

Impact of Type and Impedance Value of Fault Current Limiters on the Transient Stability of the Power System Taking in to Fault Clearing Time

Mahdi Dehghani-Ashkezari¹, Ph.D. Student, Seyed Mahmoud Modaresi², Assistant Professor, Seyed Amin Saied¹, Assistant Professor, Tahereh Daemi¹, Assistant Professor, Hamidreza Akbari, Assistant Professor

¹ Department of Electrical Engineering- Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran
² Department of Electrical Engineering- South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
m.dehghani@iauashkezar.ac.ir, m_modaresi@azad.ac.ir, saied@iauyazd.ac.ir, t.daemi@iauyazd.ac.ir, h.akbari@iauyazd.ac.ir

Abstract

In general, the basis of operation of most fault current limiters is to reduce the short-circuit current by adding a large impedance to the system at the time of the fault. However, fault current limiters differ in the type of impedance and how the impedance adds and removes the system. In this paper, taking into account three different locations for installing fault current limiter in a sample power network, as well as changing the type (inductance or resistance) and its impedance value in an extensive range, the effects of these parameters on the stability of the power system have been investigated and analyzed. The criterion used for the first time in this article by the authors to examine and evaluate the transient stability of the power system is the method of the difference between the accelerating and decelerating area. The basis of this method is based on the equal area criterion. Other issues addressed in this paper are presenting a method for locating and determining the optimal value of fault current limiter impedance to improve the stability of the power system. Also, the effect of fault clearing time on transient stability has been studied when the fault current limiter is present in the power grid.

Keywords: fault clearing time, fault current limiter, power system dynamic, power system stability, short circuit current, transient stability

Received: 30 December 2022

Revised: 30 March 2023

Accepted: 28 April 2023

Corresponding Author: Dr. Seyed Mahmoud Modaresi

Citation: M. Dehghani-Ashkezari, S.M. Modaresi, S.A. Saied, T. Daemi, H. Akbari,, "Impact of type and impedance value of fault current limiters on the transient stability of the power system taking in to fault clearing time", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 60, pp. 135-148, March 2025 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001>.....

مقاله پژوهشی

تاثیر نوع و میزان امپدانس محدودکننده‌های جریان خط بر پایداری گذرای سیستم قدرت با در نظر گرفتن زمان قطع کلید

مهدی دهقانی اشکذری^۱، دانشجوی دکتری، سید محمود مدرسی^۲، استادیار، سید امین سعید^۱، استادیار، طاهره دائمی^۱، استادیار، حمیدرضا اکبری^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق- واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

m.dehghani@iauashkezar.ac.ir, m_modaresi@azad.ac.ir, saied@iauyazd.ac.ir, t.daemi@iauyazd.ac.ir, h.akbari@iauyazd.ac.ir

چکیده: به‌طور کلی اساس عملکرد اغلب محدودکننده‌های جریان خط کاهش جریان اتصال کوتاه به وسیله واردکردن یک امپدانس بزرگ در مدار در زمان وقوع خطا است. محدودکننده‌های جریان خط در مورد نوع امپدانس و چگونگی وارد شدن و خارج شدن امپدانس به سیستم با هم متفاوت هستند. در این مقاله با در نظر گرفتن سه مکان مختلف جهت نصب محدودکننده جریان خط در یک شبکه قدرت نمونه و همچنین تغییر نوع (سلفی یا مقاومتی) و مقدار امپدانس آن در یک بازه بزرگ، اثرات این پارامترها بر پایداری سیستم قدرت مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. معیاری که برای اولین بار در این مقاله توسط نویسندگان جهت بررسی و ارزیابی پایداری گذرای سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته است، روش اختلاف بین سطح شتاب دهنده و شتاب گیرنده است. اساس این روش بر مبنای معیار سطوح برابر است. موارد دیگری که در این مقاله به آن پرداخته شده است یکی ارایه روشی جهت مکان‌یابی و تعیین مقدار بهینه امپدانس محدودکننده جریان خط جهت بهبود پایداری سیستم قدرت است. همچنین، اثر زمان رفع خطا بر پایداری گذرا، هنگام حضور محدودکننده جریان خط در شبکه قدرت، مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: پایداری سیستم قدرت، پایداری گذرا، جریان اتصال کوتاه، دینامیک سیستم قدرت، زمان رفع خطا، محدودکننده جریان خط

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۲/۸

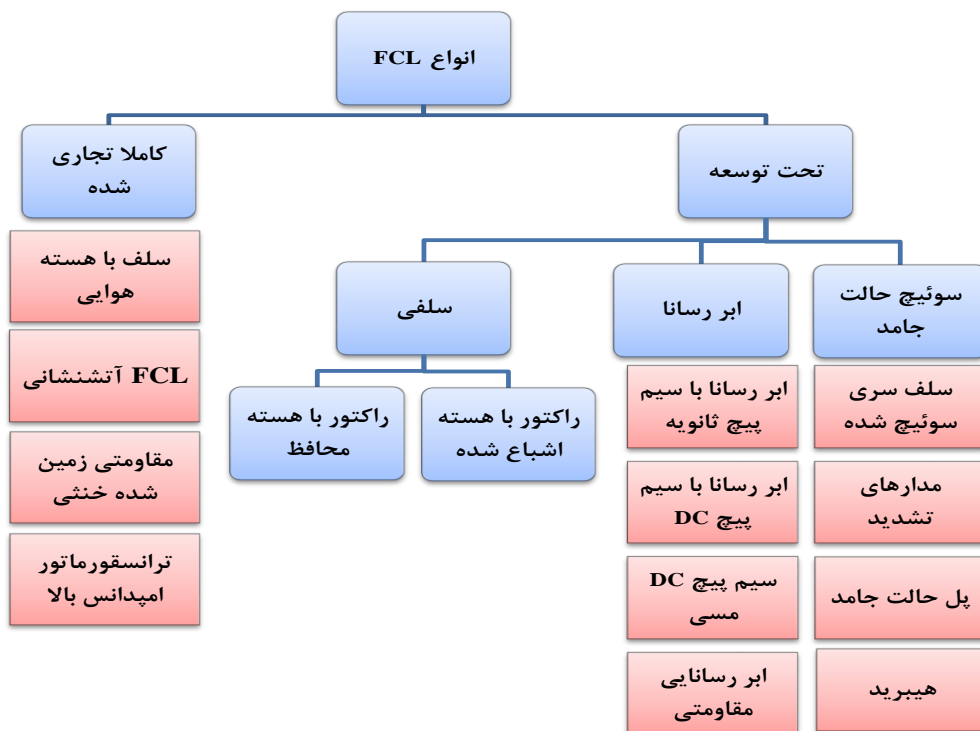
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید محمود مدرسی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- خیابان کریم خان زند- خیابان ایرانشهر شمالی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش اهمیت قابلیت اطمینان^۱ و انعطاف‌پذیری سیستم در مقابل خطا، نحوه عملکرد سیستم‌های توزیع در برنامه‌ریزی و مدیریت انرژی^۲ تغییر کرده است. با افزایش ظرفیت و پیچیدگی سیستم‌های الکتریکی، جریان خطای اتصال کوتاه بزرگ، یکی از عوامل اصلی تهدیدکننده ایمنی و پایداری سیستم‌های قدرت است. بنابراین، محدود کردن موثر جریان‌های خطای اتصال کوتاه در سیستم‌های الکتریکی بسیار مهم است. با توجه به محدودیت‌های عملیاتی قطع‌کننده‌های مدار با ظرفیت بالا^۳، یک محدودکننده جریان ابررسانا^۴ جایگزین خوبی است. در طول کارکرد عادی سیستم، محدودکننده جریان خطا^۵ (FCL) باید امیدانس خود را تا حد امکان پایین نگاه دارد. در این مرحله، اتلاف انرژی آن باید ناچیز باشد. با این حال، هنگامی که خطایی در سیستم رخ می‌دهد، این تجهیز وظیفه قرار دادن یک امیدانس سری در سیستم را بر عهده دارد تا مقدار جریان خطا را محدود کند. در شکل (۱) انواع مختلفی از FCLها معرفی شده است. در این میان، تنها تعداد کمی از این FCLها کاملاً تجاری هستند. سایر فناوری‌ها هنوز در دست توسعه هستند و طی سال‌ها یا دهه‌های گذشته توسط گروه‌های زیادی در سراسر جهان مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی برای انتخاب FCL فاکتورهای مختلفی مد نظر قرار می‌گیرد. در ادامه تعدادی از فاکتورهای مهم به صورت موردی بیان شده است: (الف) مقدار امیدانس کم در حین کارکرد منظم سیستم، که باعث اتلاف انرژی ناچیز در طول حالت پایدار می‌شود، (ب) زمان انتقال سریع از حالت عادی به حالت محدود. باید کمتر از ۰/۲۵ سیکل سیستم باشد، (ج) زمان بازیابی سریع پس از قطع شدن اتصال کوتاه، (د) هماهنگی کامل با سیستم حفاظتی موجود، (ه) قابلیت اطمینان و استحکام بالا، (ح) حجم و وزن کم تجهیز، (ط) هزینه نگهداری و بهره‌برداری پایین و (ی) تاثیر زیست محیطی کم.

افزایش مصرف و اتصال منابع تولیدپراکنده^۶ به شبکه باعث افزایش سطح اتصال کوتاه شبکه‌های برق می‌شود. وقوع خطا در چنین شبکه‌هایی منجر به جریان بالای اتصال کوتاه در سراسر سیستم شده که ممکن است از دامنه مجاز کلیدهای قدرت عبور کرده و به تجهیزات سیستم آسیب برساند. در مرجع [۱] متغیرهای طراحی یک FCL مکان، اندازه، محل و اندازه، تعداد و مکان، تعداد، محل و اندازه، اندازه و نوع و پارامترهای FCL بیان شده است. اندازه FCL به عنوان مقدار امیدانس تحت شرایط خطا تعریف شده [۲] و هزینه FCL معمولاً وقتی افزایش می‌یابد که اندازه آن افزایش می‌یابد.



شکل(۱): دسته بندی انواع مختلف محدودکننده‌های جریان خطا در مقاله‌های مختلف [۳]

Figure (1): Classification of different types of fault current limiter in articles [3]

مکان FCL، نقطه‌ای از یک سیستم قدرت است که در آن FCL متصل خواهد شد و دو نوع رویکرد قابل بررسی است: ارزیابی همه گره‌های شبکه بدون هیچ پیش فرضی [۴]، یا فقط امتیازهای خاص کاندیدای از پیش تعریف شده را ارزیابی می‌کند. در مرجع [۵] بیان شده که مکان بهینه برای FCLها در یک شبکه قدرت دارای چندین مزیت است که شامل افزایش قابلیت اطمینان و امنیت سیستم، کاهش جریان خطا و افت ولتاژ، بهبود شرایط عبور از خطا از طریق این قابلیت و افزایش اتصال انرژی تجدیدپذیر است. در مرجع [۶] یک روش چندهدفه برای بهینه‌سازی و به حداقل رساندن فاصله زمانی رله‌های جریان زیاد و شاخص نگهداری و همچنین کل هزینه مورد نیاز در حضور FCL پیشنهاد شده است. در این مرجع عنوان شده است که مکان و اندازه یک FCL را می‌توان بدون هیچ پیش فرضی به دست آورد.

امروزه با افزایش ظرفیت تولید و توسعه روز افزون سیستم‌های قدرت در جهت پاسخگویی به افزایش گسترده تقاضای مصرف انرژی الکتریکی احتمال وقوع اتصال کوتاه و همچنین سطح جریان اتصال کوتاه افزایش قابل توجهی داشته است. گستردگی این خطاها و همچنین مقدار جریان‌های خطای بزرگ باعث افزایش احتمال آسیب دیدگی تجهیزات سیستم قدرت می‌شود. همچنین این جریان‌های خطای بزرگ احتمال بروز ناپایداری و سایر صدمات حرارتی در شبکه‌های قدرت را افزایش می‌دهند [۷]. نیاز به تغییر مجدد تنظیمات رله‌ها^۷ و همچنین تعویض کلیدها به دلیل افزایش جریان‌های اتصال کوتاه باعث تحمیل هزینه‌های اضافی به سیستم قدرت خواهد شد [۸،۹]. حذف کامل همه خطاها در سیستم‌های قدرت امری غیرممکن و نشدنی است و حتی کاهش آنها نیز به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودنشان در برخی موارد غیرممکن است. کاهش اثرات مخرب خطا با کاهش جریان در حین خطا امکان‌پذیر است. برای داشتن عملکرد مداوم و حفظ قابلیت اطمینان سیستم قدرت لازم است جریان‌های اتصال کوتاه در مقادیر قابل قبول محدود شوند.

به منظور کاهش جریان اتصال کوتاه روش‌های متفاوتی استفاده می‌شود مانند ساختن پست‌های جدید، به‌کارگیری سطوح ولتاژ بالاتر در شبکه، شکافتن شین، مجزا نمودن زیر شبکه‌ها و یا اضافه کردن راکتور سری به شبکه قدرت [۱۰-۱۲]. استفاده از این روش‌ها باعث افزایش تلفات، افت ولتاژ شبکه و افزایش احتمال ناپایداری سیستم قدرت خواهد شد [۱۳،۱۴]. روش دیگری که امروزه به منظور کاهش جریان خطا استفاده می‌شود، محدودکننده‌های جریان خطا است [۱۵-۱۷]. اساس عملکرد این تجهیزات به این صورت است که در شرایط نرمال امپدانس آنها ناچیز و تقریباً برابر صفر است و در هنگام وقوع خطا با اضافه کردن یک امپدانس سری به سیستم (Z_{FCL})، باعث کاهش جریان‌های اتصال کوتاه می‌شوند. محدودکننده‌های جریان خطا با توجه به زمان و مکانیزم ورود و خروج امپدانس آنها به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. FCL حالت جامد سری یا موازی [۱۰،۱۴]، FCL مغناطیسی [۱،۱۸]، FCLهای ابررسانایی^۸ (SFCL) که در سال‌های اخیر به علت عملکرد بسیار سریع و مطلوبشان مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [۱۹-۲۲]. SFCLها به خصوص از نوع مقاومتی آن به دلیل گذر خیلی سریع از حالت با مقاومت ناچیز یا حالت ابر رسانا به حالت با مقاومت بالا به صورت خیلی سریع هر جریان خطایی را کاهش می‌دهند. در دو دهه اخیر مطالعات بسیار زیادی روی کاربرد SFCLهای با دمای بالا در سیستم‌های قدرت انجام شده و انواع متفاوتی از آنها طراحی شده است [۲۳].

از دیگر اثراتی که محدودکننده‌های جریان خطا بر سیستم قدرت دارند می‌توان به کاهش افت ولتاژ لحظه‌ای و حفاظت از تجهیزات هنگام وقوع خطا، تاثیر بر حفاظت شبکه به دلیل تغییر در امپدانس تونن سیستم، بهبود و یا بدتر شدن قابلیت اطمینان شبکه با توجه به نرخ خطای FCL، کاهش تنش‌های حرارتی و و دینامیکی تجهیزات سیستم قدرت، عدم نیاز به روز رسانی تجهیزات سیستم قدرت [۲۴]، کاهش جریان هجومی ترانسفورماتورها و همچنین تاثیر بر پایداری گذرای ژنراتورها اشاره نمود [۲۵،۲۶].

در به‌کارگیری FCLها در سیستم‌های قدرت باید عواملی همچون مقدار امپدانس بهینه آن، نوع امپدانس FCL از نظر مقاومتی یا سلفی بودن آن، زمان تاخیری ورود و خروج FCL در مسیر خطا هنگام وقوع و رفع خطا، مکان بهینه نصب آن و نیز مساله هماهنگی حفاظتی آنها با تجهیزات حفاظتی موجود در شبکه از قبیل ریکلوزرها و کلیدهای قدرت باید مد نظر قرار گیرد [۹]. اثرات مثبت FCL بر پایداری گذرای سیستم قدرت در مرجع‌های [۱۳] و [۲۷] مطالعه و نشان داده شده است. نکته‌ای که در مورد این مقاله مطرح است این است که در آنها از FCL سلفی صحبتی به میان نیامده است و صرفاً از FCL مقاومتی استفاده

شده است و همچنین تاثیر مقدار امپدانس FCL بر پایداری در بازه امپدانس محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. یعنی امپدانس FCL هایی که در این مطالعات جهت بررسی تاثیرگذاری بر پایداری گذرای شبکه استفاده شده‌اند، امپدانس‌های پایینی دارند. همچنین، در این مقاله‌ها اثر بازه‌های مختلف امپدانس FCL بر پایداری گذرای سیستم قدرت بررسی نشده است. در مرجع [۲۸] با انجام یک تحقیق مقایسه‌ای، تاثیر هر دو نوع FCL سلفی (XFCL) و FCL مقاومتی (RFCL) بر روی محدودسازی جریان اتصال کوتاه و پایداری گذرای سیستم قدرت مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این مقاله نشان داده است که هر دو نوع FCL سلفی و مقاومتی همواره باعث بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت می‌شوند که در این میان FCL مقاومتی اثر بخشی بهتری دارد. ولی در این مطالعه بازه تغییرات امپدانس FCL به صورت محدود و بسیار کوچک در نظر گرفته شده که این انتخاب امپدانس FCL در مقادیر پایین اهمی و عدم بررسی شرایط پایداری سیستم در FCL با امپدانس‌های بالاتر یکی از عیوب این تحقیق به شمار می‌آید. زیرا لزوماً نمی‌تواند منجر به نتایج قطعی برای همه سیستم‌ها باشد. ضمن آنکه در این تحقیق تاثیر زمان رفع خطا^۹ (t_c)، که می‌تواند یکی از پارامترهای موثر بر پایداری گذرای سیستم قدرت باشد در نظر گرفته نشده است.

در شرایط عادی شبکه، مقدار امپدانس FCL های سلفی و مقاومتی که در مسیر عبور جریان نصب شده‌اند برابر صفر است، اما به محض وقوع خطا، رفتار FCL های سلفی و مقاومتی به این صورت است که FCL مقاومتی که معمولاً از یک ابرهادی تشکیل شده است با افزایش جریان از یک حد معین، ابرهادی تبدیل به یک هادی معمولی شده و از خود یک مقاومت از پیش تعیین شده نشان می‌دهد. FCL های سلفی بر اساس خاصیت حفاظ مغناطیسی عمل می‌کنند. سیم پیچ محدودکننده توسط یک ماده ابررسانا محاط می‌گردد. در حالت عادی شبکه ابرهادی اجازه عبور فوران را نداده و لذا محدودکننده جریان خطا مقاومت ناچیزی را از خود نشان می‌دهد. با وقوع خطا با تبدیل ابرهادی به هادی معمولی فوران از بوبین محدودکننده عبور کرده و باعث می‌شود تا محدودکننده یک مقاومت بالایی را از خود نشان دهد. نحوه ورود و خروج FCL ها با توجه به نوع و ساختار آن متفاوت است و حتی امپدانس آنها در برخی از موارد متغیر است [۱۲].

در این مطالعه به صورت نظری-مقایسه‌ای تاثیر نوع FCL (سلفی، مقاومتی) و مقدار امپدانس آن در بازه‌های مختلف اهمی بر پایداری گذرای یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت^{۱۰} (SMIB) به وسیله کدنویسی در نرم‌افزار متلب مورد بررسی قرار داده شده است. به منظور بررسی تاثیر موقعیت FCL بر پایداری گذرا، سه مکان مختلف برای نصب FCL در نظر گرفته شده است و با فرض وقوع خطا در هر یک از نقاط ممکن روی خط انتقال ضمن فعال شدن دو FCL به صورت همزمان روی خطوط موازی، مناسبترین مکان نصب و مقدار بهینه امپدانس FCL به دست آمده است. همچنین در این تحقیق برای اولین بار اثر زمان رفع خطا بر پایداری گذرای سیستم قدرت با در نظر گرفتن هر یک از FCL های سلفی و مقاومتی بررسی و برای سه زمان قطع متفاوت کلیدهای قدرت مقایسه شده است. مساله دیگری که در این تحقیق به آن پرداخته شده بررسی تاثیر نصب FCL در بهبود پایداری سیستم قدرت در خطوط انتقال با نسبت R به X های مختلف است. به این صورت که برای بررسی این موضوع با نصب FCL در شرایط یکسان در خطوط با نسبت R به X های مختلف شرایط پایداری سیستم قدرت بررسی شده است.

این مقاله نشان می‌دهد که اگرچه در اکثر موارد هدف اصلی نصب FCL در شبکه‌های قدرت کاهش جریان‌های ناشی از خطای اتصال کوتاه است، اما این تجهیزات علاوه بر کاهش جریان خطا می‌توانند باعث بهبود وضعیت پایداری سیستم‌های قدرت شوند. جنبه بسیار مهم و جدیدی که برای اولین بار در این مقاله به آن پرداخته شده است، این است که در محاسبات مربوط به پایداری گذرای سیستم قدرت بازه مقدار امپدانس FCL محدود در نظر گرفته نشده است، تا نتایج به دست آمده در مورد نحوه تاثیر گذاری FCL بر پایداری گذرای سیستم قدرت جامع تر و کاملتر به دست آید. میزان و چگونگی تاثیرگذاری FCL ها بر پایداری سیستم قدرت با توجه مکان نصب، محل خطا، مقدار R/X خط انتقال، مقدار و نوع امپدانس FCL متفاوت است.

این مقاله شامل پنج بخش است. در بخش اول یا همان مقدمه در ابتدا کلیات موضوع بیان شده و به پیشینه تحقیق پرداخته شده است و ضمن بر شمردن کارهای مرتبط انجام شده در دیگر مقالات مواردی که در این مقاله به آن پرداخته شده است بیان شده است. در بخش دوم رابطه‌ها، شاخص و معیارهای استفاده شده در مقاله جهت بررسی پایداری گذرای سیستم قدرت بیان شده است. در بخش سوم مدار معادل سیستم قدرت مورد مطالعه معرفی شده است. در این بخش در ادامه با در نظر گرفتن مکان‌های مختلف وقوع خطا و همچنین تغییر محل نصب، نوع و مقدار امپدانس FCL شرایط پایداری سیستم قدرت بررسی شده

است. همچنین در این بخش تاثیر نسبت R به X خط انتقال با حضور FCL در خط انتقال بر پایداری گذرای سیستم قدرت بررسی شده است. در بخش چهارم تاثیر زمان رفع خطا هنگام حضور FCL در شبکه، بر پایداری گذرای سیستم قدرت بررسی شده است و در بخش پنجم نتایج و پیشنهادات ادامه تحقیق بیان شده است.

۲- معیار بررسی پایداری گذرای سیستم قدرت

برای شبیه‌سازی یک اغتشاش بزرگ، عموماً از خطای اتصال کوتاه سه فاز استفاده می‌شود. در این مقاله نیز منظور از خطا، اتصال کوتای سه فاز است. چنانچه پس از وقوع اغتشاش در سیستم قدرت و گذشت زمان، نوسانات زاویه‌ای رتور به صفر میل کند آن سیستم پایدار خواهد بود. معادله نوسان زاویه رتور ژنراتور برای یک سیستم تک ماشینه مطابق رابطه (۱) تعریف می‌شود که در آن δ اختلاف زاویه بین ولتاژ باس ژنراتور و ولتاژ باس بی نهایت، ω سرعت زاویه‌ای رتور، H ثابت اینرسی، D ضریب میرایی، P_m توان مکانیکی دریافت شده توسط ژنراتور و P_e توان الکتریکی انتقال یافته بین ژنراتور سنکرون و شین بینهایت است و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۸].

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega}{2H} \left(P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (1)$$

$$P_e = |E|^2 \cdot |Y_{11}| \cos \varphi_{11} + |E| \cdot |V| \cdot |Y_{12}| \cos(\delta - \varphi_{12}) \quad (2)$$

که در آن E نیروی محرکه ژنراتور سنکرون و V ولتاژ شین بی نهایت، Y_{11} و Y_{12} اندازه عناصر ماتریس ادمیتانس شبکه بین ژنراتور سنکرون و شین بی نهایت و φ_{11} و φ_{12} زاویه فاز عناصر ماتریس ادمیتانس شبکه هستند. شکل (۲) تغییرات توان الکتریکی متناظر با زاویه δ در یک سیستم تک ماشینه را قبل از وقوع خطا، در حین خطا و پس از رفع خطا که در جدول (۱) به اختصار معرفی شده‌اند را نشان می‌دهد.

قبل از وقوع خطا ژنراتور در نقطه A در حال کار است. در این نقطه توان الکتریکی با توان مکانیکی برابر است و زاویه رتور ژنراتور برابر δ_0 است. چنانچه خطای سه فاز متقارن در سیستم رخ دهد، نقطه کار ژنراتور از A به نقطه B که روی منحنی توان الکتریکی حین خطا قرار دارد منتقل می‌شود. در این زمان چنانچه توان الکتریکی از توان مکانیکی کمتر باشد ژنراتور شتاب گرفته و در غیر این صورت سرعت ژنراتور کاهش می‌یابد.

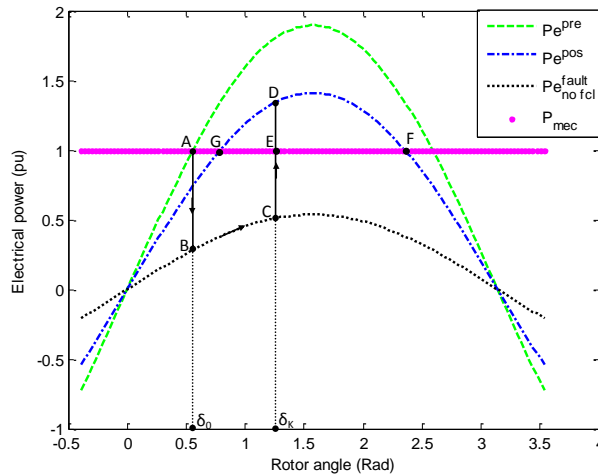
با توجه به شکل (۲) پس از وقوع خطا ژنراتور شتاب گرفته و δ افزایش می‌یابد. پس از گذشت زمان t_c ثانیه از وقوع خطا (زمان رفع خطا)، زاویه رتور به δ_c (زاویه رفع خطا) رسیده است. در این زمان بریکرها عمل کرده و خطا از سیستم برطرف می‌شود. به این ترتیب نقطه کار سیستم از نقطه C به نقطه D که روی منحنی توان الکتریکی پس از خطا قرار دارد منتقل می‌شود. در نهایت δ ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و حول نقطه G پس از چندین نوسان میرا می‌شود. بر اساس معیار سطوح برابر، چنانچه سطح شتاب گیرنده (سطح DEFD) بزرگ‌تر از سطح شتاب دهنده (سطح ABCEA) باشد، سیستم پایدار خواهد ماند و در غیر این صورت سیستم ناپایدار خواهد بود. نکته مهم آنکه مقدار δ_c به زمان رفع خطا وابسته بوده و تغییر در مقدار δ_c می‌تواند باعث تغییر در سطوح شتاب دهنده و شتاب گیرنده و در نتیجه تغییر در وضعیت پایداری سیستم شود.

برای محاسبه δ_c از روش نقطه به نقطه استفاده می‌شود. در این مقاله به منظور بررسی وضعیت پایداری سیستم از معیار شاخص ΔA استفاده می‌شود. در این شاخص تفاضل سطوح شتاب دهنده و شتاب گیرنده [(سطح ABCEA)-(سطح DEFD)] ΔA استفاده می‌شود. بر اساس این معیار هرچه شاخص ΔA منفی‌تر باشد سیستم ناپایدارتر و هرچه ΔA از صفر بزرگ‌تر باشد حاشیه پایداری سیستم افزایش می‌یابد.

Table (1): Introduction of abbreviations used

جدول (۱): معرفی نمادهای اختصاری استفاده شده

نماد اختصاری	p_e^{pre}	p_e^{fault}	p_e^{pos}
تعریف	توان الکتریکی قبل از وقوع خطا	توان الکتریکی حین خطا	توان الکتریکی بعد از خطا

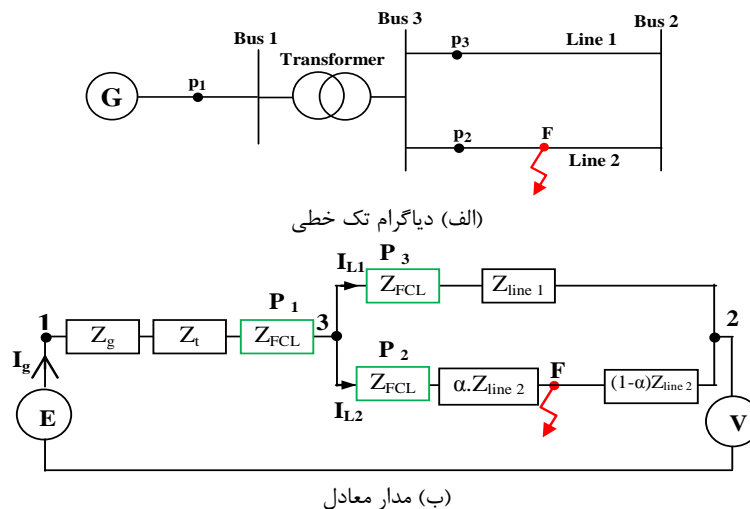


شکل (۲): تغییرات توان الکتریکی متناظر با زاویه رتور برای شرایط مختلف
Figure (2): Variation of electric power respected to rotor angle for different conditions

۳- تاثیر محدودکننده جریان خط سلفی و مقاومتی بر پایداری گذرا سیستم قدرت

شکل (۳-الف) یک سیستم استاندارد تک ماشین متصل به شین بینهایت (SMIB) را نشان می‌دهد. در این سیستم توان تولید شده توسط ژنراتور سنکرون به وسیله دو خط انتقال موازی، به باس بینهایت با ولتاژ V و زاویه صفر انتقال می‌یابد. در این شکل سه مکان مختلف P_1 ، P_2 و P_3 جهت نصب FCL در نظر گرفته شده است. مدار معادل این سیستم در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. در شکل (۳) نقطه F مکان خطا را نشان می‌دهد که به فاصله α از ابتدای شین ۱ در نظر گرفته شده است. مقدار α عددی بین صفر و یک است، به طوری مثال اگر α مساوی صفر باشد به معنی آن است که محل خطا در ابتدای خط ۲ است، اگر α مساوی ۱ باشد به معنی وقوع خطا در انتهای خط ۲ است و به همین ترتیب اگر α برابر 0.5 باشد یعنی خطا در وسط خط ۲ رخ داده است.

پارامترهای این سیستم قدرت در جدول (۲) با توان مبنای 100 مگاوات-آمپر آمده است [۲۸]. به منظور مدل کردن FCL، یک امپدانس سلفی یا مقاومتی خالص بلافاصله پس از وقوع خطا به صورت سری وارد مدار شده و پس از رفع خطا بلافاصله به شرایط عادی (ZFCL برابر صفر) باز می‌گردد. دو حالت نصب FCL در شبکه در نظر گرفته شده است، یکی قرارگیری FCL پس از ژنراتور و دیگری قرارگیری FCL در ابتدای خطوط انتقال. بر این اساس در این مقاله منظور از حالت اول قرار گرفتن یک FCL در موقعیت P_1 و منظور از حالت دوم قرار گرفتن دو FCL به طور همزمان در موقعیت‌های P_2 و P_3 است.



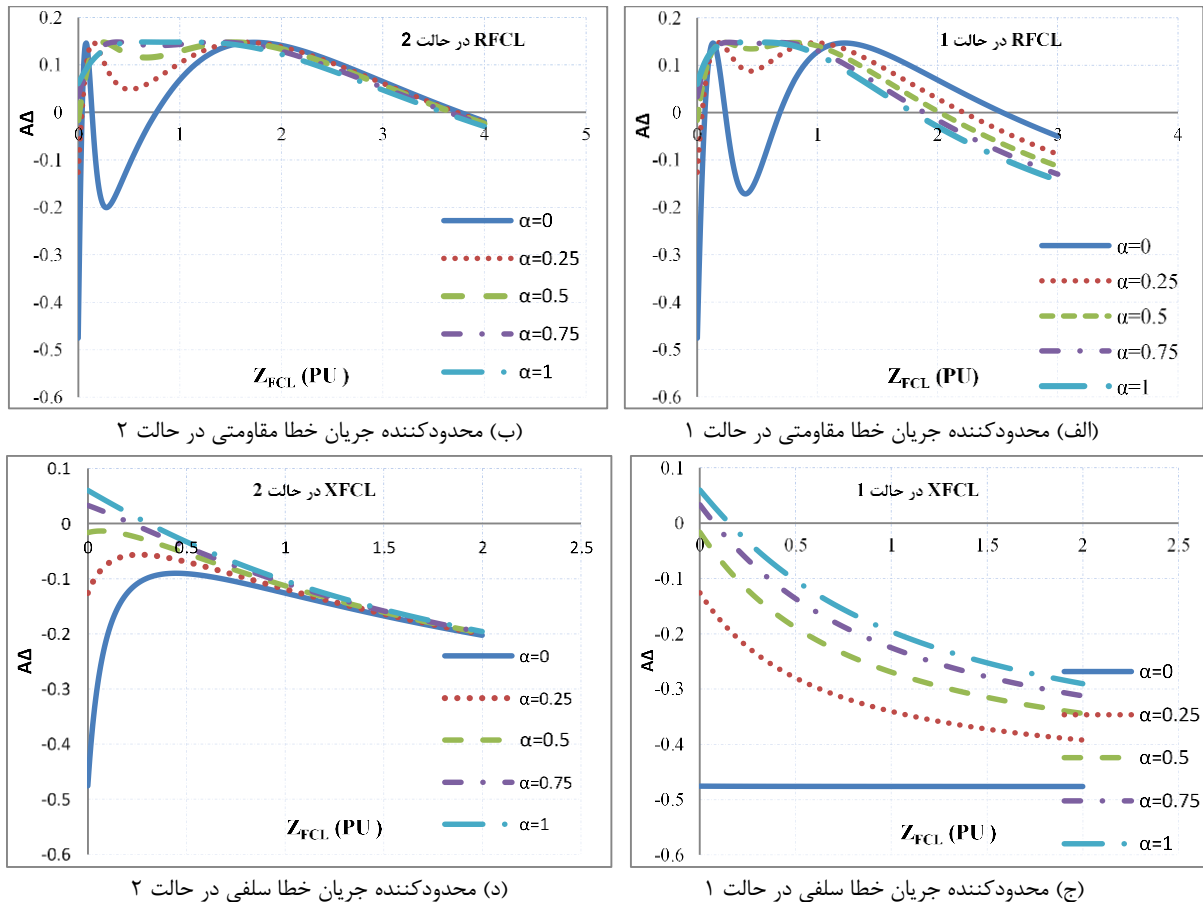
شکل (۳): سیستم قدرت مورد مطالعه
Figure (3): The studied power system, a) Single-line diagram, b) Equivalent circuit

Table (2): Parameters of the studied power system
جدول (۲): پارامترهای سیستم قدرت مورد مطالعه

تجهیز	ولتاژ نامی (کیلوولت)	توان نامی (کیلوولت-آمپر)	مقدار امپدانس (پریونیت)
ژنراتور	۲۲	۹۰	$j0.3$
ترانسفورماتور	۲۲/۱۱۰	۱۰۰	$j0.1$
خطوط انتقال	۱۱۰	---	$j0.5$

۱-۳- تاثیر مکان و امپدانس محدودکننده جریان خط بر پایداری گذرای سیستم قدرت (مکان‌های مختلف خط)
با فرض وقوع خط در فاصله α از ابتدای خط ۲، در ابتدا با استفاده از زمان رفع خطای در نظر گرفته شده و با استفاده از روش نقطه به نقطه، زاویه زمان رفع خطا (δ_c) به ازای امپدانس‌های مختلف FCL در هر یک از حالت‌های نصب ۱ و یا ۲ محاسبه می‌شود (در این قسمت زمان رفع خطا برابر با ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است). سپس روند تغییرات شاخص ΔA به ازای مقادیر مختلف امپدانس FCL (سلفی یا مقاومتی) برای α های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴) ملاحظه می‌شود در حالت بدون FCL، مقدار ΔA برای خط در α های ۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ منفی بوده که به معنای ناپایدار بودن سیستم است، و برای خط در α های ۰/۷۵ و ۱ مقدار ΔA مثبت بوده که به معنای پایدار بودن سیستم است. با نصب XFCL در شبکه مشاهده می‌شود با افزایش مقدار امپدانس FCL، ΔA شروع به کاهش می‌کند که به معنای کاهش حد پایداری سیستم است. هرچند در حالتی که XFCL در موقعیت P_2 و P_3 باشد (حالت ۲) برای خط در α های ۰ و ۰/۲۵ با افزایش امپدانس FCL، مقدار ΔA در ابتدا شروع به افزایش کرده ولی پس از مقداری خاص مجدد شروع به کاهش می‌کند و به این ترتیب حاشیه پایداری سیستم کاهش می‌یابد.

این موضوع برای FCLهای مقاومتی اندکی پیچیده است. ملاحظه می‌شود برای هر دو حالت نصب RFCL در سیستم (حالت‌های ۱ و ۲) در بازه‌ای از مقادیر امپدانس FCL، سیستم پایدار و در بازه دیگری از مقادیر، سیستم ناپایدار خواهد بود. به عنوان مثال ملاحظه می‌شود هنگام خطا در موقعیت α برابر صفر و در شرایطی که RFCL در حالت ۱ نصب شده باشد [شکل (۴- الف)] سیستم به ازای مقادیر امپدانس FCL، ۰/۷ تا ۰/۲۳ و ۰/۶۹ تا ۲/۵۴ پریونیت پایدار و برای سایر مقادیر امپدانس FCL مقدار ΔA کمتر از صفر بوده و سیستم ناپایدار می‌شود. برای نصب RFCL در حالت ۲ به ازای مقادیر امپدانس ۰/۰۴ تا ۰/۱۳ و ۰/۷۷ تا ۳/۷۶ پریونیت سیستم پایدار و برای سایر مقادیر امپدانس FCL مقدار ΔA کمتر از صفر بوده و سیستم ناپایدار می‌شود. نکته قابل توجه آن است که، اگر چه گستره مقادیر امپدانس مقاومتی که به ازای آنها سیستم پایدار است برای حالت ۲ نسبت به حالت ۱ بازه بزرگتری از مقادیر امپدانس را شامل می‌شود، ولی میزان ΔA ممکن است به ازای برخی از مقادیر امپدانس FCL برای حالت ۱ از حالت ۲ بزرگتر باشد، به عبارت دیگر حاشیه پایداری سیستم بیشتر باشد. این موضوع از آن جهت دارای اهمیت است که چنانچه مقدار امپدانس FCL بر اساس میزان کاهش جریان خطا انتخاب شود در آن صورت می‌توان با انتخاب نوع و مکان مناسب برای FCL همزمان با کاهش جریان خطا به پایدارترین حالت برای سیستم دست یافت. جدول (۳) بازه‌هایی از مقدار امپدانس FCL بر حسب پریونیت (نصب شده در حالت‌های ۱ و ۲) که به ازای آن سیستم پایدار است را برای وقوع خطا در α های مختلف نشان می‌دهد. نکته مهم دیگری که از شکل (۴) و جدول (۳) مشاهده می‌شود این است که چون عملاً سیستم هنگام وقوع خطا در هر نقطه‌ای از خط ۲ باید پایدار بماند لذا مقادیری از امپدانس FCL که به ازای آن در تمامی α ها، مقدار ΔA مثبت می‌شود می‌تواند به عنوان مقدار مناسب امپدانس FCL جهت حفظ پایداری سیستم در نظر گرفته شود. از این رو جهت رسیدن به این هدف یعنی پایدار ماندن سیستم برای خطا در تمامی α های مختلف باید بازه مقادیر امپدانس FCL به ازای کمترین و بیشترین (α برابر صفر و α برابر یک) مورد بررسی قرار گیرد و بازه‌هایی از امپدانس که در هر دو α به صورت مشترک سیستم پایدار است ملاک انتخاب امپدانس FCL قرار گیرد. به طور مثال با توجه به جدول (۳) اشتراک مقادیر مناسب امپدانس RFCL برای حالت ۱ بازه ۰/۰۷ تا ۰/۲۵ و ۰/۶۹ تا ۱/۷۹ پریونیت است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که اگر مساله کاهش جریان خطا نیز در سیستم دغدغه ما باشد باید مقدار امپدانس FCL را به گونه‌ای انتخاب نمود که به ازای همه مکان‌های خطا هم بیشترین کاهش جریان اتصال کوتاه حاصل شود و هم پایداری سیستم حفظ شود.



شکل (۴): تغییرات شاخص حاشیه پایداری بر حسب مقادیر امپدانس محدودکننده جریان خطا در مکان‌های مختلف خطا

Figure (4): Variations of stability margin index concerning fault current limiter impedance values in different fault locations, a) Resistive fault current limiter in mode 1, b) Resistive fault current limiter in mode 2, c) Inductive fault current limiter in mode 1, d) Inductive fault current limiter in mode 2

Table (3): System stability status when faults occur in different locations for FCL installation in modes 1 and 2

جدول (۳): وضعیت پایداری سیستم هنگام وقوع خطا در مکان‌های مختلف برای نصب محدودکننده جریان خطا در حالت‌های ۱ و ۲

محل نصب محدودکننده جریان خطا	نوع محدودکننده	فاصله خطا از ابتدای شین یک (α)				
		۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
۱	RFCL	۰/۰۷ تا ۰/۲۵	۲/۲۱ تا ۰/۵	۲/۰۱ تا ۰/۰۱	۱/۸۸ تا ۰	۱/۷۹ تا ۰
		۲/۵۴ تا ۰/۶۹	۲/۰۱ تا ۰/۰۱			
۲	RFCL	۰/۱۳ تا ۰/۰۴	۳/۷۲ تا ۰/۰۴	۳/۶۹ تا ۰/۰۲	۳/۶۴ تا ۰	۳/۵۹ تا ۰
		۳/۷۶ تا ۰/۷۷				
۱	XFCL	همیشه ناپایدار	همیشه ناپایدار	همیشه ناپایدار	۰/۰۷ تا ۰	۰/۱۵ تا ۰
۲	XFCL	همیشه ناپایدار	همیشه ناپایدار	همیشه ناپایدار	۰/۲۲ تا ۰	۰/۳ تا ۰

۲-۳- تاثیر نسبت مقاومت به راکتانس خط انتقال بر پایداری سیستم در حضور محدودکننده خطای جریان در این قسمت نسبت‌های ۰، ۰/۱ و ۰/۵ برای نسبت R/X خطوط انتقال در نظر گرفته شده است. برای مثال هرگاه R/X خط برابر ۰/۱ باشد به معنی آن است که مولفه اهمی امپدانس خط از مولفه موهومی آن ۱۰ برابر کمتر است. با این فرض که در این محاسبات اندازه امپدانس خطوط انتقال (Z) ثابت فرض شده است. جدول (۴) مقادیری از امپدانس FCL نصب شده در هر یک از حالت‌های ۱ یا ۲ که در آن به ازای مقادیر مختلف خط انتقال سیستم پایدار می‌ماند را نشان می‌دهد.

Table (4): Values of impedance FCL, that the system is stable in different R/X of the transmission line

جدول (۴): مقادیری از امپدانس محدودکننده جریان خطا که به ازای نسبت مقاومت به راکتانس‌های مختلف خط انتقال (سیستم پایدار)

نصب محدودکننده جریان		نسبت مقاومت به راکتانس خط انتقال		
حالت	نوع	۰	۰/۱	۰/۵
۱	RFC	۰/۰۷ تا ۰/۲۳ پریونیت ۰/۶۹ تا ۱/۷۹ پریونیت	۰/۵ تا ۰/۲۹ پریونیت ۰/۵۵ تا ۲/۴۹ پریونیت	به ازای همه مقادیر پایدار است
۲	RFC	۰/۰۴ تا ۰/۱۲ ۰/۸ تا بی‌نهایت	۰/۰۳ تا ۰/۱۵ ۰/۵۹ تا بی‌نهایت	به ازای همه مقادیر پایدار است
۱	XFCL	به ازای هیچ مقداری پایدار نیست	به ازای هیچ مقداری پایدار نیست	به ازای همه مقادیر پایدار است
۲	XFCL	۰/۲۹ تا بی‌نهایت	۰/۱۷ تا بی‌نهایت	به ازای همه مقادیر پایدار است

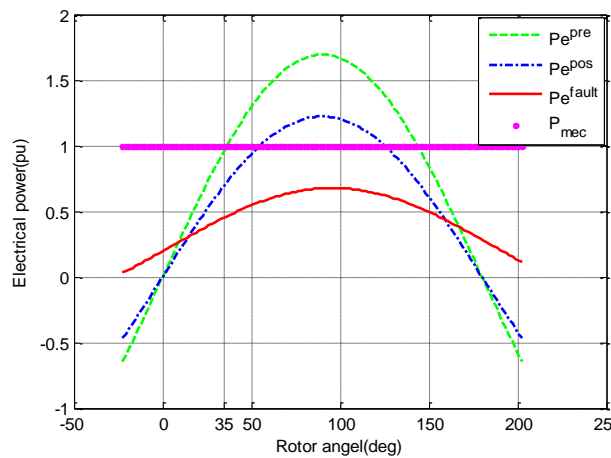
۴- تاثیر زمان رفع خطا (زمان کلید زنی) بر پایداری سیستم قدرت

محدودکننده‌های جریان خطا به محض وقوع خطا وارد شبکه شده و بلافاصله پس از رفع خطا از مدار خارج می‌شوند. بنابراین مقادیر ماتریس ادمیتانس سیستم قبل از وقوع خطا و پس از رفع خطا ثابت بوده و به مقدار امپدانس FCL وابسته نیستند. در نتیجه توان الکتریکی سیستم قبل از خطا و توان الکتریکی سیستم پس از خطا با تغییر موقعیت FCL و مقدار امپدانس آن ثابت هستند. حال آنکه مقادیر ماتریس ادمیتانس سیستم در حین خطا با تغییر مکان و میزان امپدانس FCL تغییر کرده و در نتیجه توان الکتریکی سیستم حین خطا، متغیر خواهد بود. به‌طور کلی با توجه به توپولوژی شبکه که متاثر از امپدانس خطوط انتقال و همچنین نوع و مقدار امپدانس FCL است، موقعیت منحنی توان الکتریکی سیستم حین خطا بر خلاف دو منحنی دیگر توان الکتریکی، یعنی توان الکتریکی پیش از خطا و توان الکتریکی پس از خطا متغیر خواهد بود. جهت بررسی تاثیر زمان رفع خطا بر پایداری گذرای سیستم قدرت با توجه به موقعیت منحنی توان الکتریکی حین خطا نسبت به منحنی‌های توان الکتریکی پس از خطا و P_m در لحظه کلید زنی و رفع خطا سه حالت ممکن است اتفاق بیافتد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

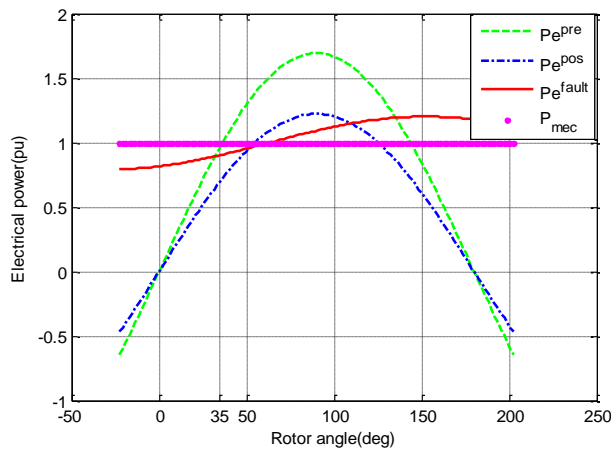
حالت اول: توان الکتریکی پس از خطا از توان الکتریکی حین خطا بزرگتر باشد- در این حالت مطابق شکل (۵) در زمان وقوع خطا در سیستم قدرت، منحنی توان الکتریکی حین خطا پایین‌تر از منحنی توان الکتریکی پس از خطا قرار گرفته است. به محض این‌که در سیستم قدرت خطایی اتفاق بیافتد، بر اساس آنچه که در قسمت دوم بیان شد، بلافاصله منحنی توان الکتریکی از روی منحنی توان الکتریکی پیش از خطا به روی منحنی توان الکتریکی حین خطا می‌افتد، در این حالت هر چه زمان رفع خطا کمتر باشد یعنی خطا با سرعت بیشتری برطرف شود منحنی توان الکتریکی سیستم زودتر به روی منحنی توان الکتریکی پس از خطا که در موقعیتی بالاتر از توان الکتریکی حین خطا قرار دارد جا به جا می‌شود. در نتیجه سطح شتاب دهنده، که همان مساحت محصور بین منحنی توان الکتریکی و زیر منحنی P_m است، کاهش یافته و در نتیجه آن شاخص ΔA که تفاضل بین سطح شتاب گیرنده و شتاب دهنده است، افزایش یافته و در نتیجه حاشیه پایداری سیستم بهبود می‌یابد.

حالت دوم: توان الکتریکی حین خطا از بعد از خطا بیشتر و از توان مکانیکی کمتر- در این حالت مقدار امپدانس FCL به گونه‌ای است که، توان الکتریکی سیستم در حین خطا از توان مکانیکی آن کمتر است ولی از توان الکتریکی سیستم پس از رفع خطا بیشتر است. در اینجا نیز بلافاصله پس از وقوع خطا، توان الکتریکی از روی منحنی توان الکتریکی پیش از خطا به روی منحنی توان الکتریکی حین خطا می‌افتد. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است در صورتی که خطا سریع برطرف شود منحنی توان الکتریکی سیستم زودتر به روی منحنی توان الکتریکی پس از خطا می‌افتد که از منحنی توان الکتریکی حین خطا پایین‌تر است، بنابراین سطح شتاب دهنده افزایش می‌یابد و باعث کاهش حاشیه پایداری سیستم می‌شود. حال آن‌که اگر خطا دیرتر برطرف شود و جابه‌جایی منحنی توان الکتریکی سیستم از روی منحنی توان الکتریکی حین خطا به روی منحنی توان الکتریکی پس از خطا با وقفه بیشتری صورت پذیرد، سطح شتاب دهنده کاهش یافته و حاشیه پایداری سیستم بهبود می‌یابد. نتیجه کلی این‌که، در مواقعی که هنگام وقوع خطا، توان الکتریکی حین خطا از توان الکتریکی پس از خطا بزرگتر و از P_m کوچک‌تر است، تا زمانی

که موقعیت منحنی‌ها نسبت به یکدیگر تغییر نکند هر چه کلید زنی کندتر و رفع خطا دیرتر انجام شود حاشیه پایداری سیستم افزایش خواهد یافت.

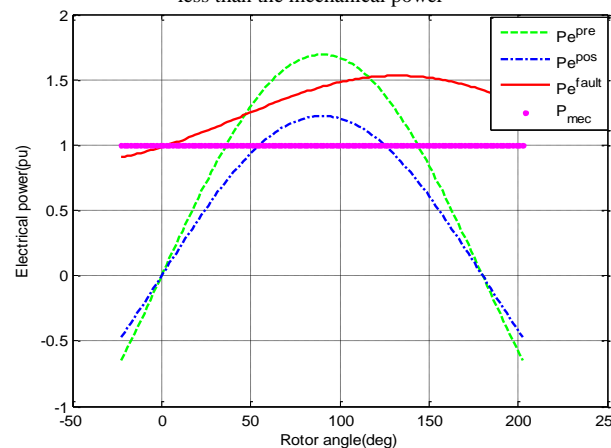


شکل (۵): تغییرات توان الکتریکی متناظر با زاویه رتور در حالتی که توان الکتریکی حین خطا از بعد از خطا کمتر است
Figure (5): Variation of electric power respected to the rotor angle when the electric power during the fault is less than after the fault



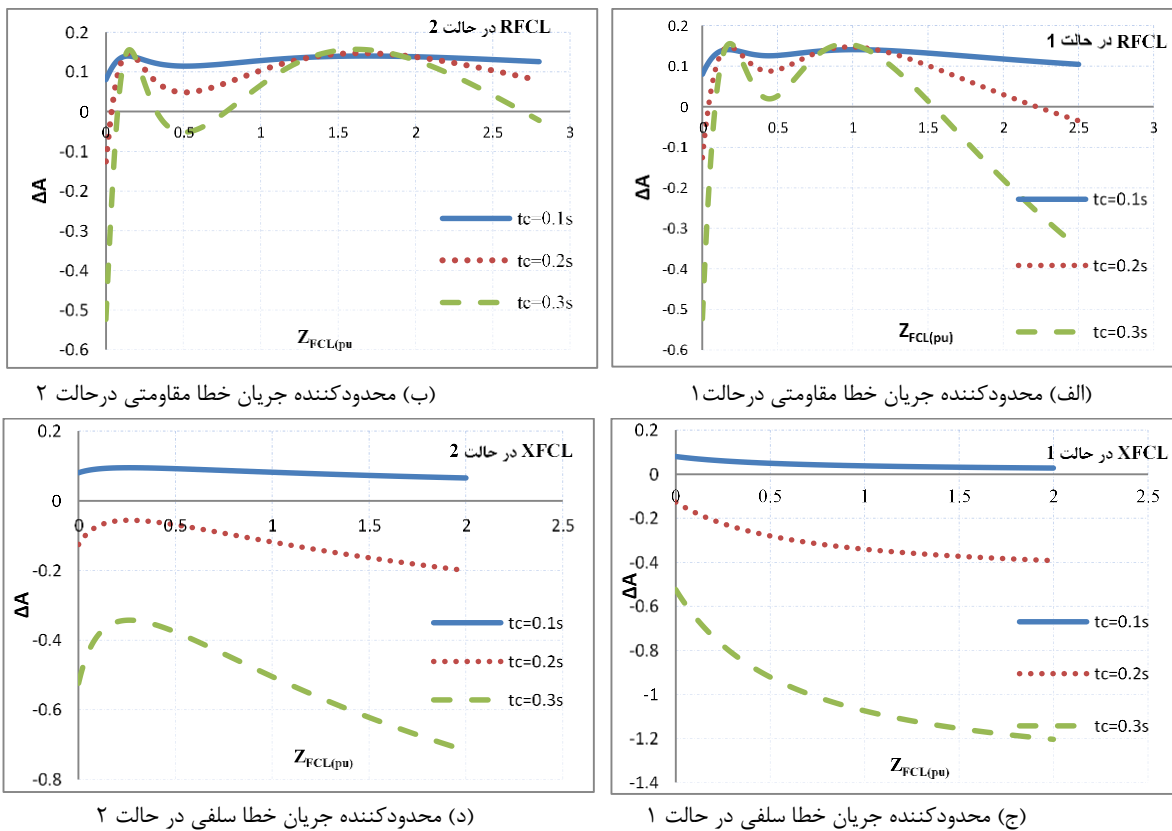
شکل (۶): تغییرات توان الکتریکی متناظر با زاویه رتور هنگامی که توان الکتریکی حین خطا از بعد از خطا بیشتر و از توان مکانیکی کمتر است

Figure (6): Variation of Electric power respected to the rotor angle when the electric power during the fault is more than the post fault and less than the mechanical power



شکل (۷): تغییرات توان الکتریکی متناظر با زاویه رتور وقتی که توان الکتریکی حین خطا از قبل از خطا بزرگتر است
Figure (7): Variation of electric power respected to the rotor angle when the electric power during the fault is greater than pre fault

حالت سوم: توان الکتریکی حین خطا از قبل از خطا بزرگ‌تر باشد- در این حالت مطابق شکل (۷) مقدار امپدانس FCL به گونه‌ای است که منجر می‌شود به این که منحنی توان الکتریکی حین خطا بالاتر از منحنی توان الکتریکی پس از خطا، منحنی توان الکتریکی پیش از خطا و منحنی توان مکانیکی قرار بگیرد. در اینجا نیز بلافاصله پس از وقوع خطا توان الکتریکی از منحنی توان الکتریکی پیش از خطا به روی منحنی توان الکتریکی حین خطا می‌افتد. با توجه به اینکه در این حالت مقدار توان الکتریکی نسبت به توان مکانیکی بیشتر است، سرعت ژنراتور و در نتیجه δ کاهش می‌یابد. مقدار کاهش δ بسته به پارامترهای سیستم و زمان رفع خطا، حتی ممکن است به گونه‌ای باشد که δ از مقدار اولیه نیز کمتر شود. نکته مهم‌تر آنکه با توجه به گشتاور کاهش دهنده شتاب، حتی پس از رفع خطا و به دلیل لختی ژنراتور، مقدار δ همچنان رو به کاهش می‌گذارد. تا این که در نقطه‌ای سرعت ژنراتور مجدداً برابر سرعت سنکرون شده و سپس سرعت ژنراتور و در نتیجه δ شروع به افزایش می‌کند. در اینجا چون شرایط FCL در سیستم قدرت باعث شده تا منحنی توان الکتریکی حین خطا بالاتر از بقیه منحنی‌ها قرار بگیرد. از این رو در این حالت مقدار ΔA می‌تواند حتی کوچک‌تر از حالت بدون FCL شده که حد پایداری سیستم را کاهش داده و منجر به کاهش ناحیه پایداری سیستم پس از وقوع خطا می‌شود. برای بررسی تاثیر زمان رفع خطا بر پایداری گذرای سیستم قدرت، تغییرات ΔA به ازای زمان‌های قطع کلید ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ ثانیه برای سیستم در حضور FCL‌های مقاومتی و سلفی برای حالت‌های ۱ و ۲ در شکل‌های زیر نشان داده شده است (با فرض اینکه R/X خط برابر صفر و خطا در α مساوی ۰/۲۵ اتفاق افتاده است). همان‌طور که در شکل‌های (۸-ج) و (۸-د) مشاهده می‌شود هرگاه از FCL سلفی نصب شده در هر دو حالت ۱ یا ۲ استفاده شده است، هرچه زمان رفع خطا کمتر باشد (t_c کوچک‌تر) پایداری گذرای سیستم بهبود می‌یابد. این موضوع در اکثر موارد برای FCL‌های مقاومتی نیز صادق است. یعنی هر چه رفع خطا سریع‌تر انجام شود احتمال پایدار ماندن سیستم بعد از رفع خطا بیشتر است. ولی یک نکته متفاوت در مورد FCL‌های مقاومتی وجود دارد و آن این که در برخی از مقادیر امپدانس FCL، علی‌الرغم آن که رفع خطا کندتر انجام شده (t_c بیشتر) ولی مقدار ΔA سیستم بزرگ‌تر بوده و در نتیجه حاشیه پایداری سیستم بهبود یافته است.



شکل (۸): تغییرات شاخص حاشیه پایداری برحسب امپدانس محدودکننده جریان خطا به ازای زمان‌های مختلف رفع خطا

Figure (8): Variations of stability margin index in terms of fault current limiter impedance in different fault clearing time, a) Resistive fault current limiter in mode 1, b) Resistive fault current limiter in mode 2, c) Inductive fault current limiter in mode 1, d) Inductive fault current limiter in mode 2

برای مثال در شکل (۸- الف) چنانچه امیدانس FCL در بازه ۰/۱۶ تا ۰/۲۳ و ۰/۸۱ تا ۱/۰۶ پریونیت باشد، مقدار ΔA به ازای زمان ۰/۳ ثانیه بزرگ‌تر از مقدار ΔA به ازای زمان‌های ۰/۱ و ۰/۲ ثانیه خواهد بود. این یعنی اینکه زمان رفع خطای کمتر لزوماً منجر به بهترین نتیجه برای پایداری گذرای سیستم نمی‌شود بلکه در برخی موارد افزایش زمان رفع خطا، حاشیه پایداری سیستم را نیز بهبود خواهد داد. دلیل اصلی این اتفاق، تغییر توپولوژیکی است که به واسطه حضور FCL هنگام حضور خطا در سیستم قدرت، ایجاد شده است. به این صورت که FCL منحنی P_e را هنگام وقوع خطا در سیستم تغییر می‌دهد به گونه‌ای که به ازای برخی مقادیر امیدانس FCL، بر خلاف شرایط عادی با افزایش زمان رفع خطا سطح شتاب دهنده کاهش و سطح شتاب گیرنده افزایش می‌یابد. به تبع آن مقدار ΔA افزایش یافته و شرایط پایداری سیستم بهبود می‌یابد. این موضوع در شکل (۸-ب) نیز صادق است به طوری که در بازه‌های امیدانسی ۰/۱۳ تا ۰/۱۸ و ۱/۳۳ تا ۱/۸۷ پریونیت به ازای t_e برابر ۰/۳ ثانیه مقدار ΔA بزرگ‌تر از زمان‌های کلیدزنی ۰/۲ و ۰/۳ ثانیه است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور مقایسه تاثیر دو نوع FCL سلفی و مقاومتی بر پایداری گذرای سیستم قدرت یک تحلیل کیفی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بر خلاف سایر مطالعه‌های انجام شده، هر دو نوع FCL سلفی و مقاومتی، با توجه به موقعیت و میزان امیدانس آنها هم می‌توانند باعث بهبود پایداری و هم باعث کاهش پایداری گذرای سیستم قدرت شوند. هر چند نوع سلفی در اغلب موارد موجب کاهش پایداری سیستم خواهد شد. بررسی و تجزیه و تحلیل کیسهای مختلف امیدانس FCL نشان می‌دهد که نمی‌توان به صورت مطلق امیدانس و مکان خاصی از FCL را نسبت به دیگری ترجیح داد. به طوری که در برخی مقادیر امیدانس، RFCL در حالت ۱ از نظر ماکزیمم حاشیه پایداری گذرای سیستم بهترین گزینه است و در مقادیر دیگری از امیدانس، RFCL در حالت ۲ و در مقادیری دیگر XFCL در حالت ۲ می‌تواند بهترین گزینه باشد. هر چند RFCL در حالت ۱ نسبت به سایرین، در بازه بزرگ‌تری از امیدانس، دارای حاشیه پایداری ماکزیمم برای پایداری گذرای سیستم خواهد بود. نکته مهم دیگر آن است که اگر چه به صورت معمول افزایش زمان رفع خطا باعث کاهش پایداری گذرای سیستم می‌شود، ولی برای بازه‌هایی از امیدانس مقاومتی FCL، افزایش زمان رفع خطا حتی می‌تواند باعث افزایش حاشیه پایداری سیستم شود. از این رو t_e نیز در کنار پارامترهایی نظیر نوع و مقدار امیدانس FCL در وضعیت پایداری و میزان حاشیه پایداری گذرای سیستم موثر است. با مقایسه نتایج به دست آمده از وضعیت پایداری سیستم قدرت مورد مطالعه با نسبت R به Xهای مختلف، این نتیجه به دست می‌آید که هر چه خط انتقال اهمی‌تر باشد یعنی نسبت R/X خط بزرگ‌تر باشد، نصب FCL در شرایط یکسان نتایج بهتری را در بهبود پایداری سیستم قدرت به وجود می‌آورد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] H. Schmitt, "Fault current limiters report on the activities of CIGRE WG A3.16", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-5, Montreal, QC, Canada, June 2006 (doi: 10.1109/pes.2006.1709205).
- [2] M.R. Barzegar-Bafrooei, A.A. Foroud, "Investigation of the performance of distance relay in the presence of saturated iron core SFCL and diode bridge type SFCL", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 29, no. 2, Article Number: e2736, Feb. 2019 (doi: 10.1002/etep.2736).
- [3] G.G. Sotelo, G. Santos, F. Sass, B.W. França, D.H.N. Dias, M.Z. Fortes, A. Polasek, R.A. Jr, "A review of superconducting fault current limiters compared with other proven technologies", Superconductivity, vol. 3, Article Number: 100018, Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.supcon.2022.100018).
- [4] M.T. Hagh, S.B. Naderi, M. Jafari, "New resonance type fault current limiter", Proceeding of the IEEE/ICPE,

- pp. 507-511, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov./Dec. 2010 (doi: 10.1109/pecon.2010.5697635).
- [5] S.P. Valsan, K.S. Swarup, "High-speed fault classification in power lines: Theory and FPGA-based implementation", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1793–1800, 2009 (doi: 10.1109/tie.2008.2011055).
- [6] P. Rodriguez, A. V Timbus, R. Teodorescu, M. Liserre, F. Blaabjerg, "Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2583–2592, Oct. 2007 (doi: 10.1109/tie.2007.899914).
- [7] S.M. Modaresi, H. Lesani, "Analysis of the effect of location and failure rates of fault current limiters on substations reliability", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 27, no. 11, Article Number: e2379, Nov. 2017 (doi: 10.1002/etep.2379).
- [8] D. Cvoric, S.W.H. Haan, J.A. Ferreira, Z. Yuan, M.V. Riet, J. Bozelie, "New three-phase inductive FCL With common core and trifilar windings", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2246–2254, Oct. 2010 (doi: 10.1109/tpwrd.2010.2051688).
- [9] M. Naseh, "Optimization of recloser-fuse coordination by considering distributed generation and FCL", *Proceedings of the IEEE/IPAPS, Zahedan, Iran*, Jan. 2022 (doi: 10.1109/IPAPS55380.2022.9763264).
- [10] H. Javadi, "Fault current limiter using a series impedance combined with bus sectionalizing circuit breaker", vol. 33, no. 3, pp. 731-736, March 2011 (doi: 10.1016/j.ijepes.2010.11.023)..
- [11] M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, I. Rahmati, "Reliability study of HV substations equipped with the fault current limiter", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 610–617, April 2012 (doi: 10.1109/tpwrd.2011.2179122).
- [12] M. Modaresi, H. Lesani, "New method to determine optimum impedance of fault current limiters for symmetrical and/or asymmetrical faults in power systems", *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 297–307, April 2018 (doi: 10.1631/fitee.1601689).
- [13] G. Didier, J. Lévêque, A. Rezzoug, "A novel approach to determine the optimal location of SFCL in electric power grid to improve power system stability", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 978-984, May 2013 (doi: 10.1109/TPWRS.2012.2224386).
- [14] S.B. Naderi, M. Jafari, M. Tarafdar-Hagh, "Parallel-resonance-type fault current limiter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2538–2546, July 2013 (doi: 10.1109/tie.2012.2196899).
- [15] M. S.E. Moursi, R. Hegazy, "Novel technique for reducing the high fault currents and enhancing the security of ADWEA power system", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 140–148, Feb. 2013 (doi: 10.1109/tpwrs.2012.2207746).
- [16] A. Heidary, H. Radmanesh, K. Rouzbehi, A. Mehrizi-Sani, G.B. Gharehpetian, "Inductive fault current limiters: A review", *Electric Power Systems Research*, vol. 187, Article Number: 106499, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106499).
- [17] S. Robak, K. Grysztanowicz, M. Piekarz, M. Polewaczyk, "Transient stability enhancement by series braking resistor control using local measurements", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 112, pp. 272–281, Nov. 2019, (doi: 10.1016/j.ijepes.2019.05.015).
- [18] S.C. Mukhopadhyay, M. Iwahara, S. Yamada, F.P. Dawson, "Investigation of the performances of a permanent magnet biased fault current limiting reactor with a steel core", *IEEE Trans. on Magnetic*, vol. 34, no. 4, pp. 2150–2152, July 1998 (doi: 10.1109/20.706833).
- [19] M.R. Barzegar-Bafrooei, A.A. Foroud, J.D. Ashkezari, M. Niasati, "On the advance of SFCL: A comprehensive review", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, no. 17, pp. 3745–3759, Sept. 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6842).
- [20] K.B. Yadav, A. Priyadarshi, S. Shankar, V. Rathore, "Study of fault current limiter- A survey", *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 97–113, July 2020 (doi: 10.1007/978-981-15-4692-1_8).
- [21] G. Didier, C.H. Bonnard, B. Douine, J. Leveque, "Power system stability improvement with superconducting fault current limiter", *Proceeding of the IEEE/CISTEM*, pp. 1-6, Tunis, Tunisia, Nov. 2014 (doi: 10.1109/cistem.2014.7076971).
- [22] S. Alaraifi, M.S.E. Moursi, H.H. Zeineldin, "Optimal allocation of HTS-FCL for power system security and stability enhancement", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4701–4711, Nov. 2013 (doi: 10.1109/tpwrs.2013.2273539).
- [23] J. Zhu, Y. Zhu, D. Wei, C. Liu, G. Lv, P. Chen, K. Ding, H. Qin, W. Yang, "Design and evaluation of a novel non-inductive unit for a high temperature superconducting fault current limiter (SFCL) with bias magnetic field", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 5, pp. 1–4, Aug. 2019 (doi: 10.1109/tasc.2019.2898518).
- [24] S. Das, A. B. Choudhury, T. Santra, "Analysis of magnetic fault current limiter for faults initiating at different positions of a current waveform", *Proceeding of the IEEE/ICICSP*, pp. 1-5, Hyderabad, India, July 2022 (doi: 10.1109/icicsp53532.2022.9862481).
- [25] Z. Hong, J. Sheng, L. Yao, J. Gu, Z. Jin, "The structure, performance and recovery time of a 10 kV resistive

- type superconducting fault current limiter”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3, pp. 5601304-5601304, June 2013 (doi: 10.1109/tasc.2012.2231899).
- [26] J.G. Lee, U.A. Khan, J.S. Hwang, J.K. Seong, W.J. Shin, B.B. Park, B.W. Lee, “Assessment on the influence of resistive superconducting fault current limiter in VSC-HVDC system”, Physica C: Superconductivity and its Applications, vol. 504, pp. 163–166, Sept. 2014 (doi: 10.1016/j.physc.2014.03.019).
- [27] M. Tsuda, Y. Mitani, K. Tsuji, K. Kakihana, “Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 2122–2125, March 2001 (doi: 10.1109/77.920276).
- [28] G. Didier, C.H. Bonnard, T. Lubin, J. Lévêque, “Comparison between inductive and resistive SFCL in terms of current limitation and power system transient stability”, Electric Power Systems Research, vol. 125, pp. 150–158, Aug. 2015 (doi: 10.1016/j.epsr.2015.04.002).

زیر نویس ها

1. Reliability
2. Energy management
3. High capacity circuit breakers
4. Superconducting
5. Fault current limiter
6. Distributed generation sources
7. Relay settings
8. Superconducting fault current limiter
9. Clearing time
10. Single machine infinite bus