

جایابی و تعیین نوع بهینه محدودکننده‌های جریان خطای نوع ابررسانا با در نظر گیری هماهنگی رله‌های دیستانس

ایرج پورکیوانی نرگور حسن رستگار حسین عسگریان ایبانه

دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Irajporkayvany@gmail.com

واژه‌های کلیدی: محدود کننده های جریان خطای ابررسانا، جایابی بهینه، تعیین نوع بهینه، پایداری

چکیده

در این مقاله جایابی و تعیین نوع یک محدود کننده جریان خطای ابررسانا به منظور افزایش پایداری گذرای ژنراتورهای سنکرون شبکه با در نظر گیری هماهنگی ادوات حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. برلی این منظور از مطالعات استاتیک و دینامیک شبکه قدرت استفاده شده است. در مطالعات قبلی چندین محدود کننده برای کاهش جریان اتصال کوتاه با در نظر گیری تابع هدفی شامل تعداد محدود کننده و مقدار آن در شبکه قدرت جایابی شده‌اند و در اکثر این مطالعات هماهنگی رله های حفاظتی در نظر گرفته نشده است. در این مقاله سعی بر این است که الگوریتم‌هایی به منظور جایابی و تعیین نوع یک محدود کننده ابررسانا در شبکه قدرت با توجه به عملکرد و هماهنگی رله‌های دیستانس در زمان خطا ارائه گردد برای ارزیابی

الگوریتم‌های پیشنهادی، از شبیه سازیهای گوناگون بر روی شبکه آزمون چهار ماشینه IEEE در محیط نرم افزار *Digsilent* استفاده شده و مشخص شده است که محدودکننده منتخب باعث افزایش پایداری گذرا، افزایش کیفیت توان و کاهش جریان خطا می‌شود. به علاوه این محدودکننده کمترین اثر را بر رله‌های حفاظتی شبکه دارد به گونه‌ای که فقط بر رله‌های خطی که در آن نصب شده است تأثیر قابل توجهی می‌گذارد که در این مورد نیز راه کلر مناسب پیشنهاد شده است.

۱- مقدمه

از اوایل دهه هفتاد میلادی مطالعات کاهش سطح اتصال کوتاه شبکه قدرت به عنوان یکی از موضوعات مهم تحقیقاتی در جهان آغاز شده و محققین تلاش خود را متوجه روش‌ها و

تجهیزاتی کرده‌اند که بتوانند دامنه جریان خطا را در حد قابل قبولی محدود نمایند [۱]. انواع مختلفی از محدودکننده‌های جریان خطا تا به حال برلی شبکه‌های توزیع و انتقال معرفی شده‌اند. از آنجاییکه جریان اتصال کوتاه در لحظات اولیه به خصوص در پیرو اول موج جریان، دارای بیشترین دامنه است و بیشترین اثرات مخرب از همین سیکل‌های اولیه ناشی می‌شود باید محدودکننده‌های جریان خطا بلافاصله بعد از وقوع خطا در مدار قرارگیرند. در میان سایر محدودکننده‌های جریان خطا، محدودکننده‌های ابرسانا در شرایط بهره برداری عادی شبکه یک سیم پیچ با خاصیت ابرسانایی بوده (مقاومت و افت ولتاژ کمی را باعث می‌شوند) ولی به محض وقوع اتصال کوتاه و افزایش جریان از یک حد معینی که جریان بحرانی نامیده می‌شود، سیم پیچ مربوط مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهد و به همین دلیل جریان خطا کاهش می‌یابد. عمل فوق در زمان کوتاهی انجام می‌پذیرد و نیاز به سیستم کشف خطا نمی‌باشد. در این نوع محدودکننده سه وظیفه عمده محدودکننده‌های جریان یعنی تشخیص خطا، منحرف کردن جریان خطا و محدودسازی آن توسط سیم پیچ ابرسانا صورت می‌گیرد [۲]. محدود کننده ابرسانا می‌تواند علاوه بر محدود سازی جریان خطا به منظور افزایش پایداری دینامیکی شبکه نیز استفاده گردد [۳]. علاوه بر این استفاده از محدود کننده‌های جریان خطای نوع ابرسانا باعث کاهش خسارات ناشی از اتصال کوتاه در شبکه، کاهش هزینه کلیدهای قدرت و فیوزها، تعویق سرمایه گذاری برای توسعه شبکه، افزایش قابلیت اطمینان در شبکه و افزایش کیفیت توان و کاهش تلفات در شبکه قدرت می‌گردد [۴].

با توجه به مواردی که تاکنون ذکر گردید استفاده از محدودکننده‌های جریان خطای ابرسانا امری ایده آل به نظر می‌رسد. اما باید دانست نصب این وسیله در شبکه قدرت با ملاحظاتی به شرح زیر همراه است.

- مکان بهینه برای نصب محدود کننده.

- نوع بهینه محدود کننده که در زمان وقوع خطا به صورت سری در شبکه قرار می‌گیرد.

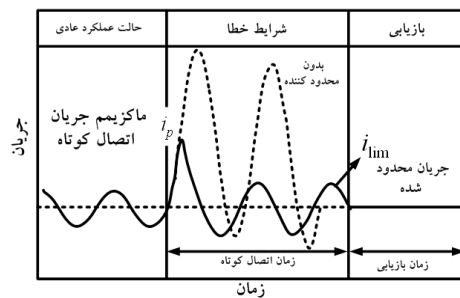
- مشکل بالقوه هماهنگی با تجهیزات حفاظتی که در اثر قرارگیری محدود کننده در شبکه ممکن است به وجود بیاید.

در واقع برای استفاده حداکثری از قابلیت‌های یک محدودکننده جریان خطای ابرسانا نیاز است که بر اساس مطالعات شبکه بهترین مکان و نوع برای آن انتخاب گردد. همچنین با توجه به این که هم محدودکننده و هم سیستم حفاظتی در هنگام بروز خطا در شبکه فعال می‌شوند ممکن است در عملکرد یکدیگر ایجاد اختلال نمایند بنابراین نیاز است که در هنگام انتخاب و نصب محدودکننده ابرسانا عملکرد رله‌ها و هماهنگی آنها نیز مورد بررسی قرار گیرد [۵].

در مرجع [۶] مکان و تعداد بهینه ابرسانایی نوع راکتانی در یک شبکه بهم پیوسته بدون در نظر گرفتن رله‌های حفاظتی مورد بررسی قرار گرفته است. قرار دادن چندین محدود کننده در نقاط مختلف شبکه می‌تواند عملکرد رله‌های حفاظتی را دچار مشکلات جدی در هنگام بروز خطا نماید. در مرجع [۷] نیز یک محدود کننده مقاومتی بدون در نظر گرفتن هماهنگی ادوات حفاظتی جایابی شده است. دلیل انتخاب نوع محدود کننده نیز در هیچ یک از مطالعات قبلی به طور صریح بیان نشده است. در این مقاله هدف آن است که یک محدود کننده جریان خطا در شبکه قدرت طوری جایابی گردد که باعث افزایش پایداری گذرا و در عین حال کاهش سطح اتصال کوتاه گردد. در این بین زمان عملکرد رله‌های حفاظتی و گذراهای به وجود آمده در اثر این عملکرد در انتخاب مکان بهینه محدود کننده در نظر گرفته شده است. همچنین دو نوع از پرکاربردترین محدود کننده‌های ابرسانا یعنی مقاومتی و امیدانسی در نظر گرفته شده‌اند و بین آن دو محدود کننده‌ای که به مقدار بیشتری در کاهش جریان اتصال کوتاه و افزایش پایداری موثر است انتخاب گردیده است.

۲- عملکرد محدود کننده های ابرسانا و مدل سازی ریاضی آنها

شکل (۱) جریان اتصال کوتاه شبکه را در اثر عملکرد یک محدود کننده ابرسانا نشان می دهد. مطابق این شکل عملکرد هر محدود کننده ابرسانا شامل سه مرحله عادی، شرایط خطا و بازیابی می گردد. یعنی با وقوع اتصال کوتاه و افزایش جریان از مقدار بحرانی محدود کننده وارد مدار شده و پس از عملکرد و کاهش جریان خطا از مدار خارج می گردد.

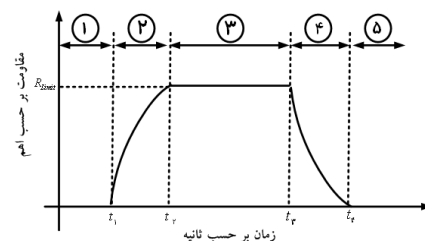


شکل (۱): جریان اتصال کوتاه شبکه و عملکرد یک محدود کننده ابرسانا

برای آگاهی بیشتر از عملکرد و رفتار محدود کننده های ابرسانا یک محدود کننده نوع مقاومتی را در نظر می گیریم. رابطه (۱) رفتار این محدود کننده را در حالت های مختلف بیان می کند.

$$f(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_1, t \geq t_4) \\ R_{Limit} \cdot (1 - e^{-at}) & (t_1 \leq t < t_2) \\ R_{Limit} & (t_2 \leq t < t_3) \\ R_{Limit} \cdot e^{-bt} & (t_3 \leq t < t_4) \end{cases} \quad (1)$$

شکل (۲) نیز مراحل از بین رفتن و بازیابی خاصیت ابرسانایی را در این محدود کننده نشان می دهد.



شکل (۲): مشخصه عملکرد یک محدود کننده نوع مقاومتی

در این شکل قسمت های ۱، ۴ و ۵ مشخصه رفتار ابرسانا را در شرایط نرمال (بدون خطا) نشان می دهند در حالیکه قسمت های ۲ و ۳، رفتار ابرسانا را در شرایط خطا نشان می دهند. قسمت ۲ رفتار محدود کننده را هنگامی که خطا در شبکه رخ داده و جریان خطا از حد بحرانی بیشتر شود نشان می دهد. در این حالت خاصیت ابرسانایی محدود کننده از بین رفته و مقاومت بالایی در مقابل جریان خطا از خود نشان می دهد. زمان حذف حالت ابرسانایی با ضریب α مشخص می گردد. در قسمت ۳ نمودار، محدود کننده جریان خطا را محدود می کند. براساس بیشترین مقدار جریان خطا در شبکه تعیین می شود. مشخصه بازگشت محدود کننده به حالت ابرسانایی در قسمت ۴ نشان داده شده است. زمان بازیابی مجدد حالت ابرسانایی با ضریب β مشخص می شود [۸].

۳- رله های دیستانس و عملکرد آن ها در حضور عنصر محدود کننده ابرسانا

رله های دیستانس به عنوان حفاظت اصلی در شبکه های انتقال به کار می روند. ایده اساسی در حفاظت دیستانس، اندازه گیری امپدانس از محل نصب رله تا محل وقوع اتصالی می باشد. ظاهر شدن مقاومت و یا راکتانس به دلیل انتقال محدود کننده از حالت ابرسانا به حالت معمولی، موجب تغییر امپدانس دیده شده توسط رله دیستانس می شود که به صورت اساسی پاسخ رله دیستانس مهو را تحت تأثیر قرار می دهد. رابطه (۲) مشخصه رله مهو را توصیف می کند که در آن Z_M برد رله و ϕ حداکثر زاویه مشخصه می باشند.

$$\left(R - \frac{Z_M}{2} \cos \phi\right)^2 + \left(X - \frac{Z_M}{2} \sin \phi\right)^2 = \left(\frac{Z_M}{2}\right)^2 \quad (2)$$

در زمان عملکرد محدود کننده مقاومتی، همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، امپدانس دیده شده توسط رله در جهت $+R$ افزایش می یابد.

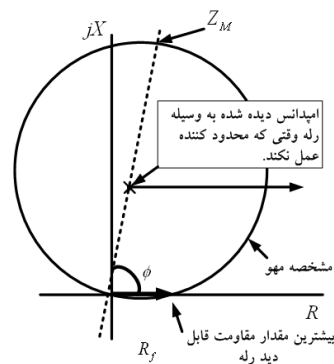
شبکه به صورت تقریبی مدل سازی می گردند. سپس محاسبات اتصال کوتاه بر اساس استاندارد ANSI برای مقادیر مختلف محدودکننده و مکان های مختلف انجام می گیرد. سپس مکان های مختلف بر این اساس که کدامیک به ازلی مقادیر مختلف دو نوع محدود کننده مقاومتی و راکتانسی بیشترین تأثیر در کاهش جریان خطا را داشته اند دسته بندی می گردند. از نتایجی که در این مرحله به دست می آید به عنوان ورودی بخش مطالعات دینامیک با مدل سازی شبکه به صورت دقیق و دینامیک استفاده می گردد. آنالیز حساسیت توان برای مکان هلی متخبی که در بخش قبلی مشخص شده انجام شده و مکان بهینه برای نصب محدودکننده مشخص می شود. برای انجام آنالیز حساسیت توان ابتدا محدود کننده در یک محدود دلخواه قرار می گیرد. سپس مقدار تغییر توان بین دو ناحیه (PCA) مطابق رابطه (۴) محاسبه می گردد.

$$PCA = \left| \int_s^{t_f} (P_{transmission}^{scheduled} - P_{transient}) \right| \quad (4)$$

که در این رابطه $P_{transmission}^{scheduled}$ توان انتقالی برنامه ریزی شده بین نواحی در شرایط ماندگار عملکرد سیستم است و $P_{transient}$ توان حقیقی در شرایط گذرا در هنگام وقوع خطا و در حالتی که ممکن است سیستم قدرت با وجود محدود کننده یا بدون آن عمل کند، می باشد. t_f نیز زمان مورد نیاز جهت بازگشت سیستم به نقطه کار حالت ماندگارش بعد از وقوع یک خطا است. پس از آن با در نظر گرفتن تغییرات کم مقدار محدود کننده و نهایتاً با جمع کردن تمامی مقادیر مرحله قبلی برای مکان های مختلف، مقدار SI از رابطه (۵) بدست می آید.

$$SI = \sum_{fault-case} \frac{\partial PCA}{\partial R_{SFCL}} |_{Location} \quad (5)$$

طبق این رابطه، مقدار نسبتاً کوچک و منفی SI در مقایسه با مقدار نسبتاً بزرگ و مثبت آن، به معنای آن است که مقدار $P_{transient}$ سریعاً بعد از وقوع خطا به مقدار اولیه $P_{transmission}^{scheduled}$



شکل (۳): تغییرات امپدانس دیده شده به وسیله رله مهو

از آنجایی که ناحیه عملکرد رله دیستانس از نوع مهو داخل یک دایره است، مقاومت نهایی ماکزیمم نیز از رابطه (۳) محاسبه می گردد.

$$R_{max} = Z_M \cos \phi \quad (3)$$

مقدار مقاومت کوچک نمی تواند موجب کاهش جریان خطا به مقداری کمتر از ظرفیت قدرت قطع کلید گردد. مقدار مورد نیاز در شبکه قدرت نمونه بیشتر از حدود ۱ اهم است [۹]. همین بحث در مورد محدود کننده راکتانسی نیز صادق است، با این تفاوت که امپدانس دیده شده توسط رله مهو در جهت $+X$ افزایش می یابد.

۳- الگوریتم پیشنهادی به منظور جایابی و تعیین نوع بهینه محدود کننده ابرسانا

همان طور که در مقدمه نیز ذکر گردید هدف استفاده از محدودکننده های ابرسانا می تواند علاوه بر کاهش جریان خطا، بهبود پایداری شبکه در هنگام خطا و پس از برطرف شدن آن نیز باشد. برای این منظور الگوریتمی ارائه می گردد که دو عامل فوق را در نظر بگیرد. همچنین اثر عملکرد رله های حفاظتی نیز در الگوریتم ارائه شده مدنظر قرار می گیرد. برای تعیین بهترین مکان نصب محدودکننده ابتدا یک آنالیز استاتیک شبکه صورت می گیرد. در این حالت محدودکننده ابرسانا و همگی اجزای

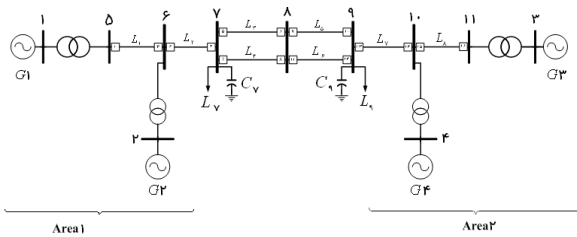
نشست پیدا می کند. بنابراین، هر چه مقدار SI کوچکتر یا منفی تر باشد، مکان متناظر آن بهینه تر خواهد بود. شکل (۴) الگوریتم آنالیز حساسیت توان را نشان می دهد.



شکل (۴): الگوریتم آنالیز حساسیت توان

۴- نتایج شبیه سازی

شبکه مورد مطالعه مطابق شکل (۶) به نام شبکه چهار ماشینه $IEEE$ معروف بوده و شامل دو ناحیه کاملا مشابه است که توسط دو خط $۲۲۰km$ و $۲۳۰kV$ به یکدیگر متصل شده اند. شبکه، شامل دو ناحیه مشابه متصل شده با یک ارتباط ضعیف است. هر ناحیه از دو واحد کنتر هم هرکدام دارای مقدار $۹۰۰MVA$ و $۲۰kV$ ، تشکیل شده است. اطلاعات این شبکه از مرجع [۱۰] اقتباس شده است. هر ژنراتور مجهز به سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ، پایدار ساز سیستم قدرت و گاورنر می باشد. رله های دیستانس خطوط نیز در شکل نشان داده شده اند.

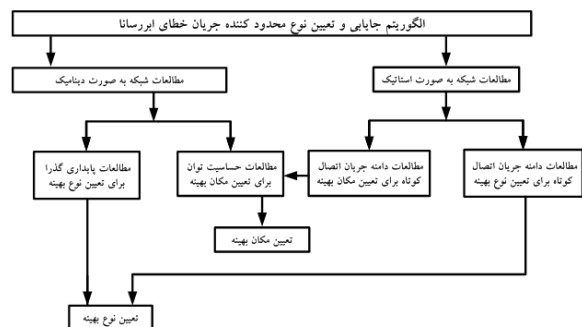


شکل (۶): شبکه مورد مطالعه

۴-۱ هماهنگی رله های دیستانس

عموم رله های دیستانس سه ناحیه حفاظتی دارند. از ناحیه اول برای حفاظت اصلی و از نواحی دوم و سوم برای حفاظت پشتیبان استفاده می شود. عملکرد رله در ناحیه اول سریع است و در نواحی دوم و سوم با تاخیر صورت می گیرد. بنابراین برای تنظیم یک رله دیستانس، سه امپدانس مربوط به نواحی و دو زمان برای ناحیه دوم و سوم مشخص می گردد. رله های دیستانس از نوع مهو با سه ناحیه انتخاب گردیده اند. جدول (۱) تنظیم نهایی رله های دیستانس را نشان می دهد.

به منظور تعیین بهترین نوع محدودکننده از میان محدودکننده های راکتانسی و مقاومتی دو مورد کیفیت توان و پایداری گذرای شبکه مورد بررسی قرار می گیرد. بر این اساس اثر هر دو نوع محدودکننده مقاومتی و راکتانسی با توجه به این موارد در نظر گرفته شده و در نهایت نوع بهینه انتخاب می گردد. شکل (۵) الگوریتم پیشنهادی را نشان می دهد.



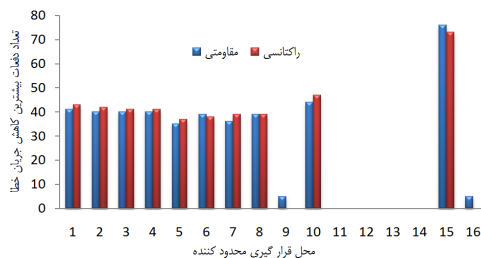
شکل (۵): الگوریتم پیشنهادی به منظور جایابی و تعیین نوع بهینه

محدودکننده ابرسانا در شبکه قدرت

جدول (۱): تنظیم نواحی رله های دیتانس نسبت به ثانویه و از دید رله

رله	$Z_{r,max}(Sec\ Ohm)$	$Z_{r,min}(Sec\ Ohm)$	$Z_r(Sec\ Ohm)$
۱	$۶۴\angle۸۳,۲۸^\circ$	$۱۳,۷۳\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۹,۲۴۵\angle۸۴,۲۸^\circ$
۲	-	$۱۴,۶۲\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۹,۲۴۵\angle۸۴,۲۸^\circ$
۳	$۶۰\angle۸۳,۹۷^\circ$	$۵۲,۲۵۷\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۷,۳۹۶\angle۸۴,۲۸^\circ$
۴	$۶۴\angle۸۰,۶۸^\circ$	$۲۴,۹۶۳\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۷,۳۹۶\angle۸۴,۲۸^\circ$
۵	$۵۱\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۴۱,۲۸۲\angle۸۱,۹۶^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۶	$۳۵,۳۶۵\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲۴,۵۴۷\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۷	$۵۱\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۴۱,۲۸۲\angle۸۱,۹۶^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۸	$۳۵,۳۶۵\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲۴,۵۴۷\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۹	$۳۵,۳۶۵\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲۴,۵۴۷\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۰	$۵۱\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۴۱,۲۸۲\angle۸۱,۹۶^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۱	$۳۵,۳۶۵\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲۴,۵۴۷\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۲	$۵۱\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۴۱,۲۸۲\angle۸۱,۹۶^\circ$	$۲,۰۳۴\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۳	$۶۴\angle۸۰,۶۸^\circ$	$۲۴,۹۶۳\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۷,۳۹۶\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۴	$۶۰\angle۸۳,۹۷^\circ$	$۵۲,۲۵۷\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۷,۳۹۶\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۵	-	$۱۴,۶۲\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۹,۲۴۵\angle۸۴,۲۸^\circ$
۱۶	$۶۴\angle۸۳,۲۸^\circ$	$۱۳,۷۳\angle۸۴,۲۸^\circ$	$۹,۲۴۵\angle۸۴,۲۸^\circ$

جریان برای هر باس به دست می آید. پس از آن به ازای هر مقاومت میزان ماکزیمم انحراف جریان در باس ها را به دست می آوریم که با این کار مقدار ۴۴۰ انحراف به دست می آید. به عبارت دیگر به ازای هر مقاومت از ۱ تا ۴۰ اهم در هر محل باسی را که وجود آن مقاومت بیشترین تأثیر در کاهش جریان خطلی آن باس داشته انتخاب و میزان انحراف جریان به وجود آمده را یادداشت می کنیم. این کار را برای هر دو نوع محدود کننده مقاومتی و راکتانسی انجام می دهیم. در نهایت با استفاده از داده های به دست آمده دیاگرامی مطابق با شکل (۸) به دست می آید.

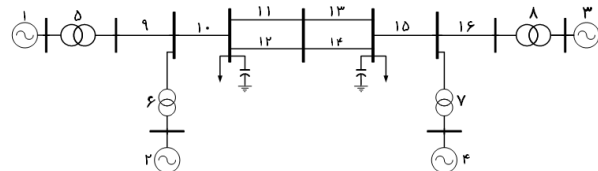


شکل (۸): تعداد دفعات بیشترین کاهش جریان خطا بر اساس محل محدود کننده

در این دیاگرام ۴۴۰ داده مربوط به ماکزیمم انحراف جریان خطا بر اساس محل قرارگیری محدودکننده دسته بندی گردیده اند. همان طور که مشخص است قرارگیری محدودکننده در محل های ۱۵ و ۱۰ و به عبارتی در خطوط هفت و دو نسبت به بقیه حالات باعث کاهش بیشتر جریان خطای باس ها می گردد. پیش از شروع مرحله دوم می خواهیم با اطلاعات این مرحله و مطالعات پایداری گذرا نوع محدودکننده جریان خطا را تعیین نماییم. برای این منظور باس نه را که به ازای محدودکننده های مختلف در موارد بیشتری کاهش جریان خطا را در آن داشته ایم در نظر می گیریم. حال محدودکننده را در جایی که بیشترین تأثیر را بر روی خطاهای این باس دارد یعنی وسط خط هفت قرار می دهیم. سپس مقادیر مختلف محدود کننده های مقاومتی و

۲-۴ جایابی و تعیین نوع

محدودکننده ابررسانا می تواند مطابق با شکل (۷) در شانزده مکان مختلف از شبکه مورد مطالعه و به صورت سری با ژنراتور، ترانس و یا خط قرار گیرد.



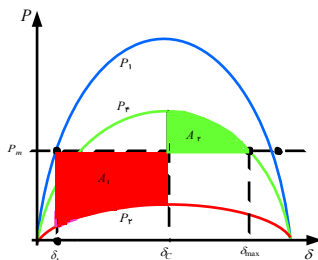
شکل (۷): مکان هایی که محدود کننده می تواند در شبکه قرار گیرد

بهترین مکان برای نصب محدودکننده در این مطالعه مطابق الگوریتم ارائه شده در دو مرحله معرفی می گردد. در مرحله اول از مطالعه انحراف جریان خطا و در مرحله دوم از مطالعه آنالیز حسایت توان استفاده می شود. برای این منظور ابتدا محدودکننده را در یک محل دلخواه مثلاً وسط خط یک قرار می دهیم. سپس مقدار آن را از ۱ تا ۴۰ و با پله های ۱ اهمی تغییر داده و با محاسبه جریان اتصال کوتاه هر باس مقدار انحراف جریان اتصال کوتاه را از جریان در هنگامی که محدودکننده ای در شبکه وجود ندارد به دست می آوریم. با این کار هر باس ۴۰ مقدار انحراف جریان خواهد داشت. اگر محدودکننده را در شانزده جای مختلف شبکه قرار دهیم بدین صورت ۶۴۰ مقدار انحراف

دارد. با فرض این که خطایی در وسط خط پایینی از شبکه شکل (۱۰) اتفاق افتد، توانی که از باس ۱ به باس ۲ منتقل می شود برابر است با

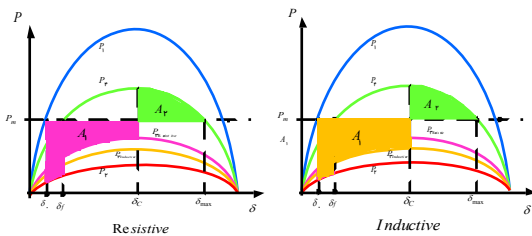
$$P_{12} = \text{Re}(E \times I^*) \quad (7)$$

این توان را در چهار مرحله در نظر می گیریم. در مرحله ۱ خطایی اتفاق نیفتاده است. در مرحله ۲ خطا اتفاق افتاده ولی محدود کننده وارد مدار نشده است. در مرحله ۳ محدود کننده های ابررسانا اعم از مقاومتی و راکتانی وارد مدار شده اند. در مرحله ۴ نیز رله های خط عمل کرده و خط را از مدار خارج کرده اند. شکل (۱۱) رابطه توان زاویه را برای شبکه مذکور بدون وجود محدود کننده نشان می دهد.



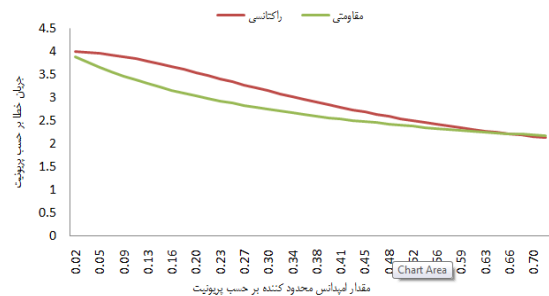
شکل (۱۱): منحنی توان زاویه قبل از به کار گیری محدود کننده

بر اساس معیار تساوی سطوح برای حفظ پایداری می بایست سطح ناحیه A_r بزرگتر و یا مساوی سطح ناحیه A_i باشد. در ادامه عملکرد سیستم با محدود کننده در هنگام بروز خطا در نظر می گیریم. شکل (۱۲) تأثیر محدود کننده جریان خطا را بر روی پایداری گذرای سیستم قدرت با استفاده از معیار انرژی نشان می دهد.



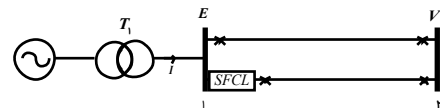
شکل (۱۲): منحنی توان زاویه بعد از به کار گیری محدود کننده

راکتانسی را از ۰ تا ۴۰ اهم برای خطای متقارن سه فاز روی باس نه وارد مدار می کنیم. شکل (۹) نمودار جریان خطا را بر حسب مقدار محدود کننده اعم از مقاومتی و یا راکتانی نشان می دهد. از این نمودار مشخص است که برای مقادیر یکسان محدود کننده مقاومتی و راکتانی، محدود کننده مقاومتی به میزان بیشتری جریان خطا را محدود می نماید.



شکل (۹): جریان خطا بر حسب مقدار محدود کننده

برای انتخاب دقیق نوع محدود کننده، رفتار دو نوع مقاومتی و راکتانی را در حالات گذرا بررسی می کنیم. برای این منظور یک شبکه ساده شامل یک ژنراتور که از طریق دو خط موازی یکسان و یک ترانسفورماتور به شین بی نهایت متصل می شود مطابق شکل (۱۰) در نظر می گیریم [۱۱].



شکل (۱۰): شبکه قدرت تک ماشینه متصل به شین بی نهایت با در نظر گرفتن محدود کننده ابررسانا در خط شماره دو

در هنگام بروز هرگونه اختلال در سیستم حرکت شتاب گیرنده و یا کند شونده روتور ژنراتور توسط معادله حرکت و یا نوسان قابل بیان است.

$$\frac{2H}{\omega} \ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (6)$$

که در آن H ثابت اینرسی، ω سرعت نامی سنکرون، P_m توان مکانیکی و P_e توان الکتریکی ماشین هستند. توان الکتریکی ماشین، تابعی از زاویه δ است و به توپولوژی شبکه بستگی

همانطور که از این شکل پیداست در صورت استفاده از محدود کننده مقاومتی سطح ناحیه A_1 نسبت به استفاده از مقدار یکسانی از محدود کننده راکتانسی کوچکتر می‌گردد لذا در صورت استفاده از محدود کننده مقاومتی پایداری گذرا بیشتر می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده و بحث های انجام گرفته تاکنون محدود کننده نوع مقاومتی به عنوان نوع مطلوب در نظر گرفته می‌شود.

در مرحله اول تعیین مکان بهینه، مدل سازی شبکه به صورت ساده بود و حتی محدود کننده ابررسانا نیز به صورت یک مقاومت و یا راکتانس معمولی مدل شد. در مرحله دوم مدل دقیقی از شبکه به همراه اطلاعات دینامیک ژنراتورها در نظر گرفته شده و برای انتخاب بهترین مکان از بین دو خط هفت و دو از آنالیز حساسیت توان با در نظر گرفتن مقدار مقاومت محدود کننده که در هنگام خطا به صورت سری با شبکه قرار می‌گیرد استفاده می‌گردد. بدین منظور ابتدا از مدلی که برای محدود کننده ابررسانای نوع مقاومتی مطرح گردید با ثابت زمانی های قرارگیری و حذف از مدار برابر با $1ms$ استفاده می‌کنیم مقدار محدود کننده را نیز در مطالعه خود از 0 تا 40 اهم با پله های 5 اهمی در نظر می‌گیریم. با بروز خطا در بلس های مختلف شبکه رله های حفاظتی خطا را در ناحیه اول خود دیده و آن را در زمان $0.04s$ قطع می‌کنند. با فرض اینکه همه کلیدهای قدرت شبکه مورد مطالعه دوسیکلی باشند، جمعاً $100ms$ طول می‌کشد تا خطای به وجود آمده توسط رله های حفاظتی برطرف گردد. پس از تأخیر کوتاهی دوباره کلید هلی قدرت بسته می‌شوند. زمان شبیه سازی ها نیز برای رسیدن شبکه به مقدار کار حالت ماندگار خود $10s$ در نظر می‌گیریم. برای شروع یک محدود کننده را با مقدار مثلاً 5 اهم در وسط خط دو قرار می‌دهیم سپس میزان تغییر توان در بین نواحی را به ازای خطا در هر باس و بعد از آن میزان حساسیت باس مربوطه برای مقاومت 5 اهمی نسبت به حالتی که مقاومتی وجود ندارد حساب می‌کنیم. در نهایت با جمع کردن مقدارهای به دست آمده برای باس

های گوناگون میزان حساسیت کلی را به دست می‌آوریم. این کار برای هریک از مقاومت های 0 تا 40 اهمی به صورت جداگانه انجام می‌دهیم. در ضمن عیناً موارد ذکر شده برای محدود کننده در خط هفت نیز انجام می‌گیرد. جدول (۲) میزان حساسیت تغییرات توان را نسبت به تغییر مقاومت محدود کننده نشان می‌دهد.

جدول (۲): حساسیت تغییرات توان نسبت به تغییر مقاومت محدود کننده

مقدار تغییرات مقاومت محدود کننده بر حسب اهم	مقدار SI به ازای محدود کننده در خط هفت	مقدار SI به ازای محدود کننده در خط نو
$0 \Rightarrow 5$	-۶۳,۵۳۴۸	-۷۲,۷۴۵
$0 \Rightarrow 10$	-۴۴,۸۵۳۱	-۳۶,۷۰۷
$0 \Rightarrow 15$	-۲۹,۰۹۳۹	-۲۶,۱۲۶
$0 \Rightarrow 20$	-۲۲,۴۹	-۲۳,۸۴۴
$0 \Rightarrow 25$	-۱۹,۱۱۹۸	-۲۳,۷۰۳
$0 \Rightarrow 30$	-۱۷,۱۱۹۱	-۲۳,۴۹۲
$0 \Rightarrow 35$	-۱۵,۵۸۴۷	-۲۳,۲۵۶
$0 \Rightarrow 40$	-۱۳,۶۴۷۶	-۲۲,۹۰۸
مجموع حساسیت توان	-۲۲۵,۴۵	-۲۵۲,۷۸

از داده های این جدول پیداست که به جز در مقدارهای پایین مقاومت یعنی در مقدارهای 20 اهم و بالاتر، میزان حساسیت توان در خط هفت کمتر از خط دو است. با توجه به این که مقاومت های پایین نمی‌توانند نقش زیادی در محدود سازی جریان خطا بازی کنند، بنابراین از کمتر بودن مقادیر حساسیت توان در خط دو در این مقادیر صرف نظر می‌گردد. همچنین مقدار حساسیت توان کلی نیز که از جمع حساسیت های توان برای همه مقاومت ها به دست آمده برای محدود کننده های نصب شده در خط هفت کمتر شده است. بنابراین خط هفت به عنوان مکان بهینه برای نصب محدود کننده ابررسانای نوع مقاومتی انتخاب می‌گردد.

۳-۴ بررسی عملکرد عناصر حفاظتی در حضور

محدود کننده منتخب

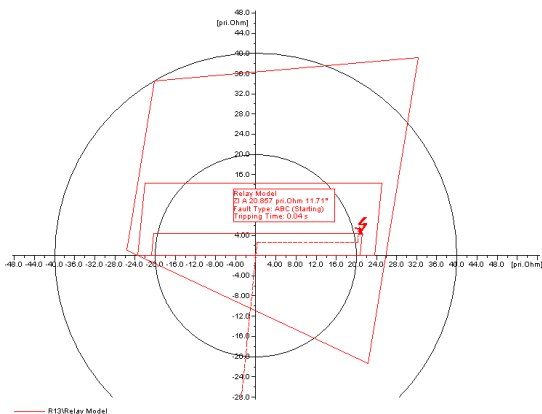
محدود کننده مقاومتی اهمی به عنوان محدود کننده بهینه در خط هفت قرار گرفته است. این خط را رله های دیستانس R_{13} و R_{14} به عنوان رله های اصلی و رله های دیستانس R_{11} ، R_9 و

مقاومتی از لحاظ پایداری گذرا مناسب نیست باید چله دیگری اندیشید. برای حل این مشکل می توان مشخصه رله های اصلی خط را از مهو به چهار ضلعی یا کواد تغییر داد. یکی از محاسن این رله، آن است که علاوه بر حساسیت رله به راکتانس خط، با توجه به امتداد این مشخصه در جهت محور R می توان مقاومت خط را نیز در تنظیم رله در نظر گرفت. با توجه به موارد ذکر شده تنظیمات رله های R_{13} و R_{14} مطابق با جدول (۴) خواهد بود.

جدول (۴): تنظیمات رله های اصلی خط هفت با مشخصه چهار ضلعی

تنظیمات رله های R_{13} و R_{14} با مشخصه چهار ضلعی	ناحیه ۳		ناحیه ۲		ناحیه ۱	
	R_r	X_r	R_r	X_r	R_r	X_r
تنظیمات R و X'						
رله R_{13}	۴۵	۶۲/۱۵۵	۴۱	۲۴/۸۳۹	۳۶	۷/۴۶۲
رله R_{14}	۴۵	۵۹/۶۶	۴۱	۵۱/۹۹	۳۷	۷/۴

با وجود تنظیمات فوق عملکرد رله های اصلی خط مطابق حالتی می گردد که محدود کننده در شبکه وجود ندارد. برای مثال با رخ داد خطای سه فازی در ۸۰٪ خط از طرف شین نه عملکرد رله R_{13} مطابق شکل (۱۴) خواهد بود. یعنی رله قادر است خطاهای آن طرف محدود کننده را به خوبی حفاظت نماید. در ضمن نواحی دوم و سوم این رله ها قادرند همچون قبل به خوبی وظیفه پشتیبانی خود از خطوط دیگر را نیز انجام دهند.



شکل (۱۴): عملکرد رله R_{13} در اثر وقوع خطا در محدود ناحیه اول رله

R_{16} به عنوان پشتیبان محافظت می کنند. ناحیه اول رله های دیستانس R_{13} و R_{14} ، ۸۰٪ خط هفت را از دو طرف محافظت می نماید. نواحی دوم هر یک از این رله ها نیز ۲۰٪ خط هفت را تحت پوشش خود قرار می دهد. رله های دیستانس R_9 و R_{11} به عنوان رله پشتیبان کل خط هفت را در ناحیه سه خود می بینند. رله R_{16} نیز ۱۸٪ خط هفت را در ناحیه دو و ۸۲٪ را در ناحیه سه خود می بیند. پس از قرارگیری محدود کننده در وسط خط مذکور ناحیه یک رله های R_{13} و R_{14} به ۵۰٪ کاهش می یابد. به عبارت دیگر حفاظت اصلی خط قادر خواهد بود فقط تا نیمه خط مورد حفاظت را بپوشاند. رله های R_9 ، R_{11} و R_{16} نیز تنها ۵۰٪ از خط را در ناحیه سه خود می بینند شاید کاهش برد رله های پشتیبان R_9 ، R_{11} و R_{16} مشکل مهمی در رفع خطاهای حفاظتی خط هفت بازی نکنند اما کاهش برد رله های اصلی این خط مشکل مهمی محسوب می گردد. یک راه حل این است که مقدار ماکزیمم مقاومتی را که رله های اصلی می توانند در نواحی خود ببینند را محاسبه و در نظر بگیریم. همانطور که ذکر گردید بیشترین مقاومتی که یک رله دیستانس می تواند برای خطاهای سه فاز در ناحیه حفاظتی خود ببیند برابر با $R_{Max} = Z_M \cos\phi$ بوده و برای نواحی سه گانه مختلف رله های دیستانس R_{13} و R_{14} در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مقدار ماکزیمم مقاومتی که رله می تواند در نواحی سه گانه خود ببیند

مقدار مقاومت بر حسب اهم	ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱
مقدار ماکزیمم مقاومت قابل دید برای رله R_{13}	۱۰/۳۶	۲/۴۸	۰/۷۴۶
مقدار ماکزیمم مقاومت قابل دید برای رله R_{14}	۶/۲۹	۵/۲۰	۰/۷۳۵

مطابق با جدول (۳) در صورتی که در بهترین حالت بخواهیم که ناحیه سوم رله های اصلی محافظت خط اصلی را بر عهده بگیرند ماکزیمم مقدار مقاومت قابل دید برای رله R_{13} ، ۱۰/۳۶ و برای رله R_{14} ، ۶/۲۹ خواهد بود. با توجه به این که مقادیر پایین مقاومت محدود کننده نمی تواند سهم بسزایی در کاهش جریان خطا بازی کند و همچنین مقادیر پایین محدود کننده

۵- نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتم هلی جدیدی به منظور جایابی و تعیین نوع محدودکننده‌های جریان خطای ابرسانا ارائه گردید. بر خلاف مطالعات قبلی اثر رله‌های حفاظتی و عملکرد آنها نیز در هنگام خطای سه فاز در مکان‌های مختلف شبکه در نظر گرفته شد. الگوریتم‌ها به گونه‌ای ارائه گردید که محدود کننده منتخب علاوه بر کاهش سطح اتصال کوتاه، پایداری گذرا را نیز بهبود بخشید. نتایج مطالعات و شبیه سازی بر روی شبکه مورد مطالعه نشان داد که محدود کننده مورد نظر فقط بر روی عملکرد رله های اصلی خط محل نصب اثر داشت که با تغییر مشخصه رله از مهو به کواد مشکل برطرف گشت.

۷- مراجع

[1] CIGRE Working Group, "Fault Current Limiters Report on the Activities of CIGRE WG A3.10", Power Engineering Society General Meeting, October 2005. [2] V. V. Terzija and H. J. Koglin, "On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation", IEEE Trans. Power Deliver., Vol. 19, No. 3, pp 1012-1017, July 2004.

[۲] حمید جوادی، محمد اخلاقی، "مطالعه حالتهای گذرای روش شکسته شدن شین برای محدودکردن جریان اتصال کوتاه در پست فیروز بهرام"، دومین کنفرانس حفاظت و کنترل سیستم های قدرت، قطب علمی قدرت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دی ماه ۱۳۸۶.

[3] Werner Buckel, Reinhold Kleiner, "Superconductivity, fundamentals and applications", Wiley-VCH, Second Edition, 2004.

[4] S.S.Kalasi, A.Malozemoff, "HTS Fault Current Limiter Concept", Power Engineering Society General Meeting, Vol.2, June 2004.

[5] Byung Chul Sung, Dong Keun Park, Jung-Wook Park, Tae Kuk Ko, "Study on Optimal Location of a Resistive SFCL Applied to an

Electric Power Grid", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.19, June 2009.

[6] Hongesombut K, Mitani Y, Tsuji K, "Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.13, No.2, July 2003.

[7] Byung Chul Sung, Dong Keun Park, Jung-Wook Park, Tae Kuk Ko, "Study on Optimal Location of a Resistive SFCL Applied to an Electric Power Grid", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.19, June 2009.

[8] Hun Shim, Sung-Yul Kim, In-Su Bae, Jin-O Kim, "The reliability-based model for superconducting fault current limiter", Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, December 2009.

[9] Kameda H, Taniguchi H, "Setting method of specific parameters of a superconducting fault current limiter considering the operation of power system protection-resistance-type and rectifier-type SFCLs in overhead transmission systems", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, August 2002.

[10] Prabha Shankar Kondur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Professional, January 1994.

[11] Almeida M.E, Rocha C.S, Dente J.A, Branco P.J.C, "Enhancement of power system transient stability and power quality using superconducting fault current limiters", International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 2009.