

# طراحی و ساخت راکتور تک فاز و نصب آن در شبکه قدرت جهت مقابله با تغییرات سریع جریان خط و کاهش نوسانات جریان

امیر حیدری<sup>۱</sup> حمید رادمنش<sup>۲</sup> محمد اخلاقی<sup>۳</sup> کامران قربانیان<sup>۴</sup> امیرحسین مرادخانی<sup>۵</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان- زنجان- ایران

[amir.powersys@gmail.com](mailto:amir.powersys@gmail.com)

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

[hamid.radmanesh@aut.ac.ir](mailto:hamid.radmanesh@aut.ac.ir)

۳- شرکت برق منطقه ای زنجان

[m\\_akhlaghi@zrec.co.ir](mailto:m_akhlaghi@zrec.co.ir)

۴- دانشگاه قاضی-آنکارا-ترکیه

[kamran\\_ghorbanyan@yahoo.com](mailto:kamran_ghorbanyan@yahoo.com)

۵- شرکت برق منطقه ای زنجان

[Tahghighat@zrec.co.ir](mailto:Tahghighat@zrec.co.ir)

**چکیده:** استفاده از منابع تولید پراکنده و بانک‌های خازنی و سلفی به دلیل توسعه شبکه‌های توزیع و همچنین افزایش تقاضای برق روزبه‌روز در حال افزایش است. تعیین محل نصب و ظرفیت، دو شاخص مهم و مؤثر بر روی تلفات توان شبکه و بهبود عملکرد شبکه است. نیروگاه‌های تولید پراکنده و راکتورها در صورتی که در محل مناسب به شبکه برق متصل شوند، اثرات مختلفی از جمله کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه را خواهند داشت. از طرفی عدم جابجایی مناسب آن‌ها در شبکه باعث افزایش تلفات و بالا رفتن هزینه‌های تولید و انتقال می‌شود. در این مقاله به مطالعه و شناخت شبکه برق منطقه‌ای زنجان با رویکرد حفاظت شبکه پرداخته شده است و با بررسی حساسیت‌های حفاظت نقاط آزمون جهت نصب راکتور DC معرفی شده است و سپس یک ساختار راکتور DC معرفی شده است و با اعمال این راکتور به نقاط نمونه مورد مطالعه از شبکه اثرات راکتور شبکه بررسی و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** راکتور DC، شبکه قدرت، منابع تولید پراکنده (DG)، سیستم‌های توزیع شعاعی، تلفات توان

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۲/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۷/۱

نام نویسنده‌ی مسئول: امیر حیدری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - زنجان - اراضی پایین کوه - بلوار دانشجو - دانشکده‌ی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

## ۱- مقدمه

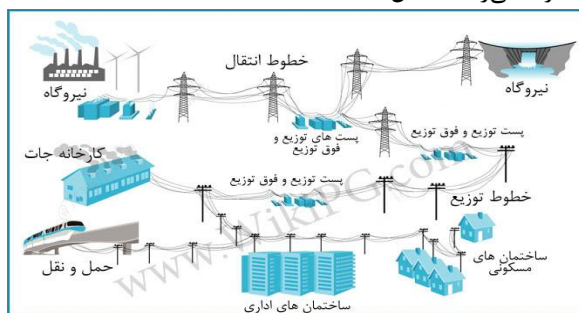
قدرت متداول است. مراجع [۲۳-۲۰] موقعیت و ظرفیت خازن‌های موازی را با اهداف و الگوریتم‌های مختلف تعیین می‌نمایند.

در مطالعات جدید بهره‌گیری از راکتور دی سی در شبکه‌های دی سی مطرح گردیده است [۲۴]. همچنین بهره‌گیری از راکتور در حالت دی سی و متناوب از راهکارهای مناسبی می‌باشد که در این زمینه به بهبود عملکرد محدود کننده جریان خطا منجر گردیده است [۲۵]. در مقالات [۲۶] و [۲۷] محدود کننده‌های جریان خطا با بهره‌گیری از راکتورهای دی سی و جریان متناوب معرفی شده‌اند و در نهایت نمونه‌های از محدود کننده جریان خطا با قابلیت جبران سری ولتاژ خط در [۲۸-۳۱] معرفی شده است.

- بررسی شبکه برق منطقه ای زنجان به لحاظ حساسیت حفاظت اتصال کوتاه
- تعیین پست‌هایی که دارای حساسیت حفاظت اتصال کوتاه می‌باشند.
- نحوه آرایش راکتور دی سی در داخل پست‌های نمونه
- معرفی راکتور دی سی دارای دو هسته رینگ و پل کنترل شونده و شبیه‌سازی مغناطیسی راکتور
- نصب راکتور دی سی در پست‌های نمونه و شبیه‌سازی خطا در پست فوق توزیع نمونه
- بررسی نتایج اثر گذاری راکتور دی سی در پست فوق توزیع نمونه تابع اندک‌تانس‌های متفاوت راکتور دی سی

## ۲- شبکه توزیع

انرژی الکتریکی، در نیروگاه‌های حرارتی توسط سوخت‌های فسیلی، یا پس از صرف هزینه‌های سنگین، با استفاده از پتانسیل آب‌سدها در توربین‌های آبی تولید شده از طریق خطوط انتقال انرژی، به مراکز مصرف انتقال می‌یابد. در این مراکز، ایستگاه‌های تبدیل، سطح ولتاژ را کاهش می‌دهند. این ولتاژ متوسط به وسیله شبکه‌های توزیع به محل مصرف کننده خواهد رسید. در محل مصرفی نیز، به کمک ایستگاه‌های ترانسفورماتوری توزیع، ولتاژ به حد قابل استفاده برای مصارف خانگی، صنعتی، تجاری، عمومی، کشاورزی و ... تبدیل شده و به مصرف می‌رسد (شکل ۱).



شکل (۱): مصارف انرژی الکتریکی در بخش توزیع [۲۴]

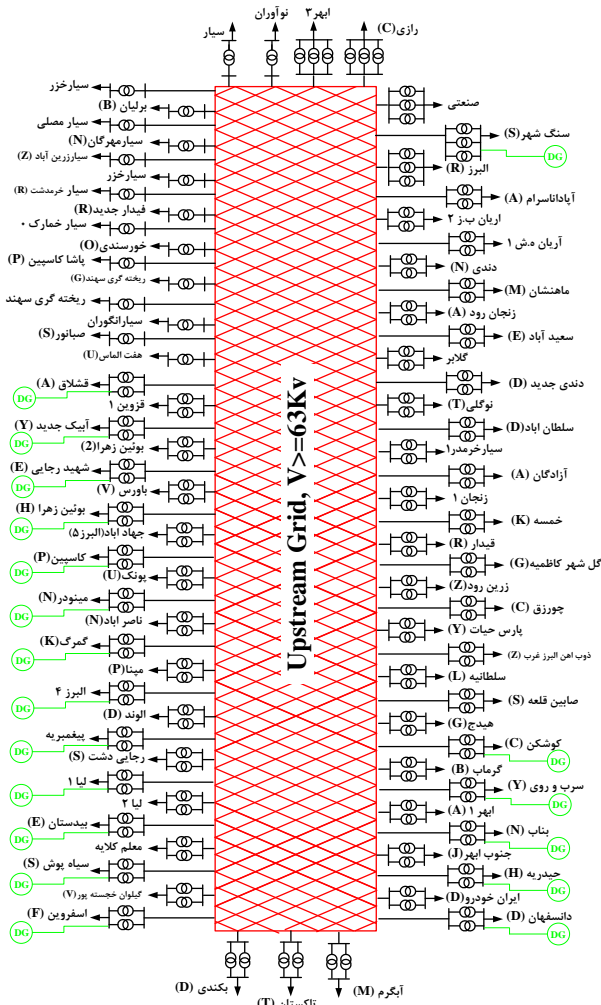
در سال‌های آغازین استفاده از انرژی الکتریکی، ژنراتورهای جریان مستقیم با همان ولتاژ تولیدی به مصرف‌کننده‌ها متصل شده بودند و به این صورت تولید و انتقال برق با یک ولتاژ انجام می‌گرفت، چراکه هیچ راهی برای تغییر ولتاژ DC به جز تغییر ژنراتورها وجود نداشت. پذیرش جریان الکتریکی متناوب AC با تغییرات بنیادی در زمینه برق همراه شد، چراکه ترانسفورماتورهای الکتریکی می‌توانستند ولتاژ را تغییر دهند و این، امکان افزایش طول خطوط انتقال را فراهم می‌کرد [۱]. با افزایش ولتاژ در طول خطوط، جریان الکتریکی کاهش یافته و بدین صورت، نیاز به استفاده از کابل‌های با سطح مقطع بالا و مولدهای محلی برطرف می‌شد و در این صورت همچنین امکان تولید انرژی الکتریکی در فواصل دور از مصرف‌کننده‌ها نیز فراهم می‌شد [۲]. مرحله توزیع یکی از مراحل انتهایی تحویل انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده‌هاست. این بخش به طور کلی شامل خطوط ولتاژ متوسط (کمتر از ۲۰ کیلوولت)، پست‌های ترانسفورماری و خطوط ولتاژ پایین (کمتر از ۱۰۰۰ ولت) می‌شود [۳]. شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی، محل تلاقی مشترکین صنعت برق است و اشکالات سیستم توزیع در این صنعت، از دید مصرف‌کنندگان، مشکل کلی صنعت برق قلمداد خواهد شد. توسعه روزافزون، عدم پیش‌بینی صحیح این روند و عقب‌ماندگی فناوری، همواره مشکلاتی را در سیستم توزیع انرژی الکتریکی به همراه داشته است [۴].

استفاده از منابع تولید پراکنده و راکتورها به دلیل توسعه شبکه‌های توزیع و همچنین افزایش تقاضای برق روزبه‌روز در حال افزایش است. تعیین محل نصب و ظرفیت دو شاخص مهم و مؤثر بر روی تلفات توان شبکه و بهبود عملکرد شبکه است. نیروگاه‌های تولید پراکنده و راکتورها در صورتی که در محل مناسب به شبکه برق متصل شوند، اثرات مختلفی از جمله کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه را خواهند داشت [۵]. از طرفی عدم جابجایی مناسب آن‌ها در شبکه باعث افزایش تلفات و بالا رفتن هزینه‌های تولید و انتقال می‌شود [۶]. مراجع [۷-۱۰] به اهمیت ذخیره‌سازی انرژی در ترکیب با تولیدات پراکنده پرداخته‌اند. اطلاعات بیشتر در مورد کاربرد DGها در پیاده‌سازی شبکه‌های توزیع هوشمند در مرجع [۱۱] قابل مشاهده است. علاوه بر نگرانی‌های اقتصادی، کیفیت توان، قابلیت اطمینان، صرفه‌جویی در انرژی و همچنین پایداری با استفاده از DGها تا حد فراوانی بهبود می‌یابد در صورتی که در مکان مناسب نصب شوند [۱۲]. در مرجع [۱۳] یک روش تحلیلی و در مراجع [۱۴-۱۷] روش‌های عددی برای یافتن موقعیت و سایز بهینه DGهای مختلف به کار گرفته شده است. یک الگوریتم ژنتیک فازی چند هدفه برای حل مسئله جابجایی DG به کار گرفته شده است [۱۸-۱۹]. علاوه بر این استفاده از منابع توان راکتیو مانند راکتورهای موازی برای بهبود پروفیل ولتاژ و همچنین کاهش تلفات در خطوط

۸	تعداد نیروگاه‌های شبکه توزیع DG	نیروگاه‌ها هستند. نیروگاه‌های DG توزیع متصل به شبکه که به پست‌های ۲۰ کیلوولت متصل می‌باشند و اغلب به صورت نیروگاه‌هایی با سوخت گاز شهری می‌باشند.
---	---------------------------------	---

#### ۴- دیاگرام طبقه‌بندی شده شبکه

با توجه به طبقه‌بندی پست‌های شبکه بر اساس سطح ولتاژ و تعداد ترانسفورماتور، دیاگرام ساده‌سازی شبکه ارائه شده است.



شکل (۲): دیاگرام ساده‌سازی شده شبکه برق منطقه‌ای زنجان

بر اساس این دیاگرام شبکه به پنج بخش عمده تقسیم‌بندی می‌شود که عبارت‌اند از: پست‌های ۲۰ کیلوولت تک ترانسفورماتوری، پست‌های ۲۰ کیلوولت دو ترانسفورماتوری، پست‌های ۲۰ کیلوولت متصل به شبکه بالادست با ولتاژ بیش از ۲۰ کیلوولت. شکل (۲)، دیاگرام مذکور را نشان می‌دهد. نیروگاه‌های اصلی موجود در شبکه انتقال که اکثر توان شبکه توسط این نیروگاه‌های تأمین می‌گردند دارای سطح ولتاژ ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت است و با توجه به بالا بودن سطح ولتاژ و توان این نیروگاه‌ها و با توجه به تعریف سطح ولتاژ راکتور DC به

سیستم‌های قدرت، وظیفه تأمین انرژی الکتریکی را از مرحله تولید تا مصرف به عهده دارند. این سیستم‌ها به چهار بخش عمده تولید، انتقال، توزیع و سرویس به مشترکین تقسیم می‌شود. امروزه، با توجه به گستردگی فعالیت‌های چرخه تأمین برق در انواع مراحل «تولید، انتقال، توزیع برق و خدمات بعد از فروش به مشترکین»، لزوم توجه بیشتر و اختصاصی‌تر به هرکدام از این شاخه‌های صنعت برق را جدی‌تر کرده است. با توجه به مزیت‌های مهم انرژی الکتریکی بر سایر انرژی‌ها به علت سادگی و راحتی توزیع و قابلیت انتقال برای مسافت‌های طولانی امروزه پیش‌بینی می‌گردد که بیشترین مصرف انرژی در قرن آینده کماکان به صورت انرژی الکتریکی باشد و شبکه توزیع که عهده‌دار ارائه انرژی به مصرف‌کنندگان است، به عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم قدرت از اهمیت و ارزش فراوانی برخوردار می‌گردد. در یک سیستم قدرت، به طور معمول نیمی از تلفات متعلق به شبکه توزیع است و با افزایش تقاضای مصرف برق، شبکه‌های توزیع رو به گسترش نهاده است؛ سرمایه‌گذاری‌های سالیانه در این زمینه، به میلیاردها دلار می‌رسد.

#### ۳- بررسی نقشه شبکه برق منطقه‌ای زنجان

در این بخش، نتایج اولیه جهت ایجاد شناخت کلی که می‌تواند در پیشبرد اهداف تعریف شده در مقاله کمک نماید، در جدول زیر فهرست شده است.

جدول (۱): مشخصات کلی شبکه برق منطقه‌ای زنجان

ردیف	عنوان اطلاعات	تشریح اطلاعات
۱	گستره استانی شبکه	شبکه برق منطقه‌ای زنجان شبکه انتقال و فوق توزیع که استان‌های زنجان و قزوین را در برمی‌گیرد.
۲	سطوح ولتاژ شبکه	سطوح ولتاژ موجود در شبکه برق منطقه‌ای عبارت‌اند از: 15.75kV, 10.5kV, 6.3kV, 400kV, 230kV, 63kV, 33kV, 20kV
۳	تعداد پست‌ها با سطح ولتاژ 20kV	تعداد پست‌هایی که سطح ولتاژ خروجی ترانسفورماتورهای آن 20kV است ۸۴ پست برق است که سطح ولتاژ ورودی این پست‌ها اغلب 63kV و در بعضی از پست‌ها 230kV است.
۴	تعداد پست‌های 20kV تک ترانسفورماتوری	تعداد پست‌هایی که سطح ولتاژ شبکه بالادست را توسط یک ترانسفورماتور به شبکه 20kV متصل می‌نماید ۱۸ پست است.
۵	تعداد پست‌های 20kV دو ترانسفورماتوری	تعداد پست‌هایی که سطح ولتاژ شبکه بالادست را توسط دو ترانسفورماتور به شبکه 20kV متصل می‌نماید ۶۱ پست است.
۶	تعداد پست‌های 20kV سه ترانسفورماتوری	تعداد پست‌هایی که سطح ولتاژ شبکه بالادست را توسط سه ترانسفورماتور به شبکه 20kV متصل می‌نماید ۵ پست است.
۷	تعداد نیروگاه‌های اصلی موجود در شبکه انتقال	نیروگاه‌های متصل به شبکه تعداد ۱۳ نیروگاه می‌باشند که اغلب نیروگاه‌های سیکل ترکیبی می‌باشند و همچنین نیروگاه‌های بادی نیز جز این

## ۴-۳- پست آپادانا سرام ۲۰/۲۳۰

دلایل سطح جریان اتصال کوتاه بالا:

۱. ساختار پست طوری است که پست با واسطه ترانسفورماتورهای ۲۰/۲۳۰ مستقیماً به رینگ ۲۳۰ شبکه سراسری ارتباط پیدا می‌کند. از جمله مواردی که سبب افزایش سطح حساسیت حفاظتی می‌گردد نحوه پیکره بندی پست‌ها است که این موضوع به‌طور دقیق معرفی شده و در اولویت‌بندی حفاظتی پست‌های نمونه اثرگذار است. همچنین جایگاه خطا با در نظر گرفتن پیکره بندی خطا می‌تواند سبب ایجاد حساسیت‌های حفاظتی و اثرات متنوعی گردد و قرارگیری راکتور DC در این پیکره بندی در آرایش‌های مختلف سبب بهبود حفاظت خواهد شد.

از جمله مهم‌ترین فاکتورهای حفاظت اضافه جریان در پست‌ها، سطح توان انتقال داده‌شده در پست است. در صورتی که سطح توان انتقال داده‌شده از پست میزان زیادی باشد در نتیجه سطح جریان اتصال کوتاه در پست نیز زیاد خواهد بود که این امر می‌تواند سبب آسیب گسترده‌ای به تجهیزات الکتریکی در هنگام خطا گردد. با توجه به مسئله ذکر شده یکی دیگر از مواردی که سبب افزایش توان انتقال داده‌شده از پست و همچنین بالا رفتن سطح اتصال کوتاه در پست می‌شود تعداد ترانسفورماتورهای موازی در پست است که این امر نیز سبب کاهش امپدانس مدل شده در پست گردیده که منتج به افزایش سطح جریان اتصال کوتاه می‌شود.

از دیگر مواردی که سبب ایجاد حساسیت اضافه جریان در پست‌های ۲۰ کیلوولت می‌شود مسافت و طول خطوط متصل‌کننده این پست‌ها به نیروگاه‌های اصلی شبکه است. لذا این امر سبب افزایش جریان اتصال کوتاه در پست می‌شود که خود سبب آسیب جدی تجهیزات الکتریکی در هنگام خطای اتصال کوتاه می‌شود که با توجه به این مسئله باید پست‌های ۲۰ کیلوولت نزدیک به نیروگاه‌های اصلی شبکه انتقال در اولویت حفاظتی قرار گیرند.

اتصال نیروگاه‌های توزیع (DG) به شین‌های ۲۰ کیلوولت سبب تغذیه پست از دو سمت می‌شود. این به معناست که توان در سطح ۲۰ کیلوولت هم از نیروگاه‌های اصلی شبکه بالادست تأمین می‌شود و هم از طریق نیروگاه توزیع متصل شده به پست، در نتیجه در هنگام خطا، شبکه تحت تنش از طریق جریان اتصال کوتاه تزریق شده از شبکه اصلی و همچنین جریان اتصال کوتاه تزریق شده از جانب نیروگاه توزیع قرار می‌گیرد که این امر سبب افزایش حساسیت حفاظت در مقابل اتصال کوتاه می‌شود.

یکی دیگر از مواردی که در شین‌های ۲۰ کیلوولت مطرح می‌شود تأمین انرژی بارهای حساس (Sensitive Load) و استراتژیک است در صورتی که یکی از بارهای متصل به پست دارای حساسیت تأمین انرژی باشد پست موردنظر باید دارای آرایش حفاظت جریان اتصال کوتاه به شکل ویژه‌ای باشد تا امکان بازیابی ولتاژ بار حساس در هنگام خطا میسر گردد.

میزان ۲۰ کیلوولت، این بخش از شبکه جهت اتصال سیستم حفاظت اضافه جریان موردبررسی قرار نمی‌گیرد. بررسی این نیروگاه‌ها در بخش مطالعه شبکه برق منطقه‌ای زنجان این نتیجه را حاصل می‌نماید که نزدیکی پست‌های ۲۰ کیلوولت به هر یک از این نیروگاه‌ها سبب افزایش سطح جریان اتصال کوتاه در آن پست گردیده و حساسیت حفاظت اضافه جریان در آن پست را افزایش می‌دهد. با توجه به مطالعات انجام شده و بررسی میدانی صورت گرفته، سه پست حساس شبکه برق منطقه‌ای زنجان جهت مطالعه و نصب راکتور کاندید شد که دلایل انتخاب در بخش زیر ارائه شده است. بهره‌گیری از راکتور دی سی در شبکه قدرت با توجه به استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در این ساختار در شبکه ۲۰ کیلوولت پست‌های فوق توزیع پیشنهاد می‌گردد. زیرا امکان تأمین ادوات الکترونیک قدرت در این سطح ولتاژ به راحتی در دسترس می‌باشد.

## ۴-۱- پست فوق توزیع سنگ شهر در سطح ۲۰ کیلوولت

دلایل سطح جریان اتصال کوتاه بالا:

۱. وجود سه ترانسفورماتور پست به‌صورت موازی با همدیگر و بالا بودن بار پست به‌طوری که امکان باز کردن دائم باس کوپلر سمت ۲۰ کیلوولت (به دلیل بروز مشکل اضافه‌بار در شرایط خروج اضطراری یکی از دو ترانسفورماتور وجود ندارد).

۲. حضور نیروگاه‌های مقیاس کوچک و ژار جهان به ظرفیت ۱۶ مگاوات، خالص سازان با ظرفیت ۳ واحد ۳/۲ مگاوات و ۳ واحد ۱/۲ مگاوات و وجود سایر متقاضیان احداث نیروگاه جهت اتصال به پست مذکور با توجه به وجود صنایع بزرگ در شهرک صنعتی روی که در مجاور پست سنگ شهر قرار دارد.

## ۴-۲- پست فوق توزیع ابهر ۳

دلایل سطح جریان اتصال کوتاه بالا:

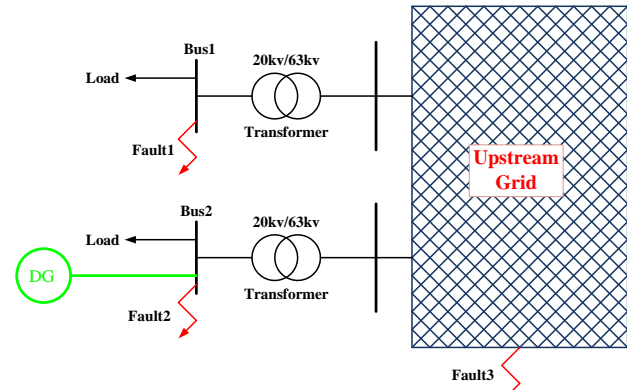
۱. وجود سه ترانسفورماتور پست به‌صورت موازی با همدیگر (این امر سبب کاهش امپدانس معادل تونن پست از دیدگاه شبکه پایین دست می‌گردد و با افزایش قدرت اتصال کوتاه باس سطح جریان اتصال کوتاه به شدت افزایش می‌یابد).

۲. وجود متقاضیان متعدد جهت احداث نیروگاه‌های مقیاس کوچک با توجه به وجود صنایع بزرگ و کوچک در اطراف پست مانند شهرک صنعتی افق و شهرک صنعتی نورین

۳. ساختار پست طوری است که پست با واسطه ترانسفورماتورهای ۶۳/۲۳۰ مستقیماً به رینگ ۲۳۰ شبکه سراسری ارتباط پیدا می‌کند. (پست ۲۰/۶۳ ابهر ۳ درواقع بخشی از پست ۲۳۰ ابهر است که در آن نسبت تبدیل ولتاژ در پست به‌صورت ۲۰/۶۳/۲۳۰ است).

## ۵- طبقه‌بندی جایگاه خطا در شبکه

با توجه به دیاگرام ارائه شده در شکل (۲)، دیاگرام ساده شده در شکل ۳ ارائه شده است که در این دیاگرام محل وقوع خطا در سه بخش متفاوت از پست مشخص شده است که هر یک سبب ایجاد اتفاقات متفاوتی در پست‌های ۲۰ کیلوولت مورد بررسی خواهد شد.



شکل (۳): طبقه‌بندی محل وقوع خطا

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، خطا در سه نقطه از شبکه طبقه‌بندی می‌شود. محل خطا در حالت نخست در پست ۲۰ کیلوولت اول در نظر گرفته شده است که در این حالت پست یک دچار افت ولتاژ شدید و اضافه جریان ناشی از تزریق جریان شبکه بالادست می‌شود. پست ۲۰ کیلوولت دوم که توسط نیروگاه توزیع DG نیز تغذیه می‌شود دچار اضافه جریان ناشی از تزریق جریان خطا توسط DG شده و این پست نیز دچار افت ولتاژ می‌شود. شبکه بالادست نیز دچار افت ولتاژ و اضافه جریان می‌شود.

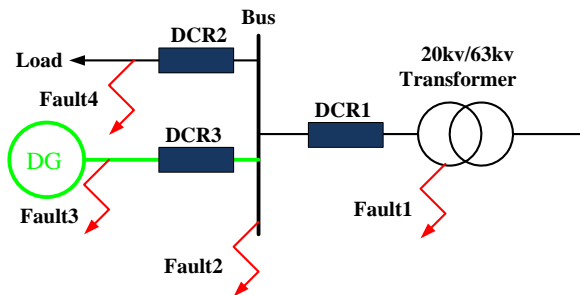
در حالت دوم خطا در پست شماره دو رخ می‌دهد و این پست جریان خطا را هم از جانب شبکه بالا و هم از طریق نیروگاه DG دریافت می‌نماید. پست اول در این شرایط دچار اضافه جریان نمی‌شود و تنها دچار افت ولتاژ می‌شود. شبکه بالادست نیز دچار افت ولتاژ و اضافه جریان می‌شود.

در حالت سوم خطا اتصال کوتاه در شبکه بالادست رخ می‌دهد که خود سبب اضافه جریان و افت ولتاژ در شبکه می‌شود. در این حالت پست اول دچار میزانی از افت ولتاژ تابع محل وقوع خطا شده و هیچ‌گونه اضافه جریان از پست عبور نمی‌کند. پست دوم نیز دچار میزانی از افت ولتاژ و اضافه جریان تأمین شده توسط DG می‌شود که مقدار آن نیز به شدت تابع محل وقوع خطا است. بر این اساس شرایط پست‌های ۲۰ کیلوولت در موقعیت خطا در سه حالت کلی طبقه‌بندی می‌شوند.

## ۵-۱- جایگاه خطا و آرایش محدودکننده جریان خطا (راکتور DC)

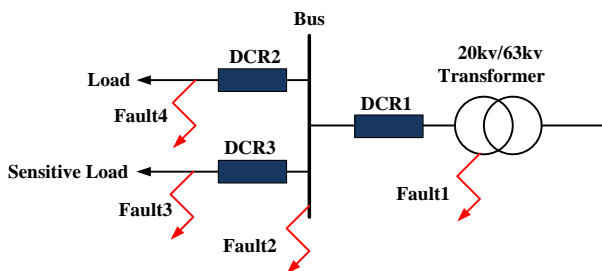
در این بخش محل نصب راکتور DC در سه نقطه از پست پیشنهاد می‌شود که با عملکرد هماهنگ این راکتورها امکان مدیریت خطا نیز بر

روی سیستم ۲۰ کیلوولت فراهم خواهد شد. با توجه به شکل (۴) یک شین ۲۰ کیلوولت که به نیروگاه DG نیز متصل است در نظر گرفته شده است. یکی از محل‌هایی که امکان وقوع خطا اتصال کوتاه در آن وجود دارد ترانسفورماتور خطا است که در این صورت با فعال شدن راکتور DC یک DG از جریان خطا مصون می‌ماند، حال در صورت قابلیت تأمین توان بار از طریق DG با غیرفعال ماندن راکتور DC دو و سه امکان تغذیه بار به صورت (جزیره‌ای) Island وجود دارد. در صورت ایجاد خطا بر روی شین بهترین حالت حفاظتی فعال شدن راکتور DC شماره سه و یک است تا شبکه بالادست و DG هر دو در مقابل اضافه جریان محافظت شوند. در این حالت بار دچار قطع توان می‌شود. در حالت سوم خطا بر روی DG ایجاد می‌شود که در این حالت تنها با فعال شدن راکتور پست دچار اضافه جریان نمی‌شود و همچنین توان بار به صورت طبیعی از شبکه بالادست تأمین می‌شود. در حالت چهارم خطا در بخش بار و مصرف‌کننده رخ می‌دهد که در این صورت نیز تنها با فعال شدن راکتور DC دو شبکه بالادست و DG دچار اضافه جریان نمی‌شود و توان DG نیز به شبکه بالادست منتقل می‌شود.



شکل (۴): آرایش قرارگیری راکتور DC در پست ۲۰ کیلوولت و در نظر گرفتن محل خطا

در شکل (۵) نیز شماتیکی از پست ۲۰ کیلوولت بدون اتصال به DG ارائه شده است که در حالت خاص به تغذیه بار الکتریکی و بار الکتریکی حساس می‌پردازد. با توجه به این آرایش در حالت خاص خطا که بر روی بار الکتریکی (Fault4) رخ می‌دهد. با عملکرد راکتور DC دو، بار حساس بدون ایجاد نوسان در ولتاژ عملکرد خود را در شبکه ادامه می‌دهد.



شکل (۵): آرایش قرارگیری راکتور دی سی در شین ۲۰ کیلو ولت دارای بار حساس



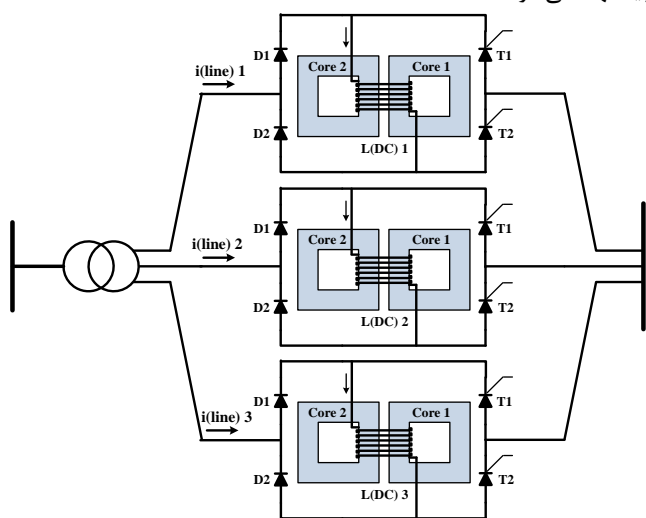
پست‌های فوق توزیع و نیروگاه‌های پراکنده یکی از آسیب‌پذیرترین نقاط شبکه قدرت در مقابل خطا اتصال کوتاه نیروگاه‌های پراکنده می‌باشند.

## ۶- ارائه ساختار پیشنهادی مبتنی بر راکتور DC

با توجه به بررسی انواع ساختارهای راکتور DC در شبکه AC، نمونه‌ای از راکتور DC معرفی می‌شود که در طراحی آن موارد ذیل لحاظ شده باشد:

- قابلیت ساخت در داخل کشور
- سادگی در طراحی
- هزینه تمام‌شده مناسب طرح
- قابلیت اطمینان مناسب
- تلفات قابل قبول

با توجه به موارد ذکرشده، شکل (۷) نشان‌دهنده طرح معرفی‌شده جهت مطالعه و اعمال در شبکه برق منطقه‌ای زنجان است که با بهره‌گیری از کلیدهای نیم پل کنترل شونده و راکتور با بهره‌گیری از ساختار دو هسته‌ای رینگ پیاده‌سازی شده است. همچنین با توجه به نیاز شبکه به راکتور سه فاز بهره‌گیری از سه راکتور به‌طور جداگانه پیشنهاد می‌شود.



شکل (۷): ساختار پیشنهادی راکتور DC متصل به شبکه

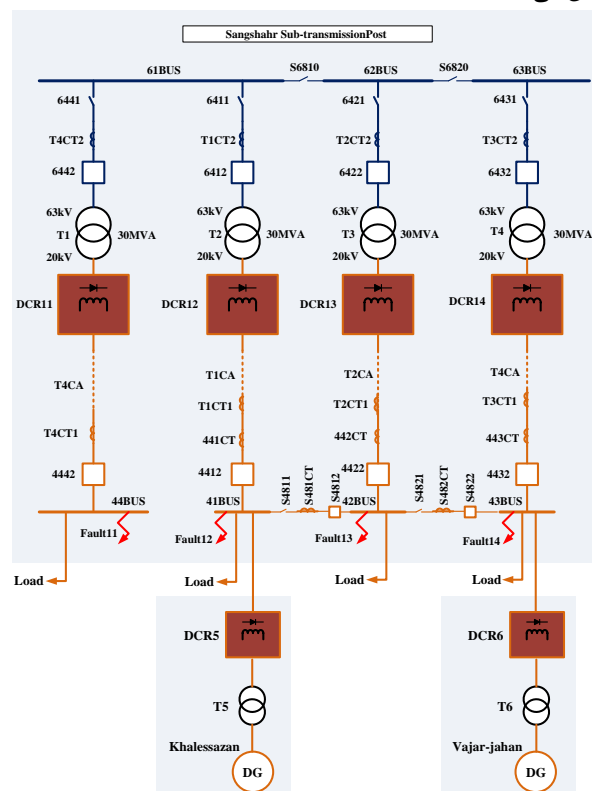
در طرح ارائه شده در شکل (۷) کلیدهای T1 و T2 متشکل از ترایستورهای سری هستند که تحمل ولتاژ احیاء در سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت شبکه را داشته باشد. سطح ولتاژ قابل تحمل ۲ کیلوولت برای کلیدهای صنعتی مرسوم الکترونیک قدرت عمومیت دارد. بر این اساس با در نظر گرفتن دامنه پیک ولتاژ احیاء شبکه به‌اندازه ۲ برابر ولتاژ شبکه و با در نظر گرفتن ۲۰ کلید سری در جایگاه هر ترایستور امکان تحمل ولتاژ احیاء شبکه وجود خواهد داشت. البته این مسئله به‌طور مستقیم تابع ویژگی‌های مدار موازی حفاظتی کلیدهای الکترونیک قدرت است. با اعمال مدار اسنابر و ارستر مناسب در این مدار قابلیت

با توجه به بررسی پست‌های ۲۰ کیلوولت موجود در برق منطقه‌ای استان زنجان و با توجه به ویژگی‌های ساختاری این پست‌ها، مسائلی که منجر به ایجاد اولویت حفاظت اضافه جریان در این نوع پست‌ها می‌شود در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲): اولویت حفاظت اضافه جریان در پست‌ها

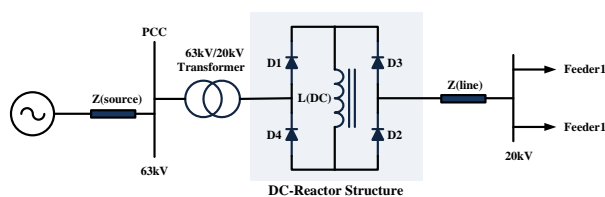
ردیف	اولویت حفاظتی پست‌های ۲۰ کیلوولت
۱	پست‌هایی که از طریق سه ترانسفورماتور موازی تغذیه‌شده و متصل به نیروگاه DG نیز می‌باشند.
۲	پست‌هایی که از طریق سه ترانسفورماتور موازی تغذیه می‌گردند.
۳	پست‌هایی که از طریق امپدانس کوچک‌تری نزدیک به نیروگاه‌های اصلی شبکه انتقال می‌باشند.
۴	پست‌هایی که از طریق دو ترانسفورماتور موازی تغذیه‌شده و به نیروگاه DG متصل هستند.
۵	پست‌هایی که جهت تأمین بارهای حساس به‌صورت موازی می‌پردازند.
۶	نیروگاه‌های DG متصل به پست، که دارای سطح توان نامی بالایی می‌باشند.

با توجه به ویژگی‌های طبقه‌بندی‌شده در جدول فوق پست‌های ۲۰ کیلوولت که شامل این ویژگی‌ها می‌باشند در محیط شبیه‌سازی، مجهز به راکتور DC خواهند شد و از این طریق اثر راکتور DC در حفاظت پست‌های موردبررسی تحلیل می‌شود. شکل (۶) جانمایی راکتور در شبکه جهت محدود کردن جریان خطای نیروگاه‌های تولید پراکنده را نشان می‌دهد.



شکل (۶): جانمایی راکتور DC جهت محدودسازی جریان خط

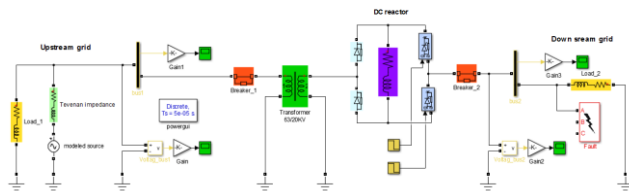
با توجه به حساسیت‌های حفاظتی نیروگاه‌های پراکنده در مواجهه با خطای اتصال کوتاه و با توجه تفاوت سطح جریان اتصال کوتاه در



شکل (۷): ساختار راکتور DC در شبکه AC

## ۷- نتایج شبیه سازی

در این بخش به بررسی رفتار راکتور DC در یک شبکه ساده تک خطی می پردازیم. بر این اساس شبکه بالادست به صورت مدل تونن و بار موازی مدل گردیده است و شبکه پایین دست متشکل از بار اهمی - سلفی با ضریب توان ۰/۹۲ در نظر گرفته شده است. همچنین ولتاژ شبکه بالادست ۶۳ کیلوولت بوده که از طریق ترانسفورماتور به سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت جهت بهره گیری در شبکه پایین دست تبدیل می گردد. راکتور DC مورد نظر در سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت و در خروجی ترانسفورماتور قرار داده شده است. این راکتور DC شامل یک پل الکترونیکی با دو کلید الکترونیک قدرت کنترل شونده و دو دیود است. همچنین راکتور DC شامل یک مدل اهمی - سلفی سری بوده که مقاومت آن به نسبت اندوکتانس راکتور مقدار بسیار کوچکی دارد. مدار نشان داده شده در شکل (۸) توسط نرم افزار متلب شبیه سازی شده است همچنین اطلاعات مدار شبیه سازی شده در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۸): دیاگرام تک خطی مدل شده در نرم افزار متلب

جدول (۳): مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

مقدار کمیت	توضیحات
$0.2+j3$	مقدار امپدانس تونن در سمت شبکه بالادست
$10^7+j10^3$	توان مقدار بار موازی در شبکه بالادست
63kV	ولتاژ شبکه بالادست
63/20	نسبت تبدیل ترانسفورماتور
$L=0.2H, R=0.01$	مقدار راکتور DC
$10^7+j10^3$	مقدار بار در شبکه پایین دست
$0.01 \Omega$	مقاومت خطا

کاهش ولتاژ کلیدها تا سطح ۱/۵ برابر ولتاژ شبکه وجود خواهد داشت. از این رو در مدار راکتور DC استفاده از مدارهای کاهش ولتاژ احیاء و حفاظت اضافه ولتاژ بسیار اهمیت دارد که در بخش شبیه سازی به طور کامل به آن پرداخته شده است.

در بخش طراحی مغناطیسی راکتور DC نیز از ساختار دو هسته ای بهره گیری شده که در این روش می توان به اندوکتانس های بزرگ تر در سائز کوچک تری دست یافت و همچنین با توجه به کاهش میدان های پراکندگی سیم پیچی، نیاز به بهره گیری از تعداد دور کمتری خواهد بود که خود سبب کاهش تلفات ساختار می شود. بررسی این طراحی نیز در بخش شبیه سازی مغناطیسی ارائه خواهد شد.

اندوکتانس یک المان الکتریکی است. این المان در مقابل تغییرات جریان امپدانس قابل قبول از خود نشان می دهد. این امر سبب جلوگیری از تغییرات ناگهانی جریان می شود. در کل، اندوکتانس های سری با بارهای DC جهت کاهش رپل جریان بارهای DC و بهبود ضرایب کیفیت در ورودی یک سوساز به کار می روند. همچنین، در این ساختار در تمام حالات اندوکتانس سری توان راکتور دریافت می کند. استفاده از چنین روشی از زمان های گذشته تاکنون مرسوم بوده است. استفاده از راکتور DC در شبکه های AC طی مدت تقریبی پانزده سال اخیر به صورت گسترده معرفی شده است. هدف از نصب این ساختار در شبکه دستاوردهای حفاظتی جهت محدود کردن جریان خطا و جلوگیری از تغییرات جریان سریع خط است.

راکتور DC در خطوط AC متشکل از یک راکتور و یک سوساز است، جریان متناوب خط به قسمت متناوب پل وصل می گردد و راکتور نیز به قسمت یک سو شده ولتاژ در پل متصل می شود. راکتورهای جریان DC یک تجهیز مغناطیسی است که بر اساس طراحی اندوکتانس و عبور جریان DC از آن عملکرد مورد نظر را به انجام می رساند. معرفی راکتورهای DC در شبکه قدرت و انجام دادن کار تحقیقاتی روی آن در دو دهه اخیر سبب ارائه راهکاری حفاظتی و کارآمد شده است؛ به طوری که امروزه نیز محققان بازم به ابعاد اثرگذاری این ساختار در شبکه های قدرت می پردازند و کارایی های این ساختار را مورد بررسی قرار می دهند.

در شبکه های متناوب، با ایجاد پلی یک سوساز و اتصال قسمت DC آن به راکتور، ساختاری ایجاد می گردد که می توان به صورت سری در شبکه قرار داد. در صورتی که جریان عبوری از شبکه دارای تغییرات گذرا نباشد، تغییرات جریان در راکتور سری نیز تغییر نمی کند. در نتیجه، افت ولتاژ آن نیز برابر صفر است. در اثر تغییرات و نوسانات جریان شبکه تابع هر عامل گذرا جریان راکتور DC نیز تغییر می کند؛ بنابراین، افت ولتاژ روی آن ظاهر می گردد. البته به هر میزان تغییرات جریان شبکه بیشتر باشد، میزان افت ولتاژ آن نیز بیشتر است. در نتیجه، ساختار راکتور سری به عنوان محدودکننده جریان در شبکه عمل می کند.

جدول (۴): مقایسه شاخص‌های جریان خطا در حالت‌های مختلف

## شبیه‌سازی راکتور DC

Simulation Num.	DC Reactor inductance	First peak of fault current	100ms fault current	300ms fault current
A	0 H	4.9 p.u	3.2 p.u	2.7 p.u
B	0.1 H	2.3 p.u	2.6 p.u	2.6 p.u
C	0.2 H	1.8 p.u	2.55 p.u	2.6 p.u
D	0.5 H	1.3 p.u	2.3 p.u	2.6 p.u
E	0.8 H	1.2 p.u	2.1 p.u	2.6 p.u
F	1 H	1.1 p.u	2 p.u	2.6 p.u
G	1.5 H	1.08 p.u	1.7 p.u	2.49 p.u
H	2 H	1.04 p.u	1.55 p.u	2.3 p.u

با توجه به نتایج استخراج شده توسط شبیه‌سازی، جریان خطا توسط راکتور DC به‌طور مناسبی محدود شده است که این مسئله متناسب با میزان اندوکتانس راکتور DC است. مقایسه هر یک از سطرهای جدول فوق با سطر یک جدول بیانگر میزان بهبود و اثرگذاری راکتور DC در شبکه است. از جمله مسائل مورد استخراج در این شبیه‌سازی این است که در صورت قطع جریان خطا در زمان‌های سریع‌تر می‌توان ماکزیمم جریان خطا تجربه‌شده شبکه را توسط راکتور DC به‌طور بسیار مناسب‌تری کاهش داد.

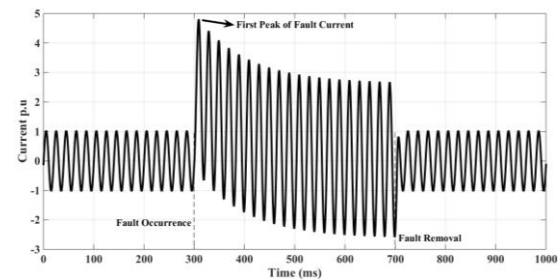
جدول (۵): مشخصات ساختار مغناطیسی شبیه‌سازی شده

عنوان	مشخصات
هسته	هسته دو قسمتی فرومغناطیسی تروید، مشخصه مواد Si-Fe 2.5%
سیم پیچ	سیم مسی مفتول ۵، میلی متر مربع با عایقی ۵۰۰ ولت

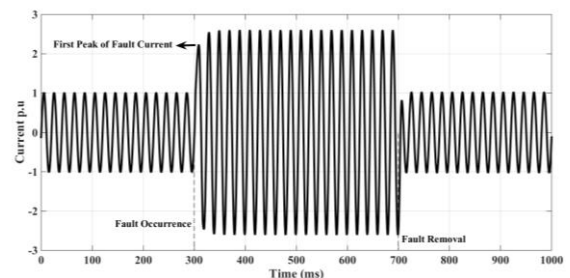
در این بخش به طراحی و شبیه‌سازی راکتور DC موردنظر توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای نامحدود (ماکسول) پرداخته شده است. اساس طراحی بهره‌گیری از دو هسته فرو مغناطیس تروید با مشخصه مغناطیسی بیان شده و سیم‌پیچی موردنیاز جهت طراحی راکتور DC است. این مشخصات در جدول (۵) ارائه شده است.

شبیه‌سازی مغناطیسی در این بخش منطبق با نمونه اولیه آزمایشگاهی است که در بخش‌های بعدی ساخته‌شده آن ارائه شده است. منحنی B-I هسته در شکل (۱۰) نشان داده شده است و همچنین طراحی سه‌بعدی راکتور، مش بندی تحلیلی ساختار، توزیع چگالی میدان مغناطیسی در هسته‌ها و فوران پراکندگی در محیط در حالت تحلیل اجزای محدود در شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) نشان داده شده است.

با توجه دیگرام نشان داده شده در شکل (۸) مشخص است که محل اعمال خطای اتصال کوتاه، در پایانه بار، در شبکه پایین‌دست است. در این حالت جریان خطا از سمت شبکه بالادست به سمت شبکه پایین‌دست خواهد بود و این جریان از طریق راکتور DC عبور خواهد کرد. خروجی‌های موردنظر در این شبیه‌سازی عبارت‌اند از پیک اول جریان خطا و پیک جریان خطا در طی مدت‌زمان ۱۰۰ میلی‌ثانیه که تعیین‌کننده روند تغییرات ماکزیمم جریان‌های خطا تحمیل‌شده به شبکه خواهد بود.



(a)

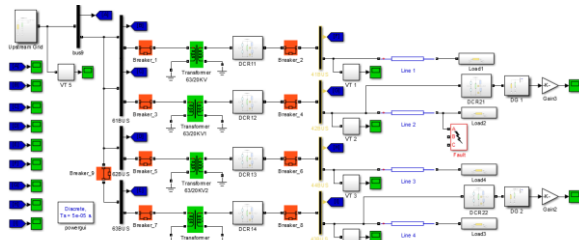


(b)

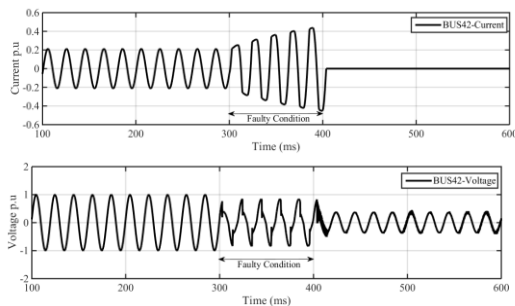
شکل (۹): جریان خط در حالت عادی و خطا متأثر از مقدار اندوکتانس راکتور DC (حالت اول ۰/۱ هانری)

بعد از گذر زمان ۱۰۰ میلی‌ثانیه از وقوع خطا می‌توان فرض نمود که خطا از طریق رفع خطا و یا از طریق عملکرد مدارشکن رفع خواهد شد. با توجه به هدف ذکر شده کمیت متغیر در شبیه‌سازی مقدار اندوکتانس راکتور DC است که در بازه ۰ تا ۲ هانری تغییر خواهد کرد که با توجه به این تغییرات جریان خط در حالت طبیعی و خطا موردبررسی قرار خواهد گرفت. بر این اساس شکل موج جریان در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل‌شده در شبیه‌سازی فوق مشخص است که میزان اندوکتانس راکتور DC می‌تواند اثر زیادی بر روی شکل موج شبکه در حالت خطا داشته باشد که جهت بررسی و مقایسه این مسئله، جریان پیک اول، جریان پیک در ۱۰۰ میلی‌ثانیه و جریان پیک در ۳۰۰ میلی‌ثانیه تابع اندوکتانس راکتور DC در جدول (۴) ارائه شده است که بر این اساس می‌توان به استخراج اندوکتانس مناسب راکتور DC با توجه به مشخصات ادوات شبکه پرداخت.





شکل (۱۴): شبیه‌سازی پست نمونه متصل به شبکه بالادست



شکل (۱۵): شکل موج‌های جریان و ولتاژ پست نمونه در طی شرایط عادی و خطا

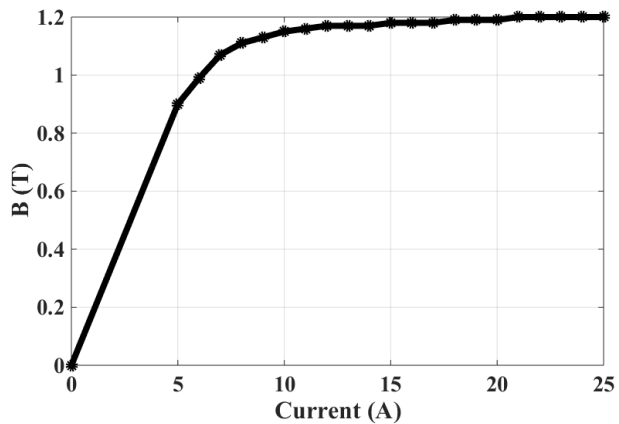
در این شبیه‌سازی، خطا در زمان ۳۰۰ میلی‌ثانیه رخ داده است و پس از طی ۱۰۰ میلی‌ثانیه بریکر خطی که در آن خطا رخ داده است عمل نموده و خطا را رفع می‌کند. بر اساس شکل موج جریان مشخص است که جریان خطا در شبکه به‌طور قابل قبولی محدود شده است و ولتاژ باس بارها غیر از باس باری که در آن خطا رخ داده است تا سطح مناسبی ثابت نگه‌داشته شده است و این مسئله نشان دهنده کارایی رویکرد حفاظتی اول است که اساس آن بهره‌گیری از کمترین راکتور DC در شبکه قدرت است.

## ۸- استخراج نتایج آزمایشگاهی

در این بخش به طراحی و تدوین نمونه آزمایشگاهی پرداخته شده است. و اطلاعات راکتور دی سی ساخته شده در جدول ذیل ارائه شده است.

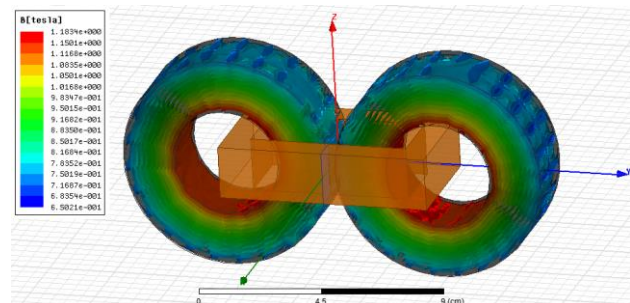
جدول (۵): مشخصات ساختار مغناطیسی شبیه‌سازی شده

Section name	Description
Core	toroid core, Si-Fe Dual ferromagnetic 2.5%, Solid metal, 1500 cilisious degree melting process, $A=6\text{cm}^2$ , $l_c=15\text{cm}$
Isolation	500 V isolator
Diode	500V, 25A
Thyristor	500V, 25A
Winding	Solid copper wire, $0.5\text{mm}^2$



شکل (۱۰): مشخصه B-I هسته شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

شکل (۱۱) نشان‌دهنده طراحی هندسی راکتور DC است. در این طراحی هندسی ابعاد نمونه اولیه آزمایشگاهی راکتور DC مدنظر قرار داده شده است. دو عدد هسته فرو مغناطیس دارای قطر خارجی ۸ سانتی‌متر است و مقطع مفید هسته ۵ سانتی‌متر مربع است و سیم‌پیچی متشکل از سیم‌های مسی بر روی دو بازوی مشترک از هر هسته قرار داده شده است. فضای پیرامون ساختار راکتور نیز از جنس هوا است.



شکل (۱۳): توزیع چگالی فوران مغناطیسی در هسته راکتور DC

در این مرحله اثر راکتورهای DC در سه رویکرد معرفی شده در بخش قبل، شبیه‌سازی می‌گردد. در این شبیه‌سازی خطا در بخش‌های مختلفی از شبکه اعمال می‌گردد و کمیت‌های الکتریکی در پست‌های نمونه ارائه می‌شود. در اولین شبیه‌سازی یکی از پست‌های متصل به شبکه بالادست مدنظر قرار داده شده است. در این پست اتصالات بین باس‌های متصل به فیدر بار توسط کلیدهای قدرت باز شده است و باس بارهای سطح ۲۰ کیلوولت به‌طور مستقل توسط ترانسفورماتور به باسبارهای ۶۳ کیلوولت متصل شده‌اند. در این شبیه‌سازی بر اساس رویکرد حفاظتی اول راکتورهای DC تنها به‌صورت سری با ثانویه ترانسفورماتورهای اصل قرار گرفته‌اند. بر اساس خطاهای اعمال شده، سیگنال ولتاژ باس بارها در سطح ۲۰ و ۶۳ کیلوولت و جریان هر یک از ترانسفورماتورها، نیروگاه‌های پراکنده و شبکه بالادست نمایش داده شده است. شکل (۱۴) نشان دهنده پست نمونه شبیه‌سازی شده با رویکرد حفاظتی اول است و شکل (۱۵) نشان دهنده سیگنال ولتاژ و جریان شبکه است.

در تست انجام شده نشان داده شده است که جریان خط در حالت عادی ۴ آمپر می باشد و پس از وقوع خطا در پیک اول با حضور راکتور دی سی جریان به ۵ آمپر می رسد و در ماکزیمم حالت خط جریان خطا ۱۳ آمپر را متحمل می گردد. در نتیجه اثر گذاری کارآمد راکتور دی سی در محدود سازی جریان خطا به صورت عملی مورد اثبات قرار داده شده است.

## ۹- نتیجه گیری

استفاده از منابع تولید پراکنده و راکتور DC به دلیل توسعه شبکه های توزیع و همچنین افزایش تقاضای برق روزه روز در حال افزایش است. تعیین محل نصب و ظرفیت دو شاخص مهم و مؤثر روی تلفات توان شبکه و بهبود عملکرد شبکه است. نیروگاه های تولید پراکنده در صورتی که در محل مناسب به شبکه برق متصل شوند، اثرات مختلفی از جمله کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه را خواهند داشت. از آنجاکه این منابع در سمت مصرف در انتهای شبکه نصب می شوند بار را به صورت محلی تأمین کرده و مقدار جریان در خطوط شبکه از سمت تولیدکنندگان به سمت مصرف را کاهش می دهند. با کاهش اندازه جریان اکتیو و راکتیو از خطوط، تلفات اکتیو و راکتیو و افت ولتاژ شبکه در خطوط نیز که متناسب با میزان جریان هستند کاسته می شوند. با کاهش افت ولتاژ خطوط، ولتاژ انتهایی شبکه کمتر کاهش یافته و مقدار آن بهبود می یابد. در این مقاله یک نمونه راکتور دی سی جدید پیشنهاد شد و رفتارهای الکتریکی و مغناطیسی آن به صورت ریاضیاتی توصیف شد و در نهایت از طریق شبیه سازی، آنالیزهای ریاضیاتی مورد تأیید قرار گرفت و سپس رفتار راکتور دی سی برای حفاظت پست نمونه مورد شبیه سازی قرار داده شد که نتایج اثرات حفاظتی بسیار مناسب راکتور دی سی در پست نمونه شبکه برق منطقه ای استان زنجان را به طور واضح تأیید گردید.

## سپاسگزاری

مطالعات حاضر با حمایت مالی شرکت برق منطقه ای زنجان تحت عنوان "طراحی و ساخت راکتور تک فاز سری جریان DC- (Reactor) و نصب آن در شبکه قدرت جهت مقابله با تغییرات جریان سریع خط و کاهش هارمونیک های ناشی از آن و افزایش زمان رسیدن خطا به جریان خطای نامی" به شماره قرارداد ۹۶/۳۰/۲۵۳ صورت گرفته است که بدین وسیله از تمامی حمایت های صورت گرفته از جانب کارشناسان و مدیران محترم این شرکت بالاخص کمیته مرکزی تحقیقات تقدیر و تشکر به عمل می آید.

## مراجع

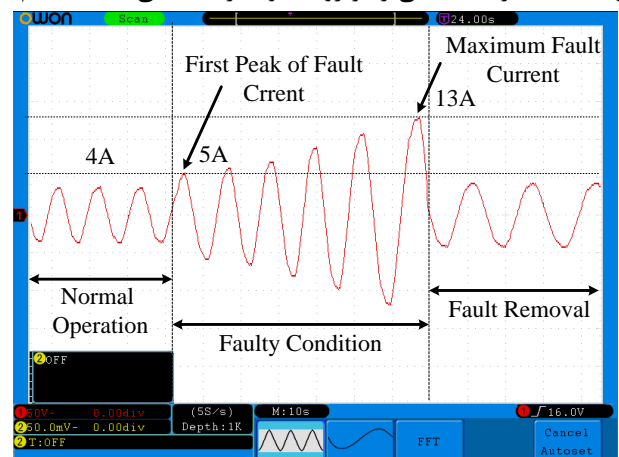
- [1] Zidar M, Georgilakis PS, Hatziaargyriou ND, Capuder T, Skrllec D. 2016, "Review of energy storage allocation in

این نمونه متشکل از منبع تغذیه با ولتاژ متغیر است که ورودی به ولتاژ شبکه تک فاز ۲۲۰ متصل شده است و در خروجی ولتاژ متغیر ۰ تا ۳۵۰ ولت را در اختیار نمونه آزمایشگاهی قرار می دهد. ولتاژ و جریان ورودی توسط آمپر متر و ولت متر اندازه گیری می شود و سپس توسط اتصال سری با راکتور DC به بار R-L متصل می شود. میزان فرکانس شبکه ۵۰ هرتز بوده و این سیگنال توسط نمونه برداری ۱ کیلوهرتز توسط کنترل سیگنال مورد بررسی قرار می گیرد. در صورت وقوع خطا سیگنال های کنترلی به کلیدهای کنترل شونده راکتور DC ارسال شده و همچنین پس از محدود سازی جریان خطا توسط راکتور دی سی امکان قطع جریان خطا توسط کلیدها کنترل شونده وجود دارد. شکل (۱۶) نشان دهنده نمونه آزمایشگاهی مورد بررسی است.



شکل (۱۶): نمونه آزمایشگاهی آزمون راکتور DC

خطا در این نمونه آزمایشگاهی توسط رله حالت جامد به شبکه اعمال می گردد. این رله قابلیت تحمل جریان لحظه ای ۱۲۰ آمپری را دارا است و امپدانس در محدوده ۰,۰۸ اهم در حالت روشن دارد. جهت ایجاد خطا با امپدانس های مختلف مقاومت های ۰,۰۵، ۰,۱، ۰,۲ اهم را با این کلید به صورت سری متصل می نماییم تا جریان های خطا با دامنه و آهنگ تغییرات مختلفی را بر روی نمونه آزمایشگاهی ایجاد نماییم.



شکل (۱۷): جریان عبوری از شبکه در حالت عادی، خطا و رفع خطا در

## حضور راکتور DC

- [19] Vinothkumar K, Selvan MP. 2011 "Fuzzy embedded genetic algorithm method for distributed generation planning. *Electric Power Compon Syst*;39 (4):346–66.
- [20] Masoum MAS, Ladjevardi M, Jafarian A, Fuchs EF. Optimal placement, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution network by genetic algorithms. *IEEE Trans Power Deliv* 004;19:1794–801.
- [21] Sultana Sneha, Roy Provas Kumar. 2014, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization. *Int J Electr Power Energy Syst*;54:387–98.
- [22] Lee Chu-Sheng, Ayala Helon Vicente Hultmann, dos Santos Coelho Leandro. 2015, "Capacitor placement of distribution systems using particle swarm optimization approaches. *Int J Electr Power Energy Syst*;64:839–51.
- [23] Vuletic Jovica, Todorovski Mirko. 2014, "Optimal capacitor placement in radial distribution systems using clustering based optimization. *Int J Electr Power Energy Syst*;62:229–36.
- [24] Amin Khodabakhshian, Mohammad Hadi Andishgar, 2016, "Simultaneous placement and sizing of DGs and shunt capacitors in distribution systems by using IMDE algorithm", *Electrical Power and Energy Systems* 82, pp. 599–607.
- [25] J A. Heidary, H. Radmanesh, K. Rouzbehi and J. Pou, "A DC-Reactor-Based Solid-State Fault Current Limiter for HVdc Applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 2, pp. 720-728, April 2019.
- [26] H. Radmanesh, S. Hamid Fathi, G.B. Gharehpetian, A. Heidary, "Bridge-Type Solid-State Fault Current Limiter Based on AC/DC Reactor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 1, pp. 200–209, 2016.
- [27] Hamid Radmanesh, Amir Heidary, Seyed Hamid Fathi, G.B. Gharehpetian, "Series Resonance Based Fault Current Limiter with Controlling The Point of Common Coupling Voltage," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 2018; 14 (4) :111-117.
- [28] Babaei E, Sahebjam M. Compensation of Voltage Disturbances and Downstream Fault Currents Reduction by Using a New Topology of DVR-FCL. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2019; 15 (4) :83-92.
- [29] Barati J, Droudi A. Fault Location in Transmission Lines in the Presence of Fault Current Limiter. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2017; 14 (3) :99-107
- [30] Radmanesh H, Heidary A, Fathi S H, Gharehpetian G. Series Resonance Based Fault Current Limiter with Controlling The Point of Common Coupling Voltage. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2018; 14 (4) :111-117
- [31] Babaei E, Sahebjam M. Compensation of Voltage Disturbances and Downstream Fault Currents Reduction by Using a New Topology of DVR-FCL. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*. 2019; 15 (4) :83-92
- [2] Hung DQ, Mithulananthan N, Bansal RC. 2010, "Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. *IEEE Trans Energy Convers*;25(3):814–20.
- [3] Ochoa LF, Harrison GP. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation. *IEEE Trans Power Syst*;26(1):198–205.
- [4] Akorede MF, Hizam H, Aris I, AbKadir MZA. 2011, "Effective method for optimal allocation of distributed generation units in meshed electric power systems. *IET Gener Transm Distrib*;5(2):276–87.
- [5] T. Ackermann, G. Andersson and L. Soder, 2001, "Distributed generation: a definition," *Electric Power Systems Research*, vol. 57, pp. 195 – 204.
- [6] Srinivas MS, 2000, "Distribution load flows: a brief review". In: *Proceedings of the 2000 IEEE PES summer meeting*, Singapore.
- [7] Ng H, Salama M, Chikhani A. 2000, "Classification of capacitor allocation techniques". *IEEE Trans Power Deliv*;15(1):387–92.
- [8] Sfikas EE, Katsigiannis YA, Georgilakis PS. Simultaneous capacity optimization of distributed generation and storage in medium voltage microgrids". *Int J Electr Power Energy Syst* 2015;67:101–13.
- [9] Evangelopoulos VA, Georgilakis PS., 2014, "Optimal distributed generation placement under uncertainties based on point estimate method embedded genetic algorithm. *IET Gener Transm Distrib*;8(3):389–400.
- [10] Georgilakis PS, Hatziaegyriou ND. A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research. *Electric Power Syst Res*;121:89–100.
- [11] Andishgar Mohammad Hadi, Fereidunian Alireza, Lesani Hamid. 2015 "Healer reinforcement for smart grid using discrete event models of FLISR in distribution automation. *J Intell Fuzzy Syst* 2016;30(5):2939–51.
- [12] Georgilakis Pavlos S, Hatziaegyriou Nikos D. 2013, "Optimal distributed generation placement in power distributed networks: models, methods", and future research. *IEEE Trans Power Syst*;28(3):3420–8.
- [13] Hung DQ, Mithulananthan N. 2013, "Multiple distributed generators placement in primary distribution networks for loss reduction. *IEEE Trans Ind Electron*;60(4):1700–8.
- [14] Porkar S, Poure P, Abbaspour-Tehrani-Fard A, Saadate S. 2011, "Optimal allocation of distributed generation using a two-stage multi-objective mixed-integernonlinear programming. *Eur Trans lectr Power*;21(1):1072–87.
- [15] Kowsalya M. 2014, "Optimal distributed generation and capacitor placement in power distribution networks for power loss minimization. In: 2014 International conference on advances in electrical engineering (ICAEE). IEEE;. p. 1–6.
- [16] Khalesi N, Rezaei N, Haghifam M-R. 2011, "DG allocation with ap-plication of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement. *Int J Electr Power Energy Syst* 2011;33(2):288–95.
- [17] Kotamarty S, Khushalani S, Schulz N. 2008, "Impact of distributed generation on distribution contingency analysis". *Electric Power Syst Res*;78 (9):1537–45.
- [18] Baghipour Reza, Hosseini Seyyed Mehdi. 2012, "Placement of DG and capacitor for loss reduction, reliability and voltage improvement in distribution networks using BPSO. *Int J Intell Syst Appl (IJISA)*;4(12):57.