

## جایابی محدود کننده جریان خطا به روش تصمیم‌گیری فازی در پست‌های فشار قوی

حسین یوسفی گل‌افشانی<sup>۱</sup>، محمد میرزائی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشگاه صنعتی بابل- بابل- ایران

h.yosefy@stu.nit.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی بابل- بابل- ایران

mirzaie@nit.ac.ir

**چکیده:** حفاظت تجهیزات پست‌های فشار قوی به عنوان نقطه‌ای استراتژیک در شبکه قدرت همواره مورد توجه طراحان شبکه بوده است. با افزایش ظرفیت تولید و اتصال شبکه‌های مجاور به یکدیگر سطح جریان خطا افزایش خواهد یافت. این تغییرات به افزایش احتمال تخریب تجهیزات پست‌های فشار قوی منجر خواهد شد. بنابراین، محدود کننده‌های جریان خطا برای امکان پاک‌سازی سریع و مطمئن خطا استفاده می‌شوند. در این مقاله، طرح بهره‌برداری بهینه از محدود کننده جریان خطا در پست‌های فشار قوی بر مبنای معیارهای کاهش سطح جریان خطا و تغییر شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی می‌شود. این دو معیار به منظور مقایسه مکان‌های مختلف برای تخصیص محدود کننده جریان خطا در پست‌های فشار قوی به‌کار می‌رود. در انتها، از روش تصمیم‌گیری فازی، که برای حل مسائل چند معیاری با ماهیت متفاوت مناسب است، برای تعیین مکان بهینه محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد مطالعه، استفاده خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** پست‌های فشار قوی، شاخص‌های قابلیت اطمینان، روش فازی، محدود کننده جریان خطا

### ۱- مقدمه

جریان خطا که در تعیین ظرفیت قطع کلیدهای قدرت بسیار موثر است از جمله عواملی است که باید مورد توجه طراحان پست‌های فشار قوی قرار گیرد. با توسعه شبکه‌های برق و احداث واحدهای تولیدی جدید در برابر افزایش تقاضا و همچنین، اتصال شبکه‌های مجاور برای بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان و کیفیت توان، سطح جریان خطا در فیدرهای پست‌های فشار قوی افزایش خواهد یافت. با افزایش سطح جریان خطا و تجاوز آن از ظرفیت قابل قطع کلیدهای قدرت، تعویض کلیدهای قدرت امری ضروری خواهد بود. با افزایش ظرفیت قابل قطع کلیدهای قدرت هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین، کاربرد روش‌هایی برای کاهش سطح جریان خطا در پست‌های فشار قوی امری ضروری به نظر می‌رسد [۱].

طراحی پست‌های فشار قوی و بهره‌برداری از آن بخش بزرگی از هزینه‌های شبکه‌های قدرت را شامل می‌شود. اما طراحی پست‌های فشار قوی تنها با این دیدگاه نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای متنوع نظیر شرایط وقوع خطا باشد. طراحی پست‌های فشار قوی تنها با توجه به دیدگاه یاد شده به وقفه‌های متعدد و طولانی مدت در پخش توان منجر می‌شود که از دید مصرف کننده نامطلوب است. سطح

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۰۵/۲۸

نام نویسنده مسئول : حسین یوسفی گل افشانی

نشانی نویسنده مسئول : ایران - بابل - دانشگاه صنعتی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

## ۲- محدودسازی جریان خطا در پست‌های

### فشار قوی

به لحاظ شینه‌بندی، آرایش‌های مختلفی از پست‌های فشار قوی وجود دارد. تفاوت آرایش‌های موجود به لحاظ دو شاخص اساسی قابلیت اطمینان و هزینه سرمایه‌گذاری است. برخی آرایش‌ها از قبیل پست‌های یک و نیم کلیدی و دو کلیدی دارای قابلیت اطمینان بالاترند ولی هزینه احداث بالایی دارند. از این آرایش‌ها معمولاً برای پست‌های با اهمیت بالا که وقفه در تحویل توان حتی برای مدت کوتاه از دید مصرف‌کننده نامطلوب است استفاده می‌شود. در مقابل آرایش‌های ساده دارای قابلیت اطمینان کمتر و هزینه احداث پایین‌تری است و برای پست‌هایی که قطع تحویل توان در مواقع اضطراری برای آن‌ها قابل تحمل است استفاده می‌شود.

افزایش سطح جریان اتصال کوتاه، می‌تواند ضمن ایجاد تنش حرارتی شدید و بیش از حد تحمل تجهیزات و هادی‌های الکتریکی، تخریب آن‌ها را به همراه داشته باشد. افزون بر این، جریان اتصال کوتاه می‌تواند تنش‌های مکانیکی شدیدی را نیز بر سیستم عایقی تجهیزات فشار قوی (عایق‌های جامد) اعمال کند. اگرچه ممکن است تنش‌های مکانیکی ناشی از اتصال کوتاه، موجب تخریب آبی عایق‌های تجهیزات فشار قوی نشود؛ اما، به تدریج و در طول مدت بهره‌برداری می‌تواند ضمن پیری عایق تجهیزات، تخریب و خروج آن‌ها را از شبکه میسر سازد. بنابراین، نصب محدودکننده جریان خطا در پست‌های فشار قوی می‌تواند ضمن کمک به کلیدهای قدرت، برای رفع سریع و مطمئن خطا، محافظت تجهیزات را نیز منجر شود.

## ۳- الگوی پیشنهادی برای جایابی محدود

### کننده جریان خطا

الگوی ارائه شده در این مقاله برای جایابی بهینه محدود کننده جریان خطا در پست‌های فشار قوی با آرایش‌های مختلف و با ملاحظه سطح جریان خطا قابل اجراست. در این مقاله، الگوی پیشنهادی برای نمونه بر روی آرایش پست

برای محدودسازی جریان خطا معمولاً از جداسازی مسیر شین‌ها و ترانسفورماتورهای با امپدانس بالا استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر با سرمایه‌گذاری که توسط نهادهای دولتی و خصوصی در کشورهای مختلف در زمینه تکنولوژی‌های محدود کننده جریان خطا (FCL) انجام شده است، پیشرفت‌های زیادی در این زمینه حاصل شده است که نتایج آن را می‌توان در تعداد در خور توجه مقالات و نشریات به چاپ رسیده مشاهده کرد [۲-۵]. محدود کننده‌های جریان خطا تجهیزاتی با امپدانس متغیر هستند که در شرایط عادی شبکه امپدانس از خود نشان نمی‌دهند ولی در شرایط خطا امپدانس قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند [۵]. امروزه تکنولوژی‌های مختلفی از محدود کننده‌های جریان خطا ارائه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به محدود کننده‌های جریان خطای ابرسانا [۶]، نیمه هادی [۷] و مغناطیسی [۸] اشاره کرد.

در [۹]، قابلیت اطمینان محدود کننده جریان خطا به عنوان یک تجهیز و با مطالعه ساختار درونی آن بررسی شده است. در [۱۰]، انواع نرخ خرابی محدود کننده جریان خطا مطالعه شده است. مطالعات قابلیت اطمینان آرایش‌های مختلف پست فشار قوی در حضور محدود کننده جریان خطا در [۱۱] بررسی شده است؛ اما، اشاره‌ای به اثر مکان محدود کننده بر شاخص‌های قابلیت اطمینان نشده است. جایابی محدود کننده جریان خطا در شبکه توزیع با توجه به سطح محدودسازی جریان خطا و بدون در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان در [۱۲] بررسی شده است.

هدف از این مقاله، ارائه روشی برای جایابی بهینه محدود کننده جریان خطا در پست‌های فشار قوی است. برای این امر از معیارهایی نظیر سطح محدودسازی جریان خطا و شاخص‌های قابلیت اطمینان استفاده شده است. همچنین، از روش تصمیم‌گیری فازی، که روشی مناسب برای حل مسائل با معیارهایی با ماهیت متفاوت است، برای تعیین مکان بهینه محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد مطالعه، استفاده شده است.

برای جابجایی محدود کننده جریان خطا استفاده شده است. نصب محدود کننده جریان خطا در مکان‌های مختلف می‌تواند با هدف بهبود عملکرد کلیدهای قدرت و یا محافظت تجهیزات در مقابل جریان اتصال کوتاه انجام گیرد. حضور محدود کننده جریان خطا در مکان‌های مختلف به لحاظ محدودسازی جریان خطای مجموع و جریان خطای عبوری از تجهیزات مورد نظر جهت حفاظت متفاوت خواهد بود. از رابطه (۱) می‌توان به عنوان تابع هدف برای تحلیل جریانی پست فشار قوی مورد مطالعه در حضور محدود کننده جریان خطا استفاده کرد.

$$FCS = \alpha I_{ss,tot} + \beta (I_{ss,T1} + I_{ss,T2}) \quad (1)$$

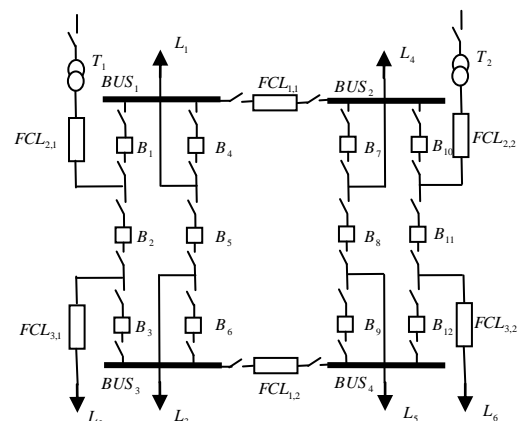
در این رابطه  $\alpha$  ضریب حساسیت محدودسازی مجموع جریان خطای پست فشار قوی مورد مطالعه است و از دیدگاه کلیدهای قدرت که وظیفه قطع جریان خطا را بر عهده خواهند داشت، بسیار مهم است. ضریب حساسیت  $\beta$  مربوط به محدودسازی جریان خطا در شاخه‌های ترانسفورماتورهای قدرت است. همچنین،  $I_{ss,T1}$ ،  $I_{ss,tot}$ ،  $I_{ss,T2}$  به ترتیب جریان خطای مجموع و عبوری از شاخه‌های ترانسفورماتور ۱ و ۲ بر حسب کیلو آمپر هستند.

### ۳-۲- تحلیل شاخص‌های قابلیت اطمینان

محدودسازی جریان خطا در پست‌های فشار قوی می‌تواند تاثیر ناخواسته‌ای بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار داشته باشد. هدف از این قسمت تعیین مکان مناسب برای محدود کننده جریان خطا با کم‌ترین تغییرات در شاخص‌های قابلیت اطمینان است. برای این امر، ابتدا باید شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار برای حالات بهره‌برداری مختلف محاسبه شوند. برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان از روش کوچک‌ترین مجموعه‌های انقطاع غیر تکراری استفاده شده است. جزئیات مربوط به نحوه محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان با این روش برای پست‌های فشار قوی در [۱۱] و [۱۳] به طور مفصل بیان شده است.

برای حالتی که وقوع خطا در تجهیز به تنهایی باعث وقفه در تحویل توان شود از نرخ خرابی ( $\lambda$ ) و زمان تعمیر

یک و نیم کلیدی که در شکل (۱) نشان داده شده مورد بررسی قرار گرفته است. به لحاظ حفظ یکپارچگی، انعطاف‌پذیری در تحویل توان و ماهیت یک و نیم کلیدی پست‌های فشار قوی، فیدرهای ورودی، خروجی و محل جداسازی مسیر شین‌ها، به عنوان مکان نصب محدود کننده جریان خطا در نظر گرفته شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است.

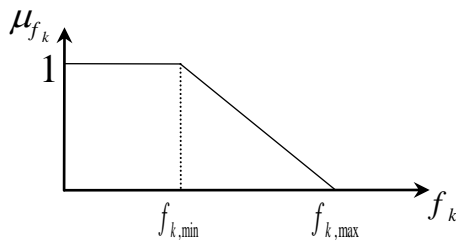


شکل (۱): پست فشار قوی یک و نیم کلیدی مورد مطالعه

سطح محدودسازی با توجه به امپدانس محدود کننده جریان خطا و مکان نصب آن متفاوت خواهد بود. به همین علت از سطح جریان خطا به عنوان یک عامل برای تعیین مکان مناسب محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد مطالعه، استفاده شده است. اما پس از محدودسازی جریان خطا تغییر دیگری هم در پست‌های فشار قوی ایجاد می‌شود. محدود کننده جریان خطا به عنوان عنصری که به شکل سری در پست‌های فشار قوی قرار خواهد گرفت شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار نظیر میانگین نرخ خرابی ( $\lambda$ ) و عدم دسترس پذیری سالانه ( $u$ ) را می‌تواند با تغییر نامطلوب مواجه کند. بنابراین در این مقاله، از معیارهای یاد شده برای تعیین مکان مناسب نصب محدود کننده جریان خطا استفاده خواهد شد.

### ۳-۱- تحلیل جریان خطا

در این مقاله، از جریان خطا به عنوان یکی از معیارها



شکل (۲): نمای مدل ریاضی ارائه شده برای تصمیم‌گیری فازی

در این روش، با توجه به تعداد معیارهای مورد نظر برای تعیین مکان بهینه محدود کننده جریان خطا، چندین تابع  $f_k$  وجود خواهد داشت. تصمیم‌گیری به روش فازی بر این اصل استوار است که هر یک از معیارها از ماهیت اصلی خود خارج شده و مقداری بین صفر و ۱ به عنوان درجه عضویت به آن می‌گیرد که با  $\mu_{f_k}$  نمایش داده می‌شود.  $f_{k,min}$  حد مطلوب معیار مورد نظر بین مکان‌های مختلف است و درجه عضویت آن در حالت فازی ۱ خواهد بود. به همین ترتیب  $f_{k,max}$  حد نامطلوب معیار مورد نظر بین مکان‌های مختلف است و درجه عضویت آن در حالت فازی صفر خواهد بود. همچنین مکان‌هایی که از نظر معیار مورد نظر بین حد مطلوب و حد نامطلوب قرار خواهند گرفت مقداری بین صفر و ۱ را با توجه به رابطه (۷) به خود اختصاص خواهند داد.

$$\mu(f_k) = \begin{cases} \frac{f_{k,max} - f_k}{f_{k,max} - f_{k,min}} & \text{for } f_{k,min} < f_k < f_{k,max} \\ 0 & \text{for } f_k > f_{k,max} \\ 1 & \text{for } f_k < f_{k,min} \end{cases} \quad (۷)$$

بعد از تغییر ماهیت مقادیر معیارهای مختلف به اعداد فازی می‌توان آن‌ها را با یکدیگر سنجید و مناسب‌ترین مکان را برای محدود کننده جریان خطا انتخاب کرد. در این مقاله، از روش (min max) برای روش تصمیم‌گیری فازی استفاده شده که رابطه‌های آن در (۸) و (۹) بیان شده است.

$$\mu^{s_m} = \min(\mu(f_1)^{s_m}, \mu(f_2)^{s_m}, \mu(f_3)^{s_m}) \quad (۸)$$

(۲) همان تجهیز برای تعیین زمان دسترس ناپذیری نقطه بار استفاده خواهد شد که با رابطه (۲) بیان می‌شود. همچنین، برای حالتی که وقوع خطای هم‌زمان دو تجهیز باعث وقفه در تحویل توان شود از نرخ خرابی و زمان تعمیر معادل که با رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه خواهند شد، استفاده می‌شود و محاسبه زمان دسترس ناپذیری همانند رابطه (۲) برای  $\lambda$  و  $r$  معادل محاسبه خواهد شد. از وقوع خطای هم‌زمان بیش از دو تجهیز به علت احتمال وقوع پایین صرفه نظر شده است.

$$u = \lambda \times r \quad (۲)$$

$$\lambda^{eq} = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad (۳)$$

$$r^{eq} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (۴)$$

در نهایت، نرخ خرابی متوسط ( $\lambda_{total}$ ) و زمان دسترس نبودن ( $u_{total}$ ) مجموع نقاط بار با توجه به کل حالت‌های وقوع خطا می‌تواند با استفاده از رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شود. در این رابطه‌ها FM و I به ترتیب بیانگر تعداد حالات وقوع خطا برای هر نقطه بار و شماره نقطه بار هستند.

$$\lambda_{total} = \sum_{l=1}^L \sum_{n \in FM} \lambda_{n,l}^{eq} \quad (۵)$$

$$u_{total} = \sum_{l=1}^L \sum_{n \in FM} \lambda_{n,l}^{eq} r_{n,l}^{eq} \quad (۶)$$

### ۳-۳- تصمیم‌گیری به روش فازی

معیارهایی که در این مقاله، برای جایابی محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد مطالعه، در نظر گرفته شده است به ترتیب جریان خطا، متوسط نرخ خرابی و دسترس ناپذیری سالانه نقطه بار است که به لحاظ ماهیت با یکدیگر متفاوت هستند. بنابراین، به طور مستقیم قابل سنجش و مقایسه با یکدیگر نخواهند بود. تصمیم‌گیری به روش فازی برای حل مسائل با معیارهای چند گانه و با ماهیت متفاوت مناسب است [۱۴]. شکل (۲) شماتیک ساده این مدل تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد و رابطه ریاضی آن رابطه (۷) است.

وقوع خطای سه فاز به زمین، انجام شده است. برای محاسبات مربوطه از داده‌های خطوط انتقال در مرجع [۱۵] استفاده شده است. سهم جریان اتصال کوتاه هر یک از فیدرهای ورودی و خروجی متصل به پست فشار قوی در ضمیمه آمده است. شایان ذکر است برای بررسی عملکرد الگوریتم ارایه شده، محدود کننده جریان خطا در شبیه‌سازی‌ها با راکتانس نوعی ۲۰ اهمی مدل شده است. قابل توجه است اثر اندازه راکتانس محدودسازی در جایابی محدود کننده جریان خطا در قسمت ۴-۳ این مقاله بررسی شده است.

همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی در جدول (۲) مشخص است حضور محدود کننده جریان خطا در شاخه‌های ورودی تأثیر محسوسی در کاهش جریان خطای کل پست فشار قوی نخواهد داشت ولی در حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت مؤثر است. همچنین، حضور محدود کننده جریان خطا در شاخه‌های خروجی در حفاظت ترانسفورماتورهای قدرت نقشی نخواهد داشت.

جدول (۲): نتایج تحلیل جریان خطا توجه به مکان محدود کننده جریان خطا

شماره حالت	$I_{ss,T1}$ (kA)	$I_{ss,T2}$ (kA)	$I_{ss,lot}$ (kA)
۰	۵۴/۳۸	۵/۰۵۲	۵/۰۵۲
۱	۵۱/۵۱	۳/۶۱	۳/۶۱
۲	۴۶/۰۲	۵/۰۵۲	۵/۰۵۲
۳	۴۰/۳۲	۵/۰۵۲	۲/۴۴

نصب محدود کننده جریان خطا در محل جداسازی مسیر شین‌ها می‌تواند تأثیر مطلوبی در کاهش جریان خطای پست فشار قوی مورد مطالعه داشته باشد. ولی در مورد حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت در مقابل جریان خطا تأثیرگذاری کم‌تری نسبت به نصب محدود کننده جریان خطا در شاخه‌های ورودی خواهد داشت. برای مثال اگر پست مورد مطالعه به دو بخش چپ و راست تقسیم شود و محدود کننده جریان خطا در محل جداسازی مسیر شین‌ها قرار داشته باشد با وقوع خطای اتصال کوتاه در بخش راست پست، محدود کننده جریان خطا تأثیری در جریان

$$\mu_m = \max(\mu^{s_0}, \mu^{s_1}, \mu^{s_2}, \mu^{s_3}) \quad (9)$$

در این روش، ابتدا برای هر یک از مکان‌های مورد نظر برای نصب محدود کننده جریان خطا مقدار کمینه از بین معیارهای مورد نظر ( $\mu^{s_m}$ ) در حالت فازی انتخاب خواهد شد. سپس، از بین مقادیر کمینه انتخاب شده، مکانی که مقدار بیشینه به آن تعلق دارد ( $\mu_m$ ) بهترین مکان برای نصب محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد نظر خواهد بود.

#### ۴- مطالعات عددی و تحلیل نتایج

مکان‌های مورد نظر برای تخصیص محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد مطالعه در جدول (۱) ارایه شده است.

جدول (۱): مکان‌های مورد نظر برای نصب محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی

شماره حالت	مکان محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی
۰	بدون محدود کننده جریان خطا
۱	محدود کننده جریان خطا در فیدرهای ورودی
۲	محدود کننده جریان خطا در فیدرهای خروجی
۳	محدود کننده جریان خطا در محل جداسازی مسیر شین‌ها

شایان ذکر است در این مقاله برای بررسی سناریوهای مختلف برای جایابی، از دو محدود کننده جریان خطا استفاده شده است. به لحاظ مسائل اقتصادی نصب محدود کننده جریان خطا در همه فیدرهای خروجی امکان‌پذیر نیست؛ اما، فیدرهایی که بیش‌ترین سهم از جریان خطا را دارند برای نصب محدود کننده جریان خطا انتخاب خواهند شد. برای پست فشار قوی مورد مطالعه، با توجه به سهم جریان خطای هر یک از فیدرهای خروجی که در ضمیمه اشاره شده است، فیدرهای L2 و L6 انتخاب خواهند شد.

#### ۴-۱- محاسبات جریان خطا

شبیه‌سازی پست فشار قوی مورد مطالعه به علت تحلیل جریان خطا در محیط نرم افزار DIGSILENT و با فرض

نرخ خرابی و زمان تعمیر تجهیزات که در ضمیمه آمده است [۱۶]، انجام شده و در جدول های (۴) و (۵) ارایه شده است.

جدول (۴): متوسط نرخ خرابی و دسترس ناپذیری سالانه در شرایط بهره برداری حالت اول

شماره حالت	$\lambda_{total}$ (f/yr)	$u_{total}$ (hr/yr)
۰	۰/۳۶۲۴۰۶	۳/۹۵۰۴۹۶
۱	۰/۳۶۲۷۳	۳/۹۵۰۷۹۶
۲	۰/۳۹۶۴۰۶	۶/۳۰۱۹۸۴
۳	۰/۳۷۱۴۰۶	۳/۹۵۹۴۹۶

جدول (۵): متوسط نرخ خرابی و دسترس ناپذیری سالانه در شرایط بهره برداری حالت دوم

شماره حالت	$\lambda_{total}$ (f/yr)	$u_{total}$ (hr/yr)
۰	۰/۳۹۲۴۰۴	۴/۷۰۰۴۶۴
۱	۰/۴۲۶۶۲	۵/۵۵۰۶۶۴
۲	۰/۴۲۹۴۰۴	۷/۰۵۴۹۲۵
۳	۰/۴۰۱۴۰۴	۴/۶۴۹۴۶۴

#### ۴-۳- تصمیم گیری فازی برای تعیین مکان بهینه

##### محدود کننده جریان خطا

با توجه به این که معیارهای مورد نظر برای تعیین مکان محدود کننده جریان خطا در پست فشار قوی مورد مطالعه از یک جنس نیستند، در این قسمت با استفاده از مدل تصمیم گیری فازی ارایه شده مقادیر معادل معیارهای مورد نظر در محیط فازی محاسبه شده و در جدول های (۶) تا (۸) ارایه شده است.

جدول (۶): مقادیر معادل فازی FCS برای مطالعات تحلیل جریانی

شماره حالت	$\alpha=0/5$	$\alpha=0/9$	$\alpha=0/1$
۰	۰	۰	۰
۱	۰/۳۴۵	۰/۲۲۲	۰/۷۶۷
۲	۰/۵۰۰	۰/۵۸۲	۰/۲۲۲
۳	۱	۱	۱

اتصال کوتاه عبوری از شاخه ترانسفورماتور سمت راست نخواهد داشت و برعکس.

برای تعیین مکان محدود کننده جریان خطا با استفاده از تحلیل جریانی سه حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول حساسیت محدود سازی جریان خطا برای عملکرد مطلوب تجهیزات حفاظتی نظیر کلیدهای قدرت و حفاظت ترانسفورماتورها برابر است. در حالت دوم عملکرد مناسب کلیدهای قدرت مطلوب طراح شبکه است. در حالت سوم حفاظت ترانسفورماتورها بعد از وقوع خطای اتصال کوتاه مطلوب طراح شبکه است. نتایج این تحلیل در جدول (۳) ارایه شده است.

جدول (۳): محاسبه (FCS) برای ضرایب حساسیت مختلف

##### محدود سازی جریان خطا

شماره حالت	$\alpha=0/5$	$\alpha=0/9$	$\alpha=0/1$
۰	۳۲/۲۴	۴۹/۹۵	۱۴/۵۳
۱	۲۹/۳۶	۴۷/۰۸	۱۱/۶۵
۲	۲۸/۰۶	۴۲/۴۳	۱۳/۶۹
۳	۲۳/۹۱	۳۷/۰۳	۱۰/۷۷

#### ۴-۲- محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان

برای مشاهده عملکرد محدود کننده های جریان خطا در پست های فشار قوی که با مشکل جریان اتصال کوتاه مواجه اند مطالعه شاخص های قابلیت اطمینان با توجه به طرح استاندارد حفاظتی ضروری به نظر می رسد. در این بررسی دو حالت بهره برداری از پست فشار قوی مورد مطالعه برای تحلیل شاخص های قابلیت اطمینان در حضور محدود کننده جریان خطا در نقاط مختلف فرض شده است. در حالت اول هر یک از ترانسفورماتورها به تنهایی قادر به تغذیه تمام نقاط بار خواهند بود. در حالت دوم بعد از خروج هر یک از ترانسفورماتورها از مدار یکی از نقاط بار هم از مدار خارج خواهد شد و دو نقطه بار باقی مانده از ترانسفورماتور سمت دیگر تغذیه خواهند شد.

محاسبات مربوط به تحلیل شاخص های قابلیت اطمینان برای مکان های مورد نظر، برای نصب محدود کننده جریان خطا با استفاده از رابطه های (۲) تا (۶) و داده های مربوط به

مکان بهینه محدود کننده جریان خطا، مقادیر (۰، ۰/۳۴۵، ۰، ۰/۷۳۵) از جدول (۹) به عنوان مقادیر کمینه برای مکان‌های مختلف انتخاب خواهند شد. از بین این مقادیر انتخاب شده، مقدار بیشینه ۰/۷۳۵ است که مربوط به نصب محدود کننده در محل جداسازی شین‌هاست.

حالت دوم: در این حالت حساسیت محدودسازی جریان خطا برای عملکرد مطلوب کلیدهای قدرت و حفاظت ترانسفورماتورها از نظر طراح شبکه برابر است و برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان فرض شده است که با خروج هر یک از ترانسفورماتورها یکی از نقاط بار هم از تغذیه خارج خواهد شد.

جدول (۱۰): مقادیر معادل فازی معیارهای مورد نظر در حالت

دوم

شماره حالت	$FCS$	$\lambda_{total}$	$u_{total}$
۰	۰	۱	۱
۱	۰/۳۴۵	۰/۰۷۵	۰/۶۳۸
۲	۰/۵۰۰	۰	۰
۳	۱	۰/۷۵۶۷	۰/۹۹۶

در این حالت مقادیر (۰، ۰/۰۷۵، ۰، ۰/۷۵۶۷) از جدول (۱۰) به عنوان مقادیر کمینه برای مکان‌های مختلف انتخاب خواهند شد. از بین این مقادیر انتخاب شده، مقدار بیشینه ۰/۷۵۶۷ است که مربوط به نصب محدود کننده در محل جداسازی شین‌هاست.

حالت سوم: در این حالت محدودسازی جریان خطا برای عملکرد مطلوب کلیدهای قدرت به حفاظت از ترانسفورماتورها توسط طراح شبکه ترجیح داده شده است و برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان فرض شده است که هر یک از ترانسفورماتورها به تنهایی قادر به تغذیه تمام نقاط بار خواهند بود.

در این حالت مقادیر (۰، ۰/۲۲۲، ۰، ۰/۷۳۵) از جدول (۱۱) به عنوان مقادیر کمینه برای مکان‌های مختلف انتخاب خواهند شد. از بین این مقادیر انتخاب شده، مقدار بیشینه ۰/۷۳۵ است که مربوط به نصب محدود کننده در محل جداسازی شین‌هاست.

جدول (۷): مقادیر مربوط شاخص‌های قابلیت اطمینان در

محیط فازی برای بهره‌برداری حالت اول

شماره حالت	$\lambda_{total}$ (f/yr)	$u_{total}$ (hr/yr)
۰	۱	۱
۱	۰/۹۹۰	۰/۹۹۹
۲	۰	۰
۳	۰/۷۳۵	۰/۹۹۶

جدول (۸): مقادیر مربوط شاخص‌های قابلیت اطمینان در

محیط فازی برای بهره‌برداری حالت دوم

شماره حالت	$\lambda_{total}$ (f/yr)	$u_{total}$ (hr/yr)
۰	۱	۱
۱	۰/۰۷۵	۰/۶۳۸
۲	۰	۰
۳	۰/۷۵۶۷	۰/۹۹۶

با توجه به اینکه برای تحلیل جریانی محدود کننده جریان خطا سه حالت و برای تحلیل شاخص‌های قابلیت اطمینان دو حالت در نظر گرفته شده است، در نهایت ۶ حالت برای تعیین مکان بهینه محدود کننده جریان خطا وجود خواهد داشت.

حالت اول: در این حالت حساسیت محدودسازی جریان خطا برای عملکرد مطلوب کلیدهای قدرت و حفاظت ترانسفورماتورها از نظر طراح شبکه برابر است. همچنین، برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان فرض شده است که هر یک از ترانسفورماتورها به تنهایی قادر به تغذیه تمام نقاط بار خواهند بود.

جدول (۹): مقادیر معادل فازی معیارهای مورد نظر در حالت

اول

شماره حالت	$FCS$	$\lambda_{total}$	$u_{total}$
۰	۰	۱	۱
۱	۰/۳۴۵	۰/۹۹۰	۰/۹۹۹
۲	۰/۵۰۰	۰	۰
۳	۱	۰/۷۳۵	۰/۹۹۶

در این صورت با توجه به روش پیشنهادی برای تعیین

جدول (۱۱): مقادیر معادل فازی معیارهای مورد نظر در حالت

## سوم

شماره حالت	$FCS$	$\lambda_{total}$	$u_{total}$
۰	۰	۱	۱
۱	۰/۲۲۲	۰/۹۹۰	۰/۹۹۹
۲	۰/۵۸۲	۰	۰
۳	۱	۰/۷۳۵	۰/۹۹۶

حالت چهارم: در این حالت محدودسازی جریان خطا برای عملکرد مطلوب کلیدهای قدرت به حفاظت از ترانسفورماتورها توسط طراح شبکه ترجیح داده شده است و برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان فرض شده است که با خروج هر یک از ترانسفورماتورها یکی از نقاط بار هم از تغذیه خارج خواهد شد.

در این حالت مقادیر (۰، ۰/۰۷۵، ۰، ۰/۷۵۶۷) از جدول (۱۲) به عنوان مقادیر کمینه برای مکان‌های مختلف انتخاب خواهند شد. از بین این مقادیر انتخاب شده، مقدار بیشینه ۰/۷۵۶۷ است که مربوط به نصب محدود کننده در محل جداسازی شین‌هاست.

جدول (۱۲): مقادیر معادل فازی معیارهای مورد نظر در حالت

## چهارم

شماره حالت	$FCS$	$\lambda_{total}$	$u_{total}$
۰	۰	۱	۱
۱	۰/۲۲۲	۰/۰۷۵	۰/۶۳۸
۲	۰/۵۸۲	۰	۰
۳	۱	۰/۷۵۶۷	۰/۹۹۶

حالت پنجم: در این حالت حفاظت ترانسفورماتورها در مقابل جریان اتصال کوتاه مورد نظر طراح است و برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان فرض شده است که هر یک از ترانسفورماتورها به تنهایی قادر به تغذیه تمام نقاط بار خواهند بود.

جدول (۱۳): مقادیر معادل فازی معیارهای مورد نظر در حالت

## پنجم

شماره حالت	$FCS$	$\lambda_{total}$	$u_{total}$
۰	۰	۱	۱
۱	۰/۷۶۷	۰/۹۹۰	۰/۹۹۹
۲	۰/۲۲۲	۰	۰
۳	۱	۰/۷۳۵	۰/۹۹۶

در این حالت مقادیر (۰، ۰/۷۶۷، ۰، ۰/۷۳۵) از جدول (۱۳) به عنوان مقادیر کمینه برای مکان‌های مختلف انتخاب خواهند شد. از بین این مقادیر انتخاب شده، مقدار بیشینه ۰/۷۶۷ است که مربوط به نصب محدود کننده در شاخه‌های ورودی است.

حالت ششم: در این حالت حفاظت ترانسفورماتورها در مقابل جریان اتصال کوتاه مورد نظر طراح است و برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان فرض شده است که با خروج هر یک از ترانسفورماتورها یکی از نقاط بار هم از تغذیه خارج خواهد شد.

در این حالت مقادیر (۰، ۰/۰۷۵، ۰، ۰/۷۵۶۷) از جدول (۱۴) به عنوان مقادیر کمینه برای مکان‌های مختلف انتخاب خواهند شد. از بین این مقادیر انتخاب شده، مقدار بیشینه ۰/۷۵۶۷ است که مربوط به نصب محدود کننده در محل جداسازی مسیر شین‌هاست.

جدول (۱۴): مقادیر معادل فازی معیارهای مورد نظر در حالت

## ششم

شماره حالت	$FCS$	$\lambda_{total}$	$u_{total}$
۰	۰	۱	۱
۱	۰/۷۶۷	۰/۰۷۵	۰/۶۳۸
۲	۰/۲۲۲	۰	۰
۳	۱	۰/۷۵۶۷	۰/۹۹۶

در این قسمت، تاثیر اندازه راکتانس محدودسازی در انتخاب مکان محدود کننده جریان خطا بررسی شده است. نتایج تحلیل حساسیت جریانی برای راکتانس محدودسازی مختلف در جدول (۱۵) ارائه شده است.



جدول (۱۵): محاسبه FCS برای تحلیل جریانی برای

راکتانس‌های مختلف محدود سازی

مکان نصب FCL	امپدانس FCL	$\alpha=0/5$ $\beta=0/5$	$\alpha=0/9$ $\beta=0/1$	$\alpha=0/1$ $\beta=0/9$
۱	۰ اهم	۳۲/۲۴	۴۹/۹۵	۱۴/۵۳
	۵ اهم	۳۱/۳۲	۴۹/۰۴	۱۳/۶۱
	۱۰ اهم	۳۰/۲۴	۴۷/۹۳	۱۲/۸۷
	۲۰ اهم	۲۹/۳۶	۴۷/۰۸	۱۱/۶۵
	۴۰ اهم	۲۷/۷۷	۴۵/۴۸	۱۰/۰۶
۲	۵ اهم	۳۰/۷۰	۴۷/۱۷	۱۴/۲۲
	۱۰ اهم	۲۹/۵۸	۴۵/۱۶	۱۳/۹۹
	۲۰ اهم	۲۸/۰۶	۴۲/۴۳	۱۳/۶۹
	۴۰ اهم	۲۶/۴۱	۳۹/۴۵	۱۳/۳۵
	۵ اهم	۲۶/۹۷	۴۱/۳۲	۱۲/۶۲
۳	۱۰ اهم	۲۶/۳۱	۴۰/۶۹	۱۱/۹۳
	۲۰ اهم	۲۳/۹۱	۳۷/۰۳	۱۰/۷۷
	۴۰ اهم	۲۱/۲۵	۳۲/۹۲	۹/۵۸
	۵ اهم			

مکان نصب محدود کننده جریان خطا مؤثر است. با توجه به جدول (۱۷)، به ازای راکتانس محدودسازی ۵ و ۱۰ اهم در همه حالت‌ها محل جداسازی مسیر شین‌ها، بهترین مکان برای نصب محدود کننده جریان خطاست، اما برای راکتانس محدودسازی ۲۰ و ۴۰ اهم در حالت پنجم بهره‌برداري، فیدرهای ورودی مناسب‌ترین مکان برای نصب محدود کننده جریان خطا خواهند بود.

جدول (۱۷): مکان نصب محدود کننده جریان خطا برای

شرایط بهره‌برداری و راکتانس محدود کننده مختلف

امپدانس FCL	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	حالت ششم
۵ اهم	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۱۰ اهم	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۲۰ اهم	۳	۳	۳	۳	۱	۳
۴۰ اهم	۳	۳	۳	۳	۱	۳

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوی جدیدی برای جایابی محدود کننده جریان خطا در پست‌های فشار قوی ارائه شد. الگوی معرفی شده بر مبنای تحلیل جریان خطا و شاخص‌های قابلیت اطمینان نقاط بار در شرایط بهره‌برداری و راکتانس محدودسازی متفاوت است. نتایج نشان می‌دهد هر یک از این عوامل، نقش قابل ملاحظه‌ای در تعیین مکان محدود کننده جریان خطا خواهند داشت. در بیشتر موارد، محل جداسازی مسیر شین‌ها بهترین مکان برای نصب محدود کننده جریان خطا خواهد بود. به جز حالت پنجم بهره‌برداری که برای راکتانس محدودسازی ۲۰ و ۴۰ اهم، مناسب‌ترین مکان برای نصب محدود کننده جریان خطا شاخه‌های ورودی خواهد بود.

ضمایم

سطح جریان اتصال کوتاه هر یک از فیدرهای ورودی و

خروجی برحسب (kA)

T2			T1			فیدرهای ورودی
۵/۰۵۲			۵/۰۵۲			
L6	L5	L4	L3	L2	L1	فیدرهای خروجی
۹/۶۷	۶/۶۴	۵/۷۸	۶/۶۴	۹/۶۷	۵/۷۸	

جدول (۱۶): مقادیر معادل فازی FCS برای تحلیل جریانی

برای راکتانس‌های مختلف محدود سازی

مکان نصب FCL	امپدانس FCL	$\alpha=0/5$ $\beta=0/5$	$\alpha=0/9$ $\beta=0/1$	$\alpha=0/1$ $\beta=0/9$
۰	۰ اهم	۰	۰	۰
۱	۵ اهم	۰/۱۷۴	۰/۱۰۶	۰/۴۸۳
	۱۰ اهم	۰/۳۳۷	۰/۲۱۸	۰/۶۷۰
	۲۰ اهم	۰/۳۴۵	۰/۲۲۲	۰/۷۶۷
	۴۰ اهم	۰/۴۰۷	۰/۲۶۳	۰/۹۰۴
۲	۵ اهم	۰/۲۹۳	۰/۳۲۲	۰/۱۶۷
	۱۰ اهم	۰/۴۴۹	۰/۵۱۸	۰/۲۰۵
	۲۰ اهم	۰/۵۰۰	۰/۵۸۲	۰/۲۲۲
	۴۰ اهم	۰/۵۳۱	۰/۶۱۷	۰/۲۳۶
۳	۵ اهم	۱	۱	۱
	۱۰ اهم	۱	۱	۱
	۲۰ اهم	۱	۱	۱
	۴۰ اهم	۱	۱	۱

مقادیر معادل فازی تحلیل حساسیت نسبت به اندازه راکتانس محدودسازی در جدول (۱۶) ارائه شده است. نتایج جایابی محدود کننده جریان خطا با استفاده از الگوی ارائه شده، نشان می‌دهد که راکتانس محدودسازی، در تعیین

Magnetic Flux Characteristics of Saturated Core Fault Current Limiters,” Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 49, No. 2, pp. 874-882, 2013.

- [9] O. -B. Hyun, J. Sim, H. -R. Kim, K. -B. Park, S. -W. Yim and I. -S. Oh, “Reliability enhancement of the fast switch in a hybrid superconducting fault current limiter by using power electronic switches,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1843 - 1846, 2009.
- [10] I. Rahmati and M. Fotuhi-Firuzabad, “Reliability evaluation of HV substations in the presence of fault current limiter,” Proc. PowerTech., pp. 1 -5, 2009.
- [11] M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar and I. Rahmati, “Reliability study of HV substations equipped with the fault current limiter,” IEEE Trans. Power Del., Vol. 27, No. 2, pp. 610 - 617, 2012.
- [12] B. Sung, “Study optimal location of a resistive SFCL applied to an electric power grid,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 2048 - 2052, 2009.
- [13] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, 2nded. New York: Plenum, 1996.
- [14] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, “Optimal feeder reconfiguration with distributed generators in distribution system by fuzzy multiobjective and tabu search,” Proc. SUPERGEN, pp. 1 -7, 2009.
- [15] A. Mohseni; S. Mohajer Yami; AAS. Akmal, “Sensitivity analysis and stochastic approach in study of transient recovery voltage with presence of superconducting FCL,” Electrical Power and Energy Conference (EPEC), IEEE, Vol., No., pp. 479 - 484, 3-5 Oct. 2011.
- [16] C. Mitchurechart; S. Chaitusaney, “Reliability evaluation of electrical substations under various failure modes,” 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Vol., No., pp. 1 - 6, 15-17 May 2013.

داده ها و اطلاعات مربوط به محاسبات شاخص های قابلیت اطمینان

$T_s$ (hr)	$T_R$ (hr)	$P_{stuck}$	$\lambda_p$ (f/ yr)	$\lambda_a$ (f/ yr)	نام تجهیز
۱	۱۴	-	-	۰/۰۴۶	خط انتقال
۱	۲۵	-	-	۰/۰۱۵	ترانسفورماتور
۱	۱۰	۰/۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	کلید قدرت
۱	۸	-	-	۰/۰۰۱	باس بار
۱	۲۵	۰/۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۵	محدود کننده جریان خطا

## مراجع

- [1] A. Abramovitz and K. Smedley, “Survey of solid state fault current limiter,” IEEE Trans. Power Electron., Vol. 27, No. 6, pp. 2770 - 2782, 2012.
- [2] S. Lee, K. Lee, Y. Yoon, and O. Hyun, “FCL application issues in Korean electric power grid,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, 2006.
- [3] H. Schmitt, “Fault current limiters report on the activities of CIGRE WGA3. 16,” presented at the Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Montreal, QC, Canada, 2006.
- [4] X. Wu, J. Mutale, N. Jenkins, and G. Strbac, “An investigation of network splitting for fault level reduction,” in Proc. Tyndall Working Paper 25, Sep. 2003.
- [5] M. Noe, M. Steurer, S. Eckroad and R. Adapa, “Progress on the R&D of fault current limiters for utility applications,” Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, pp. 1 -4, 2008.
- [6] L. Kovalsky, X. Yuan, K. Tekletsadik, A. Keri, J. Bock, and F. Breuer, “Applications of superconducting fault current limiters in electric power transmission system,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, pp. 2130 - 2133, Jun. 2005.
- [7] A. Abramovitz, K. M. Smedley, “Survey of Solid-State Fault Current Limiters,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 6, pp. 2770 - 2782, June 2012.
- [8] J. W. Moscrop, “Experimental Analysis of the