

جایابی بهینه HTSFCLها با در نظر گرفتن امنیت، پایداری و هماهنگی رله‌های جریان زیاد و انتخاب هوشمند مشخصه رله جریان زیاد در شبکه‌های متصل به نیروگاه بادی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی

مصطفی دودانگه^۱، نوید غفارزاده^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

mostafadodangh@edu.ikiu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

ghaffarzadeh@eng.ikiu.ac.ir

چکیده: با رشد سریع نیروگاه‌های بادی، این منابع در انواع و سطوح ولتاژی مختلف به شبکه متصل می‌شوند. دسته‌ای از این منابع دارای ژنراتور القایی دوسوتغذیه هستند. گسترش تولیدات پراکنده مشکلاتی مانند افزایش سطح اتصال کوتاه و از دست رفتن هماهنگی تجهیزات حفاظتی ایجاد می‌کند. حین رخداد اتصال کوتاه، با تغییرات شدید سرعت، توان و زاویه روتور ژنراتور سنکرون و آسنکرون، ممکن است پایداری گذرای این منابع از بین برود. محدودکننده‌های ابررسانا فوق‌گرمایی (HTSFCL) بر اساس وابستگی مقاومت-دما توانایی کاهش جریان خطا را دارند. در این مقاله، پس از بررسی توانایی HTSFCL در کاهش جریان خطا و افزایش میزان پایداری در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC، تابع هدف جایابی بهینه HTSFCL با در نظر گرفتن هم‌زمان شاخص‌های امنیت و هماهنگی حفاظتی، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا ژنراتور سنکرون و آسنکرون در شبکه‌های متصل به نیروگاه بادی برای اولین بار پیشنهاد می‌شود. مکان و اندازه بهینه HTSFCL در شبکه آزمون ۳۰ شینه IEEE با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی در نرم‌افزار MATLAB با در نظر گرفتن شاخص‌های منفرد و چندهدفه تعیین و شاخص‌های امنیت، هماهنگی رله‌های جریان زیاد و پایداری ولتاژ و زاویه روتور در شش حالت مقایسه شدند. نتایج به دست آمده کارایی روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکامل تفاضلی، امنیت، پایداری ولتاژ و زاویه روتور، محدودکننده جریان خطای ابررسانا فوق‌گرمایی.

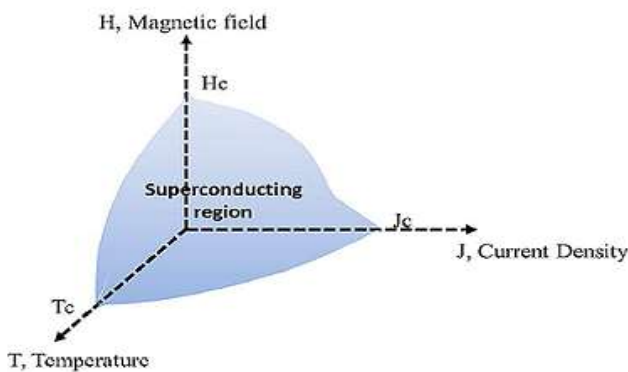
۱. مقدمه

در اینجا توانایی HTSFCL در محدود کردن جریان خطا و بهبود شاخص‌های پایداری ولتاژ و زاویه رتور نمایش داده می‌شود. راه‌حل جامع‌تری برای مسئله مکان‌یابی HTSFCL با اهداف کاهش جریان خطا و بهبود شاخص‌های پایداری ولتاژ، پایداری گذرا و هماهنگی رله‌های جریان زیاد ارائه شد و با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE^۴) مقادیر بهینه محاسبه می‌گردد. این راهکار در شبکه آزمون ۳۰ شینه IEEE بررسی و نتایج با حالات تک‌هدفه مقایسه می‌شود.

۲. نواحی کار مدل HTSFCL

مواد HTS دارای دو ناحیه ابرسانی و عادی (مقاومتی) هستند و گذار بین این دو حالت مطابق شکل (۱) با جریان، میدان مغناطیسی و دما تعیین می‌شود. استفاده از نسل دوم تولیدات HTS (مانند YBCO) به جای نسل اول (مانند BSCCO) در FCLها باعث افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت و کاهش هزینه‌های تولید شده است [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. YBCO در کمتر از ۷۷ درجه کلوین ابرساناست، لذا نیتروژن مایع ماده‌ای مناسب برای استفاده در سیستم خنک‌کاری آن است. با عبور جریان خطا دیگر سیستم خنک‌سازی قادر به کاهش دمای سریع HTSFCL نیست و با بالا رفتن دما، HTSFCL وارد ناحیه مقاومتی می‌شود، بعد از رخداد خطا HTSFCL به زمانی تحت عنوان «زمان بازیابی» نیاز دارد تا از حالت مقاومتی به حالت ابرسانی خود برگردد. سیستم‌های خنک‌کاری قوی‌تر سبب کاهش زمان بازیابی می‌شود.

شکل (۲) مشخصه (E-I) مواد HTS را نمایش می‌دهد. این مشخصه با رابطه (۱) بیان می‌شود که در آن، E افت ولتاژ واحد طول و I جریان عبوری از ابرساناست؛ n هم ثابتی برای کنترل شیب مشخصه است که در نیمه‌رساناهای سریع حدود ۲۰ می‌باشد.

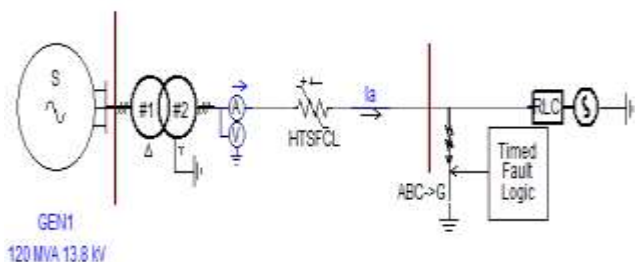


شکل (۱): ناحیه ابرسانی HTS

از مسائل مهم در طراحی، بهره‌برداری و حفاظت سیستم‌های قدرت سطح جریان اتصال کوتاه است. با گسترش شبکه‌های به هم پیوسته، افزایش دیمانند و افزایش تولیدات پراکنده مقدار جریان اتصال کوتاه نیز افزایش می‌یابد. همچنین با رخداد اتصال کوتاه نوسانات شدیدی در زاویه‌گشتاور ژنراتورهای شبکه ایجاد می‌گردد و با تداوم خطا باعث از دست رفتن پایداری گذرا می‌شود. هزینه بالا و مشکلات جایگزینی تجهیزات شبکه سبب استفاده از تجهیزاتی برای محدود کردن جریان خطا شده است. همچنین حضور تولیدات پراکنده در شبکه، مشکلاتی در هماهنگی تجهیزات حفاظتی ایجاد می‌کند. بهره‌برداران شبکه علاقه‌مند به استفاده و نصب FCLهایی هستند که در کارکرد عادی سیستم دارای امپدانس (افت ولتاژ و تلفات) کمی باشند و اولین پیک جریان خطا را محدود نماید و نیز هزینه تعمیر و نگهداری کمی داشته باشند. بنابراین HTSFCLها مورد توجه قرار گرفتند. مواد ساخته‌شده با تکنولوژی HTS گذر سریعی (کمتر از ۱ms) بین ناحیه مقاومتی و ابرسانی خود دارند و در ناحیه ابرسانی مقاومت کم و در ناحیه مقاومتی توانایی محدود کردن پیک اول جریان اتصال کوتاه را دارند. HTSFCLها دارای انواع سلفی، مقاومتی و سلفی-مقاومتی هستند که به خاطر خصوصیات نوع مقاومتی این نوع بیشتر مورد توجه است [۲]. برخلاف نوع سلفی این نوع مشکلات پایداری ولتاژ ایجاد نمی‌کند [۳ و ۴]. پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی HTS سبب بالا رفتن کیفیت، سرعت عملکرد و مقاومت حالت مقاومتی HTSFCL شده و هزینه‌های خنک‌سازی ابرسانا را کاهش داده است [۳ و ۵].

تعیین مکان و اندازه بهینه HTSFCLهای مقاومتی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی همچون PSO^۳ و GA^۲ در مراجع مختلف بررسی شده است. مرجع [۶] امکان‌سنجی استفاده از ابرساناها را انجام داده است و مکان و اندازه مناسب SFCL را با آنالیز خطا به دست می‌آورد. مراجع [۷ و ۲۰] با هدف هماهنگی تجهیزات حفاظتی و [۸ و ۲۰] در حضور DG مکان‌یابی بهینه را انجام داده است. در مراجع پیشین همواره به یکی از اهداف پایداری (۹ و ۱۰)، امنیت [۳، ۱۱ و ۱۲] و یا حفاظت در تعیین بهینه مکان و مقدار FCL توجه می‌کنند. درحالی‌که شاخص‌های کاهش جریان خطا، هماهنگی حفاظتی و پایداری ولتاژ و زاویه و حضور تولیدات پراکنده باید به صورت همزمان در تعیین بهینه محدودسازهای جریان خطا در نظر گرفته شود.

1. High Temperature Superconducting Fault Current Limiter
2. Genetic Algorithm
3. Particle Swarm Optimization



شکل (۳): سیستم تک‌ماشینه (سنکرون) متصل به شین بی‌نهایت

تغییرات توان اکتیو سبب تغییرات در زاویه رتور شده و با کاهش این تغییرات نوسانات زاویه رتور نیز کم‌تر شد که نشان‌دهنده شرایط بهتری از نظر پایداری گذراست.

هدف اصلی استفاده از HTSFCL، کاهش جریان خطاست. مطابق نمودار ردیف پنجم شکل (۴) با استفاده از HTSFCL در این سیستم حدود ۳۵٪ کاسته شده است.

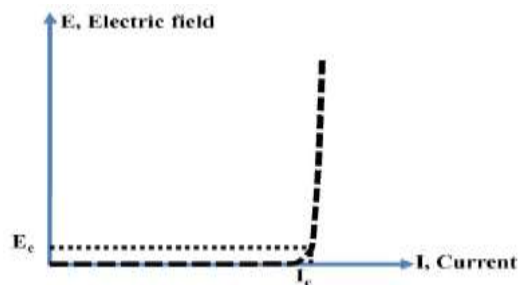
مطابق نمودارهای ردیف دوم و ششم شکل (۴) با استفاده از HTSFCL تغییرات توان راکتیو و ولتاژ در لحظه رخداد خطا کمتر شده و تغییرات مقدار موثر ولتاژ استاتور ۳۳٪ کاهش یافت، که مؤید رسیدن به شرایط بهتری از نظر پایداری ولتاژ است.

۲.۳. ژنراتور بادی دوسو تغذیه

برای بررسی کارایی HTS-FCL مقاومتی، عملکرد آن در یک شبکه متصل به DF² مطابق شکل (۵) آزموده شد. این سیستم دارای یک ژنراتور بادی دوسو تغذیه ۳MVA و ۰/۶۹kV است که با یک ترانسفورماتور ۳MVA و ۰/۶۹kV/۲۰kV و Y/Y و HTSFCL مقاومتی با مقادیر قسمت قبل به شبکه با فرکانس ۵۰Hz و نسبت R/X=۵ متصل است که در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی شد.

شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب تغییرات پارامترهای ژنراتور بادی دوسو تغذیه (تغییرات توان اکتیو، توان راکتیو، سرعت چرخش ژنراتور، زاویه رتور، جریان و ولتاژ) را در محدوده رخداد خطا برای دو حالت استفاده و عدم استفاده از HTSFCL نشان می‌دهد.

با توجه به نمودارهای ردیف اول و سوم شکل (۶) مشاهده می‌شود که در این شبکه با استفاده از HTSFCL نوسانات توان اکتیو کاهش چشمگیری نداشته ولی تغییرات سرعت ۵٪ کاهش یافته است. همچنین مطابق نمودارهای ردیف دوم و چهارم شکل (۶) با استفاده از HTSFCL کاهش ۴۰ درصدی افت توان راکتیو و کاهش ۱۰ درصدی میزان افت ولتاژ مؤثر نشان‌دهنده شرایط بهتر از نظر پایداری ولتاژ است.



شکل (۲): مشخصه ولتاژ-جریان HTS

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (1)$$

HTSFCLهای مقاومتی با مقاومت‌های متغیر با زمان و دما مدل می‌شوند. هر دو مدل کارایی مناسبی دارند. برخ از مراجع مقاومت HTSFCL را مطابق رابطه (۲) برحسب جریان (i)، مقاومت حالت عادی R_{max}، مقاومت ابرسانایی R_{sc}، جریان بحرانی (حدود I_Q) و n (ثابتی که برابر ۲۴ است) بیان می‌کنند.

$$R_{HTSFCL}(i) = R_{max} \frac{\left(\frac{i}{I_Q} \right)^n}{1 + \left(\frac{i}{I_Q} \right)^n} + R_{sc} \quad (2)$$

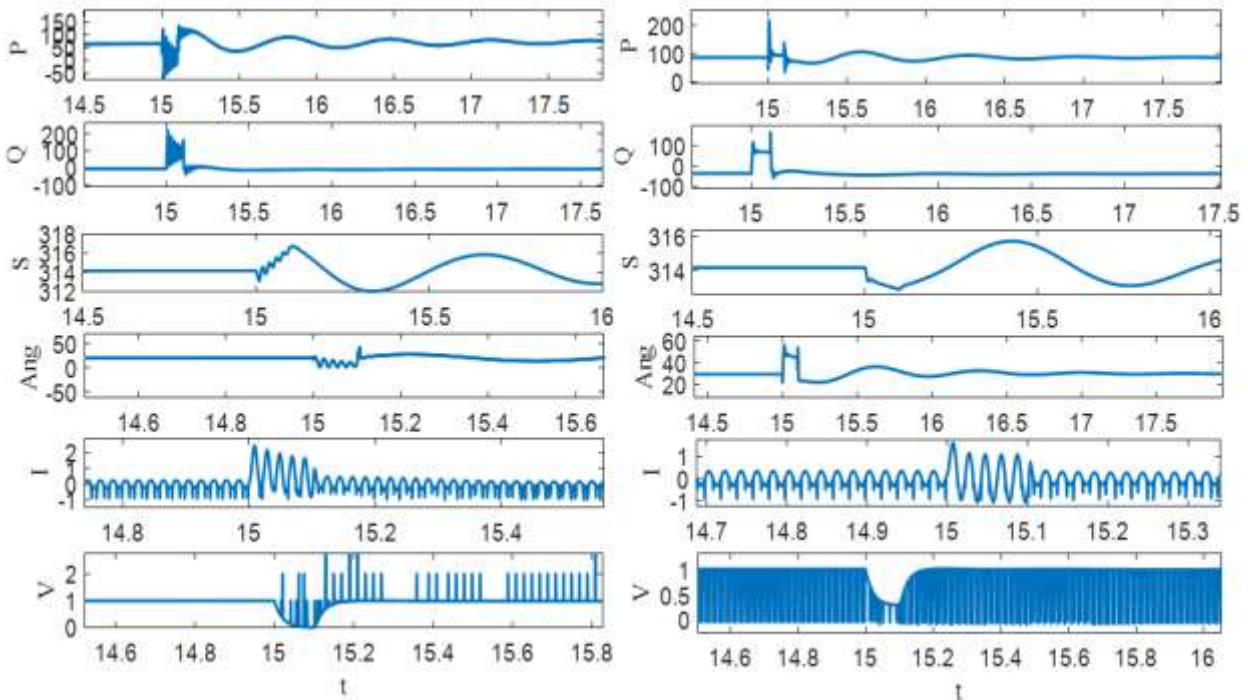
۳. کارایی مدل HTSFCL

۱.۳. ژنراتور سنکرون

برای بررسی کارایی HTS-FCL مقاومتی، عملکرد آن در شبکه متصل به ماشین سنکرون متصل به شین بی‌نهایت، مطابق شکل (۳) آزموده شد. این سیستم دارای یک ماشین سنکرون ۱۲۰MVA و ۱۳/۸kV است که با یک ۱۲۰MVA و ۱۳/۸kV/۲۳۰kV و Δ/Y به شبکه بی‌نهایت ۲۳۰kV با فرکانس ۵۰Hz و نسبت X/R=۹ متصل شده و HTSFCL مقاومتی، با مقادیر R_{max}=۵۰Ω، n=۲۴، I_Q=۲pu و R_{sc}=۵۰Ω است و زمان گذر از حالت ابرسانایی به مقاومتی حدود ۱ms است [۹، ۱۰، ۱۶ و ۱۷] که در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC^۱ شبیه‌سازی شد. یک خطای سه‌فاز به زمین در زمان ۱۵ ثانیه و به مدت ۱۰۰ms اعمال شد. شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب تغییرات پارامترهای ماشین سنکرون (تغییرات توان اکتیو، توان راکتیو، سرعت چرخش ژنراتور، زاویه رتور، جریان و ولتاژ) را در محدوده رخداد خطا برای حالت استفاده و عدم استفاده از HTSFCL نشان می‌دهد. مطابق نمودارهای ردیف اول و سوم شکل (۴) تعداد و دامنه نوسانات توان اکتیو و سرعت با استفاده از HTSFCL کمتر شده است.

1. Power System CAD/ Electromagnetic Transients including DC

با نصب HTSFCL کاهش میزان جریان خطا ۵۰ درصدی در نمودار ردیف پنجم شکل (۶) مشاهده می‌شود.

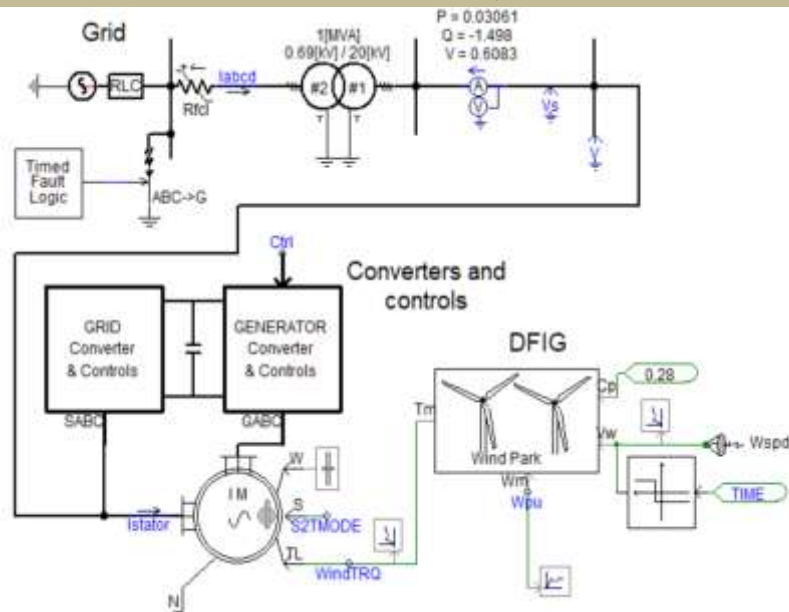


ب) پس از نصب HTSFCL

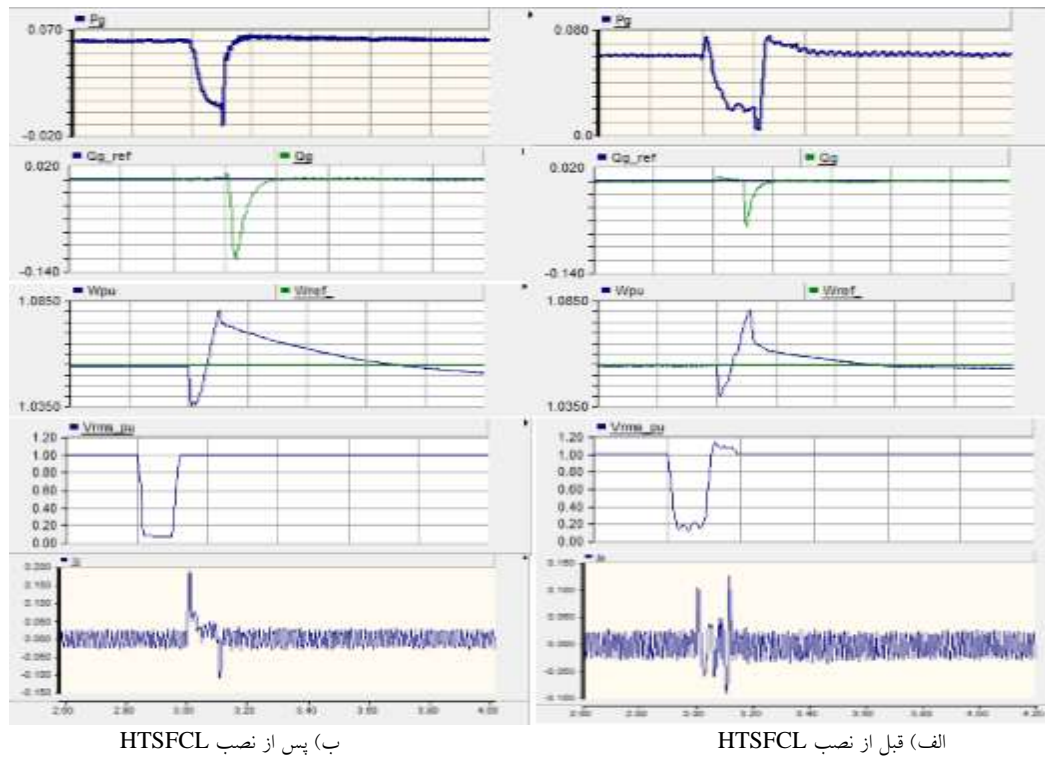
الف) قبل از نصب HTSFCL

شکل (۴): نمایش تغییرات پارامترهای ماشین سنکرون در حالت استفاده

و عدم استفاده از HTSFCL



شکل (۵): سیستم تک‌ماشینه DFIG متصل به شین بی‌نهایت

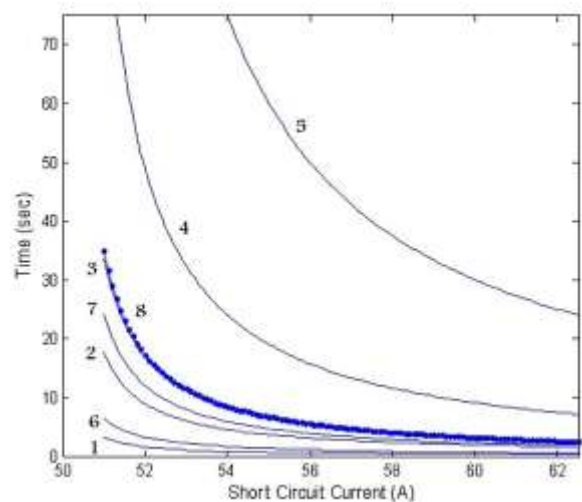


شکل (۶): نمایش تغییرات پارامترهای *DFIG* در دو حالت

۴. هماهنگی رله‌های جریان زیاد

منحنی‌های عملکرد رله‌های جریان زیاد استفاده شده در این مقاله که با رابطه کلی (۳) بیان می‌شوند، در شکل (۷) آمده است.

$$t = TSM (L + K / M^n - 1) \quad (3)$$



شکل (۷): منحنی‌های رله‌های جریان زیاد

روش ارائه شده در مرجع [۱۸] برای هماهنگی رله‌های جریان زیاد جهت دار استفاده شد. زمان عملکرد بحرانی (CTI) به منظور جلوگیری از تداخل عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در این مقاله برابر ۰/۲ در نظر گرفته شد و تنظیمات زمانی و جریانی رله به گونه‌ای تعیین گردید که قیود $TI \geq CTI$ و $1/5 \leq TSM_i \leq 0.05$ ارضا شوند. از تابع هدف رابطه (۴) برای به حداقل رساندن مجموع زمان عملکرد هماهنگ رله‌ها استفاده می‌شود. این شاخص حفاظتی دارای دو جمله است: جمله اول سبب کاهش زمان عملکرد رله‌ها شده و جمله دوم ضمن جلوگیری از منفی شدن فواصل زمانی بین رله‌های اصلی و پشتیبان سبب حداقل سازی آن می‌شود. t_i زمان عملکرد رله اصلی و $\Delta t_{mb} = t_{ibackup} - t_{main} - CTI$ اختلاف زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان و α_1 ، α_2 و β ضرایب ثابت است.

$$PI = \alpha_1 \sum t_i^x + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb} - \beta (\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^x \quad (4)$$

۵. ارائه تابع هدف

هدف اصلی نصب *HTSFCL* کاهش میزان جریان اتصال کوتاه است. می‌توان با اعمال مقادیر *HTSFCL* در هر تکرار و به‌روزرسانی مقادیر ماتریس Z_{bus} و استفاده از رابطه (۵) جریان اتصال کوتاه در هر باس را به دست آورد.

که در آن، TSM تنظیم زمانی رله و M برابر I_{sc}/I_{pickup} است که در آن I_{sc} جریان اتصال کوتاه عبوری از رله و I_{pickup} جریان تنظیمی رله می‌باشد و ثوابت K ، n و L برای هر منحنی به شرح جدول (۱) است.

به صورت معادلات (۱۰) تا (۱۳) محاسبه شد.

$$E_i^K = E_i \left(1 - \frac{Z_{iK}}{Z_{ii}}\right) \quad (10)$$

$$I_{ij} = Y_{ij}(E_i - E_j) \quad (11)$$

$$P_e^{iK} = \text{Re}[E_i^K I_{ij}] \quad (12)$$

$$\frac{2}{\omega_o} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{P_m^i - P_e^{iK}}{H_i} = \frac{\Delta P}{H_i} \quad (13)$$

که $\frac{2}{\omega_o}$ مقداری ثابت است و اندیس پایداری گذرا ماشین سنکرون نام در زمان رخداد خطا در شین K ام با رابطه (۱۴) بیان و برای ماشین $DFIG$ طبق روابط [۱] با معادله (۱۵) محاسبه شد.

$$ASI_K^i = \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\Delta P}{H_i} \quad (14)$$

$$ASI_{DFIG} = \frac{d^2 \delta_{DFIG}}{dt^2} = \quad (15)$$

$$\frac{\omega_i}{2H_i} (P_m - P_{Shaft}) + \frac{\omega_g}{2H_g} (P_{Shaft} - P_e)$$

همان طور که در شبکه‌های شکل (۴) و (۶) نشان داده شد، استفاده از محدودکننده‌های مقاومتی که از ابررساناهای دما بالا ساخته می‌شوند، میزان افت ولتاژ در لحظه رخداد خطا و یا به عبارت دیگر، میزان تغییرات ولتاژ را کاهش می‌دهند. شاخص پایداری ولتاژ برای شین نام در زمان رخداد خطا در شین K ام با رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$VSI_K^i = E_i - E_i^K \quad (16)$$

که در آن، E_i ولتاژ شین نام حاصل از پخش بار است و E_i^K ولتاژ همان شین در زمان رخداد خطا در شین K ام است.

با توجه به آنچه در قسمت ۳ و ۴ در رابطه با هماهنگی حفاظتی و اثبات روابط پایداری ولتاژ و زاویه رتور ارائه شد، تابع هدف رابطه (۱۷) برای جایابی بهینه HTSFCL پیشنهاد می‌شود.

جمله اول سبب کاهش مقادیر بهینه مقاومت ابررسانا شده و جمله دوم تابع هدف ارائه شده، شاخص کاهش جریان خطا با رابطه $\min(jl) = \sum_{K=1}^n I_{SC}^K$ است که با کاهش آن، هدف اصلی نصب HTSFCL قابل حصول است.

$$I_{SC}^K = \frac{E_{pre-fault}^K}{Z_{KK}} \quad (5)$$

که در آن، Z_{KK} عناصر قطری ماتریس Z_{bus} و $E_{pre-fault}^K$ ولتاژ باس K ام است که $K=1, 2, \dots, n$ و n تعداد باس هاست.

افزایش پایداری زاویه رتور ژنراتور با افزایش زمان بحرانی رفع خطا به دست می‌آید. با نوشتن معادله نوسان توان^۱ برای ماشین سنکرون نام با کاهش تغییرات توان اکتیو در زمان رخداد خطا پایداری گذرا بهبود یافت.

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{M_i} (P_m^i - P_e^i) \quad (6)$$

$$\omega_i = \frac{d\delta_i}{dt} \quad (7)$$

$$P_e^i = \sum_{j=1, j \neq i}^n E_i E_j (G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})) \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

جدول (۱): ضرایب رله‌های جریان زیاد

Nu mb er_ cha r	Type_Char	Std.	K	n	L
۱	short time inverse	ARE VA	۰/۰۵	۰/۰۴	۰
۲	standard inverse	IEC	۰/۱۴	۰/۰۲	۰
۳	very inverse	IEC	۱۳/۵	۱	۰
۴	extremely inverse	IEC	۸۰	۲	۰
۵	long time inverse	ARE VA	۱۲۰	۱	۰
۶	moderately inverse	ANSI /IEEE	۰/۰۵۲	۰/۰۲	۰/۱۱۴
۷	very inverse	ANSI /IEEE	۱۹/۶۱	۲	۰/۴۹۱
۸	extremely inverse short time inverse	ANSI /IEEE	۲۸/۲	۲	۰/۱۲۲

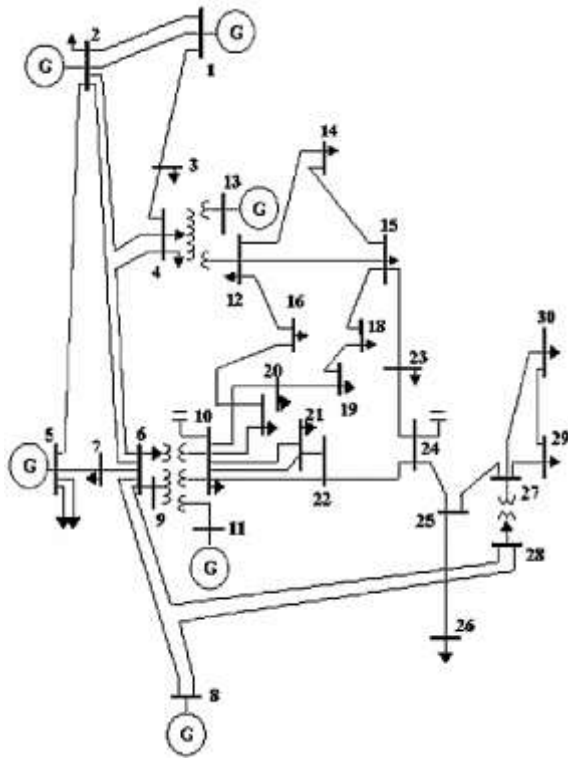
M_i ثابت اینرسی، ω_i سرعت، δ_i زاویه رتور، P_e^i توان الکتریکی خروجی، P_m^i توان مکانیکی و E_i ولتاژ داخلی ژنراتور سنکرون نام و G_{ij} و B_{ij} عناصر ماتریس Y_{bus} هستند و N تعداد ماشین‌های سنکرون است. در نهایت، معادله نوسان توان ماشین سنکرون به صورت رابطه (۹) است.

$$\frac{2H_i}{\omega_o} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_m^i - P_e^i \quad (9)$$

که $H_i = \frac{\omega_o}{2M_i}$ مقدار پریونیت انرژی ذخیره شده در رتور است و

P_e^i توان الکتریکی حین رخداد خطاست که با معادلات گذرا

1. Power Swing Equation



شکل (۸): سیستم ۳۰ شینه IEEE

نتایج به دست آمده در ۵۰۰۰ تکرار که نشان دهنده مقدار و مکان بهینه نصب محدودکننده‌های ابرسانایی جریان خطا در حالت‌های بهینه‌سازی با شاخص‌های منفرد و چندهدفه است، در جدول (۲) نشان داده شد. در حالت بهینه‌سازی چندهدفه مقادیر ضرایب برابر است با:

$$\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.1, \omega_4 = 0.3$$

نتایج در شش حالت (Mode = ۱:۶) شامل عدم استفاده از محدودکننده جریان خطا (حالت ۱) و استفاده بهینه از محدودکننده جریان خطا با شاخص جریان خطا (حالت ۲)، شاخص پایداری ولتاژ (حالت ۳)، شاخص پایداری زاویه (حالت ۴)، شاخص هماهنگی رله‌ها (حالت ۵) و شاخص چندهدفه (حالت ۶) بررسی و مقایسه شد. با اعمال مقادیر حاصل از بهینه‌سازی، شاخص جریان خطا به صورت شکل (۱۰) قابل مشاهده است.

$$\min(j) = \sum_{l=1}^n Z_{HTSFCL}^l + \omega_1 \sum_{K=1}^n I_{SC}^K + \quad (17)$$

$$\omega_2 \left[\sum_{K=1}^n \sum_{i=1}^N ASI_K^i + \sum_1^3 ASI_{DFIG} \right] +$$

$$\omega_3 \sum_{K=1}^n \sum_{i=1}^N VSI_K^i + \omega_4 PI$$

$$I_{SC}^n \leq I_{SC}^{\max}, Z_{HTSFCL} \leq Z_{\max}, n_{HTSFCL} \leq 3$$

به طوری که:

سومین عبارتی که با رابطه (۱۷) کمینه می‌شود، شاخص پایداری گذرای ماشین‌های سنکرون و $DFIG$ است که با رابطه $\min(j2) = \sum_{K=1}^n \sum_{i=1}^N ASI_K^i + \sum_1^3 ASI_{DFIG}$ محاسبه می‌شود و رابطه $\min(j3) = \sum_{K=1}^n \sum_{i=1}^N VSI_K^i$ ، چهارمین هدف بهینه‌سازی تابع هدف پیشنهادی (شاخص پایداری ولتاژ) است. با کمینه‌سازی پنجمین جمله این تابع هدف، $PI = \min(j4)$ تعیین هوشمند نوع منحنی مشخصه و هماهنگی رله‌های جریان زیاد صورت می‌گیرد. جابجایی بهینه $HTSFCL$ با در نظر گرفتن هم‌زمان شاخص‌های امنیت و هماهنگی حفاظتی، پایداری ولتاژ و پایداری گذرا ژنراتور سنکرون و آسنکرون و انتخاب هوشمند مشخصه رله جریان زیاد در شبکه‌های متصل به نیروگاه بادی برای اولین بار در این مقاله پیشنهاد شد.

۶. شبکه مورد مطالعه

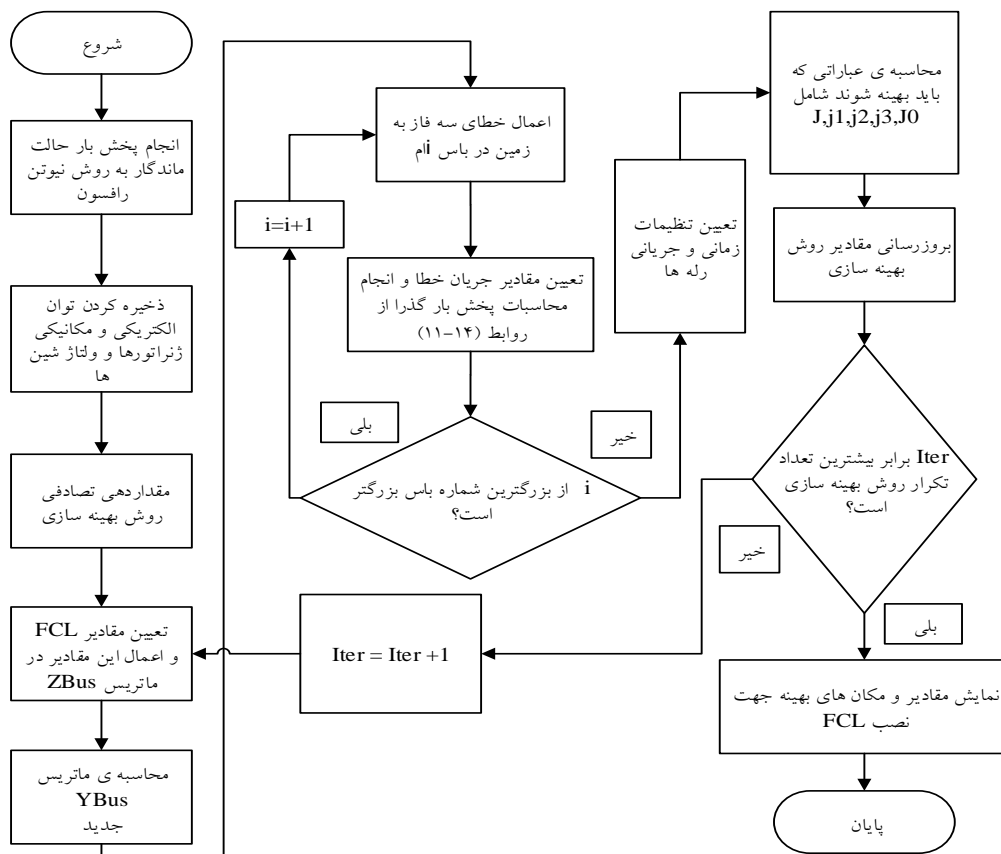
از شبکه آزمون ۳۰ شینه IEEE برای نمایش صحت و اعتبار نتایج بهینه‌سازی استفاده شده است. این سیستم که در شکل (۸) نشان داده شده است، یک شبکه توزیع - فوق توزیع ۳۳-۱۳۲ کیلوولت، دارای ۶ ژنراتور سنکرون، ۴ ترانسفورماتور، ۳۰ شین و ۳۷ خط می‌باشد و سه $DFIG$ با توان ۳ MW به شین‌های ۱۶، ۱۹ و ۲۹ این شبکه افزوده شده است. اطلاعات این شبکه در مرجع [۱۸] آمده است. این شبکه دارای ۸۶ رله اضافه جریان با مقادیر جدول (۱) است.

۷. مراحل تعیین HTSFCL

مراحل دستیابی به مقدار و مکان بهینه نصب محدودکننده‌های جریان خطا به صورت طرح‌واره در شکل (۹) آمده است.

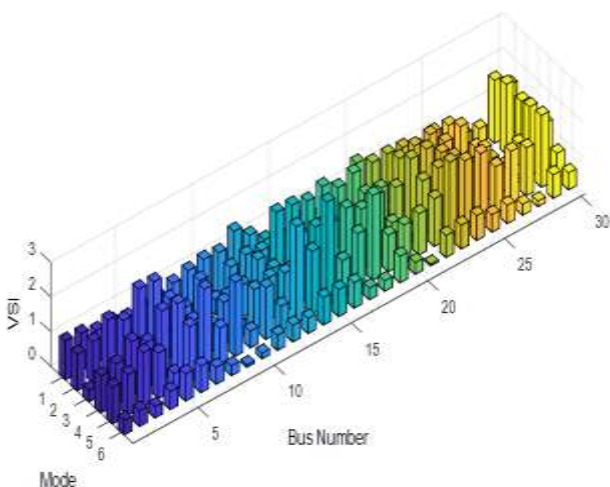
۸. بررسی نتایج

روش تکامل تفاضلی (DE) روش بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر جمعیت است. این روش در سال ۱۹۹۵ توسط استورن و پرایس ارائه شد. از DE برای بهینه‌سازی استفاده شد.

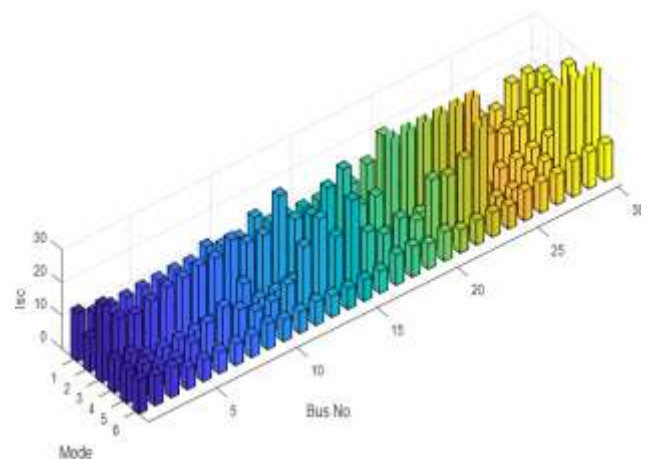


شکل (۹): طرح‌واره مراحل تعیین مقادیر و مکان بهینه نصب HTSFCL در شبکه

به زمین، شاخص پایداری گذرا در باس‌های تولیدی به صورت شکل (۱۲) است. سه باس آخر مربوط به باس‌هایی است که *DFIG* به آن‌ها متصل است. شکل (۱۲) برتری استفاده از روش چندهدفه در این مورد را نمایش می‌دهد و نیز بیان می‌کند که استفاده از شاخص‌های جریان اتصال کوتاه و پایداری ولتاژ بدترین حالت در تأمین پایداری گذرا در شین‌های متصل به منابع است.

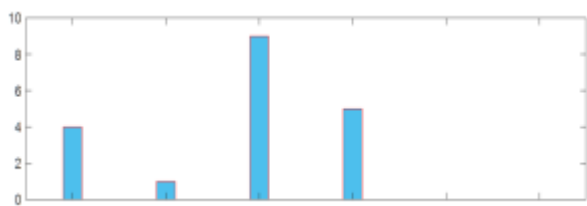


شکل (۱۱): مقایسه شاخص پایداری ولتاژ به‌ازای شش حالت



شکل (۱۰): مقایسه شاخص جریان خطا به‌ازای شش حالت

به‌ازای شش حالت مذکور، شاخص پایداری ولتاژ در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. کاهش مقدار این شاخص بیان‌کننده شرایط بهتری از نظر پایداری ولتاژ است. بنابراین استفاده از شاخص چندهدفه (حالت ۶) نتیجه بهتری داشته و سبب کاهش میزان تغییرات ولتاژ در لحظه رخداد خطا و افزایش پایداری ولتاژ شده است. با اعمال مقادیر حاصل از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی خطای سه‌فاز



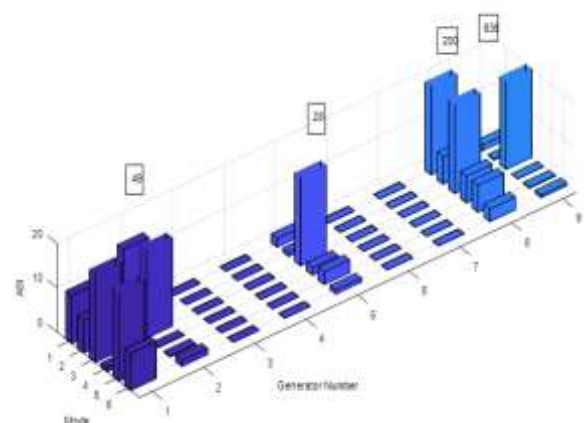
شکل (۱۳): مقایسه تعداد جفت رله‌های ناهماهنگ در شش حالت

۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله، توانایی *HTSFCL* مقاومتی در کاهش جریان خطا و افزایش پایداری ولتاژ و زاویه در شبکه‌های متصل به ژنراتور سنکرون و *DFIG* نشان داده شد. حضور تولیدات پراکنده سبب افزایش سطح اتصال کوتاه و از بین رفتن هماهنگی رله‌ها می‌شود. تابع هدف کارآمدی برای جایابی بهینه *HTSFCL* با در نظر گرفتن همزمان کاهش جریان خطا و افزایش پایداری ولتاژ و زاویه و هماهنگی رله‌های جریان زیاد در حضور منابع تولید پراکنده از نوع *DFIG* ارائه شد. جایابی بهینه *HTSFCL* با در نظر گرفتن همزمان شاخص‌های امنیت، پایداری و ولتاژ و زاویه و هماهنگی رله‌های جریان زیاد و انتخاب هوشمند مشخصه آن‌ها در شبکه‌های متصل به نیروگاه بادی برای اولین بار در این مقاله پرداخته شد. سه ژنراتور بادی به شبکه آزمون ۳۰ باسه *IEEE* افزوده شد و انتخاب بهینه *HTSFCL* با الگوریتم تکامل تفاضلی با در نظر گرفتن شاخص‌های منفرد و چندهدفه برای این شبکه انجام شد. نتایج جدول (۲) نشان‌دهنده برتری بهینه‌سازی این نوع محدودساز جریان خطا با استفاده از شاخص چندهدفه نسبت شاخص‌های منفرد است. با استفاده از شاخص چندهدفه در جایابی *HTSFCL*، میزان کاهش جریان خطا، افزایش پایداری ولتاژ و نیز افزایش پایداری گذرا بهبود یافت. در نهایت جداول (۳) و (۴) نتایج تعیین هوشمند منحنی مشخصه رله و مقادیر هماهنگی رله‌های جریان زیاد این شبکه در حضور منابع تولید پراکنده و نصب *HTSFCL* های تعیین شده با شاخص چندهدفه را نشان می‌دهد و شکل (۱۳) کاهش میزان ناهماهنگی بین رله‌ها را در این حالت نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده صحت روش پیشنهادی را تأیید می‌کنند.

جدول (۲): نتایج بهینه‌سازی

شاخص	مکان بهینه			توضیحات
	مقدار بهینه			
شماره خط مقدار (pu)	۱۴	۲۶	۱۴	۲۶
شماره خط مقدار (pu)	۱	۱	۱	۱
شماره خط مقدار (pu)	۱۴	۲۱	۱۴	۲۱
شماره خط مقدار (pu)	۱	۱	۱	۱
شماره خط مقدار (pu)	۱۴	۲۶	۱۴	۲۶
شماره خط مقدار (pu)	۱	۱	۱	۱
شماره خط مقدار (pu)	۱۵	۲۱	۱۵	۲۱
شماره خط مقدار (pu)	۱	۱	۱	۱
شماره خط مقدار (pu)	۱۵	۲۱	۱۵	۲۱
شماره خط مقدار (pu)	۱	۰/۹۱۷۲۳	۱	۰/۹۱۷۲۳



شکل (۱۲): مقایسه شاخص پایداری گذرا در شش ژنراتور و *DFIG* به‌زای شش حالت

نتایج هماهنگی رله‌ها شامل زمان عملکرد رله‌های جریان زیاد و تعیین هوشمند نوع مشخصه در جدول (۳) و اختلاف زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان در جدول (۴) آمده است. به دلیل محدودیت فضا تنها نتایج حالت بهینه‌سازی با استفاده از شاخص چندهدفه در جدول‌های (۳) و (۴) آمده است. با توجه به این جداول، هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان تضمین شده و زمان عملکرد هر رله برای خطای بحرانی مقدار کمی است.

تعداد جفت رله‌های اصلی و پشتیبان که Δt_{mb} مربوط به آن‌ها منفی است، شاخصی از میزان عدم هماهنگی حفاظتی می‌باشد. شکل (۱۳) تعداد این جفت رله‌ها را برای شش حالت مورد نظر نمایش می‌دهد.

می‌دهد.

جدول (۳): نوع مشخصه و زمان عملکرد رله‌ها در بهینه‌سازی شاخص چندهدفه

Relay number	type	t_i	Relay number	type	t_i	Relay number	type	t_i	Relay number	type	t_i	Relay number	type	t_i	Relay number	Type	t_i
۱	۳	۰/۳۰۹۲	۱۶	۶	۰/۲۳۴۳	۳۱	۱	۰/۴۲۷۴	۴۶	۱	۰/۳۹۷	۶۱	۵	۰/۲۷۶۹	۷۶	۲	۰/۵۲۲۶
۲	۱	۰/۳۰۹۲	۱۷	۲	۰/۵۴۹۳	۳۲	۱	۰/۵۳۷۴	۴۷	۱	۰/۱۷۵۶	۶۲	۳	۰/۳۰۹۵	۷۷	۶	۰/۲۸۵۳
۳	۳	۰/۳۴۶۷	۱۸	۱	۰/۵۷۴۷	۳۳	۱	۰/۲۵۲	۴۸	۱	۰/۵۵۰۱	۶۳	۷	۰/۳۹۵۴	۷۸	۱	۰/۴۴۹۴
۴	۳	۰/۲۰۹۵	۱۹	۵	۰/۳۹۴۷	۳۴	۲	۰/۲۶۹۴	۴۹	۸	۰/۷۷۹۲	۶۴	۱	۰/۵۵۳۴	۷۹	۱	۰/۴۸۱
۵	۸	۰/۷۵۶۱	۲۰	۳	۰/۵۶۶۹	۳۵	۲	۰/۳۳۲۲	۵۰	۲	۰/۱۸۰۳	۶۵	۳	۰/۳۵۷۶	۸۰	۴	۰/۴۳۴۱
۶	۷	۰/۵۶۷۱	۲۱	۴	۰/۲۷۱۶	۳۶	۳	۰/۸۲۶۲	۵۱	۱	۰/۶۵۴	۶۶	۳	۰/۵۲۷۸	۸۱	۴	۰/۳۹۳۴
۷	۱	۰/۲۴۸	۲۲	۳	۰/۵۰۹۴	۳۷	۱	۰/۴۹۰۲	۵۲	۵	۰/۶۵۷۸	۶۷	۲	۰/۵۸۵۵	۸۲	۶	۰/۸۵۸۸
۸	۲	۰/۷۲۷۱	۲۳	۴	۰/۵۴۶۸	۳۸	۳	۰/۱۷۳۲	۵۳	۱	۰/۶۱۷۳	۶۸	۴	۰/۸۴۳۵	۸۳	۳	۰/۹۳۰۳
۹	۳	۰/۵۶۷۶	۲۴	۲	۰/۷۷۱۶	۳۹	۱	۰/۱۷۳۱	۵۴	۴	۰/۵۵۵۶	۶۹	۴	۰/۵۱۰۹	۸۴	۱	۰/۵۰۹۱
۱۰	۵	۰/۶۶۷۹	۲۵	۱	۰/۸۴۸۲	۴۰	۲	۰/۶۱۲۸	۵۵	۱	۱/۰۳۳۶	۷۰	۲	۰/۶۵۴۳	۸۵	۲	۰/۳۴۸۸
۱۱	۴	۰/۶۷	۲۶	۴	۰/۶۳۹۱	۴۱	۲	۰/۶۱۰۲	۵۶	۱	۰/۵۸۳۹	۷۱	۴	۰/۲۲۶۹	۸۶	۱	۰/۳۵۶۶
۱۲	۵	۰/۴۲۳	۲۷	۵	۰/۶۰۳۳	۴۲	۵	۰/۲۷۴۸	۵۷	۱	۰/۴۴۵	۷۲	۱	۰/۴۴۷			
۱۳	۵	۰/۶۲۱	۲۸	۷	۰/۶۳۵۱	۴۳	۳	۰/۶۵۳	۵۸	۳	۰/۶۰۹۵	۷۳	۷	۰/۲۰۷۲			
۱۴	۵	۰/۹۴۱۲	۲۹	۲	۰/۶۳۵۱	۴۴	۱	۰/۲۱۰۳	۵۹	۱	۰/۲۶۱۳	۷۴	۲	۰/۶۵۲۱			
۱۵	۶	۰/۹۲۶۸	۳۰	۸	۰/۶۳۵۸	۴۵	۳	۰/۲۲۴۹	۶۰	۲	۰/۴۶۳۵	۷۵	۵	۰/۳۳۶۲			

جدول (۴): فاصله زمانی جفت رله‌های اصلی و پشتیبان در حالت چندهدفه

m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}	m,b	Δt_{mb}
۱,۴	۰/۳۵۲۹	۵۲,۱۰	۰/۰۸۸۱	۲۴,۲۳	۰/۳۰۰۹	۳۸,۴۲	۰/۱۹۶۹	۱۳,۵۳	۰/۰۴۸۹	۱۸,۶۰	۰	۲۶,۷۰	۰/۰۱۵۵	۷۳,۷۶	۰/۴۷۰۱
۱,۶	۰	۴۲,۱۱	۰/۳۲۸۵	۲۵,۲۴	۰	۸۶,۴۲	۰	۴۳,۵۳	۰/۰۱۷۱	۱۹,۶۰	۰/۱۶۶۵	۲۸,۷۰	۰	۷۴,۷۷	۰
۱,۷	۰/۳۱۴۶	۱۴,۱۲	۰/۰۰۰۵	۶۹,۲۵	۰	۳۸,۴۳	۰/۵۰۸۹	۵۰,۵۳	۰/۵۲۸۸	۲۰,۶۰	۰/۰۰۰۸	۲۹,۷۰	۰	۷۵,۷۷	۰
۱,۴۵	۰/۳۴۱۸	۱۵,۱۲	۰	۶۸,۲۶	۰/۴۹۴۹	۸۵,۴۳	۰/۳۲۷۸	۵۱,۵۳	۰/۰۱۶۳	۵۹,۶۰	۰/۳۰۶۹	۳۰,۷۰	۰/۰۰۰۳	۷۶,۷۸	۰
۲,۴	۰/۳۵۲۹	۲۶,۱۳	۰/۰۰۰۴	۶۵,۲۷	۰/۲۹۵۷	۲,۴۴	۰/۰۳۳۳	۱۰,۵۴	۰	۱۷,۶۱	۰	۵۶,۷۰	۰/۰۳۶۸	۷۷,۷۸	۰
۲,۶	۰	۲۷,۱۳	۰/۰۲۷	۳۱,۲۸	۰	۳,۴۴	۰	۱۲,۵۴	۰	۱۹,۶۱	۰	۵۸,۷۰	۰/۰۲۱۵	۲۷,۷۹	۰
۲,۷	۰/۳۱۴۶	۲۸,۱۳	۰/۰۰۰۱	۷۲,۲۸	۰	۱,۴۵	۰/۰۳۳۷	۱۳,۵۴	۰	۲۰,۶۱	۰	۲۶,۷۱	۰	۷۸,۷۹	۰/۲۳۳۷
۲,۴۴	۰/۳۵۶۵	۲۹,۱۳	۰/۰۰۰۱	۳۱,۲۹	۰	۳,۴۵	۰	۴۳,۵۴	۰	۵۹,۶۱	۰	۲۷,۷۱	۰/۰۰۳۱	۳۶,۸۰	۰
۳,۵	۰	۳۰,۱۳	۰	۷۱,۲۹	۰	۱,۴۶	۰	۵۰,۵۴	۰	۱۷,۶۲	۰	۲۹,۷۱	۰/۰۱۴۲	۷۸,۸۰	۰/۳۶۳۳
۴,۸	۰	۵۸,۱۳	۰/۰۲۶۲	۳۳,۳۰	۰	۲,۴۶	۰	۵۱,۵۴	۰	۱۸,۶۲	۰/۰۳۱۲	۳۰,۷۱	۰/۰۰۰۶	۸۵,۸۱	۰
۴,۱۶	۰/۵۶	۲۶,۱۵	۰	۷۶,۳۰	۰	۶,۴۷	۰	۱۰,۵۵	۰	۲۰,۶۲	۰/۰۰۲۲	۵۶,۷۱	۰/۰۰۲۲	۸۶,۸۱	۰
۴,۴۸	۰/۱۷۹۲	۲۷,۱۵	۰	۳۳,۳۱	۰	۷,۴۷	۰/۳۳۳۸	۱۱,۵۵	۰	۵۹,۶۲	۰/۳۰۹۳	۵۸,۷۱	۰/۰۰۲۵	۴۰,۸۲	۰
۵,۸	۰	۲۸,۱۵	۰	۷۳,۳۱	۰/۰۵۱۵	۴۴,۴۷	۰/۳۱۴۷	۱۳,۵۵	۰	۱۷,۶۳	۰	۲۶,۷۲	۰	۸۰,۸۲	۰
۵,۱۶	۰/۵۳۸۵	۲۹,۱۵	۰	۳۴,۳۲	۰/۶۳۳۲	۴۵,۴۷	۰/۳	۴۳,۵۵	۰	۱۸,۶۳	۰/۰۰۰۶	۲۷,۷۲	۰	۸۱,۸۲	۰
۵,۴۷	۰/۵۸۴۸	۳۰,۱۵	۰	۳۵,۳۳	۰	۴۶,۴۸	۰	۵۰,۵۵	۰	۱۹,۶۳	۰/۱۶۰۵	۲۸,۷۲	۰	۳۹,۸۳	۰
۶,۹	۰/۶۵۵۸	۵۶,۱۵	۰	۷۷,۳۳	۰/۰۴۱۷	۴,۴۹	۰	۵۱,۵۵	۰	۵۹,۶۳	۰/۳۱۲۵	۳۰,۷۲	۰	۸۰,۸۳	۰
۷,۱۰	۰/۰۱۵	۱۷,۱۶	۰/۰۰۰۱	۳۵,۳۴	۰/۲۰۶۷	۷,۴۹	۰	۱۰,۵۶	۰/۰۰۰۸	۶۱,۶۴	۰	۵۶,۷۲	۰	۸۱,۸۳	۰
۷,۱۱	۰	۱۸,۱۶	۰/۰۰۲۱	۷۶,۳۴	۰	۴۴,۴۹	۰	۱۱,۵۶	۰	۶۳,۶۵	۰	۵۸,۷۲	۰	۸۲,۸۴	۰
۷,۱۲	۰/۲۸۸۳	۱۹,۱۶	۰/۱۵۹۱	۳۶,۳۵	۰	۴۵,۴۹	۰	۱۲,۵۶	۰/۲۸۶۳	۳۲,۶۶	۰/۰۰۷۱	۲۶,۷۳	۰/۰۰۰۳	۵۴,۸۵	۰
۷,۱۳	۰/۰۸۸۱	۲۰,۱۶	۰	۳۷,۳۵	۰/۲۹۸۱	۴,۵۰	۰/۳۵۱۸	۴۳,۵۶	۰/۰۱۶۹	۶۲,۶۶	۰/۳۳۱۹	۲۷,۷۳	۰	۱۰,۸۶	۰
۷,۴۳	۰/۱۸۴	۲۱,۱۸	۱/۰۴۰۲	۳۹,۳۷	۰/۲۲۶۴	۶,۵۰	۰	۵۰,۵۶	۰/۵۰۸	۶۴,۶۶	۰	۲۸,۷۳	۰	۱۱,۸۶	۰/۰۱۱۶
۷,۵۱	۰/۰۱۶۵	۳۳,۱۹	۰	۴۰,۳۷	۰/۲۵۳۳	۴۴,۵۰	۰/۳۱۱۸	۵۱,۵۶	۰/۰۱۴۶	۶۶,۶۷	۰	۲۹,۷۳	۰	۱۲,۸۶	۰/۲۸۰۷
۸,۱۰	۰/۰۰۷۴	۳۳,۱۹	۰/۰۰۲۷	۸۱,۳۷	۰	۴۵,۵۰	۰/۲۹۷۱	۱۵,۵۷	۰	۶۷,۶۸	۰	۵۶,۷۳	۰/۰۰۸۱	۱۳,۸۶	۰/۰۳۶۳
۸,۱۱	۰	۶۴,۱۹	۰	۳۹,۳۸	۰/۳۱۵۲	۱۶,۵۱	۰/۳۳۱۱	۵۵,۵۷	۰	۲۷,۶۹	۰/۰۲۴	۵۸,۷۳	۰	۵۰,۸۶	۰/۵۱۰۵
۸,۱۲	۰/۲۶۷۰	۲۲,۲۰	۰/۵۴۵۹	۴۰,۳۸	۰/۳۶۸۴	۴۷,۵۱	۰/۳۸۴۳	۱۴,۵۸	۰/۱۰۰۲	۲۸,۶۹	۰	۷۱,۷۴	۰/۲۵۰۱	۵۱,۸۶	۰
۸,۱۳	۰/۰۴۷۸	۳۳,۲۱	۰/۰۰۲۳	۸۰,۳۸	۰/۰۰۵۵	۴۸,۵۱	۰	۵۵,۵۸	۰	۲۹,۶۹	۰	۷۲,۷۴	۰		
۸,۳۳	۰/۰۱۵۸	۳۲,۲۱	۰	۴۱,۳۹	۰	۴۹,۵۲	۰	۸,۵۹	۰	۳۰,۶۹	۰/۰۰۰۳	۲۳,۷۵	۰/۰۰۴۸		
۸,۵۰	۰/۵۱۰۱	۶۲,۲۱	۰/۲۳۸۴	۸۴,۴۰	۰	۱۱,۵۳	۰	۴۷,۵۹	۰/۵۹۲۷	۵۶,۶۹	۰/۰۳۳۱	۶۲,۷۵	۰/۲۳۱۹		
۹,۵۳	۰	۷۰,۲۲	۰	۸۳,۴۱	۰	۱۲,۵۳	۰/۲۷۵۹	۴۸,۵۹	۰/۱۷۸۸	۵۸,۶۹	۰/۰۲۰۲	۶۴,۷۵	۰		

مراجع

- [۱] برهمندپور، همایون، کمانکش، سیما، سلیمی، سعید، دانایی، حمید، محمد جعفریان، محمد، «نقش نیروگاه‌های بادی در پایداری گذرای شبکه»، بیست‌وهشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، ایران، ۱۳۹۲.
- [2] Chaudhari, P.S. and KHampariya, P.K., "Revive of Superconducting Fault Current Limiters", Int. J. Curr. Trends. Eng. Technol., Vol. 2, No. 1, pp. 101-108, 2016.
- [3] Pishavar, M., Ahadiat, M. and Tafti, M.K., "Set-up and Location of the Fault Current Limiter in Power Systems by Fuzzy HFL Sorting Algorithm and Optimization PSO HIGA", 5th Int. Conf. Comput. Sci. Electr. Electron. Eng., 2016.
- [4] Roldan, J., Price, A., Rosa, F. and Moriconi, F., "Analysis of the Effect of a Saturable-Core HTS Fault Current Limiter on the Circuit Breaker Transient Recovery Voltage", IEEE Power Energy Soc. General Meet., pp. 1-8, 2011.
- [5] Lambes, J., Hazelton, D. and Weber, C., "Recovery under Load Performance of 2nd Generation HTS Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power Transmission Lines", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1968-1971, 2009.
- [6] Khan, U., Seong, J., Lee, S., Lim, S. and Lee, B., "Feasibility Analysis of the Positioning of Superconducting Fault Current Limiters for the Smart Grid Application Using Simulink and SimPowerSystem", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, No. 3, pp. 2165-2169, 2011.
- [7] Najy, W., Zeineldin, H. and Woon, W., "Optimal Protection Coordination for Micro Grids with Grid-Connected and Islanded Capability", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 4, pp. 1668-1677, 2013.
- [8] Alaraifi, S. and ElMoursi, M., "Hybrid HTS_FCL Configuration with Adaptive Voltage Compensation Capability", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24, No. 6, 2014.
- [9] Didier, G., Leveque, J. and Rezzoug, A., "A Novel Approach to Determine the Optimal Location of SFCL in Electric Power Grid to Improve Power System Stability", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 2, pp. 978-984, 2013.
- [10] Zeineldin, H. and Xiao, W., "Optimal Fault Current Limiter Sizing for Distribution Systems with DG", IEEE Power Energy Soc. General Meet., pp. 1-5, 2011.
- [11] Hongesombut, K., Mitani, Y. and Tsuji, K., "Optimal Location Assignment and Design of Superconducting Fault Current Limiters Applied to Loop Power Systems", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, pp. 1828-1831, 2003.
- [12] ElMoursi, M. and Hegazy, R., "Novel Technique for Reducing the High Fault Currents and Enhancing the Security of ADWEA Power System", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 1, pp. 140-148, 2013.
- [13] Lambes, J. C. H., "Fast Insertion Impedance of 2G HTS Superconductors for Megawatt AC and Repetitive Pulsed Power Operation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 4, pp. 1334-1341, 2011.
- [14] Lambes, J. C. H., Hazelton, D., "Advantages of Second Generation High Temperature Superconductors for Pulsed Power Applications", IEEE Pulsed Power Conf., pp. 221-226, 2009.
- [15] Xie, Y., "Second-Generation HTS Conductor Design and Engineering for Electrical Power Applications", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 3009-3013, 2009.
- [16] Kim, H., Choi, H., Lim, H., Kim, I. and Hyun, O., "Resistance of Superconducting Fault Current Limiters Based on YBaCuO Thin Films after Quench Completion", Physica C: Supercond., Vol. 372-376, No. 3, pp. 1606-1609, 2002.
- [17] Ye, L., Juengst, K., "Modeling and Simulation of High Temperature Resistive Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 14, No. 2, 2004.
- [18] Chabanloo, R.M., Abyaneh, H.A., Kamangar, S.S.H. and Razavi, F., "Optimal Combined Overcurrent and Distance Relays Coordination Incorporating Intelligent Overcurrent Relays Characteristic Selection", IEEE Trans. Power Del., Vol. 26, No. 3, pp. 1381-1391, 2011.
- [19] Jiang, L., Chen, X., Jin, J. and Liu, B., "Experiment of a MOSFETs-Based Bridge Type Fault Current Limiter Prototype", IEEE Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Dev. Beijing, China, 2013.
- [20] Bayati, N., Sadeghi, S.H.H. and Hosseini, A., "Optimal Placement and Sizing of Fault Current Limiters in Distributed Generation Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm", Eng. Technol. App. Sci. Res., Vol. 7, No. 1, pp. 1329-1333, 2017.
- [21] Devi, A. and Kumar, J., "Simulation of Resistive Superconducting Fault Current Limiter and its Performance Analysis in Three Phase Systems", Int. J. Eng. Res. Technol., Vol. 2, No. 11, pp. 411-415, 2013.
- [22] Yadav, Y.Y., Matew, L. and Rajput, K.S., "Modeling and Simulation of Resistive Superconducting Fault Current Limiters", Int. J. Environ. Agric. Biotechnol., Vol. 1, No. 3, pp. 316-320, 2016.
- [23] Sung, B. and Park, J., "The Effect of SFCL on Electric Power Grid with Wind-Turbine Generation System", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 20, No. 3, pp. 1177-1181, 2010.
- [24] Duron, J., Grilli, F., Dutoit, B. and Stavrev, S., "Modelling the E-J Relation of High-Tc Superconductors in an Arbitrary Current Range", Physica: Supercond., Vol. 401, No. 1-4, pp. 231-235, 2004.
- [25] Hosseini, S.A., Abyaneh, H.A., Sadeghi, S.H.H. and Razavi, F., "Merging the Retrieval of the Protection Coordination of Distribution Networks Equipped with DGs in the Process of Their Siting and Sizing", Jour. Renewable Sustainable Energy, Vol. 8, No. 3, 2016.
- [26] Morandi, A., "2D Electromagnetic Modelling of Superconductors", Supercond. Sci. Technol., Vol. 25, No. 10, pp. 104003, 2012.
- [27] Alaraifi, S., ElMoursi, M. and Zeineldin, H., "Optimal Allocation of HTS-FCL for Power System Security and Stability Enhancement", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 28, No. 4, pp. 4701-4711, 2013.
- [28] Yim, S., Kim, H., Hyun, O. and Sim, J., "Quench and Recovery Characteristics of Au/YBCO Thin Film Type SFCL", Physica C: Supercond., Vol. 463-465, pp. 1172-1175, 2007.
- [29] Farzinfar, M., Jazaeri, M. and Razavi, F., "A New Approach for Optimal Coordination of Distance and Directional over-Current Relays Using Multiple

- [31] جلیلیان، امین، علیزاده پهلوانی، محمدرضا، «بهبود قابلیت گذر از خطای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با استفاده از محدودکننده جریان خطا»، مهندسی و مدیریت انرژی، سال پنجم، شماره ۱، صفحه ۱۳-۲، ۱۳۹۴.
- [30] Zhang, X., Ruiz, H.S., Geng, J. et al. "Power Flow Analysis and Optimal Location of Resistive Type Superconducting Fault Current Limiters", Springer plus, Vol. 5, No.1, pp. 1972, 2016.