Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 61-71

Vol. 11/ No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Evaluation of the Performance of Using Interline Fault Current Limiter in High Voltage Substations in order to Reduce Short Circuit Current, Voltage Drop and Improve the Stability of Distribution Generation; Case Study: Substation in Special Economic Zone of AMIRABAD Port

Seyyed Esmaeel Naghibi[1],Ph.D. Student, Mohammad Mirzaie[2], Professor,Taghi Barforoushi[3] ,Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

& Mazandaran Regional Electric Company,Sari,Iran
Email: enaghibi@mazrec.co.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Email: mirzaie@nit.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Email: barforoshi@nit.ac.ir

Abstract:
Due to the expansion and development of the distribution networks and the use of distributed generators (DGs), the level of short-circuit current has increased significantly. Increasing the short circuit current level provides several challenges for network equipment.

In this paper, the effects of using the inter-line fault current limiter (IFCL) to reduce the short-circuit current and improve the stability of DGs installed in the 230/63/20 kV AMIRABAD substation as a case study are investigated. It includes several output feeders for connecting loads and four DGs to a common coupling point 20 kV bus. In this substation, the connection of DGs to supply the power required by consumers, has increased the short-circuit current to a greater amount than the nominal capacity of the equipment. Also the occurrence of short-circuit in one of the feeders has led to voltage sag in the common bus and the instability of the generators. This has caused the exit of generators and sensitive loads connected to parallel feeders and finally reduce the reliability. IFCL consists of several rectifier bridge circuits and a common limiting resistor. It inserts the common limiting resistor in fault path for limiting the fault current level and consequently the voltage drop in the case of short circuit of the feeders. To prove the efficiency of the proposed structure for solving the problems of the studied network, the substation components in PSCAD / EMTDC software are simulated. The simulation results show that the proposed IFCL effectively reduces the fault current and voltage drop, as well as improves the stability of DGs.

Keywords: short circuit current, voltage sag, Interline fault current limiter, distributed generator
Submit date: 2021/10/06
Accepted date: 2022/05/31

Corresponding author Name: Mohammad Mirzaie
Corresponding author address: Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۷۱-۶۱

Vol. 11 / No. 3/ Fall 2022
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

ارزیابی عملکرد بکارگیری محدودساز بین خطی در پستهای فشار قوی به منظور کاهش جریان اتصال کوتاه، افت ولتاژ و بهبود پایداری مولدهای مقیاس کوچک – مطالعه موردی: پست منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد

نوع مطالعه: پژوهشی

سید اسماعیل نقیبی[۱] ، دانشجوی دکترا، محمد میرزایی[۲] ، استاد، تقی بارفروشی[۳]، دانشیار
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران
و شرکت برق منطقه ای مازندران و گلستان - ساری- ایران
enaghibi@mazrec.co.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران
mirzaie@nit.ac.ir
۳= دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران
barforoshi@nit.ac.ir

چکیده: با گسترش و توسعه شبکه های توزیع انرژی و بکارگیری مولدهای مقیاس کوچک ، سطح اتصال کوتاه شبکه ها به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. افزایش سطح اتصال کوتاه مشکلات متعددی را برای تجهیزات شبکه ایجاد می نماید. در این مقاله به جهت انجام مطالعه موردی، اثرات بکارگیری محدود کننده جریان خطای بین خطی، برای کاهش جریان اتصال کوتاه و بهبود پایداری مولدهای مقیاس کوچک متصله در یک پست نمونه مورد بررسی قرار می گیرد. پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد شامل چندین فیدر خروجی برای اتصال بارها و چهار مولد مقیاس کوچک به شین مشترک ۲۰ کیلوولت می باشد. در این پست اتصال مولدهای مقیاس کوچک برای تامین توان مورد نیاز مصرف کنندگان، باعث افزایش جریان اتصال کوتاه به مقداری بیشتر از ظرفیت نامی تجهیزات منصوبه ،شده و بروز اتصال کوتاه در یکی از فیدرها، منجر به کمبود ولتاژ در باس مشترک و ناپایداری مولدها گردیده است. این امر باعث خروج مولدهای مقیاس کوچک و بارهای حساس متصل به فیدرهای موازی و کاهش قابلیت اطمینان گردیده است. محدود ساز بین خطی از چندین مدار یکسوساز و یک مقاومت محدود ساز مشترک تشکیل شده است که در صورت بروز اتصال کوتاه در هر یک از فیدرها، با قرار دادن مقاومت محدود ساز مشترک در مسیر جریان خطا، دامنه جریان و متعاقبا دامنه افت ولتاژ را نیز محدود می نماید. برای اثبات کارآئی ساختار پیشنهادی در رفع مشکلات شبکه مورد مطالعه، اجزاء پست در نرم افزار PSCAD/EMTDC مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که محدود کننده پیشنهادی به طور موثری باعث کاهش جریان خطا و کاهش افت ولتاژ و همچنین بهبود پایداری مولد های مقیاس کوچک می گردد.

واژه های کلیدی: جریان اتصال کوتاه، کمبود ولتاژ، محدود ساز جریان خطا بین خطی، مولد مقیاس کوچک

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۰/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۵/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : محمد میرزایی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

۱- مقدمه

با توسعه روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، مراکز تولید و شبکه های انتقال برق گسترش چشمگیری پیدا نموده‌اند، که این امر باعث افزایش سطح اتصال کوتاه در سیستم قدرت گردیده است. دلایل متعددی در افزایش سطح جریان خطا در سیستم های انتقال و توزیع موثر می باشند که می توان به عواملی همچون افزایش ظرفیت تولید نیروگاه ها، توسعه و افزایش به هم پیوستگی خطوط انتقال و شبکه توزیع و همچنین افزودن منابع تولید پراکنده مقیاس کوچک اشاره نمود (IEEE Std., 551™, 2006& Schmitt, H., 16 October 2006).از سوی دیگر، یکی از توپولوژی‌هائی که در سیستم توزیع نسبت به مسئله کمبود ولتاژ بسیار حساس و آسیب پذیر است، اتصال چندین فیدر موازی به یک باس مشترک[1] است. در چنین ساختاری، وقوع خطای اتصال کوتاه در یکی از فیدرها، منجر به کمبود ولتاژ در باس مشترک می‌شود و در عملکرد بارهای حساس متصله به آن تاثیر گذاشته و باعث آسیب دیدن تجهیزات حساس می‌شود (Thakur,P.,Singh,A.K.,2013).در این ساختار، اتصال مولدهای مقیاس کوچک به شین مشترک باعث افزایش دامنه جریان اتصال کوتاه شده و از طرفی می تواند باعث ناپایداری مولدهای مقیاس کوچک در شرایط بروز خطا گردد. با توجه به موارد مذکور و افزایش دامنه جریان اتصال کوتاه، تنشهای حرارتی و دینامیکی بالایی به تجهیزات موجود در سیستم قدرت از قبیل هادیهای خطوط هوایی ، کابلها، ترانسفورماتورها و کلیدهای قدرت اعمال می‌گردد و می تواند باعث وارد آمدن آسیب جدی به تجهیزات و کاهش طول عمر آنها شود (Jager,j.,et al.,2008). همچنین بروز کمبود ولتاژ در شین مشترک (PCC)، منجر به خروج مولدهای مقیاس کوچک و بارهای حساس متصل به فیدرهای موازی و کاهش قابلیت اطمینان خواهد شد.

بنابراین برای رفع مشکل موصوف، باید جریان خطا تا قبل از رسیدن به مقدار پیک و باز نشدن کلیدهای قدرت، محدود گردد. بطور کلی راهکارهای کاهش جریان اتصال کوتاه به دو دسته مرسوم و استفاده از محدود کننده های جریان خطا دسته بندی می‌گردند. یک راه حل ساده برای جلوگیری از آسیب دیدن تجهیزات، جایگزینی ادوات موجود درسیستم با ادواتی با مقادیر نامی بالاتر و در حد جریان اتصال کوتاه است (Javadi,H.,mar.2011).اما این روش بسیار پرهزینه بوده و گاهی اوقات تولید تجهیزاتی در سطح اتصال کوتاه بالا به لحاظ تجاری و اقتصادی امکان‌پذیر نیست. در ضمن چنین تغییرات اساسی در شبکه مستلزم صرف وقت نسبتاً زیادی می‌باشد که می‌تواند هزینه خاموشی زیادی به شبکه تحمیل نماید. البته این روش معمولاً در طرح تجهیزات پست نیز تغییر ایجاد خواهد کرد و علاوه بر کلیدها لازم است ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری جریان، سکسیونرها، باس‌بارها و در برخی موارد حتی سیستم زمین نیز تغییر کند. نکته حائز اهمیت آن است که هر چند تعویض تجهیزات با مقادیر نامی بالاتر، مشکل قدرت قطع را حل می‌نماید، اما باید توجه داشت که اثرات مخرب ناشی از شدت جریان اتصال کوتاه به قوت خود باقی است. از طرفی با افزایش قدرت قطع کلیدها، توانایی قطع جریان بالا افزایش می‌یابد اما بالا بودن جریان اتصال کوتاه در همان چند سیکل جهت شناسایی و رفع خطا، باز هم تنش‌های دینامیکی و حرارتی قابل توجهی به تجهیزات وارد می‌کند.

یکی از روشهای مرسوم و ارزانتر در مقایسه با محدودسازهای جریان خطا، ایجاد تغییرات در ساختار شبکه از قبیل شکستن باس‌بارهای بزرگ و باز نمودن رینگ برخی از خطوط انتقال می باشد. این روش می تواند کاهش قدرت اتصال کوتاه، تغییر معادلات حاکم بر پخش بار حالت نرمال شبکه و کاهش قابلیت اطمینان سیستم را به همراه داشته باشد. در ضمن نیاز به مطالعه بسیار دقیق جزئیات سیستم وجود دارد (CIGRE WG A3.10,2003).

با توجه به مشکلات فوق، جهت مقابله با جریانهای اتصال کوتاه بالا، وجود تجهیزی که بتواند این جریان را قبل از رسیدن به اولین قله خود مهار نماید کاملا ضروری است و تنها در این صورت است که می‌توان ادعا کرد، کلیه اثرات سوء جریان اتصال کوتاه تا حد مطلوبی مرتفع گردیده است. لذا راهکار دیگری که برای کاهش جریان اتصال کوتاه در یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بکارگیری محدودکننده‌های جریان خطا[2] می‌باشد. با توجه به پیشرفت‌هایی که در زمینه محدودکننده‌ها صورت گرفته است، امروزه استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا به عنوان یک روش بسیار مناسب و رایج برای محدودسازی جریان خطا و حفظ قابلیت اطمینان سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Heydary,A., October 2020&Zolfaghari,M.,et al., 2020). تقریباً همه محدود کننده های جریان اتصال کوتاه موجود، براساس وارد نمودن یک امپدانس بزرگ به طورسری با سیستم عمل می‌نمایند. لیکن تنها روش عملکرد و ورود این امپدانس به سیستم، باعث بوجود آمدن انواع مختلف محدودکننده‌ها شده است. با استفاده از محدودکننده‌های جریان خطا، می‌توان جریان را در سطح قدرت تحمل و مقدار نامی تجهیزات موجود کنترل کرد و دیگر نیازی به جایگزینی تجهیزات به ادواتی با مقادیر نامی بالاتر نمی‌باشد. همچنین می توان با انتخاب مناسب محدودکننده، کنترل و طراحی پارامترهای آن، علاوه بر محدود سازی جریان خطا، سایر پارامترهای شبکه از قبیل افت ولتاژ (Ghanbari,T., et al,october 2018)، پایداری(Firouzi,M.Gharebpetian,G.B.,June 2013)، قابلیت اطمینان(yousefi,H.,Mirzaie,M.,Aminifar,F.,2016) و شرایط گذرای شبکه (Sousa,W.T.B.,et al.,January 2021)را نیز بهبود داد. در (Firouzi,M.,2018) برای کاهش جریان اتصال کوتاه و بهبود گذر از شرایط افت ولتاژ در مزرعه بادی، از محدود ساز خازنی استفاده شده

[1] Point of Common Coupling (PCC)

[2] Fault current limiters (FCL)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

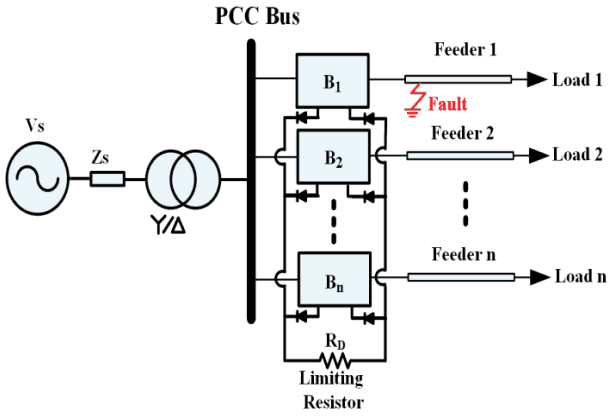
است. این محدود ساز، باعث پایداری عملکرد مزرعه بادی می گردد، ولی به ازای هر توربین بادی نیاز به یک محدود ساز است. در(Firouzi,M.,et al., 2020&Shafiee, M.R.,et al.,20 November 2020) ، از محدود ساز چند مرحله ای و چند سلولی برای بهبود پایداری مولد های تولید پراکنده استفاده گردیده است. ساختار این محدودکننده شامل چندین مقاومت به جای یک مقاومت است. گرچه محدود ساز پیشنهادی از بروز اضافه ولتاژ در ترمینال مولد ها جلوگیری می کند، ولی با توجه به تعداد زیاد مقاومت ها و کلید های بای پس ،هزینه چنین محدود سازی افزایش می یابد. در(Naghibi,S.E.,Mirzaie,M.,Barforoshi,T.,may 2020) ، ساختار محدود ساز بین خطی به منظور کاهش سطح جریان اتصال کوتاه و بهبود افت ولتاژ در سیستم توزیع، شامل فیدرهای موازی متصل به باس مشترک ،در شرایط عدم حضور مولدهای مقیاس کوچک، ارائه گردید. در این مقاله ساختار و عملکرد این محدودساز مورد بررسی قرار گرفته است.در (Elshiekh,M.,Elwakeel,A.,at al.,October 2021) ، از عنصر ابررسانایی برای حل مشکل خطاهای شبکه و مسایل ذخیره سازی انرژی در شبکه های الکتریکی مجهز به سیستم انرژی تجدیدپذیر استفاده شده است.در این مقاله،با طرح یک مدار الکترونیکی برای اتصال منابع انرژی مغناطیسی ابررسانایی به یک سیستم dc بر روی توربین باد/ژنراتورهای دوسو تغذیه استفاده شده و عملکرد سیستم در شرایط گوناگون شبیه سازی و تحلیل شده است. در(Chen,L. , et al., September 2022) ، با بیان عملکرد ضعیف تکنولوژی ژنراتورهای سنکرون مجازی جهت مقابله با جریان های خطا و همچنین قابلیت در سرویس ماندن ژنراتور در حین ولتاژ(ناشی از خطا)،روش جدیدی پیشنهاد شده است.در این روش هماهنگی کنترل بین مقاومت مجازی و محدودساز خطا-نوع کوپلینگ شار مغناطیسی بیان گردیده است.شبیه سازی سیستم نمونه با درنظرگرفتن انواع خطاها، انجام و نشان داده شد که اغتشاشات ولتاژ ترمینال ژنراتور و سطح اتصال کوتاه بهبود یافته است.

با توجه به موارد پیش گفته،ساختار این مقاله بدین شرح است که در ابتدا توضیحات لازم در خصوص ساختار و عملکرد محدودساز بین خطی و اثرات آن بر پایداری گذرای شبکه ارائه خواهد شد. در ادامه به جهت کاربردی نمودن موضوع و مطالعه موردی و در تحقیق جدید، پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد انتخاب و اثرات بکارگیری محدودساز بین خطی بر شدت جریان اتصال کوتاه، کاهش افت ولتاژ و همچنین بهبود پایداری مولد های مقیاس کوچک متصل به آن شبیه سازی و نتایج تحلیل می گردند. بدین منظور پست انتقال ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت امیرآباد در نرم افزار PSCAD/EMTDC شبیه سازی و سپس عملکرد محدود ساز بین خطی در این سیستم و اثرات آن مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- محدودساز بین خطی

با توجه به آنکه در ساختار پستهای فشارقوی بخصوص در بخشهای فوق توزیع و توزیع، فیدرهای موازی به یک باس مشترک (PCC) جهت تغذیه متصل می شوند، لذا در این نوع ساختار، طرح کلی محدودساز پیشنهادی مطابق شکل (۱) می باشد (Naghibi,S.E.,Mirzaie,M.,Barforoshi,T.,may 2020). همانطورکه در این شکل مشاهده می‌شود، محدودساز دارای یک المان محدودساز (R_D) است. بلوک‌هایی که با B_1 تا B_n نمایش داده شده‌اند، مبدل‌های نصب شده در هر فیدر می‌باشد.

در زمان بروز خطای اتصال کوتاه در هر یک از فیدرها، فقط مبدل مربوط به آن فیدر، فعال می‌گردد و جریان خطا را محدود و افت ولتاژ باس مشترک را جبران می‌نماید. با توجه به اتصال چندین فیدر موازی به باس مشترک، برخلاف سایر کارهای انجام شده که نیاز به تعداد زیادی محدودکننده متناظر با تعداد فیدرها می‌باشد، فقط از یک المان محدود کننده به ازای خطای اتصال کوتاه در همه فیدرها استفاده می‌شود بطوریکه هزینه بکارگیری محدود کننده را به طور موثری کاهش می-دهد.



شکل (۱) : طرح کلی محدودساز بین خطی در شبکه

۲-۱- ساختار محدودساز بین خطی

شبکه توزیع با تعداد زیاد واحدهای فتوولتائیک، شبکه‌ای پیچیده محسوب می‌شود. لذا، با افزایش ابعاد شبکه، کنترل اینورتر همه منابع به شیوه متمرکز کار دشواری خواهد بود. با توجه به این مفهوم که درجه ارتباط و تاثیر ولتاژی بین شین‌های مختلف شبکه توزیع یکسان نیست، می‌توان به طور عملی شین‌هایی که تاثیرپذیری بیشتری از هم دارند را در قالب ناحیه‌هایی با هدف اجرای کنترل ولتاژ بخش‌بندی نمود. به بیان دیگر، گره‌هایی که در یک بخش قرار داده شده‌اند در مقایسه با سایر شین‌های شبکه، تاثیرپذیری بیشتری نسبت به هم دارند.

در شکل (۲) ساختار محدودساز بین خطی شامل دو مبدل پل دیودی نشان داده شده است. محدود ساز بین خطی از المانهای زیر تشکیل شده اند که در آن i=1,2 ,… ,n شماره فیدر و n تعداد فیدرها می‌باشد (Naghibi,S.E.,Mirzaie,M.,Barforoshi,T.,may 2020) :

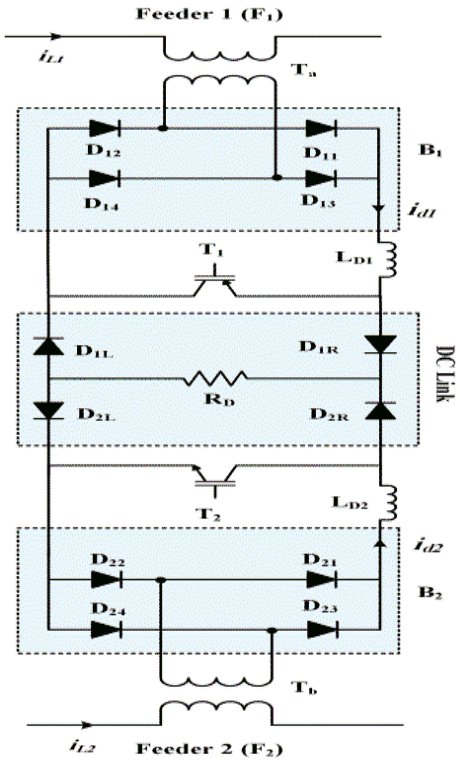
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

- یکسو ساز پل دیودی شامل دیودهای (D_{i1} تا D_{i4}) می باشد.
- کلیدهای IGBT با T_1 تا T_i نمایش داده شده است.
- راکتورهای L_{D1} تا L_{Di} به منظور جلوگیری از افزایش ناگهانی جریان و حفاظت کلیدهای IGBT در مقابل di/dt می‌باشد.
- D_{iL} و D_{iR} برای انتقال جریان خطا در مقاومت محدودساز (R_D) در حین وقوع خطا است.
- ترانسفورماتورهای سری (T_a-T_b) برای اتصال مبدلها به شبکه می باشد.

۲-۲- اساس عملکرد محدودساز بین خطی

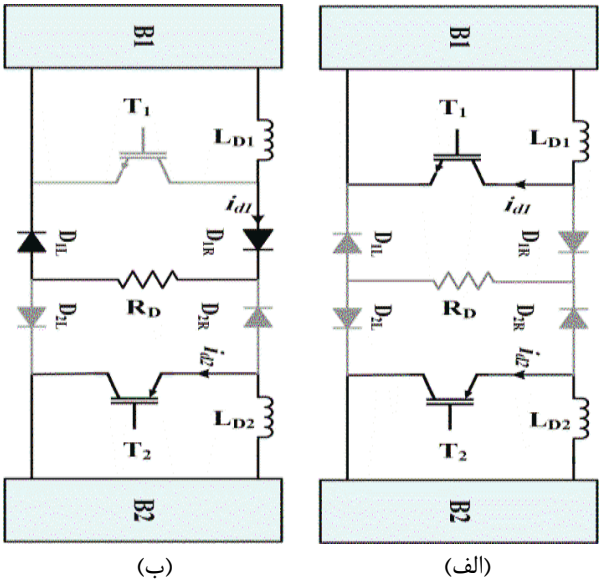
عملکرد محدود ساز بین خطی به دو حالت عملکرد نرمال و خطا تقسیم بندی می‌شود. در زمان عملکرد نرمال شبکه، کلیدهای T_1 و T_2 هر دو روشن هستند. مطابق شکل (۲) جریان های AC عبوری از فیدرهای F_1 و F_2 (i_{L1} و i_{L2})، توسط مبدل های B_1 و B_2 به جریان DC یعنی (i_{d1} و i_{d2}) تبدیل می‌شوند و از کلیدهای T_1 و T_2 عبور می‌کنند. مدار معادل محدود ساز بین خطی در زمان عملکرد نرمال شبکه در شکل (۳-الف) نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختار محدود ساز بین خطی

همانطور که در این شکل نشان داده شده است با عبور جریان از کلیدهای T_1 و T_2، مقاومت محدود ساز در حالت بای‌پس قرار می‌گیرد و هیچ جریانی از آن عبور نمی‌کند. همچنین به علت عبور جریان مستقیم از راکتور های L_{D1} و L_{D2}، امپدانس ناشی از این راکتور تقریبا صفر می‌باشد. بنابراین افت ولتاژ محدود ساز بین خطی در این شرایط با فرض ناچیز بودن افت ولتاژ ناشی از سوئیچینگ کلیدها و مقاومت راکتورها تقریبا صفر می باشد. در این حالت، محدود ساز تاثیری در عملکرد نرمال شبکه نداشته و تاثیری بر جریان های عبوری از فیدرها ندارند.

در زمان وقوع خطا در شبکه، با توجه به فیدر دارای خطا، کلید IGBT مبدل مربوط به آن فیدر توسط سیستم کنترلی خاموش می‌شود. مدار معادل محدود ساز بین خطی در شرایط خطا در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. حال با فرض وقوع خطا در فیدر F_1 ، کلید T_1 توسط سیستم کنترلی خاموش می‌گردد و جریان عبوری از کلید T_1 توسط دیودهای D_{1R} و D_{1L} به مقاومت محدود ساز R_D انتقال می‌یابد.



شکل (۳) : مدار معادل محدود ساز بین خطی (الف) شرایط نرمال شبکه (ب) شرایط خطا در شبکه (فیدر۱)

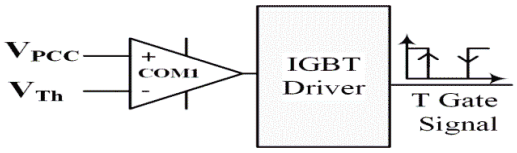
بنابراین محدودساز با قرار دادن مقاومت R_D در مسیر جریان خطای عبوری از فیدر F_1 ، باعث کاهش جریان خطا و بهبود افت ولتاژ شین مشترک در محدوده موردنظر می گردد(Naghibi,S.E.,Mirzaie,M.,Barforoshi,T.,may 2020).

۲-۳- سیستم کنترلی محدودساز بین خطی

در شکل (۴) سیستم کنترلی محدود ساز بین خطی نشان داده شده است. مطابق این شکل، برای تشخیص خطا و کنترل محدودساز بین خطی، ولتاژ باس مشترک اندازه گیری شده و با مقدار ولتاژ مرجع که ۰/۹ پریونیت در نظر گرفته شده است مقایسه می‌گردد. به محض اینکه مقدار موثر ولتاژ باس مشترک از مقدار مرجع کمتر گردد، سیستم کنترلی با اعمال پالس صفر به کلید IGBT مربوط به فیدری که دچار خطا شده، آن را خاموش می‌کند و مقاومت محدود ساز مشترک را در مسیر جریان خطا قرار می‌دهد. همچنین بعد از رفع خطا، ولتاژ باس مشترک به مقدار قبل از خطا بر می‌گردد. به محض اینکه مقدار موثر ولتاژ از مقدار مرجع بیشتر گردد، سیستم کنترلی، کلید IGBT را روشن

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

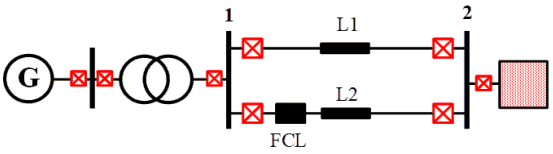
کرده و مقاومت R_D بای پس شده و مدار به عملکرد حالت نرمال بر می‌گردد.



شکل (۴) : سیستم کنترل محدود ساز بین خطی

۳- تاثیر محدودساز بر پایداری گذرا

در این قسمت تأثیر محدودساز جریان خطا بر پایداری گذرا، با استفاده از معیار تساوی سطوح مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل (۵) سیستم دو باسه شامل ژنراتور متصل به باس بینهایت و خطوط L1 و L2 با بکارگیری محدودساز جریان خطا در خط L2 نشان داده شده است.



شکل (۵) : ژنراتور متصل به باس بینهایت

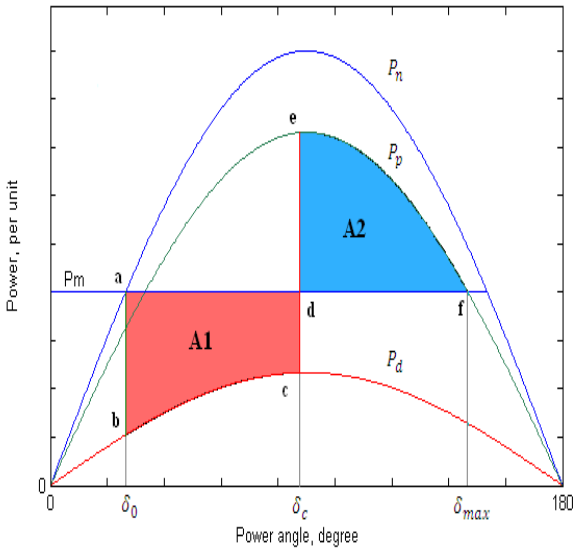
در این سیستم با چشم پوشی از مقاومت خط، توان خروجی P_e با رابطه (۱) بیان می شود.

$$P_e = \frac{EV}{X_{12}}\sin\delta \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، E ولتاژ ترمینال ژنراتور، V ولتاژ باس بینهایت، δ زاویه رتور و $X_{12} = X_T + (X_{l1} \| X_{l2})$ امپدانس معادل سیستم می‌باشد (X_T راکتانس ترانسفورماتور و X_{l1} و X_{l2} راکتانس خطوط است). از طرفی در حین هرگونه اختلال در سیستم، حرکت شتاب گیرنده یا کند شونده رتور ژنراتور، با معادله حرکت یا نوسان قابل بیان است.

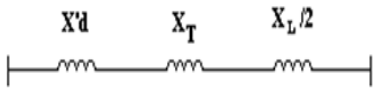
$$P_m - P_e = \frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، P_m توان مکانیکی ورودی و P_e توان الکتریکی خروجی ژنراتور، H ثابت اینرسی ژنراتور و δ زاویه رتور بر حسب رادیان می باشد. با بکارگیری معادلات (۱) و (۲) منحنی توان-زاویه رتور رسم می‌شود. از روی این منحنی، معیار تساوی سطوح قابل بیان است. نمودار توان-زاویه رتور برای سیستم دو باسه بدون بکارگیری محدودساز جریان خطا، مطابق شکل (۶) خواهد بود. بر اساس قانون تساوی، سطوح ناحیه A2 باید بزرگتر یا برابر با ناحیه A1 باشد تا پایداری حفظ شود. وقتی A1=A2 باشد، زاویه رتور متناظر با لحظه رفع خطا به عنوان زاویه بحرانی رفع خطا (δ_c) معرفی می شود (Kundor,P.,1994).



شکل (۶): منحنی توان-زاویه رتور قبل از بکارگیری محدودساز

در ادامه، عملکرد سیستم با بکارگیری محدودساز جریان خطا مورد بررسی قرار خواهد گرفت. قبل از وقوع خطا و در حالت عملکرد نرمال سیستم، محدودساز فعال نیست و تقریباً هیچ‌گونه تأثیری بر روی شبکه ندارد. در این حالت مدار معادل سیستم دو باسه در شکل (۷) نشان داده شده است.

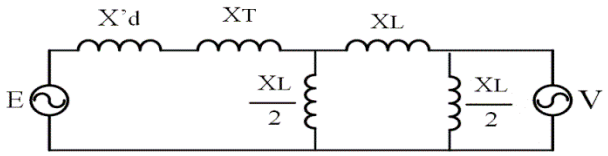


شکل (۷): مدار معادل سیستم دو باسه در حالت نرمال

در این حالت توان انتقال P_I به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$P_I = \frac{EV}{X_{1t}}\sin\delta = P_1\sin\delta$$
$$X_{1t} = X'_d + X_T + X_L/2 \qquad (۳)$$

حال هنگامی که خطای سه فاز در سیستم و وسط خط L2 اتفاق می افتد و محدودساز هنوز فعال نشده است، مدار معادل سیستم مطابق شکل (۸) و توان انتقالی P_{II} به صورت رابطه (۴) خواهد بود.



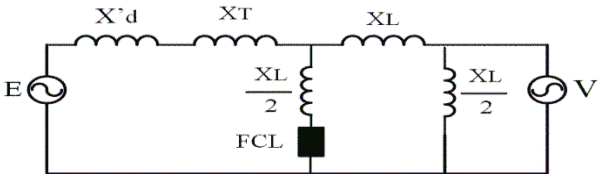
شکل (۸): مدار معادل سیستم دو باسه با خطای سه فاز در وسط خط L2

$$P_{II} = \frac{EV}{X_{2t}}\sin\delta = P_2\sin\delta$$
$$X_{2t} = (2X'_d + 2X_T + 1)(X_L) + (X'_d + X_T) \qquad (۴)$$

اما در هنگام خطا در سیستم و فعال بودن محدودساز، مدار معادل سیستم، مطابق شکل (۹) و توان انتقالی P_{III} به صورت رابطه (۵) می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

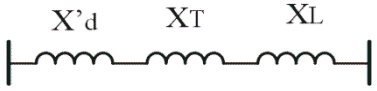


شکل (۹): سیستم دو باسه با خطای سه فاز در وسط خط با محدودساز

$$P_{III} = \frac{EV}{X_{3t}}\sin\delta = P_3\sin\delta$$

$$X_{3t} = \frac{(X'_d+X_T)}{(\frac{X_L}{2}+X_{FCL})} + \frac{(X'_d+X_T)(\frac{X_L}{2}+X_{FCL})}{(\frac{X_L}{2}+X_{FCL})} + \frac{(X_L)(\frac{X_L}{2}+X_{FCL})}{(\frac{X_L}{2}+X_{FCL})} \quad (۵)$$

در حالت آخر خطا با خروج خط رفع می شود که مدار معادل سیستم در این حالت مطابق شکل (۱۰) و توان انتقالی P_{IV} نیز به صورت رابطه (۶) بیان می‌شود.



شکل (۱۰): مدار معادل سیستم دو باسه پس از رفع خطا و با خروج خط

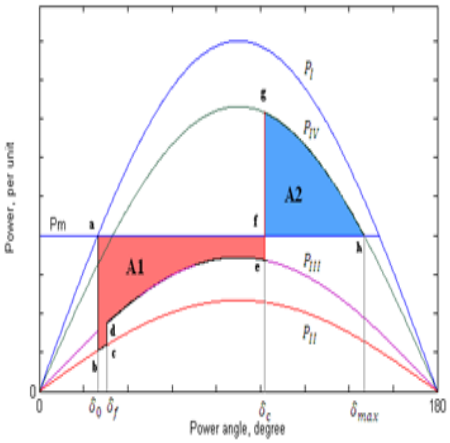
$$P_{IV} = \frac{EV}{X_{4t}}\sin\delta = P_4\sin\delta$$

$$X_{4t} = X'_d + X_T + X_L \quad (۶)$$

با توجه به روابط (۳) تا (۶) و مقایسه روابط توان انتقالی حالتها خواهیم داشت:

$$P_{II} < P_{III} < P_{IV} < P_I \quad (۷)$$

شکل (۱۱) تأثیر محدودساز جریان خطا بر پایداری گذرای سیستم با استفاده از معیار تساوی سطوح نشان داده شده است.



شکل (۱۱): منحنی توان-زاویه رتور پس از بکارگیری محدودساز

در نتیجه با توجه به شکل (۱۱) و در نظر گرفتن معیار تساوی سطوح، محدودساز جریان خطا موجب کاهش ناحیه شتاب دهنده A1 و در نتیجه موجب افزایش زاویه و زمان بحرانی رفع خطا خواهد شد. لذا نصب محدودساز، بازه بزرگتری جهت زمان عملکرد رله فراهم خواهد کرد و موجب بهبود پایداری گذرای سیستم خواهد شد.

۴- معرفی سیستم مورد مطالعه

در این قسمت به جهت شبیه سازی اثرات محدودساز بین خطی، پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد در نظر گرفته می شود. دیاگرام تک‌خطی پست در شکل (۱۲) نشان داده شده است. ظرفیت این پست ۸۰ مگاولت آمپر در بخش انتقال (۲۳۰/۶۳ کیلوولت) و ۴۰ مگاولت آمپر در بخش فوق توزیع (۶۳/۲۰ کیلوولت) می باشد. این پست دارای چهار فیدر خروجی ۲۰ کیلوولت است. دو فیدر متصل به خطوط ارتباطی مولدهای مقیاس کوچک و دو فیدر دیگر خطوط ۲۰ کیلوولت طولانی را تغذیه می‌نمایند.

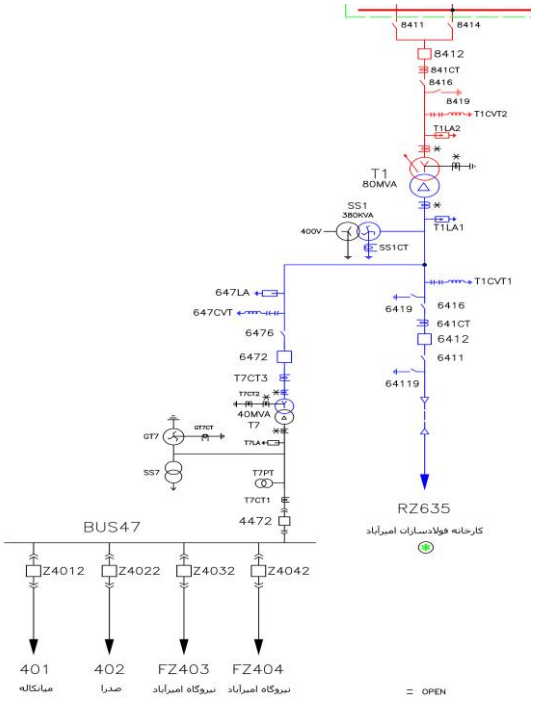
با بررسی عملکرد شبکه موجود و مطالعات برنامه ریزی و توسعه بلند مدت شبکه شرکت برق منطقه ای مازندران و گلستان، تامین برق مطمئن و مستمر منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد وابسته به تنها پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت مذکور به همراه مولدهای مقیاس کوچک موجود و برنامه توسعه نیروگاه مقیاس متوسط می باشد. این موضوع، مشکلات و چالشهای ذیل را به همراه دارد (نقیبی، س. ا.، ملیجی، ف.، میرزایی، م.، بارفروشی، ت. ،آبان ۱۳۹۷):

- اهمیت و حساسیت پایداری تنها پست انتقال و فوق توزیع نغذیه کننده منطقه به خاطر عدم امکان تامین برق از پستهای فوق توزیع مجاور
- ناپایداری خطوط ۲۰ کیلوولت منشعب از پست بدلیل طول زیاد بویژه در شرایط نامساعد جوی و خروج متعدد فیدرهای مولدهای مقیاس کوچک و بار حساس
- پرداخت هزینه های آمادگی نیروگاههای مقیاس کوچک به سرمایه گذار توسط شرکت برق منطقه ای در زمان محدودیت شبکه
- خسارات وارده به مولدها به خاطر قطعی های متعدد و محدودیت و عدم تولنایی در تعمیر یا تامین قطعات مورد نیاز خصوصاً در شرایط تحریم
- افزایش سطح اتصال کوتاه شین ۲۰ کیلوولت به مقادیر بالاتر از قدرت قطع کلیدها و تحمیل هزینه‌های تعویض کلیدها و متعلقات مربوطه نظیر ترانسفورماتورهای اندازه گیری جریان، ولتاژ و غیره

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

شایان ذکر است بر اساس برنامه کوتاه‌مدت شرکت برق منطقه‌ای مازندران، در آینده پست مذکور به ظرفیت ۸۰*۲ مگاولت آمپر در بخش انتقال (۲۳۰/۶۳ کیلوولت) و ۴۰*۲ مگاولت آمپر در بخش فوق توزیع (۶۳/۲۰ کیلوولت) و ۱۲ فیدر ۲۰ کیلوولت خروجی تبدیل خواهد شد. همچنین در برنامه میان مدت تامین برق منطقه ویژه اقتصادی، احداث نیروگاه مقیاس متوسط به ظرفیت ۱۵۰ تا ۳۰۰ مگاوات با سرمایه‌گذاری بخش خصوصی موردنظر می‌باشد. لذا با شرایط فوق، میزان جریان اتصال کوتاه شین ۲۰ کیلوولت پست مذکور بیشتر از قدرت قطع کلیدهای پست می‌گردد. پارامترها و اطلاعات شبکه تولید، انتقال، فوق توزیع و توزیع منطقه ویژه اقتصادی امیرآباد در جداول ۱ تا ۳ آمده است. مقدار مقاومت محدودساز نیز بر اساس بیشترین توان مصرفی فیدرهای متصل به باس ۴۷ درنظر گرفته شده است. مقدار مقاومت طوری لحاظ شده است که توان تلفاتی مقاومت محدود ساز برابر توان مصرفی فیدر مربوطه شود.

با به شکل (۱۲)، فیدرهای بار میانکاله (401) و صدرا (402) به عنوان فیدر ۱ و فیدر ۲ و فیدرهای نیروگاهی امیرآباد (FZ403 و FZ404) به عنوان فیدر ۳ و فیدر ۴ معرفی شده است. فیدر ۳ به مولدهای مقیاس کوچک به ظرفیتهای نامی ۲۵ مگاولت آمیر با تولید عملی ۲۰ مگاوات و ۳.۹*۲ مگاوات با تولید عملی هر واحد ۳.۵ مگاوات و فیدر ۴ به مولد مقیاس کوچک به ظرفیت نامی ۲۵ مگاوات با تولید عملی ۲۰ مگاوات متصل می باشند. لازم به توضیح است خط ارتباطی متصل به فیدر ۳ ، خط تکمداره ۲۳۰ کیلوولت به طول ۳.۷ کیلومتر می باشد که در حال حاضر با ولتاژ ۲۰ کیلوولت مورد بهره برداری قرار می گیرد. این خط بر اساس برنامه میان مدت توسعه احداث نیروگاه مقیاس متوسط در منطقه مذکور اجرا شده است.



شکل (۱۲): دیاگرام تک‌خطی پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد

جدول (۱): پارامترهای شبکه منطقه ویژه اقتصادی امیرآباد

پارامترها				مقادیر
شبکه	ولتاژ (کیلوولت)			۶۳ ، ۲۳۰ و ۲۰
	فرکانس (هرتز)			۵۰
ترانسفورماتور	۸۰ مگاولت آمپر (۲۳۰/۶۳کیلوولت)	امپدانس (درصد)		۱۲.۵
	۴۰ مگاولت آمپر (۶۳/۲۰ کیلوولت)			۱۳.۱۴
خط	مقاومت خط ۲۰ کیلوولت	اهم بر کیلومتر		۰.۲۶۷
	راکتانس خط ۲۰ کیلوولت			۰.۲۵۱
	مقاومت خط ۲۳۰ کیلوولت			۰.۰۷
	راکتانس خط ۲۳۰ کیلوولت			۰.۴۱۸
	طول فیدر۱	کیلومتر		۸۵
	طول فیدر۲			۸۰
	طول فیدر نیروگاهی۳ و ۴			۳.۷
بار	بار فیدر۱	توان اکتیو (مگاوات)		۶.۹
		ضریب توان		۰.۹۵
	بار فیدر۲	توان اکتیو (مگاوات)		۵.۷
		ضریب توان		۰.۹۵
محدودساز بین خطی	اندوکتانس راکتور DC	هانری		۰.۰۱
	مقاومت (R_D)	اهم		۴۰

جدول (۲): اطلاعات مدار معادل تونن پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت امیرآباد

از دید شین۲۳۰ کیلوولت					
V_{th} (P.U.)	<α	R_{th} (Ω.)	X_{th} (Ω.)	X/R	Ssc (MVA)
۰.۹۶۵	۱۳۶.۸۸	۰.۷۰۶	۷.۶۲۸	۱۰.۴۸	۷۵۹۶.۴
از دید شین۶۳ کیلوولت					
V_{th} (P.U.)	<α	R_{th} (Ω.)	X_{th} (Ω.)	X/R	Ssc (MVA)
۱.۰۱۴	۱۶۹.۱۱	۰.۱۵۲	۵.۱۳۳	۳۰.۲	۸۵۰.۲

جدول (۳): اطلاعات مولدهای مقیاس کوچک

پارامترها	مقادیر
توان ظاهری	۲۵ و ۳.۹ مگاولت آمپر
ولتاژ نامی	۱۱ کیلو ولت
فرکانس	۵۰ هرتز
ترانسفورماتور	۲۰/۱۱ کیلو ولت
ضریب توان	۰/۸ پس فاز

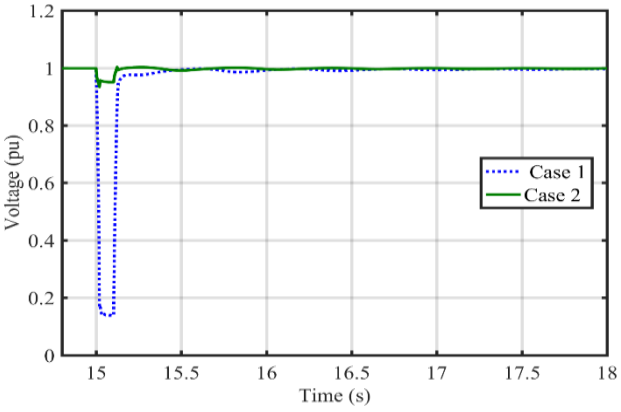
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

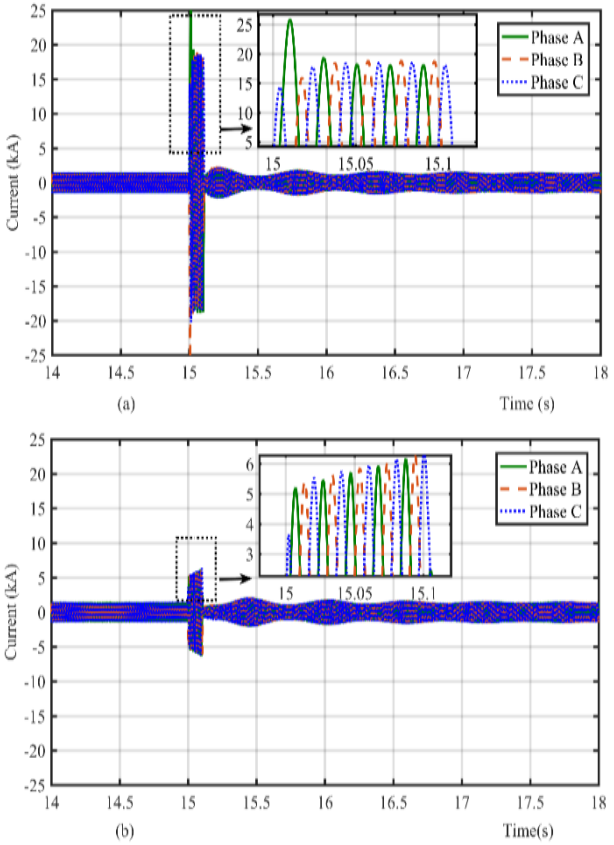
۵- شبیه سازی شبکه مورد مطالعه، نتایج و بحث

برای نشان دادن کارآیی محدودساز بین خطی به منظور کاهش جریان اتصال کوتاه و بهبود افت ولتاژ در پست ۲۳۰/۶۳/۲۰ کیلوولت منطقه ویژه اقتصادی بندر امیرآباد، سیستم نشان داده شده در شکل (۱۲) مورد شبیه سازی و مطالعه قرار گرفته است. نرم افزار PSCAD/EMTDC برای شبیه سازی این سیستم استفاده شده است. پارامترهای سیستم مورد مطالعه در جدول های ۱ تا ۳ ارائه شده است. در این مطالعه و در بخش شبیه سازی، با توجه به شکل (۱۲)، فیدر میانکاله (فیدر شماره ۱)، فیدر صدرا (فیدر شماره ۲)، فیدر نیروگاهی FZ403 (فیدر شماره ۳) و مولدهای متصل به این فیدر با مولد شماره ۱، فیدر نیروگاهی FZ404 (فیدر شماره ۴) و همچنین مولد متصل به این فیدر با مولد شماره ۲ معرفی شده است. در این مطالعه، محدود ساز پیشنهادی دارای ۴ مبدل می باشد که هر کدام از این مبدل ها در فیدرهای شماره ۱-۴ قرار گرفته است.

در این مطالعه، یک خطای سه فاز به زمین در ابتدای فیدر شماره ۱ در نظر گرفته می شود. شبیه سازی برای دو حالت بدون بکارگیری محدودساز (حالت اول (Case 1)) و بکارگیری محدودساز بین خطی (حالت دوم (Case 2)) انجام گرفته است. در شکل های ارائه شده الف (a) و ب (b) می باشند. شکل (۱۳) ولتاژ باس مشترک را دو حالت نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، در حالت بدون استفاده از محدود ساز، ولتاژ باس مشترک (PCC) به حدود ۰/۱۷ پریونیت افت می کند. ولی با بکارگیری محدودساز بین خطی مطروحه، دامنه افت ولتاژ به ۰/۹۶ پریونیت کاهش می یابد. شکلهای (۱۴-الف) و (۱۴-ب) به ترتیب جریان عبوری از پست ۶۳/۲۰ را در دو حالت مختلف نشان می دهد. با توجه به این شکل، دامنه جریان اتصال کوتاه تا حدود ۱۸ کیلوآمپر افزایش یافته لیکن با بکارگیری محدودساز بین خطی، دامنه جریان اتصال کوتاه به حدود ۴ کیلوآمپر محدود می گردد.



شکل (۱۳) : ولتاژ باس مشترک (BUS47) در شرایط اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ابتدای فیدر شماره ۱ در حالت بدون/ با وجود محدودساز جریان خطا



شکل (۱۴) : جریانهای عبوری از پست ۶۳/۲۰ کیلوولت در شرایط اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ابتدای فیدر شماره ۱، الف) حالت اول ب) حالت دوم

شکلهای (۱۵) و (۱۶) به ترتیب جریانهای عبوری از فیدر ۱ و فیدر ۲ را در شرایط با و بدون محدودساز بین خطی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۵-الف) مشاهده می‌گردد، دامنه جریان اتصال کوتاه در فیدر ۱ تا بیش از ۲۳ کیلوآمپر افزایش یافته لیکن با بکارگیری محدودساز بین خطی، دامنه جریان اتصال کوتاه در این فیدر به حدود ۶ کیلوآمپر محدود می شود که در شکل (۱۵-ب) نشان داده شده است. شکل (۱۶-الف) جریان فیدر ۲ را نشان می دهد. با توجه به این شکل، به علت بروز خطای اتصال کوتاه در فیدر ۱، دامنه جریان در فیدر ۲ از مقدار ۰/۲۳ کیلو آمپر به حدود ۰/۰۴ کیلو آمپر کاهش می یابد. این امر منجر به خاموشی بارهای متصل به این فیدر می گردد. با بکارگیری محدودساز، دامنه جریان در این فیدر تقریبا بدون تغییر می ماند (شکل ۱۶-ب).

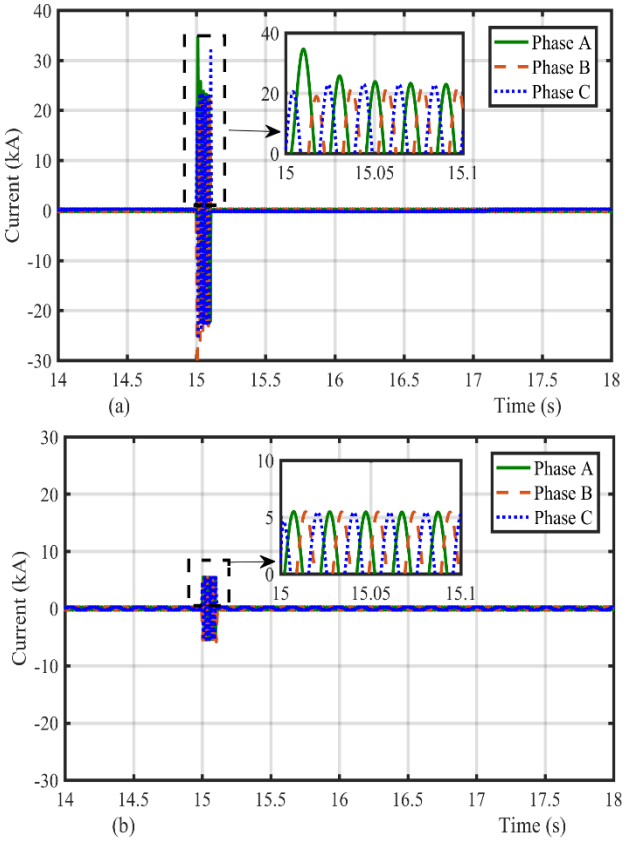
شکلهای (۱۷-الف) و (۱۷-ب) به ترتیب جریان مولد ۱ را در هنگام خطای سه فاز در فیدر۱ و در دو حالت مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می گردد، در زمان خطا، دامنه جریان ناشی از مولد ۱ تقریبا تا ۷/۵ کیلوآمپر افزایش می یابد. ولی با بکارگیری محدودساز، دامنه جریان اتصال کوتاه به حدود ۱/۵ کیلوآمپر محدود می گردد. شکل (۱۸-الف) توان خروجی مولد ۱ را در دو حالت با و بدون محدودساز بین خطی نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، با بکارگیری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

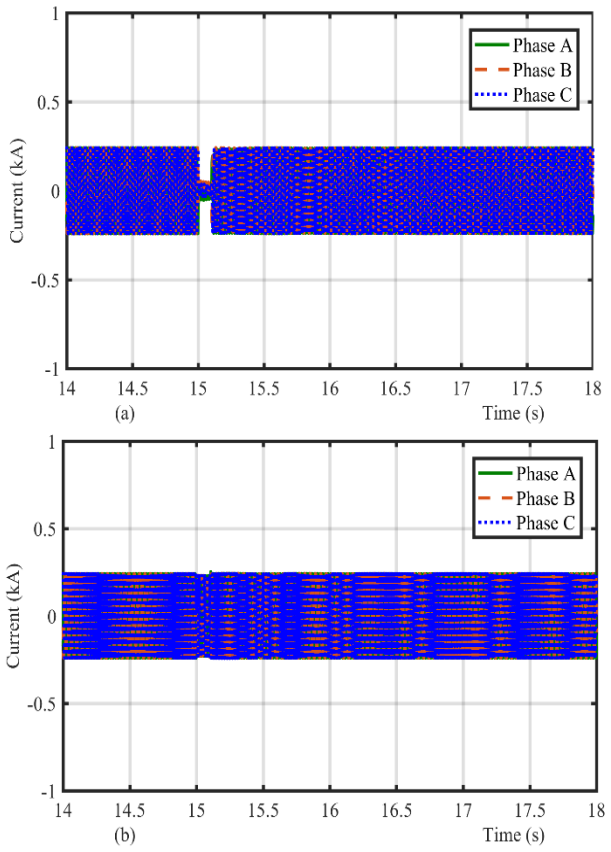
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

این محدودساز دامنه نوسانات توان به طور موثری کاهش می یابد. شکل (۱۸-ب) سرعت مولد ۱ را در دو حالت نشان می دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، با بکارگیری این محدودساز، دامنه نوسانات سرعت به طور موثری میرا می گردد.

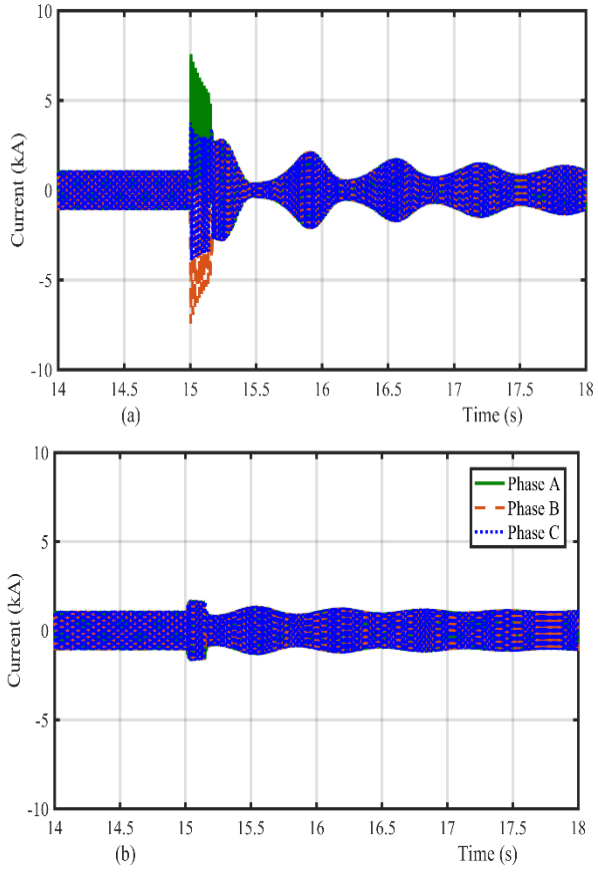
همچنین در شکلهای (۱۹-الف) و (۱۹-ب) به ترتیب جریان مولد ۲ را در دو حالت با و بدون محدودساز بین خطی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، دامنه جریان مولد ۲ با بکارگیری محدودساز، تقریبا از ۴ کیلوآمپر به ۱/۳ کیلو آمپر محدود می گردد. در ضمن توان خروجی و سرعت مولد ۲ در دو حالت در شکلهای (۲۰-الف) و (۲۰-ب) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲۰-الف) مشاهده می‌گردد، با بکارگیری این محدودساز دامنه نوسانات توان به طور موثری کاهش می‌یابد. همچنین با بکارگیری محدودساز بین خطی، دامنه نوسانات سرعت به طور موثری کاهش می‌یابد که این امر حاشیه پایداری مولد را افزایش می‌دهد.



شکل (۱۵) : جریان سه فاز فیدر ۱، الف) حالت اول ب) حالت دوم



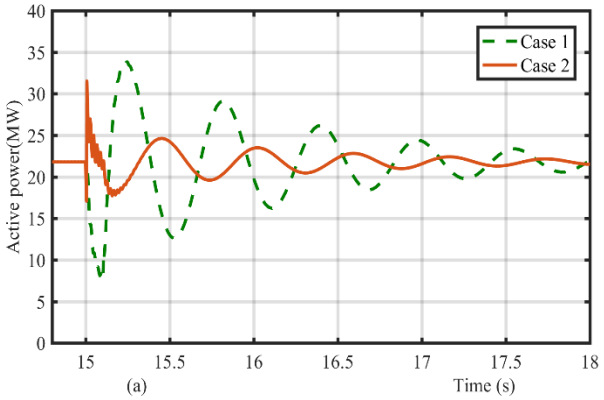
شکل (۱۶) : جریان سه فاز فیدر ۲، الف) حالت اول ب) حالت دوم

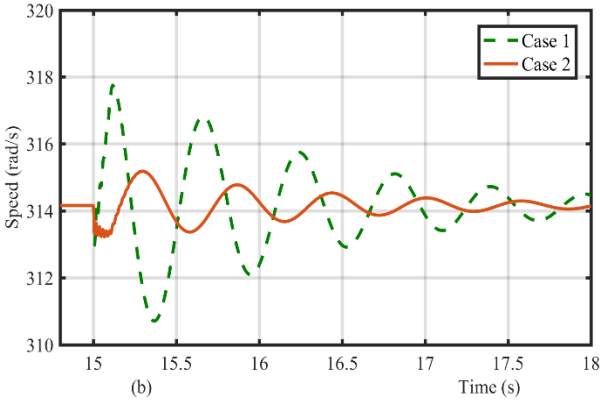


شکل (۱۷) : جریان سه قاز مولد ۱، الف) حالت اول ب) حالت دوم

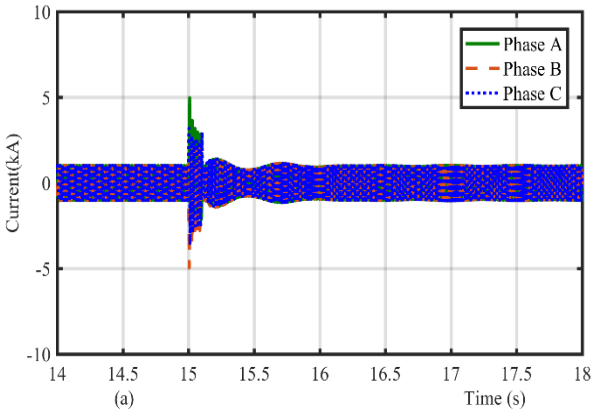
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

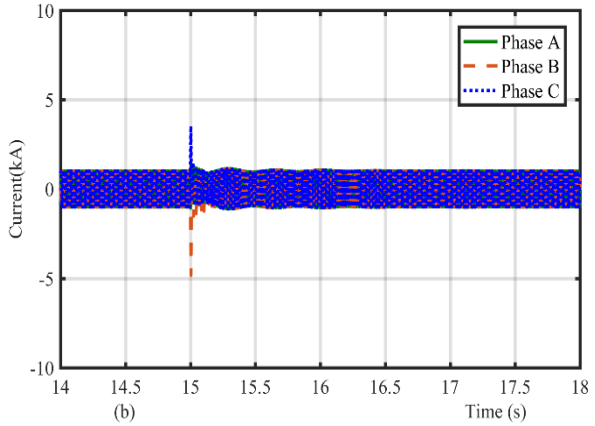
[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]



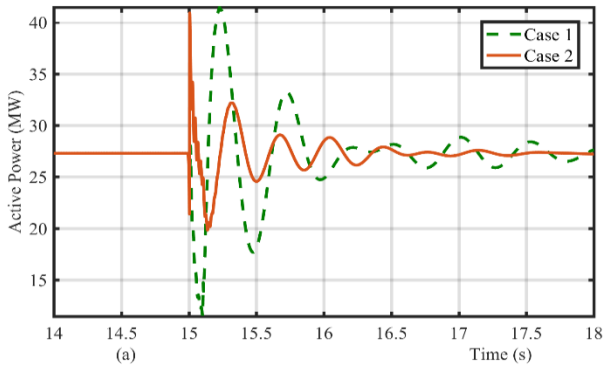


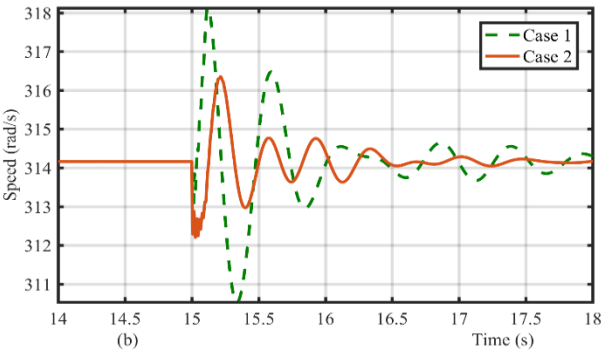
شکل (۱۸) : عملکرد مولد ۱ در دو حالت با و بدون محدودساز بین خطی، الف) توان خروجی ب) سرعت مولد





شکل (۱۹) : جریان سه فاز مولد ۲، الف) حالت اول ب) حالت دوم





شکل (۲۰) : عملکرد مولد ۲ در دو حالت با و بدون محدودساز بین خطی، الف) توان خروجی ، ب) سرعت مولد

۶- نتیجه گیری

در این مقاله بکارگیری محدودساز بین خطی برای کاهش جریان اتصال کوتاه، جلوگیری از بروز کمبود ولتاژ و حفظ پایداری مولدهای متصل به پست امیر آباد مطالعه گردیده است. محدود ساز بین خطی با قرار دادن مقاومت محدودساز در مسیر جریان خطا، دامنه جریان خطا را محدود می کند. برای اثبات کارایی ساختار پیشنهادی، سیستم پست مورد مطالعه با اجزاء مختلف در نرم افزار PSCAD/EMTDC مورد شبیه سازی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی ها عبارتند از:

- با نصب محدودساز بین خطی، دامنه جریان اتصال کوتاه در فیدری که دچار خطا شده بود و همچنین جریان خطای مولدهای مقیاس کوچک به طور موثری کاهش می یابد.
- با نصب محدودساز بین خطی، افت ولتاژ در باس مشترک به طور موثری کاهش می یابد بطوریکه می تواند از خروج سایر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]

فیدرهای متصل به باس مشترک که به نوسانات ولتاژ حساس می باشند، جلوگیری نماید.

- با نصب محدودساز جریان خطا، میزان نوسانات توان و همچنین سرعت مولدهای مقیاس کوچک متصل به باس مشترک، به طور موثری کاهش می یابد.
- با بکارگیری این محدودساز که صرفا از یک المان محدودساز استفاده می شود، دیگر نیازی به نصب جداگانه محدود ساز در هر فیدر نمی باشد. این موضوع باعث کاهش هزینه بکارگیری محدودساز در این شبکه می گردد.

سپاسگزاری

در اینجا لازم است تا از حمایت بی شائبه مدیر عامل محترم شرکت برق منطقه‌ای مازندران و گلستان و همچنین مدیران و کارشناسان محترم دفاتر برنامه ریزی فنی و تحقیقات که در خصوص انجام این کار پژوهشی مندرج در مقاله نقش ویژه داشتند، تشکر و قدردانی گردد.

مراجع

Chen, L. and etc. (September 2022). Coordination of adaptive virtual resistance controller and flux-coupling-type fault current limiter for LVRT fulfillment of virtual synchronous generator, Electric Power Systems Research, 210, 108112.

CIGRE WG A3.10 (2003). Fault Current Limiters in High Electrical Medium and Voltage Systems, CIGRE Technical Brochure, no. 239.

Elshiekh,M., Elwakeel, A. and etc.(October 2021) . Utilising SMES-FCL to improve the transient behaviour of a doubly fed induction generator DC wind system. International Journal Electrical Power Energy System, 131, 107099.

Firouzi, M., Gharehpetian, G. B. (June 2013) .Improving Fault Ride-Through Capability of Fixed-Speed Wind Turbine by Using Bridge-Type Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Energy Conversion, 28(2), 361–369.

Firouzi,M. (2018), A modified capacitive bridge-type fault current limiter (CBFCL) for LVRT performance enhancement of wind power plants,International Transactions on Electrical Energy Systems, 28(3), e2505.

Firouzi, M., Shafiee, M. R., Gharehpetian, G. B. (2020).Multi-Resistor Bridge-Type FCL for FRT Capability Improvement of DFIG-based Wind Farm, IET Energy System Integration,2(4),316-324.

Ghanbari, T., Farjah, E., Naseri, F. (October 2018).Power quality improvement of radial feeders using an efficient method, Electric Power Systems Research, 163, 140-153.

Heydary, A., Radmanesh, H., Rouzbehi, K. , Mehrizi-Sani, A., Gharehpetian, G. B.(October 2020). Inductive fault current limiters: A review, Electric Power Systems Research, 187, 106499.

IEEE Std 551™ (2006). IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Violet Book.

Jager, J., et. Al.(2008). Interaction Between Fault Current Limiters and Protection-A Glance at the Final Report of CIGRE WG-A3.16, IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century.

Javadi, H.(Mar. 2011).Fault Current Limiter using a Series Impedance Combined With Bus Sectionalizing Circuit Breaker, International Journal Electrical Power Energy System, 33(3), 731–736.

Kundor, P.(1994).Introduction to power system stability, Power System Dynamics Stability and Control, New York, McGraw Hill.

Naghibi, S. E., Mirzaie, M., Barforoshi, T.(May 2020). Interline bridge-type fault current limiter: A novel approach for limiting fault current in distribution network, International Transactions on Electrical Energy Systems, 30(5). e12326.

Schmitt, H. (16 October 2006).Fault Current Limiters Report on the Activities of CIGRE WG A3.16, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal.

Shafiee, M. R., Kartijkolaie, H. Sh. , Firouzi, M., Mobayen, S., Fekih, A. (20 November 2020).Dynamic Multi-Cell FCL to Improve the Fault Ride through Capability of DFIG-Based Wind Farms, Energies, *13*(22), 6071.

Sousa, W. T. B., Kottonau, D. , Karrari, Sh., Geisbüsch, J., Noe, M. (January 2021).Deployment of a Resistive Superconducting Fault Current Limiter for Improvement of Voltage Quality and Transient Recovery Voltage, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 31(1).

Thakur, P., Singh,A.K. (2013).A novel way to quantify the magnitude of voltage sag, Electrical Engineering, 95, 331–340.

Yousefi, H., Mirzaie, M., Aminifar, F.(2016) .Reliability Assessment of HV Substations Equipped with Fault Current Limiter Considering Changes of Failure Rate of Components, IET Generation, Transmission & Distribution, 10(7),1504 - 1509 .

Zolfaghari, M., Gilvanejad, M., Gharehpetian, G. B.(2020).A survey on fault current limiters: Development and technical aspects, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 118, 105729.

نقیبی، س. ا.، ملیجی، ف.، میرزایی، م.، بارفروشی، ت. (آبان ۱۳۹۷). جایابی بهینه محدودکننده جریان خطای مناسب شبکه برق منطقه‌ای مازندران و گلستان در سال ۱۴۰۳ به همراه مقایسه فنی و اقتصادی با روشهای مرسوم، سی و سومین کنفرانس بین‌المللی برق ایران، تهران.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1401.11.3.1.7]