

طراحی و جایابی بهینه محدودساز ابرسانایی جریان خطا با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل سلسله مراتبی

رضا شریفی
حسین حیدری
قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت
دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران
ایران

واژه‌های کلیدی: محدودساز ابرسانایی جریان خطا (SFCL)، بهینه‌سازی،
تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

چکیده

برای طراحی و نصب یک محدودساز ابرسانایی در سیستم قدرت، لازم است با انجام شبیه‌سازهای مختلف، مشخصات و خصوصیت‌های الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی حتی الامکان به شکل مدارهای معادل و مدل‌های تحلیلی ریاضی نوشته شوند. سپس با توجه به بررسی‌های اقتصادی و ویژگی‌های سیستم انتقال یا توزیع، نوع محدودساز انتخاب و در نهایت متناسب با عملکرد محدودساز پارامترهای مربوطه طراحی و در خطوط انتخاب شده نصب شود. با توجه به اینکه تغییر پارامترهای محدودساز از جمله ابعاد، مقاومت و دما می‌تواند نحوه محدودسازی و زمانهای فرونشانی (Quench) و بازیابی (Restore) را متاثر سازد، موازنه پارامترهای مختلف برای حصول به طراحی بهینه از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله ابتدا شبیه‌سازهای لازم برای بررسی مشخصات الکتریکی و حرارتی محدودساز نوع مقاومتی انجام شده و با

استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره (Multiple Criteria Decision Making)، ابعاد و مشخصات محدودساز برای استفاده در سیستم قدرت با اهدافی مانند حداکثر مقاومت محدودسازی، حداقل جریان خطا، حداقل زمانهای فرونشانی و بازیابی و در نهایت هزینه ساخت محدودساز و سیستم میرد، بهینه شده و سپس با بررسی عملکرد محدودساز در شبکه نمونه ۳۰ شینه IEEE و استفاده از تحلیل سلسله مراتبی محل مناسب برای محدودساز انتخاب می‌شود.

۱- مقدمه

در زمان وقوع اتصال کوتاه، جریان خطا تا بیشتر از ۱۰ برابر جریان نامی افزایش می‌یابد که با رشد و گسترش شبکه‌های برق، به صورت مستمر نیز افزوده می‌شود. لذا عبور چنین جریانی از شبکه احتیاج به تجهیزاتی دارد که توانایی تحمل این جریان را داشته باشند و نیز جهت قطع این جریان به

جمله ویژگیهای این سیمها هزینه ساخت و تلفات ac بسیار کم و عدم تاثیر از میدانهای مغناطیسی خارجی است. به علاوه امکان اتصال آنها به سیمهای معمولی نیز فراهم شده است [۱۴-۱۵].

برای طراحی و نصب یک محدودساز ابرسانا لازم است با انجام شبیه‌سازیهای مختلف، مشخصات و خصوصیت‌های الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی حتی الامکان به شکل مدارهای معادل و مدل‌های تحلیلی ریاضی نوشته شوند. سپس با توجه به بررسی‌های اقتصادی و ویژگیهای سیستم انتقال یا توزیع، نوع محدودساز انتخاب و در نهایت متناسب با عملکرد محدودساز پارامترهای مربوطه به صورت بهینه طراحی شده و محدودسازها در خطوط انتخاب شده نصب شود. اما فرآیند تصمیم‌گیری در شرایطی که با چند معیار (Criteria) مغایر و نامتناسب همراه شود، از مسائل پیچیده و مشکل است. این معیارها می‌توانند شامل تعدادی شاخصه (Attribute) و یا تعدادی هدف (Objective) باشد که متناسب با آنها چند شاخصه (MADM) یا چند هدفه (MODM) نامیده می‌شوند. تفاوت این دو روش تصمیم‌گیری چند معیاره در فضای متغیرهای تصمیم نیز وجود دارد چنانکه تصمیم‌گیری چند شاخصه به منظور انتخاب یک گزینه از میان گزینه‌های مفروض و با لحاظ خصوصیت‌های مختلف هر یک از گزینه‌ها انجام می‌شود و دارای یک تابع هدف و احتمالاً تعدادی قید است. اما در تصمیم‌گیری چند هدفه، تعدادی هدف وجود دارد که هر یک می‌تواند نقطه یا نقاط بهینه مخصوص به خود را داشته باشد اما تلاش می‌شود نقطه‌ای یافت شود که تمام اهداف را در وضعیت بهینه قرار می‌دهد و البته ممکن است چنین نقطه‌ای یافت نشود و در نتیجه نقاطی به عنوان نقطه بهینه مؤثر که از بهینه‌سازی بخشی از اهداف به دست می‌آیند حاصل شود. یکی از مهمترین روشهای تصمیم‌گیری چندشاخصه، تحلیل سلسله مراتبی است که با مقایسه دو به دو، اهمیت گزینه‌ها نسبت به یکدیگر مشخص شده و در نهایت با لحاظ وزن نسبی هر شاخصه، اولویت گزینه‌ها معلوم شده و گزینه مطلوب انتخاب می‌شود [۱۶].

کلیدهایی با قدرت قطع بالا نیاز است که هزینه‌های سنگینی به سیستم تحمیل می‌کند. اگر به روشی بتوان پس از آشکارسازی خطا، جریان را محدود نمود، از نظر فنی و اقتصادی صرفه‌جویی قابل توجهی صورت می‌گیرد. انواع مختلفی از محدود کننده‌های خطا تا به حال برای شبکه‌های توزیع و انتقال معرفی شده‌اند. این تجهیزات در حالت عادی، مقاومت کمی در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهند ولی پس از وقوع اتصال کوتاه و در لحظات اولیه شروع جریان، مقاومت آنها یکباره بزرگ شده و از بالا رفتن جریان اتصال کوتاه جلوگیری می‌کنند. محدودسازها باید بعد از هر بار عملکرد قابل بازیابی بوده و در حالت ماندگار سیستم، باعث ایجاد اضافه ولتاژ و یا تزریق هارمونیک به سیستم نگردند [۱].

محدودسازهای اولیه با استفاده از کلیدهای مکانیکی امپدانس را در زمان خطا در مسیر جریان قرار می‌دادند. با ورود ادوات الکترونیک قدرت کلیدهای تریتوری برای این موضوع مورد استفاده قرار گرفتند [۲] و مدارهای متعددی از جمله مدارهای امپدانس تشدید [۳] و ابرسانا [۴-۶]، ارائه شده است. محدودکننده ابرسانا در شرایط بهره‌برداری عادی سیستم یک سیم‌پیچ با خاصیت ابرسانایی است که مقاومت و افت ولتاژ کمی را باعث می‌شود ولی به محض وقوع اتصال کوتاه و افزایش جریان از حد جریان بحرانی سیم‌پیچ مربوط مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهد و به همین دلیل جریان خطا کاهش می‌یابد. عمل فوق در زمان کوتاهی انجام شده و نیاز به سیستم کشف خطا ندارد [۷-۸].

در دو دهه گذشته با کشف ابرساناهای دمابالا مدارهای مختلفی برای محدودسازی جریان خطا از جمله محدودسازهای ابرسانای مقاومتی [۵-۶]، عبور شار [۹]، القایی [۱۰]، شار نامتعادل [۱۱-۱۲] و هسته آهنی اشباع شده [۱۳] پیشنهاد شده‌اند.

در ۴ سال اخیر و بخصوص بعد از ساخت نسل دوم سیمهای ابرسانا (2G) موسوم به سیمهای پوشش‌دار (Coated Conductor) افق روشنی در استفاده از ابرسانا برای کاربردهای مختلف سیستم قدرت به وجود آمده است. از

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

یکنواختی گرمایی استفاده شده است [۱۸]. گذار از وضعیت ابرسانایی به مقاومتی با سه عامل چگالی جریان، دما و میدان مغناطیسی امکانپذیر است. در محدودساز مقاومتی نوع عبور شار، از خاصیت افزایش چگالی جریان به جای گرما برای گذار از ابرسانایی به مقاومتی استفاده شده و در نتیجه به زمان بازیابی و خنک سازی ابرسانا نیازی نیست اما بر خلاف نوع مقاومتی معمولی به حجم بسیار بالایی از مواد ابرسانا نیاز خواهد داشت [۶]. افت ولتاژ محدودساز در وضعیت ابرسانا، عبور شار و نرمال با توجه به دمای بحرانی و جریان بحرانی به شکل رابطه ۱ قابل ارائه است [۲۰-۱۹].

برای محدودسازی اولین پیک از جریان خطا، عملکرد سریع محدودساز لازم است. از سوی دیگر، افزایش خیلی سریع امپدانس منجر به ظاهر شدن اضافه ولتاژ خطرناک در شبکه خواهد شد. برآوردها نشان می‌دهد که زمان تغییر امپدانس بین ۲ تا ۴ میلی‌ثانیه برای محدودسازی اولین پیک جریان خطا کفایت می‌کند و باعث اضافه ولتاژ نخواهد شد.

$$u_s = \begin{cases} u_{s0} \left(\frac{|i_s|}{I_{c0}} \right)^n \left(1 - \frac{\Delta T}{T_c - T_0} \right)^{-n} \operatorname{sgn}(i_s) & \text{if } |i_s| \leq I_b(T) \text{ and } T < T_c \\ u_{s0} \left(\frac{I_b(T)}{I_{c0}} \right)^n \left(1 - \frac{\Delta T}{T_c - T_0} \right)^{-n} \operatorname{sgn}(i_s) + R_n [i_s - \operatorname{sgn}(i_s) I_b(T)] & \text{if } |i_s| > I_b(T) \text{ and } T < T_c \\ R_n i_s (1 - \gamma \Delta T) & T \geq T_c \end{cases} \quad (1)$$

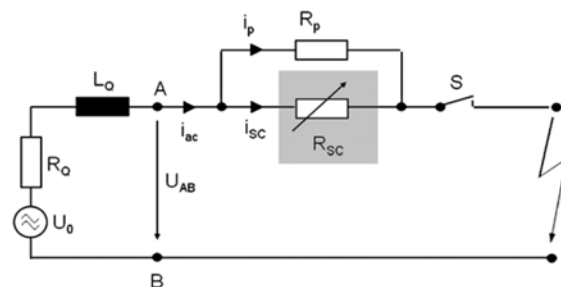
در این رابطه u_{s0} افت ولتاژ در جریان بحرانی I_{c0} با معیار یک میکروولت بر سانتیمتر، $I_b(T)$ مقدار جریان مرزی است که نواحی ابرسانا (خزش شار) و عبور شار را جدا می‌کند، T_c دمای بحرانی، T_b دمای خنک‌سازی، R_n مقاومت حالت نرمال، $n \approx 9$ توان خزش شار و $\gamma \approx 0.0007$ ضریب اثر دما است.

امپدانس ادوات تحت شرایط نرمال و خطا، جریان عملکرد، زمان عملکرد و زمان بازیابی از پارامترهای اصلی خارجی محدودساز می‌باشد. مقادیر قابل قبول از این پارامترها در محدوده توصیف شده به وسیله مشخصات نواحی خطا و نرمال شبکه قدرت به دست می‌آید. با توجه به اینکه

در این مقاله ابتدا با شبیه‌سازی رفتار محدودساز مقاومتی و بررسی تغییرات ایجاد شده در اثر تغییر پارامترها گزینه‌های مختلفی که در محدوده قیود سیستم هستند مشخص شده و با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره نحوه بهینه‌سازی یک محدودساز مقاومتی برای نصب در سیستم قدرت ارائه می‌شود. سپس برای هر یک از خطوط شبکه نمونه ۳۰ شینه IEEE محدودساز مناسب طراحی شده و چون نصب محدودساز در همه خطوط از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی محل‌های مناسب پیشنهادی برای نصب محدودساز مشخص می‌شود.

۲- محدودساز ابرسانایی جریان خطا

محدودسازهای مقاومتی ابرسانا به دلیل عدم نیاز به هسته و شکل ساده ساخت آن بیشتر مورد استفاده قرار گرفته و به صورت سری در سیستم قرار می‌گیرند. این محدودساز مقاومت اهمی خالص است که بسته به نوع، شدت خطا و ... مقدار مقاومت نیز تغییر می‌یابد. در شرایط عادی شبکه میزان این مقاومت صفر بوده و هیچگونه افت ولتاژی در شبکه به وجود نمی‌آید. نوع مقاومتی دارای حجم کوچکی است ولی به طول زیادی از سیم ابرسانا نیاز دارد. شکل ۱ اساس کار این نوع محدودساز و پارامترهای مورد استفاده را معرفی می‌کند [۱۷].



شکل ۱: محدودساز ابرسانای مقاومتی

عامل محدودساز جریان، مقدار مناسبی از ابرسانا به صورت سیم، نوار یا کپه (توده) ابرساناست که با مقاومت معمولی یعنی ورقه نازکی از هادی طلا یا نقره (در نسل اول) و آلیاژهای فلزی (در نسل دوم) موازی شده است. از این لایه برای ممانعت از تأثیر رطوبت یا هوا روی ابرسانا و

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

مقاومت عبور شار رخ می‌دهد. برای $|J| \geq J_{c0}$ ، ولتاژ با معادله زیر مشخص می‌شود.

$$V = \rho_f (J \mp J_{c0}) \quad (6)$$

که ρ_f مقاومت مخصوص عبور شار نامیده می‌شود و شیب مشخصه $V-J$ است. علامت + و - به چگالی جریان منفی و مثبت بستگی دارد. مقدار مقاومت مخصوص ρ_f مربوط به ابرسانا با تقسیم V بر J به دست می‌آید. معادله زیر در شرایط $|J| \geq J_{c0}$ برای ρ قابل بازنویسی است.

$$\rho = \left\{ \frac{J_{c0}}{|J|} \left(\frac{T - T_b}{T_c - T_b} - 1 \right) + 1 \right\} \rho_f \quad (7)$$

در محدودساز جریان خطا از نوع مقاومتی مقدار اولیه جریان محدودسازی مساوی جریان بحرانی است. اگر طول ابرسانا l_{sc} باشد مقدار V_{sc} نیز برابر $A_{sc} \cdot l_{sc}$ است. با استفاده از این رابطه مقدار R_{FCL} به صورت زیر به دست می‌آید.

$$R_{FCL} = \rho \frac{l_{sc}}{A_{sc}} = \left\{ \frac{J_{c0}}{|J|} \left(\frac{T - T_b}{T_c - T_b} - 1 \right) + 1 \right\} \frac{\rho_f J_{c0} V_{sc}}{I_{ini}^2} \quad (8)$$

مقدار انرژی انباشته گرما (W) می‌تواند توسط انتگرال‌گیری از رابطه $R_{FCL} I^2 / V_{sc}$ محاسبه شود [۲۱].

$$W = \int i^2 R_{FCL} / V_{sc} \quad (9)$$

۳- تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل سلسله‌مراتبی

چنانکه گفته شد فرآیند تصمیم‌گیری در شرایطی که با چند معیار مغایر و نامتناسب همراه شود، از مسائل پیچیده و مشکل است. اهداف در تصمیم‌گیری چند معیاره شامل توابعی با حداکثر مطلوب یا سود (Benefit) و توابعی با حداقل مطلوب یا هزینه (Cost) است. بعد از مشخص شدن معیارها و آلترناتیوها، پنج روش مهم برای همسانی و مقایسه عبارتند از مدل جمع وزنی (WSM)، مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مدل تحلیل سلسله مراتبی بازنگری شده (RAHP)، مدل ضرب وزنی (WPM) و مدل تحلیل سلسله مراتبی ضربی [۱۶]. ساده‌ترین روش، مدل جمع وزنی است که بعد از تشخیص مزیت هر آلترناتیو نسبت به هر معیار مجموع مزیتها برای یک آلترناتیو محاسبه و مقدار حداکثر انتخاب می‌شود.

محدودساز مقاومتی، جریان خطا را با افزایش مقاومت محدود می‌سازد، پارامترهای کلیدی اثرگذار بر طراحی، مقدار جریان محدود شده (I_{lim})، دوره خطا (Δt) و افزایش دمای مجاز (ΔT) در عناصر ابرسانا می‌باشد. معادلات ۲ و ۳ اندازه و حجم سیم ابرسانا را برای محدودسازی مقاومتی نشان می‌دهد:

$$R = \frac{V_0}{I_{lim}} = \frac{\rho \cdot L}{t \cdot w} \quad (2)$$

$$I_{lim} = t \cdot w \cdot \sqrt{\frac{C_p \cdot \Delta T}{\rho \cdot \Delta t}} \quad (3)$$

که R مقاومت ابرسانا برای شرایط خطا، L طول نمونه محدودساز جریان، Δt ماکزیمم دوره خطا، ΔT ماکزیمم افزایش دمای مجاز، C_p گرمای ویژه موثر ابرسانا و w و t عرض، ضخامت و مقاومت ویژه ابرسانا و V_0 ولتاژ سیستم هستند. با حل این معادلات، مینیمم حجم هادی برای محدودساز مقاومتی قابل محاسبه است. نکته قابل توجه اینکه حجم مینیمم هادی (Vol_{min}) مستقل از مقاومت هادی است.

$$Vol_{min} = \frac{I_{lim} \cdot V_0 \cdot \Delta t}{C_p \cdot \Delta T} \quad (4)$$

مقدار چگالی جریان بحرانی و مشخصات تولید مقاومت عبور شار در ابرسانا به میزان دمای ابرسانا و چگالی میدان مغناطیسی بستگی دارد. مقاومت عبور شار همچنین با مقدار لحظه‌ای چگالی جریان عبوری تغییر می‌کند به طوری که در شبیه‌سازی‌های عملکرد محدودسازی، ارتباط دما و چگالی شار باید در نظر گرفته شود. مقدار چگالی جریان بحرانی با افزایش دمای ابرسانا به طور خطی کاهش می‌یابد. اگر T_c دمای بحرانی مربوط به ابرسانا، T_b دمای نیتروژن مایع و J_{c0} چگالی جریان بحرانی در لحظه $T = T_b$ باشد، J_c می‌تواند به عنوان تابعی از دما به صورت زیر بیان شود.

$$J_c = -\frac{J_{c0}}{T_c - T_b} (T - T_b) + J_{c0} \quad (5)$$

در تخمین‌ها وقتی که $T > T_c$ باشد از این ملاحظات چشم‌پوشی می‌شود زیرا مقاومت نرمال در ابرسانا به جای

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

برای انتخاب اولویتها در سیستمی که شامل توابع هزینه و فایده است، دو روش نسبت سود به هزینه و تفاضل سود و هزینه قابل استفاده است. اگر تعداد توابع سود n_1 باشد

$$P_{i, WSM, Ratio} = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} a_{ij} w_j}{\sum_{j=n_1+1}^n a_{ij} w_j} \quad (14)$$

$$P_{i, WSM, Dif} = \sum_{j=1}^{n_1} a_{ij} w_j - \sum_{j=n_1+1}^n a_{ij} w_j \quad (15)$$

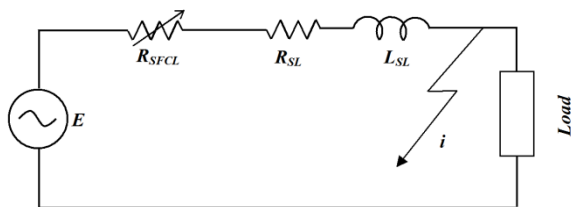
در صورت استفاده از ضرب وزنی یا تحلیل سلسله مراتبی وزنی، روشهای نسبت سود به هزینه و تفاضل سود و هزینه به شکل ذیل خواهند شد.

$$R \left(\frac{A_K}{A_L} \right) = \frac{\prod_{i=1}^{n_1} a_{K_i}^{w_i}}{\prod_{i=n_1+1}^n a_{K_i}^{w_i}} \times \frac{\prod_{j=n_1+1}^n a_{L_j}^{w_j}}{\prod_{j=1}^{n_1} a_{L_j}^{w_j}} \quad (16)$$

$$D \left(\frac{A_K}{A_L} \right) = \prod_{i=1}^{n_1} a_{K_i}^{w_i} \times \prod_{j=n_1+1}^n a_{L_j}^{w_j} - \prod_{j=n_1+1}^n a_{K_i}^{w_j} \times \prod_{j=1}^{n_1} a_{L_j}^{w_j} \quad (17)$$

۴- طراحی و جایابی بهینه محدودساز ابرسانا

برای انجام شبیه‌سازی، یک خط نمونه ۳۳ کیلوولت (تکفاز ۱۹ کیلوولت) مانند شکل ۲ انتخاب و پارامترهای قابل بررسی برای طراحی محدودساز مشخص شده است.



شکل ۲: مدار معادل تکفاز برای شبیه‌سازی پارامترهای محدودساز

پارامترهای قابل تغییر شامل دمای بحرانی متناسب با نوع ماده ابرسانا، دمای سیال خنک‌سازی متناسب با نوع خنک‌ساز، سطح مقطع، حجم (طول)، مقاومت عبور شار، مقاومت محدودساز، ظرفیت گرمایی ویژه و توان خنک‌سازی هستند. با شبیه‌سازی یک نمونه محدودساز به وسیله نرم‌افزار PSCAD/EMTDC و تغییر پارامترها نحوه تغییر حداکثر مقاومت، حداکثر دما، حداکثر جریان خطا، زمان فرونشانی و زمان بازیابی با تغییر پارامترها مشخص شده است که نتایج در شکل‌های بعدی ملاحظه می‌شود. حداکثر جریان خط ۴۵۰ آمپر

در روش WSM باید تمامی معیارها عددی و از یک واحد باشند. برای n معیار و m آльтرناتیو، مزیت هر یک از آльтرناتیوها عبارتست از

$$P_{WSM}^* = \max_i P_i = \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (10)$$

for $i = 1, 2, 3, \dots, m$

با توجه به تفاوت واحدها، روش WSM مناسب بهینه‌سازی محدودساز نیست. در روش AHP برای حل مشکل عدم هماهنگی واحدها، به هر یک از انتخابها از یک تا ۹ اختصاص می‌یابد. در نتیجه قابل مقایسه خواهند بود.

$$P_{AHP}^* = \max_i P_i = \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad (11)$$

for $i = 1, 2, 3, \dots, m$

در تحلیل سلسله مراتبی (Analytical Hierarchy Process) که برای اولین بار توسط توماس ساعتی (Saaty) در سال ۱۹۸۰ مطرح شد [۲۲]، هدف در بالاترین مرتبه قرار گرفته و در رده‌های بعدی شاخصه‌ها و گزینه‌ها قرار می‌گیرند. سپس با مقایسه دو به دو، اهمیت گزینه‌ها نسبت به یکدیگر مشخص شده و در نهایت با لحاظ وزن نسبی هر شاخصه، اولویت گزینه‌ها مشخص شده و گزینه مطلوب انتخاب می‌شود. اگر هر یک از وزنه‌های روش AHP به عدد بزرگتر در هر ردیف تقسیم و نرمالیزه شود، روش تحلیل بازنگری شده RAHP حاصل خواهد شد. در روش ضرب وزنی برای مقایسه دو آльтرناتیو از حاصلضرب آنها به قوه ضریب وزنی استفاده می‌شود. اگر عدد حاصل از یک بزرگتر باشد، K از L مطلوبتر است. با توجه به حذف واحدها، روش WPM بی‌ابعاد نامیده شده است.

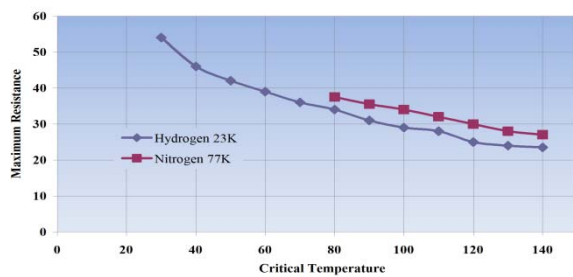
$$R \left(\frac{A_K}{A_L} \right) = \prod_{j=1}^n \left(\frac{a_{Kj}}{a_{Lj}} \right)^{w_j} \quad (12)$$

در روش سلسله مراتبی ضربی نیز از ضرب شاخصه‌ها برای تحلیل سلسله مراتبی استفاده می‌شود.

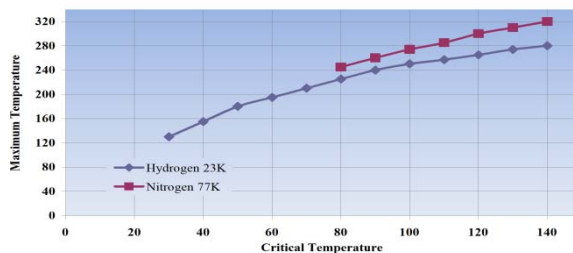
$$P_{i, multi-AHP} = \prod_{j=1}^n (a_{ij})^{w_j} \quad (13)$$

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

بازیابی چنانکه ملاحظه می‌شود افزایش دمای بحرانی تمامی اهداف را بدتر و کاهش دمای بحرانی تمامی اهداف را بهتر می‌سازد در نتیجه همواره حداقل سازی دمای بحرانی مطلوب است. از سوی دیگر سیال خنک ساز در دمای ۷۷ کلوین نیتروژن مایع و در دمای ۲۳ کلوین نیتروژن مایع است. از ابررساناهای قابل استفاده برای محدودسازی MgB_2 با دمای بحرانی ۳۹ کلوین دارای دمای بحرانی کمتری به نسبت YBCO و BSCCO است اما نیازمند خنک‌سازی با نیتروژن است که هزینه‌بر و خطرناک است. لذا با عنایت به پارامترهای اقتصادی، نیتروژن مایع با دمای ۷۷ کلوین انتخاب شد. برای بررسی دقیق موضوع شبیه‌سازی با دو سیال و دماهای بحرانی ۳۰ تا ۱۴۰ کلوین انجام شده است که نتایج مندرج شکل‌های ۴ و ۵ بیانگر نحوه استفاده از نیتروژن و محدوده دمای بحرانی مجاز است. از سوی دیگر افزایش مقاومت ویژه نیز منجر به بهبود کلیه پارامترها می‌شود که متناسب با نوع ابررسانای استفاده شده تغییر خواهد داشت و بعد از انتخاب ماده ابررسانا قابل تغییر نیست. همین‌طور در صورت انتخاب ابررسانا، مقاومت عبور شار نیز به خواص ذاتی وابسته است و متغیر نخواهد بود.



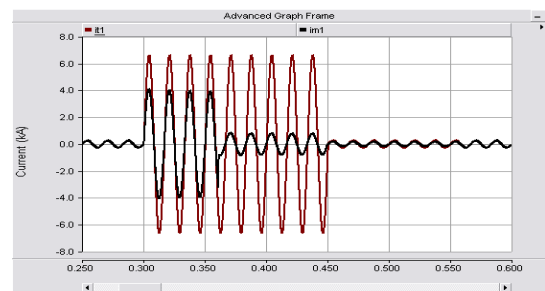
شکل ۴. بررسی تغییرات حداکثر مقاومت محدودساز بر حسب دمای بحرانی با دماهای خنک‌سازی ۲۳ و ۷۷ کلوین



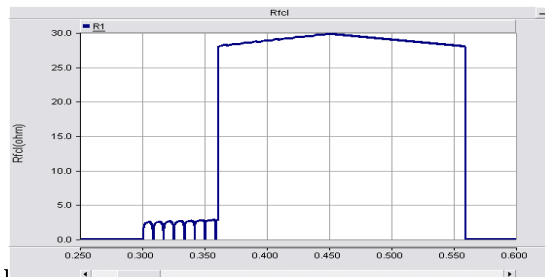
شکل ۵. بررسی تغییرات حداکثر دما بر حسب دمای بحرانی با دماهای خنک‌سازی ۲۳ و ۷۷ کلوین

است که در صورت نبود محدودساز می‌تواند تا ۶/۵ کیلوآمپر افزایش یابد اما با محدودساز به حدود ۴ کیلوآمپر در ناحیه عبور شار و ۹۵۰ آمپر در ناحیه مقاومتی نرمال محدود می‌شود. خطا بعد از مدت ۰/۱۵ ثانیه برای بررسی تاثیر بازیابی برداشته می‌شود.

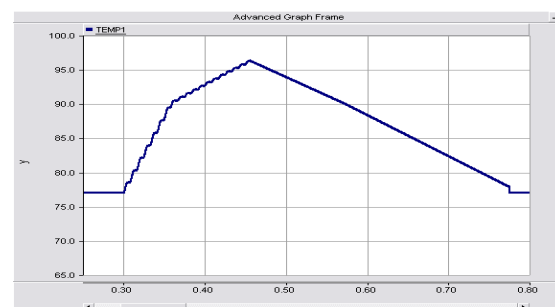
در گام بعدی با افزایش و کاهش هر یک از پارامترها و انجام شبیه‌سازی، نحوه تاثیر آنها را بر شاخصهای مدنظر مشاهده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، جدول شماره ۱ برای نحوه تغییرات نتیجه خواهد شد.



الف



ب



ج

شکل ۳: (الف). مقدار کاهش جریان یک فاز در صورت محدودسازی (ب). تغییرات مقاومت و (ج). تغییرات دما

با لحاظ اهداف بهینه‌سازی یعنی حداکثر سازی مقاومت محدودساز، حداقل سازی دما، حداقل سازی پیک جریان خطا، حداقل سازی زمان خاموشی و حداقل سازی زمان

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

با توجه به ساخت صنعتی نسل دوم ابررساناها موسوم به سیم پوششی در سال ۲۰۰۷ که قیمتی ۲۰٪ قیمت ابررساناهای لایه نازک YBCO دارند و از لحاظ قیمت قابل رقابت با کابل‌های متداول مسی هستند، با ملاحظات اقتصادی انتخاب سیم YBCO سیم پوششی مناسب است.

جدول ۱. نحوه تغییر شاخصها با تغییر پارامترها

زمان بازتابی	زمان بازنشانی	حداکثر جریان خطا	حداکثر دما	حداکثر مقاومت		
افزایش	افزایش	بی تغییر	افزایش	کاهش	افزایش	دمای بحرانی
کاهش	کاهش	بی تغییر	کاهش	افزایش	کاهش	
افزایش	کاهش	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش	دمای خنک ساز
کاهش	افزایش	افزایش	کاهش	کاهش	کاهش	
کاهش	افزایش	افزایش	افزایش	کاهش	افزایش	سطح مقطع
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	افزایش	کاهش	
کاهش	افزایش	کاهش	کاهش	افزایش	افزایش	حجم (طول)
افزایش	بی تغییر	افزایش	افزایش	کاهش	کاهش	
افزایش	کاهش	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش	مقاومت عبور شار
کاهش	افزایش	افزایش	کاهش	کاهش	کاهش	
کاهش	بی تغییر	بی تغییر	کاهش	افزایش	افزایش	مقاومت نرمال
افزایش	بی تغییر	بی تغییر	افزایش	کاهش	کاهش	
افزایش	افزایش	بی تغییر	کاهش	کاهش	افزایش	ظرفیت گرمایی
کاهش	کاهش	بی تغییر	افزایش	افزایش	کاهش	
کاهش	افزایش	بی تغییر	کاهش	کاهش	افزایش	توان خنک سازی
افزایش	کاهش	بی تغییر	افزایش	افزایش	کاهش	

مقادیری انتخاب و شبیه‌سازیها به شکل مجزا انجام شده است. برای انتخاب مقادیر بهینه محدودساز، نتایج دو روش تفاضلی و نسبی با یکدیگر مقایسه شده است. اگر تنها یکی از اهداف بهینه‌سازی شود، نتایج براساس جدول ۲ خواهد بود. در این جدول هر سطر بیانگر جواب بهینه برای یکی از اهداف است. با استفاده از هریک از مدل‌های تصمیم‌گیری و لحاظ همه اهداف نتایج براساس جدول ۳ خواهد شد که هر سطر جدول بیانگر جواب بهینه برای تمامی اهداف با توجه به روش بهینه‌سازی انتخاب شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود سه جواب از چهار جواب مشابه است یعنی سه روش به جوابهای یکسان رسیده‌اند و بیانگر کارآمدی الگوریتم در حصول به جواب بهینه است.

از سوی دیگر با توجه به سطح مقطع بسیار کم، لازم است از متراف بالایی سیم استفاده شود که باید به شکل کویل ساخته شود که دارای راکتانس خواهد بود. در نتیجه برای حذف راکتانس از ساختار مشابه مقاله [۲۳] استفاده می‌شود که با پیچش خلاف جهت باعث حذف راکتانس می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، بهینه‌سازی با ابررسانای سیم پوششی با دمای بحرانی ۹۰ کلوین، سیال با دمای ۷۷ کلوین و مقاومت ویژه‌های مشخص صورت خواهد گرفت. جریان محدودسازی نیز با توجه به شرایط سیستم ۶۵۰ آمپر فرض شده است. در نتیجه متغیرهای سطح مقطع، حجم، ظرفیت گرمایی ویژه که با انتخاب فلز پوششی قابل تغییر است و توان خنک‌سازی بهینه می‌شوند. برای هریک با توجه به قیود مساله مانند حداکثر زمان بازتابی و حداکثر جریان در پیک اول،

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

۵- جایابی بهینه محدودساز ابرسانا

محدودساز مناسب طراحی می‌شود اما تنها محدودسازی که بیشترین تاثیر را در بهبود شرایط سیستم دارد ساخته و نصب می‌شود. شبکه انتخاب شده سیستم استاندارد ۳۰ شینه IEEE است که نوع تکامل یافته آن دارای ۶ ژنراتور، ۶ ترانسفورماتور و ۳۲ خط انتقال یک مداره و دو خط انتقال دو مداره در ولتاژهای ۱۳۲ و ۳۳ کیلوولت دارد.

بعد از بررسی روش طراحی بهینه محدودساز ابرسانا، با در نظر گرفتن یک سیستم نمونه استاندارد سعی می‌شود محل مناسب برای نصب محدودساز انتخاب شود. در انتخاب محل نصب محدودساز حداقل سازی تعداد و ظرفیت محدودساز با توجه به هزینه‌های نصب و نگهداری اهمیت زیادی دارد. لذا در این بررسی برای هر یک از خطوط سیستم قدرت یک

جدول ۲. مقادیر بهینه برای هر یک از اهداف

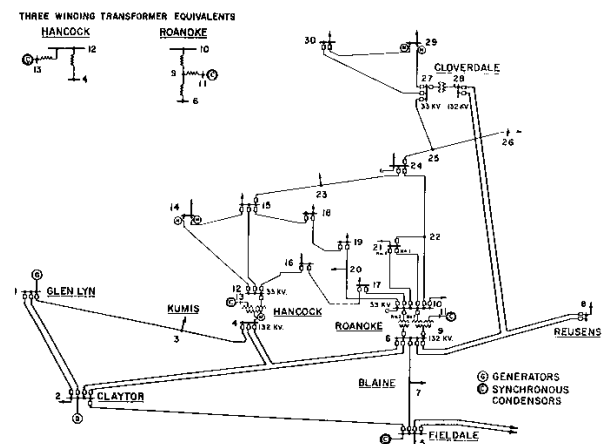
هدف	سطح مقطع (۱۰-۷)	حجم (۱۰-۳)	ظرفیت گرمایی	توان خنک‌سازی	مقاومت	دما	جریان خطا	زمان خاموشی	زمان بازیابی
حداکثر مقاومت	۶	۲۵	۱/۴	۱/۵	۸۴	۱۴۷	۲۸۴۵	۸/۴	۳۱۴
حداقل دما	۶	۲۰	۲	۲/۵	۵۷	۹۴	۳۹۷۲	۱۴	۲/۵
حداقل جریان خطا	۶	۲۵	۱/۴	۱/۵	۷۵	۱۸۵	۲۶۷۴	۷	۳۱۸
حداقل خاموشی	۶	۲۵	۱/۴	۲/۵	۶۲	۲۷۴	۴۱۲۳	۳/۲	۴۲۰
حداقل بازیابی	۶	۲۵	۲	۲/۵	۷۱	۹۴	۳۱۲۷	۱۵	۲

جدول ۳. مقادیر بهینه برای تمامی اهداف

هدف	سطح مقطع	حجم	ظرفیت گرمایی	خنک‌سازی	مقاومت	دما	جریان خطا	زمان خاموشی	زمان بازیابی
روش AHP افزایشی تفاضلی	۶	۲۵	۱/۴	۱/۵	۸۴	۱۴۷	۲۸۴۵	۸/۴	۳۱۴
روش AHP افزایشی نسبی	۶	۲۵	۱/۴	۱/۵	۸۴	۱۴۷	۲۸۴۵	۸/۴	۳۱۴
روش AHP ضریبی تفاضلی	۶	۲۵	۱/۴	۱/۵	۸۴	۱۴۷	۲۸۴۵	۸/۴	۳۱۴
روش AHP ضریبی نسبی	۶	۲۵	۱/۴	۱/۵	۷۵	۱۸۵	۲۶۷۴	۷	۳۱۸

یک از شینه‌های ۳۰ گانه تاثیر آنها روی دو معیار بررسی شده است. یکی تاثیر روی مقدار محدودسازی جریان در شبکه و دیگری تاثیر روی جبران افت ولتاژ در شینه‌های مجاور خطا. در حالت عادی جمع جریانهای نامی سیستم ۳۴ پریونیت (تعداد خطوط) و جمع ولتاژهای ناشی از پخش بار ۲۸/۴ پریونیت (برای ۳۰ شین) است. با اعمال خطا روی هر یک از شینها در حالت عدم وجود محدودساز در بدترین شرایط یعنی خطا در شین شماره ۶ حداکثر جمع جریان تا ۳۴۱ پریونیت افزایش و حداقل جمع ولتاژها تا ۱۴/۹ پریونیت کاهش می‌یابد که نتایج در جدول ۴ آمده است.

حال در هر یک از خطوط، محدودساز طراحی شده قرار گرفته و برای هر محدودساز یک بار نتایج تکرار می‌شود. با



شکل ۶. شبکه ۳۰ شینه IEEE

برای این سیستم متناسب با جریانهای نامی خطوط ۳۶ محدودساز طراحی و با اعمال خطای اتصال کوتاه روی هر

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

بهترین حالت برای حداقل جریان اتصال کوتاه زمانی است که خطا در شین شماره ۹ روی داده و محدودساز در خط شماره ۱ است و بدترین حالت وقتی است که خطا در شین شماره ۶ و محدودساز نیز در خط شماره ۳۶ قرار گرفته است. کمترین افت ولتاژ نیز زمانی است که خطا در شین شماره ۹ و محدودساز در خط شماره ۱۱ است و بیشترین آن نیز به ازای خطا در شین ۱۰ و محدودساز در خط شماره ۱۱ است. حال اگر برای حداکثر جریان و حداقل ولتاژ اهمیت یکسانی فرض شود با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و هر دو روش افزایشی نسبی و افزایشی تفاضلی مشخص می‌شود اولویت نصب محدودساز با توجه به خطای شین ۹ و سطح اتصال کوتاه قابل توجه شین، به ترتیب خطوط ۱، ۲ و ۵ خواهد بود. البته برای بهبود فرایند جایابی در سیستم‌های واقعی می‌توان متناسب با احتمال وقوع خطا در هر یک از شینها ضرایب وزنی را متفاوت فرض کرد.

جدول ۵. اولویت نصب محدودساز برای خطای شین ۹

شماره شین خطا	شماره خط محدودساز	شاخص افزایشی نسبی	شاخص افزایشی تفاضلی
۹	۱	۰/۷۷۸۹۱	-۷/۶۴۱۸
۹	۲	۰/۷۷۸۸۹	-۷/۶۴۱۸
۹	۵	۰/۷۷۸۶۱	-۷/۶۵۶۲

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای طراحی و جایابی محدودسازهای ابرسانایی جریان خطا ارائه و نتایج حاصل از به کارگیری الگوریتم بررسی شد. شبیه‌سازیهای انجام شده نشان داد که استفاده از روشهای تصمیم‌گیری چند معیاره و بخصوص تحلیل سلسله مراتبی می‌تواند در فاز طراحی و سپس نصب تجهیزات سیستم قدرت از جمله محدودسازها موثر باشد و با توجه به شرایط سیستم و اهمیت شاخص‌ها جوابهای مناسبی ارائه نماید.

انجام حدود ۱۱۴۰ شبیه‌سازی نتایج حاصل از نصب هر محدودساز در سیستم مشخص می‌شود. برای انتخاب یکی از حالتها مجدداً از تحلیل سلسله مراتبی استفاده می‌شود و با توجه به دو معیار حداقل سازی حداکثر جریان خطا (هزینه) و حداکثر سازی حداقل ولتاژ حالت‌های مختلف بررسی می‌شود.

جدول ۴. حداکثر جریانها و حداقل افت ولتاژها با خطا در هر شین

شماره شین خطا	جمع حداکثر جریانها	جمع حداقل ولتاژها
-	۳۴	۲۸/۴
۱	۲۰۷	۲۶
۲	۱۶۲	۲۴/۸
۳	۲۱۷	۲۴/۲
۴	۳۰۲	۲۰/۵
۵	۸۲	۲۵/۹
۶	۳۴۱	۱۴/۹
۷	۹۶	۲۵/۱
۸	۲۶۰	۲۰/۴
۹	۳۵	۲۸/۴
۱۰	۲۴۶	۱۵/۱
۱۱	۸۸	۲۲/۱
۱۲	۲۴۸	۲۱/۹
۱۳	۲۲۶	۲۳/۸
۱۴	۱۸۶	۲۳/۹
۱۵	۲۸۳	۲۱/۸
۱۶	۱۸۶	۲۵/۱
۱۷	۱۸۵	۲۲/۲
۱۸	۲۶۴	۲۲/۸
۱۹	۲۲۹	۲۲/۶
۲۰	۲۰۵	۲۲/۳
۲۱	۲۸۵	۱۸/۹
۲۲	۳۳۳	۱۸/۷
۲۳	۲۷۳	۲۲/۴
۲۴	۲۵۳	۲۰/۴
۲۵	۱۳۸	۲۲/۴
۲۶	۱۱۱	۲۴/۹
۲۷	۱۲۱	۲۳
۲۸	۲۶۴	۲۳
۲۹	۱۱۶	۲۴/۵
۳۰	۱۱۳	۲۴/۷

- Current Injection System,” *Superconductor Science and Technology*, Vol. 21, 2008.
- [13] S. B. Abbott, D. A. Robinson, S. Perera, F. A. Darmann, C. J. Hawley and T. P. Beales, “Simulation of HTS Saturable Core Type FCLs for MV Distribution Systems,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 21, No. 2, April 2006.
- [14] Y. Xie, K. Tekletsadik, D. W. Hazelton, and V. Selvamanickam, “Second Generation High-Temperature Superconducting Wires for Fault Current Limiter Applications,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.17, No.2, 2007.
- [15] A. Kudymow, M. Noe, C. Schacherer, H. Kinder, W. Prusseit, “Investigation of YBCO Coated Conductor for Application in Resistive Superconducting Fault Current Limiters,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.17, No.2, 2007.
- [16] Evangelos Triantaphyllou and Khalid Baig, “The Impact of Aggregating Benefit and Cost Criteria in Four MCDA Methods,” *IEEE Trans. Engineering Management*, Vol. 52, No. 2, May 2005.
- [17] M. Noe, M. Steurer, “High-Temperature Superconductor Fault Current Limiters: Concepts, Applications, and Development Status,” *Superconductor Science and Technology* vol. 20, 2007.
- [18] A. Henning, M. Kurrat, “Thermal-Electric Simulations of Coated Conductors with a Variable Conductivity of the Buffer Layer,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.17, No.2, 2007.
- [19] V. Meerovich, V. Sokolovsky, “Thermal Regimes of HTS Cylinders Operating in Devices for Fault Current Limitation,” *Superconductor Science and Technology*, Vol. 20, 2007.
- [20] H. Hooshyar, H. Heydari, M. Savaghebi, R. Sharifi, B. Shahbazi, “An investigation on optimum volume of superconducting element of RSFCL considering harmonic generation,” *3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2008*, Singapore, 3-5 Jun., 2008.
- [21] P. Tixador, Y. Brunet, J. Leveque, V. D. Pham, “Hybrid Superconducting AC Fault Current Limiter Principle and Previous Studies,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 28, No. 1, 1992.
- [22] R. R. Clarke, “Choosing an integrated resource plan for electric utilities: an analytic hierarchy approach,” *Energy Conversion Engineering Conference, IECEC 96*, Proceedings of the 31st Intersociety, Volume 3, 11-16 Aug. 1996
- [23] Dong Keung Park and others, “Analysis of the operational characteristics of a resistive SFCL by using the YBCO coated conductor,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, June 2007
- [1] L. Ye, L. Lin, and K. P. Juengst, “Application Studies of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 12, No. 1, pp. 900-903, Mar. 2002.
- [2] M. M. A. Salama, H. Temraz, A. Y. Chikhani, M. A. Bayoumi, “Fault-Current Limiter with Thyristor-Controlled Impedance,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, Jul 1993.
- [3] G. G. Karady, “Principles of Fault Current Limitation by a Resonant LC Circuit,” *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 139, No. 1, pp.1-6, January 1992.
- [4] E. Thuries et al., “Toward the Superconducting Fault Current Limiter,” *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 6, pp. 801–808, Apr. 1991.
- [5] M. Noe, K. P. Juengst, F. Wefel, L. Cowey, A. Wolf, and S. Elschner, “Investigation of High Tc Bulk Material for its Use in Resistive Superconducting Fault Currnt Limiters,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, Mar. 2001.
- [6] H. Heydari, H. Hooshyar, M. Savaghebi, R. Sharifi, “Proper Dimension of HTS Material for a Resistive Type SFCL in an 11kV Distribution System,” *IEEE PES PowerAfrica 2007 Conference and Exposition*, Johannesburg, South Africa, 16-20 July 2007.
- [7] M. Noe, B. R. Oswald, “Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.9, No.2, Jun. 1999.
- [8] H. Heydari, F. Faghihi, A. H. Poursoltanmohamadi, R. Sharifi and A. Goudarzi, “Viable Superconductor Based Current Control Circuit for High Current Injection System,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Accepted for future publication, 2009.
- [9] H. Shimizu, Y. Yokomizu, M. Goto, T. Matsumura, and N. Murayama, “A Study on Required Volume of Superconducting Element for Flux Flow Resistance Type Fault Current Limiter,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, June 2003.
- [10] H. Kado and M. Ichikawa, “Performance of a High Tc Superconducting Fault Current Limiter, Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 7, No.2, June 1997.
- [11] S. H. Lim, H. S. Choi, D. Ch. Chung, S. Ko and B. S. Han, “Impedance Variation of a Flux-Lock Type SFCL Dependent on Winding Direction Between Coil 1 and Coil 2,” *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, June 2005.
- [12] H. Heydari, F. Faghihi, R. Sharifi, A. H. Poursoltanmohammadi, “Superconducting Technology for Overcurrent Limiting in a 25 kA