و دام با قسمت های برقدار جلوگیری کند. عایق بندی پایه حفاظت در برابر تماس مستقیم یا حفاظت پایه را تأمین می کند.

### -عایق بندی تکمیلی

عایق بندی تکمیلی در صورت خراب شدن عایق بندی پایه حفاظت در برابر خطر برق گرفتگی را تأمین می کند. عایق بندی تکمیلی حفاظت، حفاظت در برابر تماس غیرمستقیم با قسمت های برقدار یا حفاظت در برابر اتصالی را تأمین می کند.

### -عایق بندی مضاعف

به مجموع عایق بندی پایه و عایق بندی تکمیلی، عایق بندی مضاعف گفته می شود.

### -عایق بندی تقویت شده

یک واحد عایق بندی است که بر روی قسمت های برقدار کشیده می شود و ایمنی آن معادل ایمنی عایق بندی مضاعف است. عایق بندی تقویت شده معمولاً در صورتی به کار می رود که کشیدن عایق بندی تکمیلی امکان پذیر نباشد.

### -مواد عایق در برابر ریزقوس ها چه رفتاری دارند؟

با خشک شدن سطح آلوده، مسیر جریان نشست سطحی بر روی سطح عایق قطع می شود، حال اگر جریان نشت سطحی از مقدار معینی بیشتر باشد، ریزقوس هایی در این مسیر ایجاد می شود. انرژی متراکم ریز قوس ها ممکن است: ۱- اثری بر روی ماده عایق نداشته باشد، ۲- باعث تجزیه ماده عایق به اجزاء فرار شود یعنی باعث فرسایش ماده عایق شود، ۳- باعث تجزیه ماده عایق و پس ماند کربن شود و در نتیجه مسیر هادی در سطح عایق ایجاد کند. رفتار مواد عایق در آلودگی ها و ولتاژهای مختلف، فوق العاده پیچیده است. در شرایط مختلف خیلی از مواد در دو گروه و حتی در هر سه گروه بالا قرار می گیرند. شاخص مقایسه ای CTI مطابق IEC ۱۱۲ معیاری مقایسه ای، برای ایجاد مسیر هادی در سطح مواد عایق جامد در شرایط مرطوب است. شاخص مقایسه ای برای مقایسه عملکرد مواد عایق در شرایط آزمون طراحی شده است. الکتروادهای دارای شکل معین به ترتیب بر روی نمونه، قرار داده می شوند. قطره های آمونیم کلراید ۰.۱ از قطره چکان بر روی سطح نمونه چکانده می شود.

فیلتر خوب باید عملکرد ردیابی و دینامیک سریع داشته باشد و خود را با تغییرات سریع بار تطبیق نماید بطوریکه جریان فیلتر، سیگنال مرجع را بدون خطا در حالت گذرا و ماندگار دنبال نماید. جهت رسیدن به این مهم باید آشکارساز سیگنال مرجع و کنترل کننده جریان، سریع باشند. در این تحقیق جهت بهبود عملکرد کنترلر طراحی شده در شرایط گذرای ناشی از تغییر بار، از تئوری تبدیل موجک جهت بهبود پاسخ زمانی فیلتر و کاهش تأخیر در عملکرد آن استفاده میشود. نتایج شبیهسازی مبین آن هستند که کنترلر بهبودیافته علاوه بر دارا بودن تمام قابلیت‌های کنترلر طراحی شده اولیه، تأخیر فیلتر را حدود ۵۵ درصد کاهش پیدا می کند (۵). در اکثر شرکت‌های برق فرض قابل قبول این است که شکل موج ولتاژ سینوسی تولید شده در نیروگاه‌ها خیلی خوب و منظم می‌باشد. در حالیکه ولتاژ در خطوط انتقال عملاً دارای درصدی اغتشاش است. با افزایش بارهای غیرخطی در شبکه‌های قدرت، شکل موج جریان و ولتاژ دچار اغتشاشات بیشتری شده و کیفیت توان سیستم‌های الکتریکی بطور جدیتری مورد مخاطره قرار می‌گیرد. عنصر غیرخطی عنصری است که جریانش متناسب با ولتاژ اعمالی نمی‌باشد و افزایش چند درصدی ولتاژ ممکن است منجر به دو برابر شدن جریان شود و جریان شکل موج دیگری به خود بگیرد. از آنجا که بیشتر اغتشاشات بصورت تناوبی یا هارمونیک میباشند یعنی سیکل به سیکل شبیه هم بوده و تغییرات تصادفی در آنها خیلی کم است لذا برای تشریح اغتشاش در شکل موج بطور گسترده از عبارت هارمونیک استفاده میشود. بطور کلی هارمونیکها بصورت اغتشاشات موجهای ولتاژ و جریان و برحسب فرکانسهای هارمونیک که مضارب صحیحی از فرکانس اصلی هستند بیان می‌شوند (۶). سطوح اغتشاش هارمونیک بوسیله طیف کامل هارمونیکها، با مقدار دامنه و اختلاف فاز هر هارمونیک مشخص میگردد. همچنین مرسوم است که از یک مقدار بنام ضریب اعوجاج کل THD بعنوان مقدار مؤثر اغتشاش هارمونیک استفاده شود. پیدایش عناصر نیمه هادی و المان‌های غیرخطی نظیر؛ دیود، تریستور،... و استفاده‌ی فراوان از آنها در شبکه‌های قدرت، عامل جدیدی برای تولید هارمونیک می‌باشد.

اثار سوئ هارمونیک‌ها عبارتند از:

الف: عملکرد نامناسب وسایل کنترل کننده که وظیفه انجام اعمالی مانند کلیدزنی از راه دور، کنترل بار و اندازه‌گیری را بر عهده دارند ب: خرابی بانکهای خازنی بدلیل شکست عایقی یا افزایش بیش از حد توان راکتیو ج: اضافه ولتاژها و جریانه‌های اضافی در سیستم که ناشی از تشدید ولتاژها و جریانه‌های هارمونیک در شبکه هستند د: شکست عایقی در کابل ها بخاطر اضافه ولتاژهای هارمونیک در سیستم ح: خطا در دستگاه‌های اندازه گیری انرژی الکتریکی که با روش القا کار میکنند چ: عملکرد نامناسب سیستم‌های تولیدکننده سیگنال و رله‌های حفاظتی بخصوص در سیستم‌های استاتیکی و میکرو پروسوسری خ: تداخل در



سیستم‌های کنترل موتورهای بزرگ و سیستم‌های تحریک در نیروگاه‌ها ن: نوسانات مکانیکی در ماشینهای سنکرون و القایی د: عملکرد ناپایدار مدارهای آتش، بخصوص مدارهایی که براساس تشخیص نقطه صفر ولتاژ عمل می‌کنند. اثرات مخرب هارمونیک‌ها روی تجهیزات مسلماً به نوع منبع هارمونیک، محل استقرار آن در سیستم قدرت و مشخصات الکتریکی شبکه مورد بحث بستگی دارد.

### فیلتر اکتیو قدرت با ذخیره‌ساز انرژی

جهت کاهش سایز سلف لینک DC در فیلتر اکتیو منبع جریانی، چند راه حل پیشنهاد شده است. در مرجع ساختاری برای لینک DC ارائه شده است که در آن انرژی مورد نیاز برای جبران سازی هارمونیک، در مدار تشدید موازی ذخیره شده است. در نتیجه حجم و وزن مؤلفه‌های پسیو، کاهش قابل توجهی خواهند داشت. اما سیستم پیشنهادی قادر به جبران سازی هارمونیک سوم جریان و عدم تعادل فاز بار نخواهد بود. راه حل دیگر، یک ذخیره ساز انرژی هیبرید است که در مرجع (۱۲) ارائه شده است. ذخیره‌ساز انرژی هیبرید شامل یک سلف DC، یک خازن DC، دو دیود و دو سوئیچ قابل کنترل است. در ذخیره‌ساز انرژی هیبرید چون خازن لینک DC بیشترین انرژی مورد نیاز را ذخیره میکند، اندازه سلف لینک DC به میزان قابل توجهی کاهش مییابد. با این وجود میتوان ولتاژ را در یک سطح بسیار پایینتر از حالت فیلتر اکتیو موازی منبع ولتاژی نگه داشت. روش کنترل جریان لینک DC که در مرجع (۱۳) ارائه شده است بهینه نیست از اینرو با افزایش روش کنترل جریان لینک DC نمی‌توان سایز سلف لینک DC را بیشتر از این کاهش داد. در شکل زیر یک فیلتر اکتیو موازی منبع جریانی چهار سیمه با ذخیره‌ساز انرژی هیبرید نشان داده شده است. دو سوئیچ قابل کنترل، دو دیود و دو خازن DC در لینک DC، یک مبدل PWM منبع ولتاژی را تشکیل میدهند که ولتاژ DC، UHD مدوله شده با پهنای پالس را کند. بنابراین هیبرید، کنترل سریع جریان را ممکن میکند و نمیتوان جریان لینک DC را بر اساس جریان لحظه ای مورد نیاز کنترل کرد.

مبدل لینک DC دارای سه حالت سوئیچینگ است که دو حالت آن فعال است. اگر هیچ یک از سوئیچ‌ها هدایت نداشته باشند، ولتاژ لحظه‌ای برابر با ولتاژ لینک DC، خواهد بود. گر فقط یکی از سوئیچ‌ها در حالت فعال باشد، حالت سوئیچینگ صفر خواهد بود. در این حالت خازن لینک DC، پس شده و ولتاژ لحظه‌ای صفر است. برای اینکه اندوکتانس سلف لینک DC شود بایستی در صورت امکان مبدل پل اصلی و مبدل پل لینک DC به صورت همزمان صفر شود. علاوه بر ساختارهایی که تاکنون در این فصل معرفی شد، چند ساختار دیگر برای فیلتر اکتیو چهار سیمه در مقالات آمده است که قابل ذکر میباشد. سیستمی پیشنهاد شده است که ترکیبی از یک فیلتر اکتیو قدرت سه سیمه و یک ترانسفورماتور زیگزاگ است. ترانسفورماتور زیگزاگ مسیری برای مؤلفه توالی صفر جریان بار ایجاد میکند بنابراین مؤلفه توالی صفر در شبکه جاری نمیشود. فیلتر اکتیو سه سیمه نیز به نوبه خود مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی جریان تولید شده توسط بار را جبران میکند. مزیت سیستم پیشنهادی این است که یک فیلتر اکتیو سه سیمه استاندارد را می‌توان برای سیستم‌های چهار سیمه استفاده کرد و میتوان رنج قدرت آن را نسبت به یک فیلتر اکتیو موازی چهار سیمه نوعی کاهش داد. در مراجع قبلی، یک فیلتر اکتیو چهار سیمه، متشکل از دو فیلتر اکتیو مجزا و یک ترانسفورماتور زیگزاگ - دلتا است که به صورت موازی با بار متصل شده است. یک فیلتر اکتیو منبع ولتاژی تکفاز به نقطه خنثی سمت اولیه ترانسفورماتور متصل شده است و برای جبران سازی مؤلفه توالی صفر جریان بار استفاده میشود. فیلتر اکتیو دیگر، یک فیلتر اکتیو منبع ولتاژی سه فاز سه شاخه است که به سمت ثانویه ترانسفورماتور متصل است. وظیفه فیلتر اکتیو سه فاز جبران سازی توالی مثبت و منفی مؤلفه‌های هارمونیک جریان بار است. با مجزا نمودن جبران سازی مؤلفه‌های توالی غیر صفر و مؤلفه‌های توالی صفر، رنج کلی توان فیلترهای اکتیو در مقایسه با یک فیلتر اکتیو موازی چهار سیمه در مقدار کوچکتري تنظیم می‌شود. این ساختار برای بهبود عملکرد ساختار سه شاخه طراحی شده است. شاخه اضافی مبدل، کنترل مؤثر تعادل ولتاژ لینک DC و کاهش استرس جریان خازنهای لینک DC را با کنترل مستقل شاخه‌های مبدل فراهم می‌آورد. یعنی ولتاژ خط به خنثی تولیدی توسط هر شاخه مبدل مستقل از حالت سوئیچ‌ها در دیگر شاخه‌ها است. همچنین جریان‌های DC شامل مؤلفه DC نیز در این ساختار قابل تولید است. تحقیقات اخیر پیرامون فیلترهای اکتیو، بر روی روشهای کاهش رنج ولتاژ و جریان سوئیچ‌های نیمه رسانا در مبدل PWM و رنج کلی توان سیستم انجام میشود. این امر هنگامی که از فیلترهای اکتیو در سیستم‌های توزیع قدرت ولتاژ بالا و ولتاژ متوسط استفاده میشود، حائز اهمیت تر است. یک روش مرسوم جهت کاهش رنج توان در فیلتر اکتیو، استفاده از فیلترهای هیبرید است که فیلتر اکتیو را با مؤلفه‌های پسیو نظیر ترانسفورماتورها، سلف‌ها و خازنها ترکیب میکند. با این وجود ممکن است این فیلترها به علت وزن و سایز ناشی از تعداد زیاد مؤلفه‌های پسیو و یا ترانسفورماتورهای مورد نظر، مناسب نباشند. به عنوان یک راه حل، در مرجع (۱۴) یک فیلتر هیبرید بدون ترانسفورماتور برای یک سیستم توزیع قدرت ۳۳ kv ارائه شده است. فیلتر هیبرید شامل یک مبدل PWM منبع ولتاژ سه فاز سه سیمه استاندارد است که از طریق یک فیلتر LC سری که بر روی فرکانس هارمونیک هفتم تنظیم شده است، به شبکه متصل است. فیلتر LC هارمونیک‌های جریان تولید شده توسط بار را جذب می‌کند و فیلتر اکتیو، مشخصه فیلترینگ فیلتر LC را بهبود میبخشد. محدوده توان مورد نیاز فیلتر اکتیو در مقایسه با توان بار ۳۰۰ کیلو وات بسیار کوچک ۱۰ کیلووات است.

عب سیستم پیشنهادی این است که برای جبران سازی توان راکتیو، خیلی مناسب نیست. چون امپدانس خازن کوپلینگ در فرکانس فاندمنتال بالاست و ولتاژ لینک DC فیلتر اکتیو در مقایسه با ولتاژ شبکه کم است.

### -مروری بر تحقیقات و مطالعات انجام شده بر روی فیلتر اکتیو

در این بخش به بررسی تعدادی از تحقیقات که در سالهای اخیر در زمینه کنترل فیلترهای اکتیو موازی برای کاربردهای مختلف انجام شده است، میپردازیم. در بسیاری از این تحقیقات از ساختار چهار سیمه چهار شاخه استفاده شده است. همچنین ساختارهای سه شاخه با خازن سروسط نیز تنها جهت بهبود کیفیت توان شبکه مورد استفاده قرار گرفته و بحث انتقال توان در این ساختار لحاظ نشده است. در سال ۲۰۰۷ کنترلر فیلتر اکتیو موازی چهار شاخه چهار سیمه متصل به شبکه بگونه‌ای طراحی شده است که بصورت دینامیکی جریان خروجی فیلتر را محدود می‌کند. از اینرو بصورت مؤثری از سوئیچهای اینورتر در مقابل اضافه جریان محافظت میشود بدون اینکه عملکرد فیلتر اکتیو تضعیف شود. این روش مبتنی بر تئوری  $q-d$  بوده و از تأخیر در جبران سازی جهت انجام محاسبات محدود سازی جریان بهره میگیرد. در سال ۲۰۱۴ سلول خورشیدی با ظرفیت بالا توسط یک فیلتر اکتیو چهار شاخه دوگانه به شبکه متصل شده است. در این مرجع کنترلر یکپارچه مبتنی بر PI در قاب مرجع  $q-d$  بگونه‌ای طراحی شده است که هم توان تولیدی PV به شبکه تزریق می‌شود و هم از فیلتر اکتیو جهت بهبود کیفیت توان شبکه استفاده شده است. در این ساختار بخشی از الگوریتم کنترل به جریان گردشی بین دو اینورتر موازی اختصاص یافته است. در سال ۲۰۱۲ معرفی شده است، از اینورتر چهار شاخه برای اتصال منابع تجدیدپذیر به شبکه و بهبود کیفیت توان استفاده شده است. در الگوریتم کنترلی طراحی شده، جریانهای مرجع سه فاز اینورتر از طریق حلقه کنترل ولتاژ لینک DC تعیین میشوند و جریان مرجع شاخه چهارم صفر در نظر گرفته میشود. سپس از مدولاسیون هیستریزس جهت سوئیچ زنی استفاده شده است. در سال ۲۰۰۶، طراحی اصولی پارامترهای اینورتر سه شاخه چهار سیمه انجام شده است تا ردیابی جریانهای مرجع جریانهای مرجع جهت جبران سازی بارهای نامتعادل و غیرخطی به درستی انجام شود. در روشی که در سال ۲۰۱۹ معرفی شده است از ساختار اینورتر سه شاخه متصل به شبکه استفاده شده است که دارای یک خازن در لینک dc بوده و سیم خنثی به پایانه منفی استفاده شده که ۲ خازن لینک dc متصل شده است. در این مرجع از کنترلر مقاومتی هارمونیکها را بصورت گزینشی حذف میکند و تأخیر عملکرد فیلتر را جبران سازی می‌نماید. در روشی که در سال ۲۰۱۸ برای کنترل اینورتر چهار شاخه متصل به شبکه ارائه شده است، فرکانس سوئیچینگ حداقل شده است. این روش که شکل اصلاح شده‌ی روش کنترل هیستریزس است، فرکانس سوئیچ زنی در طول یک پریود را کاهش میدهد و برای جبران سازی بارهای غیرخطی و نامتعادل مورد استفاده قرار میگیرد. مرجع که در سال ۲۰۲۰ انجام شده است، مطالعه‌ای مقایسه‌ای بر روی انواع ساختارهای فیلتر اکتیو چهار سیمه انجام شده است. طبق نتایج این مقاله، برای کاربردهای توان پایین تا متوسط با عملکرد جبران سازی بسیار قوی اینورتر چهار شاخه انتخاب مناسبی است اما برای کاربرد در شرایط مشابه با عملکرد متوسط ساختار سه شاخه با خازن سروسط بدلیل هزینه پایین و ساده تر بودن الگوریتم کنترل پیشنهاد میشود. مدل چند متغیره سیستم در قاب مرجع  $0-q-d$  فضای حالت بدست آمده و از آن برای تعیین دینامیک حلقه بسته سیستم و انتخاب حالت‌های سوئیچینگ با استفاده از استراتژی مود لغزشی جهت کنترل فیلتر اکتیو چهار شاخه با خازن سروسط استفاده شده است. با استفاده از این روش پایداری سیستم حلقه بسته افزایش یافته و کنترلر طراحی شده در رنج وسیعی از عملکرد سیستم مقاوم میباشد. کنترلر قادر به متعادل سازی ولتاژ خازنهای لینک dc و حذف جریان سیم خنثی در حضور مؤلفه dc جریان غیرخطی بار می‌باشد.

بررسیهای انجام گرفته در این تحقیق بر روی یک فیلتر اکتیو موازی به منظور جبران مؤلفه های توان راکتیو و هارمونیکهای ناشی از بارهای غیرخطی است. روش کنترلی بر اساس اندازه گیری جریان های خط و جریان بار می باشد. از ولتاژ باس DC نیز جهت تخمین جریان مرجع استفاده می شود. سپس پارامترهای نشان دهنده کیفیت فیلتر مورد بررسی قرار گرفته و توسط نتایج شبیه سازی نشان داده می شود.

### -اصول اساسی جبران سازی و ساختار APF موازی استفاده شده

شکل زیر بلوکهای اصلی یک فیلتر اکتیو موازی را نشان می‌دهد که مؤلفه های اصلی آن عبارتند از: اینورتر قدرت، ذخیره ساز انرژی DC و یک سیستم کنترل. اینورتر قدرت از طریق یک فیلتر پسیو که عموماً یک سلف می‌باشد به PCC متصل شده است. این فیلتر ریپل فرکانس بالای جریان تزریقی را که به دلیل سوئیچینگ اینورتر تولید شده است تقلیل می‌دهد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت و مشاوره پژوهشگر محترم جناب آقای مهندس امید نوروزی انگنایی به سرانجام رسیده است که نویسنده این پژوهش از ایشان کمال تشکر و قدردانی را داریم. امید است که با همدلی و استفاده از دانش جمعی، برای آبادانی هرچه بیشتر ایران عزیز گام برداریم.

1. transient simulation", Power India Conference 2006 IEEE, April 2020.
2. Landau, Lev Davidovich. "On the theory of phase transitions. I." *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 11 (1937): 19.
3. Mermin, N. David. "Crystalline order in two dimensions." *Physical Review* 176, no. 1 (1968): 250. [DOI:10.1103/PhysRev.176.250].
4. Peierls, R. E. "Bemerkungen über umwandlungstem peraturen." *Helv. Phys. Acta* 7, no. 2 (1934): 81.
5. Fagan, Solange B., R. J. Baierle, R. Mota, Antonio JR da Silva, and A. Fazzio. "Ab initio calculations for a hypothetical material: Silicon nanotubes." *Physical Review B* 61, no. 15 (2000): 9994. [DOI:10.1103/PhysRevB.61.9994].
6. Novoselov, Kostya S., Andre K. Geim, Sergei Vladimirovich Morozov, Dingde Jiang, Michail I. Katsnelson, IVa Grigorieva, SVb Dubonos, and AA Firsov. "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene." *nature* 438, no. 7065 (2005): 197-200. [DOI:10.1038/nature04233] [PMID].
7. F. Haddadan, M. Soroosh, and N. Alaei-Sheini, "Designing an electro-optical encoder based on photonic crystals using the graphene-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stacks," *Appl. Opt.* 59, 2179-2185 (2020). [DOI:10.1364/AO.386248] [PMID]
8. F. Haddadan, M. Soroosh, and N. Alaei-Sheini, "Cross-talk reduction in a graphene-based ultra-compact plasmonic encoder using an Au nano-ridge on a silicon substrate," *Appl. Opt.* 61, 3209-3217 (2022). [DOI:10.1364/AO.449123] [PMID].
9. Bagheri, F., et al. "Design and simulation of a compact graphene-based plasmonic D flip-flop." *Optics & Laser Technology* 155 (2022): 108436. [DOI:10.1016/j.optlastec.2022.108436].
10. Haddadan, F., and M. Soroosh. "Design and simulation of a subwavelength 4-to-2 graphene-based plasmonic priority encoder." *Optics & Laser Technology* 157 (2023): 108680. [DOI:10.1016/j.optlastec.2022.108680].
11. Jalali Azizpour, M.R.; Soroosh, M.; Dalvand, N.; Seifi-Kavian, Y. All-Optical Ultra-Fast Graphene-Photonic Crystal Switch. *Crystals*, 9, 461, (2019). [DOI:10.3390/cryst9090461].
12. Darvari S M, Khatir M. Plasmonic biosensor using gold nanorods based on graphene. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2022; 19 (3) :105-112 [DOI:10.52547/jiaeee.19.3.105].
13. Yousefi S, Pourmahyabadi M, Rostami A. Design of a Dual Band Graphene-Plasmonic Absorber for Optical Communication Devices. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2022; 19 (2) :55-63 [DOI:10.52547/jiaeee.19.2.55].
14. Afroozeh A. The role of grating and electro-optical to adjustment of optical switches with voltage to graphene layer in increasing bandwidth. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2021; 18 (3) :65-71 [DOI:10.52547/jiaeee.18.3.65].
15. ghaziasadi H, nayebi P. Rectification in Graphene Self-Switching Nanodiode Using Side Gates Doping. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers* 2021; 18 (1) :9-16.
16. Li, Lin, Ye Zhang, Ziyi Han, Huanli Dong, Gui Yu, Dechao Geng, and Hui Ying Yang. "A mini review on chemical vapor deposition growth of wafer-scale h-BN single crystals." *Nanoscale* (2021). [DOI:10.1039/D1NR04034K] [PMID].
17. Kharadi, Mubashir A., Gul Faroz A. Malik, Farooq A. Khanday, Khurshed A. Shah, Sparsh Mittal, and Brajesh Kumar Kaushik. "Silicene: From material to device applications." *ECS Journal of Solid-State Science and Technology* 9, no. 11 (2020): 115031. [DOI:10.1149/2162-8777/abd09a].
18. Liu, Yundan, Dan Mu, and Jincheng Zhuang. "Group IVA of 2D Xenes materials (Silicene, Germanene, Stanene, Plumbene)." In *2D Monoelemental Materials (Xenes) and Related Technologies*, pp. 39-66. CRC Press, 2022. [DOI:10.1201/9781003207122-3].
19. Zhang, Xiaoli, Xiaoyi Zhang, and Yu Yang. "The process for preparing MX<sub>2</sub> (M= Mo, W; X= Se, S) single crystal." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2079, no. 1, p. 012014. IOP Publishing, 2021. [DOI:10.1088/1742-6596/2079/1/012014].
20. Molle, Alessandro, Carlo Grazianetti, Li Tao, Deepyanti Taneja, Md Hasibul Alam, and Deji Akinwande. "Silicene, silicene derivatives, and their device applications." *Chemical Society Reviews* 47, no. 16 (2018): 6370-6387. [DOI:10.1039/C8CS00338F] [PMID].

21. Lalmi, Boubekeur, Hamid Oughaddou, Hanna Enriquez, Abdelkader Kara, Sébastien Vizzini, Bénédicte Ealet, and Bernard Aufray. "Epitaxial growth of a silicene sheet." *Applied Physics Letters* 97, no. 22 (2010): 223109. [DOI:10.1063/1.3524215].
22. Wu, Chen-Huan. "Tight-binding model and ab initio calculation of silicene with strong spin-orbit coupling in low-energy limit." arXiv preprint arXiv:1804.01695 (2018).
23. [24] Drummond, N. D., Viktor Zolyomi, and V. I. Fal'Ko. "Electrically tunable band gap in silicene." *Physical Review B* 85, no. 7 (2012): 075423 [DOI:10.1103/PhysRevB.85.075423].
24. de Vargas, Douglas D., Mateus H. Köhler, and Rogério J. Baierle. "Electrically tunable band gap in strained h-BN/silicene van der Waals heterostructures." *Physical Chemistry Chemical Physics* 23, no. 31 (2021): 17033-17040. [DOI:10.1039/D1CP02012A] [PMID].
25. Ezawa, Motohiko. "A topological insulator and helical zero mode in silicene under an inhomogeneous electric field." *New Journal of Physics* 14, no. 3 (2012): 033003. [DOI:10.1088/1367-2630/14/3/033003].
26. "R. Saito, G. Dresselhaus and MS Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London, 1998, xii+ 259p., 22× 15.5 cm, 10,560 54, no. 10 (1999): 832-833].
27. Ukhtary, M. Shoufie, Ahmad RT Nugraha, Eddwi H. Hasdeo, and Riichiro Saito. "Broadband transverse electric surface wave in silicene." *Applied Physics Letters* 109, no. 6 (2016): 063103. [DOI:10.1063/1.4960531].
28. Menabde, Sergey G., Daniel R. Mason, Evgeny E. Kornev, Changhee Lee, and Namkyoo Park. "Direct optical probing of transverse electric mode in graphene." *Scientific reports* 6, no. 1 (2016): 1-6. [DOI:10.1038/srep21523].