جایابی و تعیین ظرفیت بهینه محدودساز جریان خطا با لحاظ عدم‌قطعیت در توان تولیدی توربین بادی

رضا قربانی[۱]، کارشناسی ارشد، کاظم مظلومی[۲]، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران – reza_ghorbani@ymail.com
۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران – kmazlumi@znu.ac.ir

چکیده: امروزه به دلیل افزایش قیمت منابع انرژی فسیلی، استفاده از تولیدات پراکنده که اغلب از انرژی‌های نو استفاده می‌کنند، در حال افزایش است. با نصب این واحدها در شبکه‌های توزیع، سطح جریان اتصال کوتاه شبکه افزایش می‌یابد؛ که این امر منجر به برهم‌خوردن هماهنگی بین رله-های جریان زیاد موجود در سیستم و همچنین ایجاد جریان‌های خطای بالاتر از قدرت قطع‌کنندگی تجهیزات حفاظتی می‌شود. در این مقاله از محدودساز ابررسانای جریان خطا (SFCL) برای حل مشکلات فوق استفاده می‌شود. جایابی و تعیین ظرفیت مناسب SFCL، با در نظر گرفتن سه معیار حفظ هماهنگی رله‌ها، کاهش جریان خطا و مینیمم ظرفیت نصب‌شده SFCL به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد؛ همچنین عدم‌قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی نیز لحاظ می‌شود. برای مدل‌سازی سرعت باد از سری زمانی ARMA (Autoregressive Moving Average) استفاده شده است؛ تا بتوان سرعت ساعتی باد را شبیه‌سازی نمود و توزیع احتمالاتی آن را به دست آورد. برخلاف روش‌های بهینه‌سازی متداول، در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II استفاده شده است. در پایان، روش پیشنهادی بر روی سیستم نمونه ۳۰ باسه IEEE اجرا می‌گردد تا نتایج عددی حاصل شده، عملکرد روش پیشنهادی را نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: محدودساز جریان خطا، عدم‌قطعیت، انرژی‌های نو، توربین بادی، هماهنگی حفاظتی، رله جریان زیاد

Optimal size and location of fault current limiter incorporating uncertainty of wind power

R. Ghorbani, Master of Science[1], K. Mazlumi, associate professor[2]

1- Engineering Faculty, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: reza_ghorbani@ymail.com
2- Engineering Faculty, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: kmazlumi@znu.ac.ir

Abstract: Nowadays, due to the rising price of fossil energy sources, use of distributed generation with renewable energy sources is rising. In distribution networks, fault current level is increased with the installation of these units. Therefore, it tends to mis-coordination between directional overcurrent relays. In this paper, superconducting fault current limiter (SFCL) is used to solving these problems. Multiple criteria such as the total operating time of the relays, fault current reduction and the minimum size of SFCLs are simultaneously considered in order to determine the optimal placement and the size of SFCLs. Moreover, uncertainty in output power for DGs is incorporated. Autoregressive moving average (ARMA) model is used for the modeling of wind speed. Unlike the traditional optimization methods, none dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) multi-objective optimization algorithm is used, in this paper. Finally, the proposed method is carried out on distribution part of IEEE 30-bus test system to demonstrate the effectiveness of the method.

Keywords: fault current limiter, uncertainty, renewable sources, wind turbine, protection coordination, overcurrent relay.

تاریخ ارسال مقاله:۹۴/۷/۱۸
تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۹/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۱۱
نام نویسنده مسئول: کاظم مظلومی
نشانی نویسنده مسئول: ایران – زنجان - بلوار دانشگاه - کیلومتر ۵ جاده تبریز - دانشگاه زنجان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

افزایش نیاز به تولید انرژی الکتریکی و محدویت‌های شدید در احداث خطوط انتقال باعث افزایش استفاده از منابع تولید پراکنده شده است. حضور این منابع در سیستم توزیع، منجر به افزایش قابلیت اعتماد و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود [۱]. کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، تداوم در تأمین بار و افزایش کیفیت توان ازجمله عواملی هستند که طراحان شبکه را به استفاده از این منابع ترغیب می‌کند [۲]. تولیدات پراکنده در کنار مزایایی که دارند، مشکلاتی را نیز برای سیستم توزیع ایجاد می‌کنند [۳]. ازجمله این مشکلات می‌توان به افزایش سطح جریان خطا، تریپ اشتباه رله‌ها و عملکرد نادرست ادوات حفاظتی اشاره کرد [۴]. افزایش جریان خطا منجر به استفاده از مدارشکن‌هایی با قدرت قطع بالاتر می‌شود؛ همچنین این افزایش جریان باعث به‌هم خوردن هماهنگی بین ادوات حفاظتی می‌گردد [۵].

استفاده از حفاظت تطبیقی [۶] و ریکلوزرهای میکروپروسسوری [۷] برای حل مشکلات فوق پیشنهاد شده است. اما استفاده از این طرح در کنار پیچیدگی‌هایی که دارد هزینه بالایی را در پی خواهد داشت. جدا کردن DG[۱] از شبکه در زمان بروز خطا و اتصال مجدد آن پس از رفع خطا راه‌حل دیگری به شمار می‌رود. مشکلاتی نظیر سنکرونیزاسیون در زمان اتصال مجدد DG به شبکه و همچنین از دست دادن توان DG حتی در خطاهای گذرا ناکارآمد بودن این روش را نشان می‌دهند. استفاده از مدارشکن‌هایی با قدرت قطع بالاتر و چک کردن مجدد هماهنگی ادوات حفاظتی در حضور DGها [۸] راه‌حل‌هایی هستند که به دلیل هزینه بسیار بالا به‌صورت گسترده مورد توجه قرار نمی‌گیرند. برای کاهش جریان تزریقی از DG به شبکه، می‌توان ظرفیت DG را کاهش داد [۹]. اما معمولاً تعیین ظرفیت مناسب برای تولیدات پراکنده به‌منظور دستیابی به اهداف دیگری مانند کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ صورت می‌گیرد [۱۰].

با پیشرفت تکنولوژی ابررساناها در چند دهه اخیر، استفاده از ادواتی تحت عنوان محدودساز ابررسانای جریان خطا (SFCL[۲]) بسیار مورد توجه قرار گرفته است. SFCL این توانایی را دارد که مستقیماً و با سرعت بالا جریان خطا را تشخیص داده و با گذر از حالت ابررسانایی به حالت محدودسازی آن را کاهش دهد. SFCL در شرایط کارکرد طبیعی سیستم، هیچ تلفات و افت ولتاژی ایجاد نکرده و فقط در شرایط خطای سیستم تأثیر خود را بر شبکه اعمال می‌کند؛ همچنین این روش پرهزینه نیست و نیازی به الگوهای حفاظتی پیچیده ندارد. بهبود پایداری گذرا و انتقال توان بالاتر با پایداری بیش‌تر از دیگر مزایای استفاده از SFCL در شبکه قدرت محسوب می‌شوند [۱۱، ۱۲].

به دلیل جنبه‌های فنی و اقتصادی، تعیین ظرفیت و محل مناسب برای نصب SFCL بسیار حائز اهمیت است؛ به‌گونه‌ای که اگر این تجهیز در محل نامناسب و با ظرفیت نادرست نصب شود، نه‌تنها عملکرد مورد انتظار را ندارد بلکه مشکلاتی را نیز برای شبکه ایجاد خواهد کرد. در مرجع [۱۳]، محل مناسب برای نصب FCL[۳] در یک سیستم هوشمند تعیین می‌گردد. بااین‌وجود، امکان نصب FCL، فقط در بعضی از نقاط شبکه موردمطالعه قرار می‌گیرد. همین محدودیت، در مورد محل وقوع خطا نیز لحاظ شده است. همچنین هیچ مطالعه‌ای در خصوص ظرفیت مناسب FCL صورت نگرفته است. مرجع [۱۴] با استفاده از شاخصی تحت عنوان PCA[۴] و تحلیل حساسیت، محل مناسب برای نصب FCL را یافته است. برای محاسبه این شاخص، نیاز است تا مدل دینامیکی شبکه با جزئیات زیادی شبیه‌سازی گردد. همین موضوع سبب شده تا اجرا کردن این روش بر روی شبکه‌های بزرگ بسیار دشوار باشد. به‌علاوه، برای یافتن محل مناسب برای نصب FCL، می‌بایست کلیه محل‌های ممکن در شبکه، یک‌به‌یک بررسی شوند. در مرجع [۱۵]، ظرفیت بهینه محدودساز جریان خطا در یک سیستم توزیع تعیین می‌گردد؛ اما محل نصب FCL به‌صورت فرضی در نظر گرفته شده است. همچنین، هزینه نصب FCL نیز نادیده گرفته شده است. مرجع [۱۶] با روش تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM[۵]) در یک شبکه شعاعی ساده اقدام به جایابی SFCL کرده است؛ اما روش تصمیم‌گیری چندشاخصه قادر به تعیین ظرفیت بهینه SFCL نیست؛ همچنین تعیین وزن مناسب برای هر یک از شاخصه‌ها پیچیده و دشوار خواهد بود. در [۱۷] برای بازیابی هماهنگی بین رله‌های جریان زیاد از FCL به‌صورت سری‌شده با DG استفاده شده است. در هیچیک از مطالعات گذشته، عدم‌قطعیت در توان تولیدی DGها در نظر گرفته نشده است.

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و آگاهی از مسئله انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولیدات پراکنده امری مهم تلقی می‌گردد. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، تولید برق از طریق باد به علت زیرساخت‌های خوب، رشد تکنولوژی و پایین بودن هزینه بهره‌برداری در حال زیاد شدن است [۱۸]. مشکلات زیست‌محیطی و مسئله تغییر آب‌وهوای کره زمین به سبب استفاده بیش از حد از انرژی‌های فسیلی، عوامل دیگری هستند که استفاده از انرژی باد را در سال‌های اخیر افزایش داده است. با توجه به موارد ذکرشده و توجیه‌پذیری اقتصادی انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی‌های نو، پرداختن به انرژی باد امری حیاتی و ضروری به‌نظر می‌رسد. موضوع مهم در استفاده ار این انرژی، در نظر گرفتن ماهیت تصادفی سرعت باد است که سبب می‌شود تأثیرات آن بر روی سیستم قدرت با عدم‌قطعیت همراه باشد [۱۹، ۲۰]. با لحاظ کردن عدم‌قطعیت در مدل‌سازی این منابع، می‌توان رفتار سیستم قدرت را به‌صورت واقعی‌تری موردمطالعه قرار داد. همچنین برنامه‌ریزی‌های شبکه، اعم از تعیین محل و ظرفیت مناسب تجهیزات آن، بدون در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌های موجود در سیستم کاری غیرمنطقی است و باعث سرمایه‌گذاری‌های بی‌مورد می‌شود.

در این مقاله محل و ظرفیت بهینه محدودساز ابررسانای جریان خطا، با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی، تعیین می‌گردد. توربین‌های بادی به‌عنوان منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده‌اند. الگوی تولید توان برای این منابع، با شناخت تأثیر

Archive of SID

www.SID.ir

سرعت باد و مدل توربین بادی ارائه شده است. این روش پیشنهادی به یک شبکه نمونه اعمال می‌شود؛ به این ترتیب که ابتدا هماهنگی بین رله‌های جریان‌زیاد جهت‌دار (DOCR[۶]) در یک شبکه توزیع نمونه برقرار می‌شود. سپس با استفاده از سری زمانی ARMA[۷]، الگوی ساعتی سرعت باد محاسبه شده و به دنبال آن، یک توزیع احتمالاتی مناسب که بتواند رفتار این الگو را توصیف کند، بر این الگو برازش می‌یابد. بر اساس توزیع احتمالاتی برازش‌یافته، توان خروجی توربین بادی به‌صورت غیرقطعی محاسبه می‌گردد. در ادامه، جایابی و تعیین اندازه بهینه SFCL در حضور توربین‌های بادی صورت می‌گیرد. برای انجام این کار، از سه معیار مختلف و الگوریتم NSGA[۸]-II استفاده شده است. در انتها، یک بار دیگر این مسئله بدون در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در توان خروجی توربین‌های بادی موردمطالعه قرار می‌گیرد و نتایج عددی حاصل از آن با حالت قبلی مقایسه خواهد شد.

۲- هماهنگی بهینه رله‌های جریان‌زیاد جهت‌دار

موضوع مهم در مسئله تنظیم و هماهنگی رله‌های جریان‌زیاد، تعیین مقدار TMS برای هر رله می‌باشد. TMSها باید به‌گونه‌ای تعیین شوند تا رله‌ها در کم‌ترین زمان ممکن، خطای اتصال کوتاه را تشخیص داده و فرمان تریپ را صادر کنند و همچنین اختلاف زمان عملکرد بین رله‌های اصلی و پشتیبان در محدوده مجاز باقی بماند. در شبکه‌های حلقوی، تعیین مقدار TMSها کار ساده‌ای نیست. یکی از روش‌های پیشنهادی، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند برای تعیین مقدار مناسب TMSها می‌باشد. در الگوریتم‌های هوشمند، تعریف تابع هدف مناسب در رسیدن به جواب بهینه تأثیر به‌سزایی دارد. در مرجع [۲۱]، روشی بر اساس الگوریتم ژنتیک برای هماهنگی بهینه رله‌ها ارائه شده است. در این مرجع، تابع هدف به‌گونه‌ای تعریف شده که علاوه بر مینیمم‌سازی زمان عملکرد رله‌های اصلی، فاصله زمانی بین رله‌های اصلی و پشتیبان را در محدوده مجاز نگه دارد. این تابع هدف به‌صورت رابطه (۱) است.

$$OF = \alpha_1 \sum (t_i)^2 + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb} - \beta_2 (\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^2$$
$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m - CTI \qquad (۱)$$

α_1، α_2 و β_2 ضرایب وزنی هستند. t_i زمان عملکرد رله iام به ازای خطایی است که در جلوی رله iام رخ می‌دهد. Δt_{mb} اختلاف زمانی بین هر جفت رله اصلی و پشتیبان می‌باشد. t_b و t_m زمان عملکرد رله اصلی و پشتیبان به ازای خطا در جلوی رله اصلی است. CTI فاصله زمانی بحرانی است که در حدود ۰/۳ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه زمان عملکرد رله‌ها از منحنی استاندارد IEC استفاده می‌شود. این مشخصه از رابطه (۲) پیروی می‌کند.

$$t = \frac{k}{\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right)^n - 1} \times TMS \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، t زمان عملکرد رله، TMS تنظیم زمانی رله، I_0 جریان آستانه یا جریان قطع رله، I_{SC} جریان خطای عبوری از رله می‌باشد. ضرایب k و n نیز ثابت‌های وابسته به نوع رله می‌باشند.

برای محاسبه جریان اتصال کوتاه می‌توان از نظریه تونن استفاده نمود. با استفاده از نظریه تونن، ولتاژ شین‌ها در حین خطا از جمع کردن ولتاژ شین‌ها قبل از خطا و تغییر در ولتاژ شین‌ها به‌صورت رابطه (۳) به دست می‌آیند.

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + Z_{bus} I_{bus}(F) \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، $V_{bus}(F)$ بردار ولتاژ شین‌ها در حین خطا، $V_{bus}(0)$ بردار ولتاژ شین‌ها قبل از خطا و $I_{bus}(F)$ بردار جریان شین می‌باشد.

اگر خطایی در باس kام رخ دهد، فرم ماتریسی رابطه (۳)، به‌صورت رابطه (۴) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ \dots \\ \dots \\ V_k(F) \\ \dots \\ \dots \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \dots \\ \dots \\ V_k(0) \\ \dots \\ \dots \\ V_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & \dots & Z_{1k} & \dots & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{k1} & \dots & \dots & Z_{kk} & \dots & \dots & Z_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & \dots & \dots & Z_{nk} & \dots & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \dots \\ -I_k(F) \\ \dots \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

ازآنجایی‌که خطا در باس kام رخ داده، جریان تمام شین‌ها به جز شین kام برابر صفر است. جریان شین kام به‌صورت یک جریان منفی وارد شده به شین k در نظر گرفته می‌شود.

معادله kام در رابطه ماتریسی (۴)، به‌صورت رابطه (۵) است.

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(F) \qquad (۵)$$

برای خطای مستقیم (خطا با امپدانس صفر)، $V_k(F) = 0$ است. با استفاده از این مفهوم و رابطه (۵)، جریان خطا طبق رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}} \qquad (۶)$$

در رابطه فوق، $I_k(F)$ جریان خطا در باس kام، $V_k(0)$ ولتاژ شین kام قبل از خطا و Z_{kk} امپدانس تونن از دید شین kام است.

پس از محاسبه جریان خطا، می‌توان ولتاژ تمام شین‌ها در حین خطا را با استفاده از رابطه (۴) محاسبه نمود. پس از مشخص شدن ولتاژ شین‌ها در حین خطا، می‌توان جریان خطا در همه خطوط را محاسبه کرد. به‌عنوان‌مثال، جریان اتصال کوتاه در خط بین شین‌های i و j به‌صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{z_{ij}} \qquad (۷)$$

در رابطه فوق، $V_i(F)$ ولتاژ شین i در حین خطا، $V_j(F)$ ولتاژ شین j در حین خطا و z_{ij} امپدانس بین شین i و j است.

۳- مدل‌سازی عدم‌قطعیت در توربین بادی

با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی سرعت باد، موضوع عدم‌قطعیت در توان خروجی توربین بادی مطرح می‌شود. این موضوع سبب شده تا

Archive of SID

www.SID.ir

نتوان از روش‌های مرسوم برای بررسی تأثیرات آن بر روی سیستم قدرت استفاده کرد. به همین دلیل، به دست آوردن یک مدل مناسب ظرفیت برای توربین بادی امری ضروری به شمار می‌رود. در بخش‌های (۳-۱) و (۳-۲) موارد لازم برای مدل‌سازی توربین‌های بادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- مدل‌سازی سرعت باد

عوامل مختلفی در عدم‌قطعیت توان تولیدی یک توربین بادی دخیل هستند اما مهم‌ترین آن‌ها عدم‌قطعیت در انرژی اولیه (باد) می‌باشد. توان خروجی توربین بادی، به میزان سرعت باد در منطقه‌ای که توربین در آن نصب شده بستگی دارد. به همین علت، به مدلی نیاز است که بتواند سرعت ساعتی باد را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. در [۲۲]، با استفاده از سری زمانی ARMA روشی برای شبیه‌سازی سرعت ساعتی باد ارائه شده است. روش‌های مبتنی بر سری زمانی ARMA، راهکاری مناسب برای انجام این کار می‌باشد. سری زمانی ARMA به‌صورت رابطه (۸) فرمول‌بندی می‌شود [۲۲].

$$y_t = \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \ldots + \varphi_n y_{t-n} + \alpha_t - \alpha_{t-1}\theta_1 - \alpha_{t-2}\theta_2 - \ldots - \alpha_{t-m}\theta_m \quad (۸)$$

$$\alpha_t \in NID\left(0,\sigma^2\right)$$

در این رابطه، y_t مقدار سری زمانی در لحظه t است. $\Phi_i(i=1,2,3,\ldots,n)$ و $\theta_j(j=1,2,3,\ldots,m)$ به ترتیب ضرایب خودهمبسته و ضرایب با میانگین متحرک هستند. این ضرایب با استفاده از داده‌های آماری یک محل مشخص محاسبه می‌شوند. α_t نویز سفید گوسی با میانگین صفر و واریانس σ^2 است. NID بیانگر توزیع نرمال مستقل است.

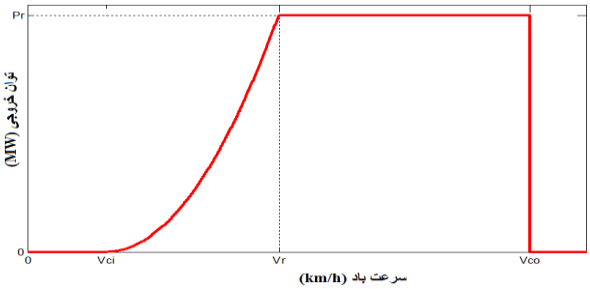
رابطه (۸)، یک سری زمانی تولید می‌کند که مقدار آن در هر لحظه به مقدار تصادفی α_t و مقادیر y و α تولیدشده در لحظات قبلی بستگی دارد. با استفاده از سری زمانی تولید شده از رابطه (۸)، می‌توان سرعت ساعتی باد را طبق رابطه (۹) محاسبه کرد [۲۲].

$$v(t) = \mu + \sigma y_t \quad (۹)$$

در رابطه فوق، v(t) سرعت باد در لحظه t، μ میانگین سرعت باد و σ انحراف معیار استاندارد سرعت باد در یک منطقه مشخص می‌باشد.

۳-۲- مشخصه توان خروجی توربین بادی

مطابق شکل ۱ توان خروجی توربین بادی در هر لحظه، به سرعت باد در همان لحظه و مشخصه‌های توربین بادی وابسته است. در این شکل، V_{ci} سرعت قطع پایین، V_r سرعت نامی و V_{co} سرعت قطع بالا می‌باشند. واحدهای بادی از سرعتی تحت عنوان V_{ci} تا سرعتی تحت عنوان V_{co} قابل بهره‌برداری بوده و شروع به تولید توان می‌کنند. در سرعت‌های بین V_{ci} تا V_r رابطه بین توان خروجی و سرعت باد یک رابطه غیرخطی است. به دلیل مسائل ایمنی، اگر سرعت باد از سرعت قطع بالا بیش‌تر شود، توربین بادی خاموش می‌شود. رابطه بین باد و توان خروجی متناظر با آن به‌صورت رابطه (۱۰) توصیف می‌شود [۲۳].



شکل ۱: میزان توان تولیدی توربین بادی برحسب سرعت باد

$$p(v) = \begin{cases} 0 & 0 \le v < v_{ci} \\ (A + Bv + Cv^2)P_r & v_{ci} \le v < v_r \\ P_r & v_r \le v < v_{co} \\ 0 & v \ge v_{co} \end{cases} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، p(v) توان خروجی توربین بادی به ازای سرعت باد v و P_r ظرفیت نامی توربین بادی است. A، B و C مقادیر ثابتی هستند که به V_{ci} و V_r بستگی دارند و طبق روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردند [۲۳].

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2}\left\{V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4V_{ci}V_r\left[\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right]^3\right\} \quad (۱۱)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2}\left\{4(V_{ci} + V_r)\left[\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right]^3 - (3V_{ci} + V_r)\right\} \quad (۱۲)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2}\left\{2 - 4\left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r}\right)^3\right\} \quad (۱۳)$$

۴- انتخاب نوع و محل‌های کاندیدشده برای نصب SFCL

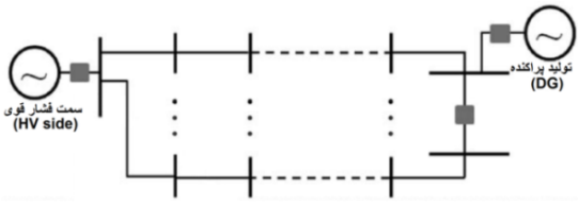
انواع مختلفی از SFCLها مانند مقاومتی [۲۴]، القایی [۲۵] و هیبرید مقاومتی [۲۶] تولید شده‌اند. برای ساختن هیبرید مقاومتی، از مواد ابررسانا و سوئیچ‌های قدرت معمولی استفاده می‌شود. استفاده از این طرح باعث شده تا حجم ماده ابررسانای استفاده‌شده در آن، بسیار کاهش یابد که درنتیجه خنک‌سازی آن را ساده‌تر می‌کند [۲۶]. در این مقاله از محدودساز ابررسانای نوع هیبرید مقاومتی استفاده می‌شود. عملکرد یک محدودساز ابررسانای جریان خطا از نوع هیبرید مقاومتی، به این صورت است که در حالت طبیعی شبکه، جریان بار از یک ابررسانای دمای بالا عبور می‌کند؛ اما زمانی که خطایی در سیستم اتفاق می‌افتد، یک مدار کنترلی این شرایط را تشخیص داده و مسیر عبور جریان را تغییر می‌دهد. به‌این‌ترتیب، جریان خطا از طریق یک مقاومت محدودکننده که در مسیر جدید قرار دارد، کاهش می‌یابد.

برای جایابی SFCL در شبکه قدرت، ابتدا باید محل‌هایی که امکان نصب SFCL در آن‌ها وجود دارد، مشخص شوند. در این مقاله تمامی محل‌های ممکن به‌عنوان کاندید در نظر گرفته شده‌اند. این محل‌ها در شکل ۲ مشخص شده‌اند. برای کاهش سطح اتصال کوتاه کل سیستم، می‌توان SFCL را در سمت فشار قوی سیستم یا به‌صورت سری با تولیدات پراکنده نصب کرد. نصب SFCL در مسیر یک خط باعث

Archive of SID

www.SID.ir

کاهش سطح جریان اتصال‌کوتاه در آن خط شده که در این صورت می‌توان از مدارشکن‌هایی با قدرت قطع پایین‌تر استفاده نمود.



شکل ۲: محل‌های کاندید برای نصب SFCL

۵- الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

بیش‌تر مسائل بهینه‌سازی در دنیای واقعی به‌صورت چندهدفه هستند؛ زیرا معمولاً چندین هدف متعارض وجود دارد که باید به‌صورت هم‌زمان بهینه شوند [۲۷]. راهکار معمول برای حل این دسته از مسائل، استفاده از روش مجموع وزندار است. نکته قابل تأمل در استفاده از روش مجموع وزن‌دار، تعیین وزن مناسب برای هر یک از اهداف است که غالباً نیاز به تجربه بالا و آزمون و خطا دارد. به‌علاوه، برای به دست آوردن مجموعه جواب بهینه با روش مجموع وزن‌دار، می‌بایست چندین مرتبه الگوریتم اصلی را اجرا کنیم که این کار زمان زیادی به طول می‌انجامد.

دسته‌ای از الگوریتم‌ها وجود دارند که ذاتاً به‌صورت چندهدفه طراحی شده‌اند. اگرچه این الگوریتم‌ها پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند، اما فقط با یکبار حل مسئله، کلیه پاسخ‌های بهینه را به دست می‌آورند. به‌عبارت‌دیگر خروجی این الگوریتم‌ها یک پاسخ بهینه نیست، بلکه مجموعه‌ای (آرشیو) از پاسخ‌های بهینه است که بسته به نظر طراح سیستم، هر یک از آن‌ها می‌تواند به‌عنوان پاسخ بهینه انتخاب شود. یکی از شاخص‌ترین و قوی‌ترین الگوریتم‌هایی که در این حوزه وجود دارد، الگوریتم NSGA-II است [۲۸]. این الگوریتم به‌قدری شاخص است که حتی صحت عملکرد سایر الگوریتم‌های ابداعی، با آن سنجیده می‌شود. با توجه به دلایل ذکرشده، در این مقاله از الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود تا امکان انتخاب پاسخ مناسب در حالت‌های مختلف و تحت سیاست‌ها و شرایط متفاوت برای تصمیم‌گیرنده فراهم باشد.

در حالت کلی چندین روش برای رتبه‌بندی مجموعه جواب بهینه پارتو وجود دارد. یکی از پرکاربردترین آن‌ها L_p norm نامیده می‌شود. در این روش، پاسخ‌ها بر اساس فاصله‌ای که از یک نقطه ایده‌آل دارند، رتبه‌بندی می‌شوند. برای محاسبه این فاصله از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود [۲۹].

$$Minimize\left\{\sum_{i=1}^{m}\left(f_i(x)-f_i^*\right)^p\right\}^{\frac{1}{p}} \qquad (۱۴)$$

f_i^* بردار ایده‌آل هدف نامیده می‌شود که در اینجا [۰ ۰ ۰] در نظر گرفته شده است. مقدار p نیز برابر ۲ لحاظ شده است. اگر مقدار p برابر ۱ باشد به آن فاصله شهری گفته می‌شود. اگر مقدار p برابر ۲ باشد به آن فاصله اقلیدسی گفته می‌شود [۲۹]. در حالت کلی، هیچ حساسیتی نسبت به مقدار پارامتر p وجود ندارد و هر مقداری را برای آن می‌توان اختیار کرد. $f_i(x)$ مقدار تابع هدف iام به ازای پاسخ x است. m تعداد توابع هدف می‌باشد.

۶- فرمول‌بندی معیارهای مختلف برای جایابی و تعیین ظرفیت بهینه SFCL

همان‌طور که گفته شد اضافه شدن تولیدات پراکنده به سیستم قدرت منجر به افزایش سطح جریان اتصال کوتاه شده که این امر بر روی هماهنگی رله‌ها تأثیرات منفی خواهد داشت. همچنین افزایش ماکزیمم جریان خطا میتواند منجر به استفاده از مدارشکن‌هایی با قدرت قطع بالاتر شود. انتخاب محل و ظرفیت مناسب برای SFCL می‌تواند به کاهش ماکزیمم جریان خطا کمک کرده و آن را تا حد قدرت قطع‌کنندگی ادوات حفاظتی پایین آورد؛ به‌علاوه بر روی هماهنگی رله‌ها نیز اثرگذار خواهد بود. در کنار تمام موارد ذکرشده، هزینه نصب و بهره‌برداری SFCL فاکتور مهمی محسوب می‌شود.

در این مقاله از الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی سه معیار حفظ هماهنگی رله‌ها، کاهش جریان خطا و مینیمم ظرفیت نصب‌شده SFCL به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌شود. برای در نظر گرفتن این سه معیار، توابع هدف به‌صورت روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) تعریف شده‌اند.

$$OF_1=\alpha_1\sum(t_i)^2+\alpha_2\sum(\Delta t_{mb}-\beta_2(\Delta t_{mb}-|\Delta t_{mb}|))^2$$
$$\Delta t_{mb}=t_b-t_m-CTI \qquad (۱۵)$$

$$OF_2=\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{I_i^{DG,SFCL}-I_i^1}{I_i^1}\right| \qquad (۱۶)$$

$$OF_3=\sum_{i=1}^{m}R_i \qquad (۱۷)$$

OF_1 تابع هدف اول می‌باشد که برای حفظ هماهنگی رله‌ها و حداقل‌سازی زمان عملکرد آن‌ها در نظر گرفته شده است.

OF_2 تابع هدف دوم می‌باشد که به‌منظور کاهش جریان خطا با حداقل‌سازی انحراف از ظرفیت قطع کلیدها در نظر گرفته می‌شود.

OF_3 تابع هدف سوم است که برای حداقل‌سازی ظرفیت نصب‌شده SFCL لحاظ شده است.

همچنین $I_i^{DG,SFCL}$ جریان خطای رله iام در حضور تولیدات پراکنده و SFCL، I^1_i ظرفیت قطع کلید iام (جریان اتصال‌کوتاه کلید iام قبل از نصب DG و SFCL)، n تعداد کل کلیدها، R_i مقاومت iامین SFCL و m تعداد کل SFCLهای نصب‌شده می‌باشد.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، درصورتی‌که SFCL در محل نادرست و با ظرفیت نامناسب نصب شود نه‌تنها جریان اتصال کوتاه را کاهش نمی‌دهد بلکه منجر به افزایش آن نیز خواهد شد. البته لازم به ذکر است که محل وقوع خطا نیز عامل بسیار مهمی تلقی می‌شود. معمولاً در مطالعات مشابه، یک یا چندین محل را به‌عنوان کاندید برای ایجاد خطا در شبکه انتخاب می‌کنند و فقط سطح اتصال کوتاه آن‌ها را

Archive of SID

www.SID.ir

موردبررسی قرار می‌دهند. در این مقاله، تمام محل‌هایی که امکان وقوع خطا برای آن‌ها وجود دارد موردبررسی قرار می‌گیرند. به عبارت دقیق‌تر، تحلیل اتصال کوتاه با قرار دادن خطا در جلوی تک‌تک رله‌ها انجام می‌شود.

۷- محاسبه مقدار تابع هدف با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت

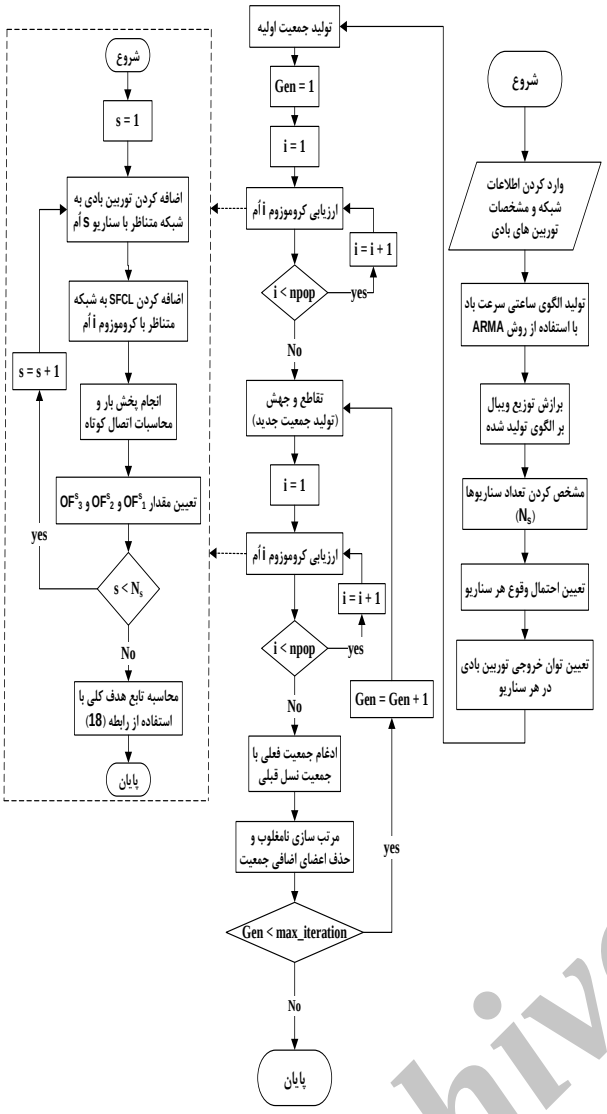
در مطالعات گذشته مانند [۱۷] فرض شده است که توان تولیدی DGها ثابت است. این مسئله در عمل بسیار غیرمحتمل است؛ زیرا توان تولیدی DGها به منبع انرژی اولیه آن‌ها بستگی دارد. اگر این منبع انرژی باد باشد، بایستی عدم‌قطعیت آن در نظر گرفته شود. به عبارت ساده‌تر، متغیر بودن سرعت باد باعث می‌شود تا توان خروجی توربین‌های بادی نیز متغیر باشد. به همین دلیل نمی‌توان توربین بادی را به‌صورت یک منبع انرژی با توان ثابت مدل‌سازی کرد. برای حل این مشکل، می‌توان محدوده عملکرد توربین بادی را به مجموعه‌ای از سناریوها تقسیم‌بندی نمود. هرچه تعداد سناریوها بیش‌تر باشد، دقت مدل‌سازی افزایش می‌یابد. برای تولید سناریوها، ابتدا باید الگوی ساعتی سرعت باد در دسترس باشد. در این مقاله، با استفاده از سری زمانی ARMA و روش گفته‌شده در بخش (۳-۱)، الگوی ساعتی سرعت باد به دست می‌آید. سپس باید توزیع احتمالی مناسب بر این الگو برازش یابد. بررسی‌های متعدد در محل‌های مختلف نشان داده است که توزیع ویبال بهترین برازش را بر سرعت باد دارد و این توزیع به‌صورت گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرد [۳۰]. در این مقاله نیز از توزیع ویبال برای برازش بر الگوی سرعت باد استفاده شده است. حال می‌بایست توزیع به‌دست‌آمده را به بازه‌های مختلفی تقسیم‌بندی نمود. به هر یک از این بازه‌ها، یک سناریو گفته می‌شود. احتمال وقوع هر سناریو، برابر مساحت زیر منحنی ویبال در آن بازه (سناریو) است. توان خروجی توربین بادی نیز با استفاده از رابطه (۱۰) و میانگین سرعت باد در هر سناریو قابل محاسبه است. با این رویکرد، می‌توان توربین بادی را به‌صورت احتمالاتی مدل‌سازی نمود.

برای محاسبه نمودن مقدار کلی توابع هدف، باید تأثیر هر یک از سناریوها لحاظ شود. برای انجام این کار باید هر سناریو به‌صورت جداگانه به شبکه اعمال شود. سپس می‌بایست مقادیر OF_1، OF_2 و OF_3 به‌صورت مجزا برای هر سناریو محاسبه گردد. در انتها، مقدار کلی توابع هدف از رابطه (۱۸) قابل محاسبه است. درواقع این رابطه، امید ریاضی توابع هدف را تحت سناریوهای مختلف محاسبه می‌کند.

$$\left[OF_1^{Total}\ OF_2^{Total}\ OF_3^{Total}\right]=\sum_{s=1}^{N_s}P_s\times\left[OF_1^{s}\ OF_2^{s}\ OF_3^{s}\right] \qquad (۱۸)$$

در رابطه فوق، $OF^{Total}{}_1$، $OF^{Total}{}_2$ و $OF^{Total}{}_3$ مقادیر کلی توابع هدف برای هر پاسخ هستند. $OF^{s}{}_1$، $OF^{s}{}_2$ و $OF^{s}{}_3$ مقادیر توابع هدف به ازای سناریوی sام هستند. P_s احتمال وقوع سناریوی sام و N_s تعداد کل سناریوها می‌باشد.

در فلوچارت شکل ۳، نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۳: فلوچارت روش پیشنهادی

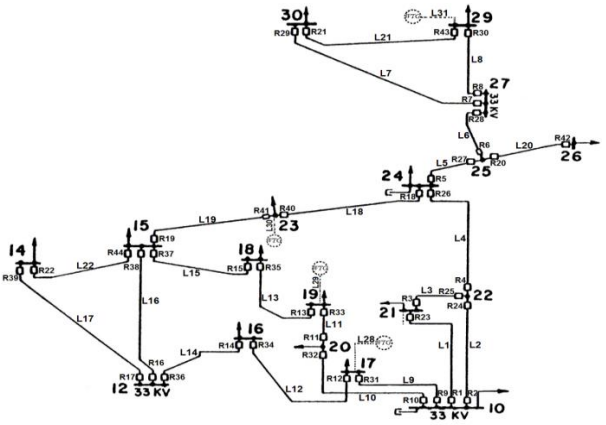
۸- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۸-۱- شبکه موردمطالعه

در این مقاله بخش توزیع (33kV) شبکه ۳۰ باسه IEEE به‌عنوان شبکه نمونه موردمطالعه قرار می‌گیرد. این شبکه شامل ۱۸ باس، ۲۲ خط و ۴۴ رله جریان زیاد می‌باشد که در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این شبکه از رله‌های جریان‌زیاد جهت‌دار به‌عنوان حفاظت اصلی استفاده شده است. این رله‌ها در ابتدا و انتهای تمام خطوط نصب گردیده‌اند. شبکه توزیع تحت‌مطالعه از طریق سه پست توزیع اولیه (132kV/33kV) که در باس‌های ۱۰، ۱۲ و ۲۷ قرار گرفته‌اند، تغذیه می‌گردد. مشخصات مربوط به ژنراتورها، خطوط، ترانسفورماتور و سایر اطلاعات مربوط به شبکه موردمطالعه در [۳۱] آورده شده است. مشخصات تمامی رله‌ها از رابطه (۲) پیروی می‌کند که در آن مقادیر k و n به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۰۲ می‌باشند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴: بخش توزیع شبکه ۳۰ باسه IEEE

۸-۲- هماهنگی رله‌های جریان‌زیاد جهت‌دار

برای هماهنگی رله‌های موجود در شبکه نمونه، از روش گفته‌شده در بخش (۲) استفاده می‌شود. ضرایب وزنی α_1، α_2 و β_2 به ترتیب ۱، ۲ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. فاصله زمانی بحرانی (CTI) بین رله‌های اصلی و پشتیبان ۰/۳ ثانیه لحاظ می‌گردد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک و محاسبات اتصال کوتاه در نرم‌افزار MATLAB، مقدار تنظیم زمانی رله‌ها (TMS) و همچنین جریان اتصال کوتاه به ازای خطا در جلوی هر رله محاسبه شده و در جدول ۱ نشان داده شده است.

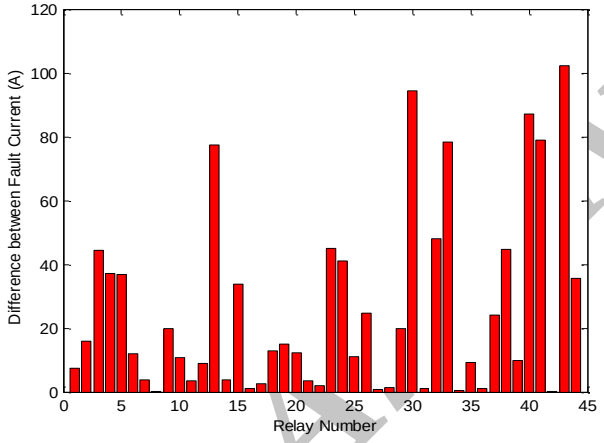
جدول ۱: TMS و جریان خطای عبوری از رله‌ها

شماره رله	TMS (s)	I_{sc} (kA)	شماره رله	TMS (s)	I_{sc} (kA)
۱	۰/۷۰۶	۱۳/۳۴۶	۲۳	۰/۰۵	۴/۱۳۴
۲	۰/۶۱۳	۱۳/۴۶۷	۲۴	۰/۱۱۱	۷/۰۷۱
۳	۰/۹۷۳	۶/۲۸۷	۲۵	۰/۲۹۶	۵/۵۱۶
۴	۰/۷۰۱	۸/۴۵۸	۲۶	۰/۳۰۳	۳/۵۵۹
۵	۰/۷۷۸	۶/۰۶۱	۲۷	۰/۵۱۷	۲/۳۷۶
۶	۰/۴۷۸	۲/۵۴۱	۲۸	۰/۶۳۶	۳/۵۵۷
۷	۰/۴۳۵	۵/۲۶۵	۲۹	۰/۰۹۶	۰/۹۱۰
۸	۰/۳۵۷	۵/۳۰۰	۳۰	۰/۲۰۷	۰/۶۸۷
۹	۰/۹۶۶	۱۲/۰۶۶	۳۱	۰/۱۲۶	۲/۸۲۵
۱۰	۰/۹۱۴	۱۲/۸۷۵	۳۲	۰/۱۳۳	۲/۲۷۹
۱۱	۰/۶۰۵	۴/۷۳۸	۳۳	۰/۳۲۹	۲/۶۹۰
۱۲	۰/۹۱۱	۴/۲۴۴	۳۴	۰/۳۱۸	۵/۰۸۴
۱۳	۰/۵۳۳	۳/۷۶۸	۳۵	۰/۶۴۹	۳/۸۴۵
۱۴	۰/۵۷۹	۳/۷۲۳	۳۶	۰/۴۷۱	۱۴/۸۴۳
۱۵	۰/۱۸۶	۲/۷۱۲	۳۷	۰/۷۸۵	۸/۹۹۵
۱۶	۰/۶۵	۱۵/۲۰۵	۳۸	۰/۰۶	۴/۵۹۱
۱۷	۰/۵۶۱	۱۶/۱۹۸	۳۹	۰/۱۴	۳/۰۳۱
۱۸	۰/۴۹۲	۵/۴۰۸	۴۰	۰/۸۱۴	۴/۰۲۸
۱۹	۰/۷۵۸	۹/۰۱۵	۴۱	۰/۲۱۲	۲/۵۶۴
۲۰	۰/۳۴۶	۴/۹۵۸	۴۲	۰/۰۵	۰/۰۷۳
۲۱	۰/۴۱۵	۱/۳۶۶	۴۳	۰/۲۷۴	۱/۹۱۴
۲۲	۰/۶۰۸	۴/۰۶۴	۴۴	۰/۵۷۵	۹/۰۵۱

۸-۳- تاثیر سطح تولید DG بر جریان‌های اتصال کوتاه

با نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع، سطوح اتصال کوتاه در نقاط مختلف شبکه دستخوش تغییر می‌شوند. حضور این منابع در شبکه سبب می‌شود که در هنگام بروز خطا، جریان خطا علاوه بر شبکه سراسری از طریق این منابع نیز تأمین شده و درنتیجه با تزریق جریان توسط این منابع در محل خطا، جریان اتصال کوتاه افزایش می‌یابد. هر چه ظرفیت DG بزرگ‌تر باشد، سطح جریان خطا نیز بیش‌تر خواهد بود. علت این افزایش را می‌توان در رابطه (۶) جستجو کرد. در رابطه (۶)، $V_k(0)$ ولتاژ شین kام قبل از خطا می‌باشد. این ولتاژ را می‌توان با انجام پخش بار از شبکه، قبل از وقوع خطا محاسبه نمود. حضور تولیدات پراکنده در شبکه، منجر به افزایش این ولتاژ، نسبت به حالتی که این منابع در شبکه حضور ندارند، می‌شود. در پی این افزایش ولتاژ، جریان خطا نیز طبق رابطه (۶) افزایش می‌یابد.

در شکل ۵، اختلاف بین سطوح اتصال کوتاه برای شبکه مورد مطالعه، در دو حالت مختلف نشان داده شده است. در این شکل محور افقی شماره رله‌هایی که خطا جلوی آن‌ها منظور شده است را نشان می‌دهد. در حالت اول، ظرفیت هر یک از تولیدات پراکنده ۲۰MW است. در حالت دوم، ظرفیت DGها به ۲۵MW افزایش یافته است. همان طور که انتظار می‌رفت، با افزایش توان تولیدی DGها، سطوح اتصال کوتاه شبکه افزایش یافتند.



شکل ۵: تفاضل سطوح اتصال کوتاه در حالت اول و دوم

۸-۴- محاسبه عدم‌قطعیت در توربین‌های بادی

در این مقاله، با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد انرژی بادی و سایر عوامل گفته‌شده در بخش ۱، از توربین‌های بادی جهت تأمین بخشی از نیاز مشترکین به انرژی الکتریکی استفاده شده است. این توربین‌ها به‌صورت تولید پراکنده به شبکه اضافه شده‌اند و مجهز به سیستم کنترل توان راکتیو هستند به‌گونه‌ای که توان راکتیو بسیار کمی از شبکه جذب می‌کنند. ظرفیت نامی هر یک از توربین‌ها ۱/۵MW و راکتانس گذرای آن‌ها ۰/۱۵pu بوده و سرعت قطع پایین (V_{ci})، سرعت نامی (V_r) و سرعت قطع بالا (V_{co}) به ترتیب ۱۴/۴km/h، ۴۵km/h و ۹۰km/h می‌باشد.

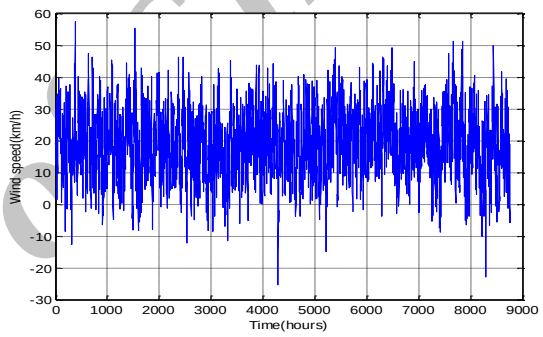
Archive of SID

www.SID.ir

برای شبیه‌سازی ساعتی سرعت باد از روش گفته‌شده در بخش (۳-۱) و رابطه (۸) استفاده می‌شود. با استفاده از داده‌های آماری مربوط به سایت بادی Swift Current [۳۲]، مدل ARMA محاسبه شده که پارامترهای آن در رابطه (۱۹) نشان داده می‌شوند.

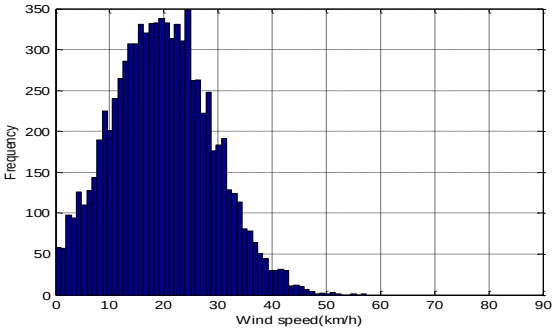
$$y_t = 0.8782y_{t-1} - 0.0066y_{t-2} + 0.0265y_{t-3} + \alpha_t - 0.2162\alpha_{t-1} + 0.0091\alpha_{t-2} \quad (19)$$
$$\alpha_t \in NID(0, 0.55792^2)$$

در این سایت بادی، میانگین سرعت باد ۱۹/۶۷km/h و انحراف معیار استاندارد آن ۹/۶۷km/h گزارش شده است. شکل ۶ سرعت باد شبیه‌سازی شده با استفاده از سری زمانی ARMA برای سایت بادی Swift Current را نشان می‌دهد. در این شکل، سرعت باد برای یک سال در ساعت‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بعضی از سرعت‌ها مقادیر منفی هستند. ازآنجایی‌که در این مطالعه مقادیر منفی برای سرعت باد معنی فیزیکی ندارند، در پایان شبیه‌سازی حذف خواهند شد.



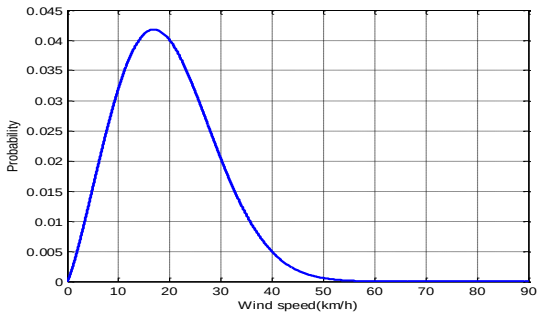
شکل ۶: سرعت باد شبیه‌سازی شده با سری زمانی ARMA

با توجه به شکل ۶، با دسته‌بندی داده‌های سرعت باد، می‌توان نمودار هیستوگرام آن‌ها را رسم کرد. شکل ۷ نمودار هیستوگرام داده‌های سرعت باد، که با استفاده از سری زمانی ARMA شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۷: نمودار هیستوگرام داده‌های سرعت باد

با تقسیم فراوانی هر بازه بر تعداد کل داده‌های سرعت باد، می‌توان احتمال وقوع هر بازه را به دست آورد. با برازش یک توزیع احتمالی مناسب، می‌توان رفتار باد را به‌صورت یک توزیع احتمالی پیوسته توصیف کرد. توزیع ویبال[۹] با تقریب مناسبی به‌عنوان توزیع احتمالی سرعت باد در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸ توزیع ویبال متناظر با سرعت‌های باد شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸: تابع توزیع ویبال سرعت باد مربوط به شکل ۶

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، میزان تولید توان توربین بادی تابعی از سرعت باد است. در شکل ۱ منحنی تغییرات توان تولیدی برحسب سرعت باد برای یک توربین بادی نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی مشخصه و تابع توزیع احتمالی سرعت باد، می‌توان برای هر حالت توان تولیدی توربین بادی، احتمال مربوطه را به دست آورد. برای انجام این کار مشخصه توربین بادی را به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی می‌کنیم. ناحیه اول مربوط به سرعت‌های کوچک‌تر از V_{ci} یا بزرگ‌تر از V_{co} است. در این ناحیه، توان تولیدی توربین بادی صفر می‌باشد. ناحیه دوم مربوط به سرعت‌های بین V_r تا V_{co} است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، توان تولیدی توربین بادی در این ناحیه ثابت است. اگر سرعت باد بین V_{ci} تا V_r باشد توان تولیدی توربین بادی با یک رابطه غیرخطی تعریف می‌شود. لذا با در نظر گرفتن گام‌هایی یکسان در این محدوده، می‌توان این ناحیه پیوسته را به‌صورت گسسته درآورد و احتمال مربوط به هر ناحیه را محاسبه نمود. در این مقاله مجموعاً ۱۲ ناحیه مختلف در نظر گرفته می‌شود که احتمال وقوع هر یک از آن‌ها با توجه به شکل ۸ محاسبه شده است. جدول ۲ نواحی مختلف به همراه احتمال وقوع آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مدل‌سازی توان خروجی توربین بادی

سناریوها	سرعت باد(km/h)	توان تولیدی(kW)	احتمال
۱	V<۱۴/۴ یا V>۹۰	۰	۰/۳۱۹۲۶
۲	۴۵<V<۹۰	۱۰۰۰۰	۰/۰۰۷۷۲۳۵
۳	۱۴/۴<V<۱۷/۴۶	۹۶/۲۴۲	۰/۱۲۶۷۷
۴	۱۷/۴۶<V<۲۰/۵۲	۴۱۶/۲۳	۰/۱۲۴۹۵
۵	۲۰/۵۲<V<۲۳/۵۸	۹۰۶/۲۲	۰/۱۱۳۴۱
۶	۲۳/۵۸<V<۲۶/۶۴	۱۵۶۶/۲	۰/۰۹۵۴۲۸
۷	۲۶/۶۴<V<۲۹/۷۰	۲۳۹۶/۲	۰/۰۷۴۷۲۷
۸	۲۹/۷۰<V<۳۲/۷۶	۳۳۹۶/۲	۰/۰۵۴۵۸۹
۹	۳۲/۷۶<V<۳۵/۸۲	۴۵۶۶/۲	۰/۰۳۷۲۵۴
۱۰	۳۵/۸۲<V<۳۸/۸۸	۵۹۰۶/۲	۰/۰۲۳۷۷۱
۱۱	۳۸/۸۸<V<۴۱/۹۴	۷۴۱۶/۲	۰/۰۱۴۱۸۸
۱۲	۴۱/۹۴<V<۴۵	۹۰۹۶/۲	۰/۰۰۷۹۲۱۹

۸-۵- تأثیر حضور توربین‌های بادی با عدم‌قطعیت

در بخش قبلی عدم‌قطعیت برای توان تولیدی هر ژنراتور بادی محاسبه گردید. در این بخش، توربین‌های بادی در باس‌های ۱۷، ۱۹، ۲۳ و ۲۹

Archive of SID

www.SID.ir

نصب می‌شوند که در شکل ۴ قابل مشاهده است. محل نصب توربین‌های بادی به‌گونه‌ای مشخص شده تا سطح اتصال کوتاه سیستم به بالاترین حد ممکن برسد و بیش‌ترین ناهماهنگی میان رله‌های موجود در شبکه ایجاد شود. این باس‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیکی که برای این منظور طراحی شده بود، تعیین شدند. البته در حالت کلی، محل نصب توربین‌های بادی با توجه به تقاضای انرژی مشترکین می‌تواند متفاوت باشد. در این مقاله فرض می‌شود که توربین‌ها در یک منطقه جغرافیایی واقع شده‌اند و از الگوی باد یکسانی تبعیت می‌کنند که با توجه به وسعت کم شبکه‌های توزیع، این فرض منطقی به نظر می‌رسد.

نصب این توربین‌ها منجر به افزایش سطح جریان اتصال کوتاه در شبکه می‌شود. این افزایش جریان تأثیرات منفی بر روی جفت رله‌های اصلی و پشتیبان دارد و در بعضی از مواقع منجر به عدم هماهنگی نیز می‌شود. در جدول ۳، جریان خطای تمام رله‌ها به ازای خطا در جلوی آن‌ها، در حضور منابع بادی مشاهده می‌شود. برای محاسبه این جریان‌ها عدم‌قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی در نظر گرفته شده است. درواقع هر یک از این جریان‌ها توسط احتمال وقوع هر یک از ۱۲ سناریوی جدول ۲، وزن‌دهی شده‌اند. آنچه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار مورد انتظار یک گروه از امیدهای ریاضی جریان خطا می‌باشد.

جدول ۳: جریان خطای رله‌ها در حضور توربین‌های بادی

شماره رله	I_{sc} (kA)	شماره رله	I_{sc} (kA)
۱	۲۰/۱۶۵	۲۳	۵/۷۰۴
۲	۲۰/۳۳۵	۲۴	۹/۵۵۶
۳	۸/۲۹۵	۲۵	۷/۵۰۷
۴	۱۱/۰۱۵	۲۶	۵/۴۱۶
۵	۸/۱۶۶	۲۷	۳/۲۶۲
۶	۲/۸۸۲	۲۸	۶/۰۹۴
۷	۷/۲۴۴	۲۹	۲/۰۱۶
۸	۶/۲۳۶	۳۰	۸/۴۱۴
۹	۱۵/۰۹۱	۳۱	۱۱/۲۲۶
۱۰	۱۸/۱۶۲	۳۲	۶/۹۶۲
۱۱	۵/۴۲۶	۳۳	۱۱/۰۳۰
۱۲	۱۶/۲۲۲	۳۴	۵/۵۱۲
۱۳	۱۲/۱۳۴	۳۵	۴/۴۳۵
۱۴	۵/۴۱۳	۳۶	۱۷/۲۱۰
۱۵	۵/۶۴۷	۳۷	۱۱/۸۳۴
۱۶	۱۶/۸۳۰	۳۸	۸/۴۱۲
۱۷	۱۹/۰۶۵	۳۹	۳/۵۹۶
۱۸	۶/۴۱۹	۴۰	۱۲/۱۷۰
۱۹	۱۰/۷۶۵	۴۱	۱۰/۷۴۸
۲۰	۶/۱۸۲	۴۲	۰/۰۷۳
۲۱	۱/۶۵۰	۴۳	۹/۵۲۵
۲۲	۴/۳۶۶	۴۴	۱۳/۰۴۹

جدول ۴ جفت رله‌های اصلی و پشتیبانی را نشان می‌دهد که حضور توربین‌های بادی منجر به عدم هماهنگی بین آن‌ها شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با نصب ۴ واحد بادی، هماهنگی بین ۳ جفت از رله‌ها از بین می‌رود. در این جدول برای محاسبه Δt_{mb}، تأثیر ۱۲ سناریوی جدول ۲ لحاظ شده است. آنچه که در جدول ۴ آورده شده است، مقدار مورد انتظار Δt_{mb} است.

جدول ۴: عدم هماهنگی رله‌ها در حضور توربین‌های بادی

شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	Δt_{mb}
۳	۱	-۰/۰۰۴۷۹۷۴
۲۵	۲۶	-۰/۱۹۹۴۴
۵	۴۰	-۰/۰۷۱۶۴۴

۸-۶- انتخاب بهینه محل و ظرفیت SFCL با عدم‌قطعیت

همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد، حضور توربین‌های بادی منجر به عدم هماهنگی برخی از جفت رله‌های اصلی و پشتیبان شده و همچنین سطح جریان اتصال کوتاه در شبکه را افزایش داده است. در این بخش با استفاده از الگوریتم NSGA-II و در نظر گرفتن سه معیار ذکرشده در بخش ۶، محل و ظرفیت SFCL در حضور توربین‌های بادی تعیین می‌شود. در مدل‌سازی توربین‌های بادی، از یک مدل ۱۲ حالته بر اساس سناریوهای جدول ۲ استفاده شده است. لازم به ذکر است که تعداد SFCLها برابر ۳ و ماکزیمم ظرفیت هر یک از آن‌ها ۵pu می‌باشد. در الگوریتم NSGA-II، هر کروموزوم بیانگر یک پاسخ است. در این مقاله ساختار کلی این پاسخ‌ها مطابق شکل ۹ در نظر گرفته شده است که در آن سطر اول بیانگر محل نصب و سطر دوم بیانگر ظرفیت SFCL متناظر با هر محل می‌باشد.

محل 1	محل 2	محل 3	...	محل n
R1	R2	R3	...	Rn

شکل ۹: ساختار کلی هر کروموزوم

مقدار کلی هر یک از توابع هدف با روش گفته‌شده در بخش ۷، برای هر پاسخ محاسبه می‌شود. پس از اجرای این الگوریتم، مجموعه جواب بهینه پارتو[۱۰] به دست می‌آید که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. هر یک از این نقاط، بیانگر یکی از پاسخ‌ها بوده که با توجه به مقدار سه تابع هدف متناظر با آن پاسخ، در فضای سه بعدی جای گرفته است. برخلاف بهینه‌سازی تک‌هدفه، در بهینه‌سازی چندهدفه یک جواب بهینه وجود ندارد که در مقابل همه اهداف بهترین باشد. استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه منجر به تولید مجموعه‌ای از جواب‌ها می‌شود که هیچکدام از آن‌ها بر دیگری برتری ندارند؛ به‌طوری‌که تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به قیود متفاوت و وزن هر هدف در شرایط مختلف یکی از راه‌حل‌ها را انتخاب کند. البته حضور چندین انتخاب و مقایسه آن‌ها با یکدیگر به تصمیم‌گیرنده این شانس را می‌دهد که بهترین انتخاب را انجام دهد.

پس از رتبه‌بندی جواب‌ها، تعدادی از آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. سطر اول این جدول، مربوط به بهترین پاسخ بر اساس روش L_2 norm است. مطابق با این پاسخ، اگر SFCLها در شاخه‌های L۲۸، L۲۹ و L۳۰ با ظرفیت‌های ۰/۴۰۸۸pu، ۰/۹۶۳۳pu و ۲/۴۳۷۳pu نصب شوند بهترین کارایی ممکن را خواهند داشت. با اعمال این پاسخ

Archive of SID

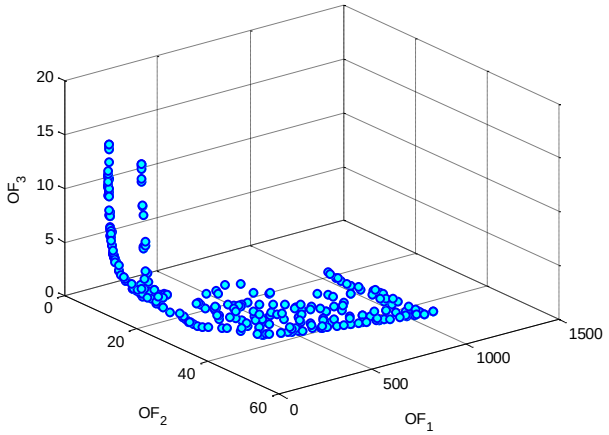
www.SID.ir

به شبکه، جریان‌های خطا و همچنین اختلاف زمان عملکرد بین جفت رله‌های اصلی و پشتیبان مجدداً محاسبه شده و به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ آورده شده‌اند.

جدول ۵: بهترین پاسخ‌ها از نظر L_2 norm با عدم‌قطعیت

رتبه	مقدار OF_1	مقدار OF_2	مقدار OF_3	محل SFCL	مقدار مقاومت (p.u.)
۱	۴۵/۸۳۲	۲۲/۶۱۹	۳/۸۰۹۴	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۴۰۸۸۱ ۰/۹۶۳۲۸ ۲/۴۳۷۳
۲	۴۶/۷۷۹	۲۰/۳۲۴	۵/۱۵۴۱	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۱/۰۲۴۹ ۱/۶۹۱۹ ۲/۴۳۷۳
۳	۴۶/۵۲۶	۲۱/۱۱۷	۴/۳۵۰۴	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۹۴۹۸۴ ۰/۹۶۳۲۸ ۲/۴۳۷۳
۴	۴۶/۷۱۷	۲۰/۷۳۲	۵/۰۳۶۸	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۱/۶۳۶۲ ۰/۹۶۳۲۸ ۲/۴۳۷۳
۵	۴۶/۸	۲۰/۱۵۱	۷/۵۰۸۷	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۷۷۷۹۷ ۲/۸۲۲۶ ۳/۹۰۸۱
۶	۴۶/۰۳۶	۲۲/۸۱۷	۳/۷۱۱۷	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۷۲۳۳۶ ۰/۵۵۱۰۵ ۲/۴۳۷۳
۷	۴۷/۰۵۴	۱۹/۷۳۴	۷/۲۴۵	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۲/۳۹۹۷ ۱/۸۹۵۳ ۲/۹۵۰۱
۸	۴۷/۰۵۱	۱۹/۷۳۱	۷/۳۸۶	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۳/۰۴۸۲ ۲/۳۹۹۲ ۱/۹۳۸۶
۹	۴۶/۸۱۷	۲۰/۱۰۵	۷/۸۶۱۳	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۷۷۷۹۷ ۳/۱۷۵۲ ۳/۹۰۸۱
۱۰	۴۵/۷۲۶	۲۳/۹۷۳	۳/۳۹۷۲	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۴۰۸۸۱ ۰/۵۵۱۰۵ ۲/۴۳۷۳

اگر جریان خطای رله‌ها را قبل و بعد از اعمال SFCL به شبکه با یکدیگر مقایسه کنیم در می‌یابیم که جریان‌های اتصال کوتاه بعد از اعمال SFCL به شبکه کاهش یافته‌اند. این کاهش جریان، در محل رله‌های ۲۸، ۳۰ و ۴۳ بیش‌تر است. با مراجعه به شکل ۳، درمی‌یابیم که پیوستگی (تراکم) خطوط در محل این رله‌ها، نسبت به سایر قسمت‌های شبکه کم‌تر است. این گونه استنباط می‌شود که کاهش جریان خطا توسط SFCL، در قسمت‌هایی از شبکه که پیوستگی کم‌تری دارند به شکل مؤثرتری صورت می‌گیرد.



شکل ۱۰: مجموعه جواب بهینه پارتو

جدول ۶: جریان خطای رله‌ها بعد از اعمال بهترین پاسخ از نظر L_2 norm

شماره رله	I_{sc} (kA)	شماره رله	I_{sc} (kA)
۱	۲۰/۰۵۹۳	۲۳	۵/۶۰۳۷
۲	۲۰/۲۱۰۰	۲۴	۹/۴۲۲۸
۳	۸/۲۶۶۲	۲۵	۷/۳۷۵۶
۴	۱۰/۹۸۱۴	۲۶	۵/۱۰۱۷
۵	۸/۱۴۴۹	۲۷	۲/۴۱۸۵
۶	۲/۸۷۵۱	۲۸	۳/۶۱۷۵
۷	۵/۵۰۴۷	۲۹	۰/۹۳۲۰
۸	۵/۵۳۶۸	۳۰	۰/۷۱۷۷
۹	۱۴/۹۲۶۷	۳۱	۱۱/۲۲۰۶
۱۰	۱۸/۰۰۲۵	۳۲	۶/۹۶۰۶
۱۱	۵/۴۱۲۶	۳۳	۱۱/۰۲۷۰
۱۲	۱۶/۱۷۶۹	۳۴	۵/۵۰۷۲
۱۳	۱۲/۱۲۶۹	۳۵	۴/۴۳۱۱
۱۴	۵/۴۰۷۴	۳۶	۱۷/۱۸۱۲
۱۵	۵/۶۴۵۰	۳۷	۱۱/۸۱۲۷
۱۶	۱۶/۸۰۲۷	۳۸	۸/۳۹۶۵
۱۷	۱۹/۰۳۲۲	۳۹	۳/۵۹۳۷
۱۸	۶/۰۸۲۲	۴۰	۱۲/۱۶۲۳
۱۹	۱۰/۷۵۳۰	۴۱	۱۰/۶۸۳۸
۲۰	۵/۳۲۳۲	۴۲	۰/۰۷۳۲
۲۱	۱/۳۹۲۲	۴۳	۱/۹۷۵۸
۲۲	۴/۳۶۳۵	۴۴	۱۳/۰۲۸۵

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، همه مقادیر Δt_{mb} مثبت هستند؛ درحالی‌که پیش از اضافه شدن SFCL به شبکه، تمامی این مقادیر منفی بودند که نشانگر عملکرد نادرست جفت رله‌های اصلی و پشتیبان (ناهماهنگی) بوده است. پرواضح است که SFCLها به‌خوبی توانسته‌اند هماهنگی بین رله‌ها را بازیابی کنند و عملکرد نادرست آن‌ها را تصحیح نمایند. مثبت بودن مقادیر Δt_{mb} در جدول ۷، این گفته را تأیید می‌کند.

جدول ۷: Δt_{mb} بعد از اعمال بهترین پاسخ از نظر L_2 norm

شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	Δt_{mb}

Archive of SID

www.SID.ir

۰/۰۴۲۴۷	۱	۳
۰/۰۱۷۴۸	۲۶	۲۵
۰/۰۰۹۹۶	۴۰	۵

در جدول ۸، بهترین پاسخ‌ها از لحاظ هر یک از معیارها آورده شده است. سطر دوم این جدول پاسخی را نشان می‌دهد که بیش‌ترین تأثیر را بر کاهش جریان خطا دارد. مطابق با این پاسخ، اگر SFCLها در شاخه‌های L۳۱، L۳۰ و L۲۹ با حداکثر ظرفیتشان نصب شوند، می‌توانند مقدار OF_2 را که به‌عنوان شاخصی برای میزان محدودکنندگی جریان خطا است، به مقدار ۸/۱۸۹۵ برسانند. درحالی‌که مقدار OF_2 به ازای بهترین پاسخ از نظر L_2 norm برابر ۲۲/۶۱۹ است. این میزان کاهش، بسیار چشمگیر است. اگرچه این پاسخ، مقدار OF_2 را به شدت کاهش می‌دهد اما اعمال آن به شبکه باعث می‌شود که عدم هماهنگی بین جفت رله‌های اصلی و پشتیبان باقی بماند. در کل، با توجه به محدودیت‌ها و شرایطی که وجود دارد، تصمیم‌گیرنده می‌تواند بهترین راه‌حل را از بین مجموعه بهینه پارتو انتخاب نماید. سطر سوم جدول ۸ مقدار OF_1 و OF_2 را در شرایطی که SFCLها در شبکه حضور ندارند، نشان می‌دهد.

جدول۸: بهترین پاسخ از لحاظ هر یک از معیارها

بهترین پاسخ	مقدار OF_1	مقدار OF_2	مقدار OF_3	محل SFCL	مقدار مقاومت (p.u.)
از لحاظ OF_1	۴۵/۷۲۶	۲۳/۹۷۳	۳/۳۹۷۲	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۰/۴۰۸۸۱ ۰/۵۵۱۰۵ ۲/۴۳۷۳
از لحاظ OF_2	۸۰/۳۰۸	۸/۱۸۹۵	۱۵	L۲۹ L۳۰ L۳۱	۵ ۵ ۵
از لحاظ OF_3	۱۰۸۳/۸	۴۴/۳۲۶	صفر	* * *	صفر صفر صفر

با مقایسه پاسخ‌های سطر دوم وسوم در جدول ۸ در می‌یابیم که اگر اولویت اصلی طراح، بازیابی هماهنگی رله‌ها باشد، می‌بایست SFCLها در شاخه‌های ۲۸، ۲۹ و ۳۰ (متناظر با باس‌های ۱۷، ۱۹ و ۲۳) نصب شوند؛ اما درصورتی‌که اولویت اصلی طراح کاهش سطوح اتصال کوتاه باشد، می‌بایست SFCLها در شاخه‌های ۲۹، ۳۰ و ۳۱ (متناظر با باس‌های ۱۹، ۲۳ و ۲۹) نصب گردند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بسته به اینکه کدام هدف در اولویت قرار دارد، محل‌های متفاوتی برای نصب SFCL مشخص شده است. با تحلیل پاسخ‌ها، این گونه استنباط می‌شود که توربین‌های نصب‌شده در باس‌های ۱۷، ۱۹ و ۲۳ تأثیر بیش‌تری در ایجاد عدم هماهنگی بر روی رله‌ها دارند و اگر اولویت اصلی طراح، بازیابی هماهنگی رله‌ها باشد، بهتر است که SFCLها در مقابل این توربین‌ها نصب شوند. به‌عبارت‌دیگر، چون توربین نصب‌شده در باس ۲۹ در فاصله دورتری نسبت به سایر توربین‌ها قرار گرفته، تأثیر کم‌تری بر روی عدم هماهنگی رله‌ها دارد (مشکلات کم‌تری را از نظر عدم هماهنگی برای شبکه ایجاد می‌کند). به طریق مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که توربین‌هایی که در باس‌های ۱۹، ۲۳ و ۲۹ نصب شده‌اند تأثیر بیش‌تری بر روی افزایش سطوح اتصال کوتاه سیستم دارند.

۹- انتخاب بهینه محل و ظرفیت SFCL بدون عدم‌قطعیت

در بخش قبل، تعیین محل و ظرفیت بهینه برای نصب SFCL در شرایطی صورت گرفت که عدم‌قطعیت در توان خروجی توربین‌های بادی لحاظ شده بود. برای توصیف این عدم‌قطعیت، یک مدل ۱۲حالته برای توربین بادی مورداستفاده قرار گرفت.

در این بخش، مسئله قبلی مجدداً حل خواهد شد اما این بار عدم‌قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی لحاظ نمی‌شود. به‌عبارت‌دیگر، از تغییرات سرعت وزش باد چشم‌پوشی شده و فرض می‌شود که توان خروجی توربین‌های بادی در هر شرایطی ثابت و مستقل از سرعت باد است. استفاده از این فرض در مدل‌سازی توربین بادی باعث می‌شود که مدل به‌دست‌آمده با مدل واقعی بسیار متفاوت باشد. بااین‌وجود، در بسیاری از مطالعات گذشته مانند [۳۳]، از این فرض استفاده شده است. با در نظر گرفتن این فرض، الگوریتم پیشنهادی مجدداً به شبکه اعمال می‌شود و مجموعه جواب بهینه پارتو به دست می‌آید. سپس بهترین پاسخ از نظر L_2 norm تعیین شده و در جدول ۹ آورده شده است. مطابق با این پاسخ، اگر SFCLها با ظرفیت‌های مشخص و در محل‌های تعیین‌شده در شبکه نصب شوند، سطح اتصال کوتاه سیستم کاهش یافته و عدم هماهنگی میان جفت رله‌های اصلی و پشتیبان از بین خواهد رفت.

جدول ۹: بهترین پاسخ از نظر L_2 norm بدون عدم قطعیت

رتبه	مقدار OF_1	مقدار OF_2	مقدار OF_3	محل SFCL	مقدار مقاومت (p.u.)
۱	۴۶/۵۹۷	۲۸/۷۶۷	۸/۶۳۹۲	L۲۸ L۲۹ L۳۰	۲/۲۰۴۹ ۲/۸۹۱۵ ۳/۵۴۲۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ به‌دست‌آمده در هر دو حالت (با عدم‌قطعیت و بدون عدم‌قطعیت)، سطح اتصال کوتاه شبکه را کاهش داده و هماهنگی میان رله‌های اصلی و پشتیبان را بازیابی می‌کند؛ اما یک تفاوت عمده میان آن‌ها وجود دارد. تفاوت اصلی میان این پاسخ‌ها، در مقدار ظرفیت بهینه SFCL می‌باشد. در حالت اول (با عدم‌قطعیت) مجموع ظرفیت بهینه SFCL برابر با ۳/۸۰۹۴pu تعیین شده است اما این مقدار در حالت دوم (بدون عدم‌قطعیت) ۸/۶۳۹۲pu تعیین گردیده که ۲/۳ برابر حالت اول است. این میزان اختلاف ظرفیت بسیار چشمگیر است و هزینه هنگفتی را به شبکه تحمیل می‌کند. منشأ اصلی این تفاوت، در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی و مدل‌سازی دقیق آن‌ها است. نتایج عددی نیز این موضوع را تائید می‌کند و نشان می‌دهد که لحاظ کردن این فاکتور در تعیین

Archive of SID

www.SID.ir

ظرفیت بهینه محدودساز جریان خطا اهمیت بهسزایی دارد و از صرف هزینه‌های غیرضروری جلوگیری می‌کند.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در توان خروجی توربین‌های بادی، محل و ظرفیت بهینه برای نصب SFCL در شبکه تعیین گردید. لحاظ کردن عدم‌قطعیت در مسئله موردمطالعه، نه‌تنها خطای مدل‌سازی را کاهش می‌دهد بلکه بر روی پاسخ به‌دست‌آمده نیز تاثیرگذار است. مدل‌سازی عدم‌قطعیت، با استفاده از سناریوهای مختلف باد و تعیین احتمال وقوع هر یک از آن‌ها صورت گرفت. همان‌طور که مشاهده شد ظرفیت تعیین‌شده برای محدودساز جریان خطا در شرایطی که عدم‌قطعیت در شبکه مدل‌سازی شود مقدار کم‌تری است؛ اما بااین‌وجود، نتایج عددی نشان داد که این پاسخ علاوه‌بر داشتن کارایی لازم، از صرف هزینه‌های بی‌مورد در شبکه جلوگیری می‌کند.

مراجع

[1] M. Ahmadi, A. Yousefi, A. Soroudi, and M. Ehsan, "Multi objective distributed generation planning using NSGA-II," *Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1847-1851, 2008.

[2] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, "Placement of dispersed generation systems for reduced losses," *International Conference on Annual Hawaii*, pp. 9, 2000.

[3] P. P. Barker, R. W. De Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1645-1656, 2000.

[4] K. Kauhaniemi, and L. Kumpulainen, "Impact of distributed generation on the protection of distribution networks," *International Conference on Developments in Power System Protection*, vol. 1, pp. 315-318, 2004.

[5] S. H. Lim, and J. C. Kim, "Analysis on protection coordination of protective devices with a SFCL due to the application location of a dispersed generation in a power distribution system," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, article no. 5601104, 2012.

[6] S. M. Brahma, and A. A. Girgis, "Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 56-63, 2004.

[7] S. M. Brahma, and A. A. Girgis, "Microprocessor-based reclosing to coordinate fuse and recloser in a system with high penetration of distributed generation," *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 453-458, 2002.

[8] K. Hongesombut, Y. Mitani, and K. Tsuji, "Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 13, no. 2, pp. 1828-1831, 2003.

[9] S. Chaitusaney, and A. Yokoyama, "Impact of protection coordination on sizes of several distributed generation sources," *Power Engineering Conference*, vol. 2, pp. 669-674, 2005.

[10] D. K. Khatod, V. Pant, and J. Sharma, "Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 683-695, 2013.

[11] B. C. Sung, D. K. Park, J. W. Park, and T. K. Ko, "Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: modeling, simulation, and experimental verification," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 7, pp. 2412-2419, 2009.

[12] Y. Lin, L. Liangzhen, and K. P. Juengst, "Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 12, no. 1, pp. 900-903, 2002.

[13] U. A. Khan, J. K. Seong, S. H. Lee, S. H. Lim, and B. W. Lee, "Feasibility analysis of the positioning of superconducting fault current limiters for the smart grid application using Simulink and SimPowerSystem," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2165-2169, 2011.

[14] B. C. Sung, D. K. Park, J. W. Park, and T. K. Ko, "Study on optimal location of a resistive SFCL applied to an electric power grid," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2048-2052, 2009.

[15] H. H. Zeineldin, and W. Xiao, "Optimal fault current limiter sizing for distribution systems with DG," *Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2011.

[16] H. C. Jo, S. K. Joo, and K. Lee, "Optimal placement of superconducting fault current limiters (SFCLs) for protection of an electric power system with distributed generations (DGs)," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 304-321, 2013.

[17] W. El-Khattam, and T. S. Sidhu, "Restoration of directional overcurrent relay coordination in distributed generation systems utilizing fault current limiter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 576-585, 2008.

[18] E. Sesto, and C. Casale, "Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 74-76, pp. 375-387, 1998.

[19] S. H. Karaki, R. B. Chedid, and R. Ramadan, "Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 766-772, 1999.

[20] S. H. Karaki, R. B. Chedid, and R. Ramadan, "Probabilistic performance assessment of wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, pp. 217-224, 1999.

[21] F. Razavi, H. Askarian-Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 4, pp. 713-720, 2008.

[22] R. Billinton, H. Chen, and R. Ghajar, "Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy," *Microelectronics Reliability*, vol. 36, no. 9, pp. 1253-1261, 1996.

[23] P. Giorsetto, and K. F. Utsurogi, "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 1, pp. 134-143, 1983.

[24] L. Salasoo, A. F. Imece, R. W. Delmerico, and R. D. Wyatt, "Comparison of superconducting fault limiter

Archive of SID

www.SID.ir

concepts in electric utility applications," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 5, no. 2, pp. 1079-1082, 1995.
[25] M. Ichikawa, and M. Okazaki, "A magnetic shielding type superconducting fault current limiter using a Bi2212 thick film cylinder," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 5, no. 2, pp. 1067-1070, 1995.
[26] O. B. Hyun, K. B. Park, J. Sim, H. R. Kim, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Introduction of a hybrid SFCL in KEPCO grid and local points at issue," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 1946-1949, 2009.
[27] M. J. Alves, and J. Clímaco, "A review of interactive methods for multiobjective integer and mixed-integer programming," *European Journal of Operational Research*, vol. 180, no. 1, pp. 99-115, 2007.
[28] N. Srinivas, and K. Deb, "Muiltiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms," *Evolutionary Computation*, vol. 2, no. 3, pp. 221-248, 1994.
[29] E. M. Kasprzak, and K. E. Lewis, "Pareto analysis in multiobjective optimization using the collinearity theorem and scaling method," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 22, no. 3, pp. 208-218, 2014.
[30] T. J. Chang, and Y. L. Tu, "Evaluation of monthly capacity factor of WECS using chronological and probabilistic wind speed data: A case study of Taiwan," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 12, pp. 1999-2010, 2007.
[31] *Power System Test Cases*, [Online], available online at: www.ee.washington.edu/resesrch/pstca/.
[32] R. Karki, and P. Hu, "Wind power simulation model for reliability evaluation," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 541-544, 2005.
[33] W. J. Park, B. C. Sung, K. B. Song, and J. W. Park, "Parameter optimization of SFCL with wind-turbine generation system based on its protective coordination," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2153-2156, 2011.

زیرنویس‌ها

۱ Distributed Generation
۲ Superconducting Fault Current Limiter
۳ Fault current Limiter
۴ Power Change between Area
۵ Multi-Attribute Decision Making
۶ Directional Overcurrent Relay
۷ Autoregressive Moving Average
۸ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
۹ Weibull
۱۰ Pareto Front

Archive of SID

www.SID.ir