

# جایابی و تعیین ظرفیت بهینه محدودساز جریان خطا با لحاظ عدم قطعیت در توان تولیدی توربین بادی

رضا قربانی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، کاظم مظلومی<sup>۲</sup>، 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 برهم خوردن هماهنگی بین رله‌های جریان زیاد موجود در سیستم و همچنین ایجاد جریان‌های خطای بالاتر از قدرت قطع‌کنندگی تجهیزات حفاظتی می‌شود. در این مقاله از محدودساز ابرسانای 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 نصب شده SFCL به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد؛ همچنین عدم قطعیت 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، عدم قطعیت، 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<sup>1</sup>, K. Mazlumi, associate professor<sup>2</sup>

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

## ۱- مقدمه

افزایش نیاز به تولید انرژی الکتریکی و محدودیت‌های 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 از جمله 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]. از جمله 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 به هم 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<sup>۱</sup> از شبکه در زمان بروز خطا و اتصال مجدد آن پس از رفع خطا راه حل 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] راه حل‌هایی هستند که به دلیل هزینه بسیار بالا به صورت 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 به منظور دستیابی به اهداف دیگری مانند کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ صورت می‌گیرد [۱۰].

با پیشرفت تکنولوژی ابرسازها در چند دهه اخیر، استفاده از ادواتی تحت عنوان محدودساز ابرسازهای جریان خطا (SFCL) 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 ابرسازایی 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؛ به گونه‌ای که اگر این تجهیز در محل نامناسب و با ظرفیت نادرست نصب شود، نه تنها عملکرد مورد انتظار را ندارد بلکه مشکلاتی را نیز برای شبکه ایجاد خواهد کرد. در مرجع [۱۳]، محل مناسب برای نصب FCL<sup>۲</sup> در یک سیستم

هوشمند تعیین می‌گردد. با این وجود، امکان نصب FCL، فقط در بعضی از نقاط شبکه مورد مطالعه 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<sup>۴</sup> 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. به علاوه، 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 به صورت فرضی در نظر گرفته شده است. همچنین، هزینه نصب FCL نیز نادیده گرفته شده است. مرجع [۱۶] با روش تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM<sup>۵</sup>) 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 به صورت سری شده با DG استفاده شده است. در هیچیک از مطالعات گذشته، عدم قطعیت 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 ذکر شده و توجه‌پذیری اقتصادی انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی‌های نو، پرداختن به انرژی باد امری حیاتی و ضروری به نظر می‌رسد. موضوع مهم در استفاده از این انرژی، در نظر گرفتن ماهیت تصادفی سرعت باد است که سبب می‌شود تأثیرات آن بر روی سیستم قدرت با عدم قطعیت همراه باشد [۱۹، ۲۰]. با لحاظ کردن عدم قطعیت در مدل‌سازی این منابع، می‌توان رفتار سیستم قدرت را به صورت واقعی‌تری مورد مطالعه قرار داد. همچنین برنامه‌ریزی‌های شبکه، اعم از تعیین محل و ظرفیت مناسب تجهیزات آن، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در سیستم کاری غیرمنطقی است و باعث سرمایه‌گذاری‌های بی‌مورد می‌شود.

در این مقاله محل و ظرفیت بهینه محدودساز ابرسازهای جریان خطا، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی، تعیین می‌گردد. توربین‌های بادی به عنوان منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده‌اند. الگوی تولید توان برای این منابع، با شناخت تأثیر

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 به صورت رابطه (۳) به دست می‌آیند.

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + Z_{bus} I_{bus}(F) \quad (3)$$

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  $k$  رخ دهد، فرم ماتریسی رابطه (۳)، به صورت رابطه (۴) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ \dots \\ V_k(F) \\ \dots \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \dots \\ V_k(0) \\ \dots \\ V_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & \dots & Z_{1k} & \dots & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{k1} & \dots & \dots & Z_{kk} & \dots & \dots & Z_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & \dots & \dots & Z_{nk} & \dots & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ -I_k(F) \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

از آنجایی که خطا در باس  $k$  رخ داده، جریان تمام شین‌ها به جز شین  $k$  برابر صفر است. جریان شین  $k$  به صورت یک جریان منفی وارد شده به شین  $k$  در نظر گرفته می‌شود.

معادله  $k$ ام در رابطه ماتریسی (۴)، به صورت رابطه (۵) است.

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(F) \quad (5)$$

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.

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk}} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $I_k(F)$  جریان خطا در باس  $k$ ام،  $V_k(0)$  ولتاژ شین  $k$ ام قبل از خطا و  $Z_{kk}$  امپدانس تونن از دید شین  $k$ ام 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. به عنوان مثال، جریان اتصال کوتاه در خط بین شین‌های  $i$  و  $j$  به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{z_{ij}} \quad (7)$$

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 عدم قطعیت در توربین بادی

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

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 جریان زیاد جهت‌دار (DOCR) در یک شبکه توزیع نمونه برقرار می‌شود. سپس با استفاده از سری زمانی ARMA<sup>y</sup>، 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 برآزش می‌یابد. بر اساس توزیع احتمالاتی برآزش یافته، توان خروجی توربین بادی به صورت 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-II استفاده شده است. در انتها، یک بار دیگر این مسئله بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان خروجی توربین‌های بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و نتایج عددی حاصل از آن با حالت قبلی مقایسه خواهد شد.

### ۲- هماهنگی بهینه رله‌های جریان زیاد جهت‌دار

موضوع مهم در مسئله تنظیم و هماهنگی رله‌های جریان زیاد، تعیین مقدار TMS برای هر رله می‌باشد. TMSها باید به گونه‌ای 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 به گونه‌ای 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 به صورت رابطه (۱) است.

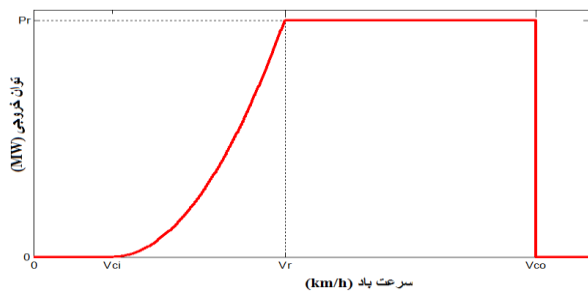
$$OF = \alpha_1 \sum (t_i)^2 + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb} - \beta_2 (\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^2 \quad (1)$$

$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m - CTI$$

$\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و  $\beta_2$  ضرایب وزنی هستند.  $t_i$  زمان عملکرد رله  $i$ ام به ازای خطایی است که در جلوی رله  $i$ ام رخ می‌دهد.  $\Delta t_{mb}$  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.

$$t = \frac{k}{\left(\frac{I_{sc}}{I_0}\right)^n - 1} \times TMS \quad (2)$$



شکل ۱: میزان توان تولیدی توربین بادی بر حسب سرعت باد

$$p(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \\ (A + Bv + Cv^2)P_r & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (10)$$

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].

$$A = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ v_{ci} (v_{ci} + v_r) - 4v_{ci} v_r \left[ \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \right\} \quad (11)$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ 4(v_{ci} + v_r) \left[ \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 - (3v_{ci} + v_r) \right\} \quad (12)$$

$$C = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ 2 - 4 \left( \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right)^3 \right\} \quad (13)$$

#### ۴- انتخاب نوع و محل‌های کاندید شده برای نصب SFCL

انواع مختلفی از SFCLها مانند مقاومتی [۲۴]، القایی [۲۵] و هیبریدی مقاومتی [۲۶] تولید شده‌اند. برای ساختن هیبریدی مقاومتی، از مواد ابررسانا و سوئیچ‌های قدرت معمولی استفاده می‌شود. استفاده از این طرح باعث شده تا حجم ماده ابررسانای استفاده شده در آن، بسیار کاهش یابد که در نتیجه خنک‌سازی آن را ساده‌تر می‌کند [۲۶]. در این مقاله از محدودساز ابررسانای نوع هیبریدی مقاومتی استفاده می‌شود. عملکرد یک محدودساز ابررسانای جریان خطا از نوع هیبریدی 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. به این ترتیب، 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

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 عدم قطعیت توان تولیدی یک توربین بادی دخیل هستند اما مهم‌ترین آن‌ها عدم قطعیت 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].

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_n y_{t-n} + \alpha_t - \alpha_{t-1} \theta_1 - \alpha_{t-2} \theta_2 - \dots - \alpha_{t-m} \theta_m \quad (8)$$

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

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

رابطه (۸)، یک سری زمانی تولید می‌کند که مقدار آن در هر لحظه به مقدار تصادفی  $\alpha_t$  و مقادیر  $y$  و  $\alpha$  تولید شده 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].

$$v(t) = \mu + \sigma y_t \quad (9)$$

در رابطه فوق،  $v(t)$  سرعت باد در لحظه  $t$ ،  $\mu$  میانگین سرعت باد و  $\sigma$  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].

حساسیتی نسبت به مقدار پارامتر  $p$  وجود ندارد و هر مقداری را برای آن می توان اختیار کرد.  $f_i(x)$  مقدار تابع هدف  $i$ ام به ازای پاسخ  $x$  است.  $m$  تعداد توابع هدف می باشد.

#### ۶- فرمول بندی معیارهای مختلف برای جایابی و تعیین ظرفیت بهینه SFCL

همان طور که گفته شد اضافه شدن تولیدات پراکنده به سیستم قدرت منجر به افزایش سطح جریان اتصال کوتاه شده که این امر بر روی هماهنگی رله ها تأثیرات منفی خواهد داشت. همچنین افزایش ماکزیمم جریان خطا میتواند منجر به استفاده از مدارشکن هایی با قدرت قطع بالاتر شود. انتخاب محل و ظرفیت مناسب برای SFCL می تواند به کاهش ماکزیمم جریان خطا کمک کرده و آن را تا حد قدرت قطع کنندگی ادوات حفاظتی پایین آورد؛ به علاوه بر روی هماهنگی رله ها نیز اثرگذار خواهد بود. در کنار تمام موارد ذکر شده، هزینه نصب و بهره برداری SFCL فاکتور مهمی محسوب می شود.

در این مقاله از الگوریتم NSGA-II برای بهینه سازی سه معیار حفظ هماهنگی رله ها، کاهش جریان خطا و مینیمم ظرفیت نصب شده SFCL به صورت هم زمان استفاده می شود. برای در نظر گرفتن این سه معیار، توابع هدف به صورت روابط (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) تعریف شده اند.

$$OF_1 = \alpha_1 \sum (t_i)^2 + \alpha_2 \sum (\Delta t_{mb} - \beta_2 (\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|))^2 \quad (15)$$

$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m - CTI$$

$$OF_2 = \sum_{i=1}^n \left| \frac{I_i^{DG, SFCL} - I_i^1}{I_i^1} \right| \quad (16)$$

$$OF_3 = \sum_{i=1}^m R_i \quad (17)$$

$OF_1$  تابع هدف اول می باشد که برای حفظ هماهنگی رله ها و حداقل سازی زمان عملکرد آن ها در نظر گرفته شده است.

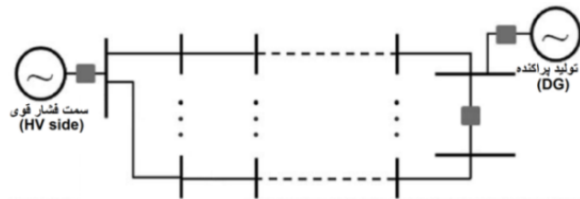
$OF_2$  تابع هدف دوم می باشد که به منظور کاهش جریان خطا با حداقل سازی انحراف از ظرفیت قطع کلیدها در نظر گرفته می شود.

$OF_3$  تابع هدف سوم است که برای حداقل سازی ظرفیت نصب شده SFCL لحاظ شده است.

همچنین  $I_i^{DG, SFCL}$  جریان خطای رله  $i$ ام در حضور تولیدات پراکنده و SFCL،  $I_i^1$  ظرفیت قطع کلید  $i$ ام (جریان اتصال کوتاه کلید  $i$ ام قبل از نصب DG و SFCL)،  $n$  تعداد کل کلیدها،  $R_i$  مقاومت تأمین SFCL و  $m$  تعداد کل SFCL های نصب شده می باشد.

همان طور که پیش از این اشاره شد، در صورتی که SFCL در محل نادرست و با ظرفیت نامناسب نصب شود نه تنها جریان اتصال کوتاه را کاهش نمی دهد بلکه منجر به افزایش آن نیز خواهد شد. البته لازم به ذکر است که محل وقوع خطا نیز عامل بسیار مهمی تلقی می شود. معمولاً در مطالعات مشابه، یک یا چندین محل را به عنوان کاندید برای ایجاد خطا در شبکه انتخاب می کنند و فقط سطح اتصال کوتاه آن ها را

کاهش سطح جریان اتصال کوتاه در آن خط شده که در این صورت می توان از مدارشکن هایی با قدرت قطع پایین تر استفاده نمود.



شکل ۲: محل های کاندید برای نصب SFCL

#### ۵- الگوریتم ژنتیک مبتنی بر رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)

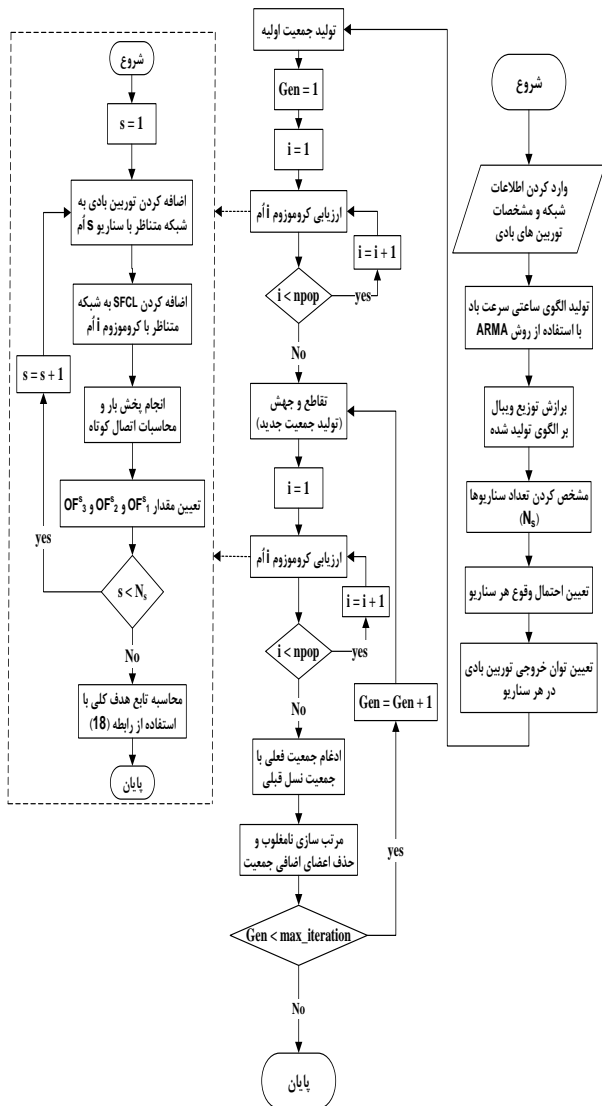
بیش تر مسائل بهینه سازی در دنیای واقعی به صورت چندهدفه هستند؛ زیرا معمولاً چندین هدف متعارض وجود دارد که باید به صورت هم زمان بهینه شوند [۲۷]. راهکار معمول برای حل این دسته از مسائل، استفاده از روش مجموع وزن دار است. نکته قابل تأمل در استفاده از روش مجموع وزن دار، تعیین وزن مناسب برای هر یک از اهداف است که غالباً نیاز به تجربه بالا و آزمون و خطا دارد. به علاوه، برای به دست آوردن مجموعه جواب بهینه با روش مجموع وزن دار، می بایست چندین مرتبه الگوریتم اصلی را اجرا کنیم که این کار زمان زیادی به طول می انجامد.

دسته ای از الگوریتم ها وجود دارند که ذاتاً به صورت چندهدفه طراحی شده اند. اگرچه این الگوریتم ها پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند، اما فقط با یکبار حل مسئله، کلیه پاسخ های بهینه را به دست می آورند. به عبارت دیگر خروجی این الگوریتم ها یک پاسخ بهینه نیست، بلکه مجموعه ای (آرشیو) از پاسخ های بهینه است که بسته به نظر طراح سیستم، هر یک از آن ها می تواند به عنوان پاسخ بهینه انتخاب شود. یکی از شاخص ترین و قوی ترین الگوریتم هایی که در این حوزه وجود دارد، الگوریتم NSGA-II است [۲۸]. این الگوریتم به قدری شاخص است که حتی صحت عملکرد سایر الگوریتم های ابداعی، با آن سنجیده می شود. با توجه به دلایل ذکر شده، در این مقاله از الگوریتم NSGA-II برای بهینه سازی استفاده می شود تا امکان انتخاب پاسخ مناسب در حالت های مختلف و تحت سیاست ها و شرایط متفاوت برای تصمیم گیرنده فراهم باشد.

در حالت کلی چندین روش برای رتبه بندی مجموعه جواب بهینه پارتو وجود دارد. یکی از پرکاربردترین آن ها  $L_p$  norm نامیده می شود. در این روش، پاسخ ها بر اساس فاصله ای که از یک نقطه ایده آل دارند، رتبه بندی می شوند. برای محاسبه این فاصله از رابطه (۱۴) استفاده می شود [۲۹].

$$Minimize \left\{ \sum_{i=1}^m (f_i(x) - f_i^*)^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (14)$$

$f_i^*$  بردار ایده آل هدف نامیده می شود که در اینجا  $[0 \ 0 \ 0]$  در نظر گرفته شده است. مقدار  $p$  نیز برابر ۲ لحاظ شده است. اگر مقدار  $p$  برابر ۱ باشد به آن فاصله شهری گفته می شود. اگر مقدار  $p$  برابر ۲ باشد به آن فاصله اقلیدسی گفته می شود [۲۹]. در حالت کلی، هیچ



شکل ۳: فلوچارت روش پیشنهادی

### ۸- شبیه سازی و تحلیل نتایج

#### ۸-۱- شبکه مورد مطالعه

در این مقاله بخش توزیع (33kV) شبکه ۳۰ باسه IEEE به عنوان شبکه نمونه مورد مطالعه قرار می گیرد. این شبکه شامل ۱۸ باس، ۲۲ خط و ۴۴ رله جریان زیاد می باشد که در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این شبکه از رله های جریان زیاد جهت دار به عنوان حفاظت اصلی استفاده شده است. این رله ها در ابتدا و انتهای تمام خطوط نصب گردیده اند. شبکه توزیع تحت مطالعه از طریق سه پست توزیع اولیه (132kV/33kV) که در باس های ۱۰، ۱۲ و ۲۷ قرار گرفته اند، تغذیه می گردد. مشخصات مربوط به ژنراتورها، خطوط، ترانسفورماتور و سایر اطلاعات مربوط به شبکه مورد مطالعه در [۳۱] آورده شده است. مشخصات تمامی رله ها از رابطه (۲) پیروی می کند که در آن مقادیر k و n به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۰۲ می باشند.

مورد بررسی قرار می دهند. در این مقاله، تمام محل هایی که امکان وقوع خطا برای آن ها وجود دارد مورد بررسی قرار می گیرند. به عبارت دقیق تر، تحلیل اتصال کوتاه با قرار دادن خطا در جلوی تک تک رله ها انجام می شود.

### ۷- محاسبه مقدار تابع هدف با در نظر گرفتن عدم قطعیت

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 آن ها بستگی دارد. اگر این منبع انرژی ساده تر، متغیر بودن سرعت باد باعث می شود تا توان خروجی توربین های بادی نیز متغیر باشد. به همین دلیل نمی توان توربین بادی را به صورت یک منبع انرژی با توان ثابت مدل سازی کرد. برای حل این مشکل، می توان محدوده عملکرد توربین بادی را به مجموعه ای از سناریوها تقسیم بندی نمود. هر چه تعداد سناریوها بیشتر باشد، دقت مدل سازی افزایش می یابد. برای تولید سناریوها، ابتدا باید الگوی ساعتی سرعت باد در دسترس باشد. در این مقاله، با استفاده از سری زمانی ARMA و روش گفته شده در بخش (۳-۱)، الگوی ساعتی سرعت باد به دست می آید. سپس باید توزیع احتمالی مناسب بر این الگو برازش یابد. بررسی های متعدد در محل های مختلف نشان داده است که توزیع ویبال بهترین برازش را بر سرعت باد دارد و این توزیع به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد [۳۰]. در این مقاله نیز از توزیع ویبال برای برازش بر الگوی سرعت باد استفاده شده است. حال می بایست توزیع به دست آمده را به بازه های مختلفی تقسیم بندی نمود. به هر یک از این بازه ها، یک سناریو گفته می شود. 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، می توان توربین بادی را به صورت احتمالاتی مدل سازی نمود.

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

$$[OF_1^{Total} \quad OF_2^{Total} \quad OF_3^{Total}] = \sum_{s=1}^{N_s} P_s \times [OF_1^s \quad OF_2^s \quad OF_3^s] \quad (18)$$

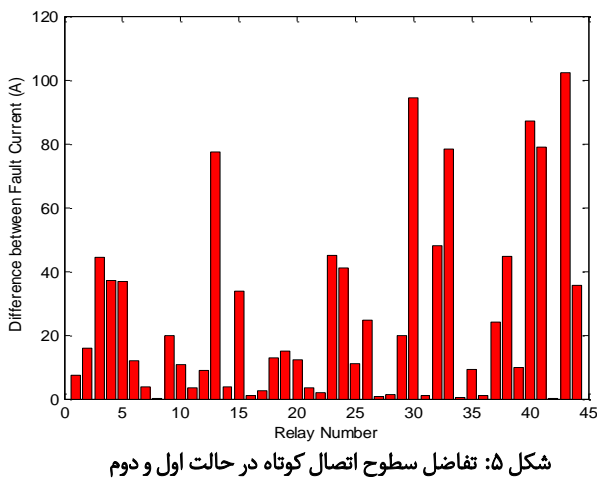
در رابطه فوق،  $OF_1^{Total}$ ،  $OF_2^{Total}$  و  $OF_3^{Total}$  مقادیر کلی توابع هدف برای هر پاسخ هستند.  $OF_1^s$ ،  $OF_2^s$  و  $OF_3^s$  مقادیر توابع هدف به ازای سناریوی sام هستند.  $P_s$  احتمال وقوع سناریوی sام و  $N_s$  تعداد کل سناریوها می باشد.

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

### ۸-۳- تأثیر سطح تولید DG بر جریان های اتصال کوتاه

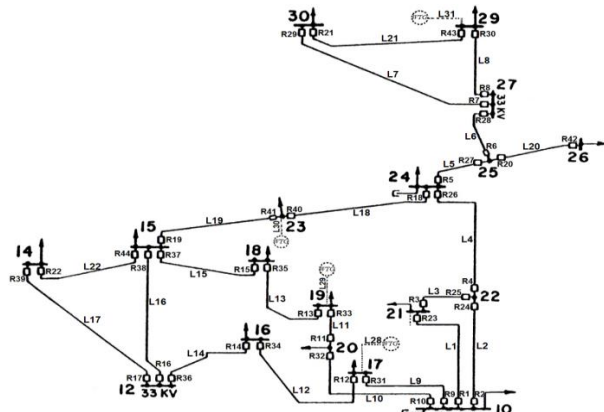
با نصب واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع، سطوح اتصال کوتاه در نقاط مختلف شبکه دستخوش تغییر می شوند. حضور این منابع در شبکه سبب می شود که در هنگام بروز خطا، جریان خطا علاوه بر شبکه سراسری از طریق این منابع نیز تأمین شده و در نتیجه با تزریق جریان توسط این منابع در محل خطا، جریان اتصال کوتاه افزایش می یابد. هر چه ظرفیت DG بزرگتر باشد، سطح جریان خطا نیز بیشتر خواهد بود. علت این افزایش را می توان در رابطه (۶) جستجو کرد. در رابطه (۶)،  $V_k(0)$  ولتاژ شین kام قبل از خطا می باشد. این ولتاژ را می توان 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، می شود. در پی این افزایش ولتاژ، جریان خطا نیز طبق رابطه (۶) افزایش می یابد.

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 رله هایی که خطا جلوی آن ها منظور شده است را نشان می دهد. در حالت اول، ظرفیت هر یک از تولیدات پراکنده ۲۰ MW است. در حالت دوم، ظرفیت DG ها به ۲۵ MW افزایش یافته است. همان طور که انتظار می رفت، با افزایش توان تولیدی DG ها، سطوح اتصال کوتاه شبکه افزایش یافتند.



### ۸-۴- محاسبه عدم قطعیت در توربین های بادی

در این مقاله، با توجه به ویژگی های منحصر به فرد انرژی بادی و سایر عوامل گفته شده در بخش ۱، از توربین های بادی جهت تأمین بخشی از نیاز مشترکین به انرژی الکتریکی استفاده شده است. این توربین ها به صورت تولید پراکنده به شبکه اضافه شده اند و مجهز به سیستم کنترل توان راکتیو هستند به گونه ای که توان راکتیو بسیار کمی از شبکه جذب می کنند. ظرفیت نامی هر یک از توربین ها ۱/۵ MW و راکتانس گذرای آن ها ۰/۱۵ pu بوده و سرعت قطع پایین  $(V_{ci})$ ، سرعت نامی  $(V_r)$  و سرعت قطع بالا  $(V_{co})$  به ترتیب ۱۴/۴ km/h، ۱۴/۴ km/h و ۹۰ km/h می باشد.



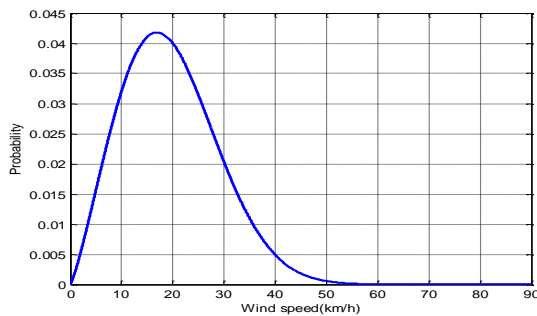
شکل ۴: بخش توزیع شبکه ۳۰ باسه IEEE

### ۸-۲- هماهنگی رله های جریان زیاد جهت دار

برای هماهنگی رله های موجود در شبکه نمونه، از روش گفته شده در بخش (۲) استفاده می شود. ضرایب وزنی  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  به ترتیب ۱، ۲ و ۱۰۰ در نظر گرفته شده اند. فاصله زمانی بحرانی (CTI) بین رله های اصلی و پشتیبان ۰/۳ ثانیه لحاظ می گردد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک و محاسبات اتصال کوتاه در نرم افزار MATLAB، مقدار تنظیم زمانی رله ها (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 رله ها

شماره رله	TMS (s)	$I_{sc}$ (kA)	شماره رله	TMS (s)	$I_{sc}$ (kA)
۱	۰/۷۰۶	۱۳/۳۴۶	۲۳	۰/۱۰۵	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	۰/۶۶۵	۱۵/۲۰۵	۳۸	۰/۰۰۶	۴/۵۹۱
۱۷	۰/۵۶۱	۱۶/۱۹۸	۳۹	۰/۱۱۴	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	۰/۰۰۵	۰/۰۷۳
۲۱	۰/۴۱۵	۱/۳۶۶	۴۳	۰/۲۷۴	۱/۹۱۴
۲۲	۰/۶۰۸	۴/۰۶۴	۴۴	۰/۵۷۵	۹/۰۵۱



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

همان طور که قبلاً اشاره شد، میزان تولید توان توربین بادی تابعی از سرعت باد است. در شکل ۱ منحنی تغییرات توان تولیدی بر حسب سرعت باد برای یک توربین بادی نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی مشخصه و تابع توزیع احتمالی سرعت باد، می توان برای هر حالت توان تولیدی توربین بادی، احتمال مربوطه را به دست آورد. برای انجام این کار مشخصه توربین بادی را به نواحی مختلفی تقسیم بندی می کنیم. ناحیه اول مربوط به سرعت های کوچکتر از  $V_{ci}$  یا بزرگتر از  $V_{co}$  است. در این ناحیه، توان تولیدی توربین بادی صفر می باشد. ناحیه دوم مربوط به سرعت های بین  $V_r$  تا  $V_{co}$  است. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، 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 غیر خطی تعریف می شود. لذا با در نظر گرفتن گام هایی یکسان در این محدوده، می توان این ناحیه پیوسته را به صورت گسسته درآورد و احتمال مربوط به هر ناحیه را محاسبه نمود. در این مقاله مجموعاً ۱۲ ناحیه مختلف در نظر گرفته می شود که احتمال وقوع هر یک از آن ها با توجه به شکل ۸ محاسبه شده است. جدول ۲ نواحی مختلف به همراه احتمال وقوع آن ها را نشان می دهد.

جدول ۲: مدل سازی توان خروجی توربین بادی

سناریوها	سرعت باد (km/h)	توان تولیدی (kW)	احتمال
۱	$0 < V < 14/4$ یا $V > 90$	۰	۰/۳۱۹۲۶
۲	$14/4 < V < 90$	۱۰۰۰۰	۰/۰۰۷۲۳۵
۳	$14/4 < V < 17/46$	۹۶/۲۴۲	۰/۱۲۶۷۷
۴	$17/46 < V < 20/52$	۴۱۶/۲۳	۰/۱۲۴۹۵
۵	$20/52 < V < 23/58$	۹۰۶/۲۲	۰/۱۱۳۴۱
۶	$23/58 < V < 26/64$	۱۵۶۶/۲	۰/۰۹۵۴۲۸
۷	$26/64 < V < 29/70$	۲۳۹۶/۲	۰/۰۷۴۷۲۷
۸	$29/70 < V < 32/76$	۳۳۹۶/۲	۰/۰۵۴۵۸۹
۹	$32/76 < V < 35/82$	۴۵۶۶/۲	۰/۰۳۷۲۵۴
۱۰	$35/82 < V < 38/88$	۵۹۰۶/۲	۰/۰۲۳۷۷۱
۱۱	$38/88 < V < 41/94$	۷۴۱۶/۲	۰/۰۱۴۱۸۸
۱۲	$41/94 < V < 45$	۹۰۹۶/۲	۰/۰۰۷۹۲۱۹

#### ۸-۵- تأثیر حضور توربین های بادی با عدم قطعیت

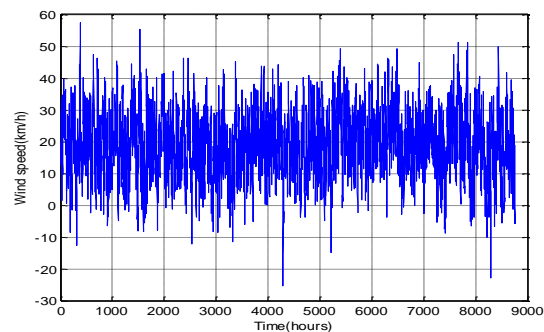
در بخش قبلی عدم قطعیت برای توان تولیدی هر ژنراتور بادی محاسبه گردید. در این بخش، توربین های بادی در باس های ۱۷، ۱۹، ۲۳ و ۲۹

برای شبیه سازی ساعتی سرعت باد از روش گفته شده در بخش (۱-۳) و رابطه (۸) استفاده می شود. با استفاده از داده های آماری مربوط به سایت بادی Swift Current [۳۲]، مدل ARMA محاسبه شده که پارامترهای آن در رابطه (۱۹) نشان داده می شوند.

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

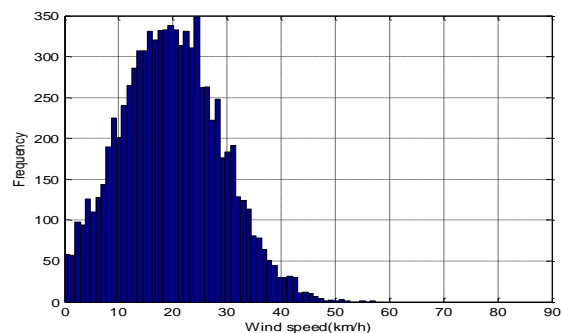
$$\alpha_t \in NID(0, 0.55792^2)$$

در این سایت بادی، میانگین سرعت باد  $19/67 \text{ km/h}$  و انحراف معیار استاندارد آن  $9/67 \text{ km/h}$  گزارش شده است. شکل ۶ سرعت باد شبیه سازی شده با استفاده از سری زمانی ARMA برای سایت بادی Swift Current را نشان می دهد. در این شکل، سرعت باد برای یک سال در ساعات های مختلف شبیه سازی شده است. همان طور که مشاهده می شود، بعضی از سرعت ها مقادیر منفی هستند. از آنجایی که در این مطالعه مقادیر منفی برای سرعت باد معنی فیزیکی ندارند، در پایان شبیه سازی حذف خواهند شد.



شکل ۶: سرعت باد شبیه سازی شده با سری زمانی ARMA

با توجه به شکل ۶، با دسته بندی داده های سرعت باد، می توان نمودار هیستوگرام آن ها را رسم کرد. شکل ۷ نمودار هیستوگرام داده های سرعت باد، که با استفاده از سری زمانی ARMA شبیه سازی شده است را نشان می دهد.



شکل ۷: نمودار هیستوگرام داده های سرعت باد

با تقسیم فراوانی هر بازه بر تعداد کل داده های سرعت باد، می توان احتمال وقوع هر بازه را به دست آورد. با برازش یک توزیع احتمالی مناسب، می توان رفتار باد را به صورت یک توزیع احتمالی پیوسته توصیف کرد. توزیع ویبال<sup>۹</sup> با تقریب مناسبی به عنوان توزیع احتمالی سرعت باد در نظر گرفته می شود. شکل ۸ توزیع ویبال متناظر با سرعت های باد شبیه سازی شده را نشان می دهد.



بین ۳ جفت از رله‌ها از بین می‌رود. در این جدول برای محاسبه  $\Delta t_{mb}$ ، تأثیر ۱۲ سناریوی جدول ۲ لحاظ شده است. آنچه که در جدول ۴ آورده شده است، مقدار مورد انتظار  $\Delta t_{mb}$  است.

جدول ۴: عدم هماهنگی رله‌ها در حضور توربین‌های بادی

$\Delta t_{mb}$	شماره رله پشتیبان	شماره رله اصلی
-۰/۰۰۴۷۹۷۴	۱	۳
-۰/۱۹۹۴۴	۲۶	۲۵
-۰/۰۷۱۶۴۴	۴۰	۵

#### ۸-۶- انتخاب بهینه محل و ظرفیت SFCL با عدم قطعیت

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 ذکر شده در بخش ۶، محل و ظرفیت SFCL در حضور توربین‌های بادی تعیین می‌شود. در مدل‌سازی توربین‌های بادی، از یک مدل ۱۲ حالتی بر اساس سناریوهای جدول ۲ استفاده شده است. لازم به ذکر است که تعداد SFCLها برابر ۳ و ماکزیمم ظرفیت هر یک از آنها  $\Delta pu$  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 گفته شده در بخش ۷، برای هر پاسخ محاسبه می‌شود. پس از اجرای این الگوریتم، مجموعه جواب بهینه پارتو<sup>۱</sup> 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؛ به طوری که 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  $L_{28}$ ،  $L_{29}$  و  $L_{30}$  با ظرفیت‌های  $۰/۴۰۸۸pu$ ،  $۰/۹۶۳۳pu$  و  $۲/۴۳۷۳pu$  نصب شوند بهترین کارایی ممکن را خواهند داشت. با اعمال این پاسخ

نصب می‌شوند که در شکل ۴ قابل مشاهده است. محل نصب توربین‌های بادی به گونه‌ای 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.

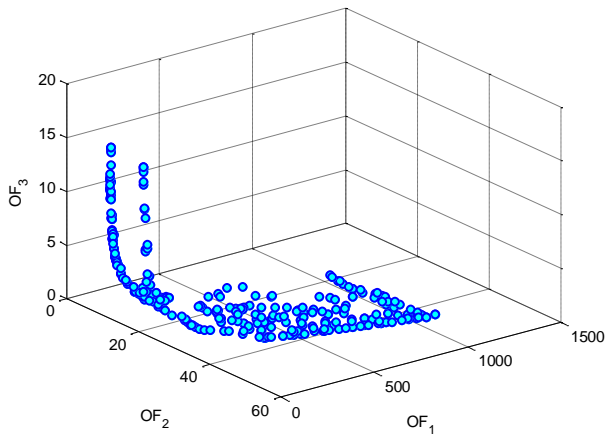
نصب این توربین‌ها منجر به افزایش سطح جریان اتصال کوتاه در شبکه می‌شود. این افزایش جریان تأثیرات منفی بر روی جفت رله‌های اصلی و پشتیبان دارد و در بعضی از مواقع منجر به عدم هماهنگی نیز می‌شود. در جدول ۳، جریان خطای تمام رله‌ها به ازای خطا در جلوی آن‌ها، در حضور منابع بادی مشاهده می‌شود. برای محاسبه این جریان‌ها عدم قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی در نظر گرفته شده است. در واقع 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

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.



شکل ۱۰: مجموعه جواب بهینه پارتو

جدول ۵: بهترین پاسخ‌ها از نظر  $L_2$  norm با عدم قطعیت

رتبه	مقدار $OF_1$	مقدار $OF_2$	مقدار $OF_3$	محل SFCL	مقدار مقاومت (p.u.)
۱	۴۵/۸۳۲	۲۲/۶۱۹	۳/۸۰۹۴	L۲۸	۰/۴۰۸۸۱
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۰/۹۶۳۲۸
				L۳۰	۲/۴۳۷۳
۲	۴۶/۷۷۹	۲۰/۳۲۴	۵/۱۵۴۱	L۲۸	۱/۰۲۴۹
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۱/۶۹۱۹
				L۳۰	۲/۴۳۷۳
۳	۴۶/۵۲۶	۲۱/۱۱۷	۴/۳۵۰۴	L۲۸	۰/۹۴۹۸۴
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۰/۹۶۳۲۸
				L۳۰	۲/۴۳۷۳
۴	۴۶/۷۱۷	۲۰/۷۳۲	۵/۰۳۶۸	L۲۸	۱/۶۳۶۲
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۰/۹۶۳۲۸
				L۳۰	۲/۴۳۷۳
۵	۴۶/۸	۲۰/۱۵۱	۷/۵۰۸۷	L۲۸	۰/۷۷۷۹۷
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۲/۸۲۲۶
				L۳۰	۳/۹۰۸۱
۶	۴۶/۰۳۶	۲۲/۸۱۷	۳/۷۱۱۷	L۲۸	۰/۷۲۳۲۶
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۰/۵۵۱۰۵
				L۳۰	۲/۴۳۷۳
۷	۴۷/۰۵۴	۱۹/۷۳۴	۷/۲۴۵	L۲۸	۲/۳۹۹۷
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۱/۸۹۵۳
				L۳۰	۲/۹۵۰۱
۸	۴۷/۰۵۱	۱۹/۷۳۱	۷/۳۸۶	L۲۸	۳/۰۴۸۲
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۲/۳۹۹۲
				L۳۰	۱/۹۳۸۶
۹	۴۶/۸۱۷	۲۰/۱۰۵	۷/۸۶۱۳	L۲۸	۰/۷۷۷۹۷
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۳/۱۷۵۲
				L۳۰	۳/۹۰۸۱
۱۰	۴۵/۷۲۶	۲۳/۹۷۳	۳/۳۹۷۲	L۲۸	۰/۴۰۸۸۱
	۲/۴۳۷۳			L۲۹	۰/۵۵۱۰۵
				L۳۰	۲/۴۳۷۳

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	۵/۳۳۳۲	۴۲	۰/۰۷۳۲
۲۱	۱/۳۹۲۲	۴۳	۱/۹۷۵۸
۲۲	۴/۳۶۳۵	۴۴	۱۳/۰۲۸۵

همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، همه مقادیر  $\Delta t_{mb}$  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 SFCL با به خوبی توانسته‌اند هماهنگی بین رله‌ها را بازیابی کنند و عملکرد نادرست آن‌ها را تصحیح نمایند. مثبت بودن مقادیر  $\Delta t_{mb}$  در جدول ۷، این گفته را تأیید می‌کند.

جدول ۷:  $\Delta t_{mb}$  بعد از اعمال بهترین پاسخ از نظر  $L_2$  norm

شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	$\Delta t_{mb}$
----------------	-------------------	-----------------

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، در می‌یابیم 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.

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

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 عدم قطعیت

در بخش قبل، تعیین محل و ظرفیت بهینه برای نصب SFCL در شرایطی صورت گرفت که عدم قطعیت در توان خروجی توربین‌های بادی لحاظ شده بود. برای توصیف این عدم قطعیت، یک مدل ۱۲ حالتی برای توربین بادی مورد استفاده قرار گرفت.

در این بخش، مسئله قبلی مجدداً حل خواهد شد اما این بار عدم قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی لحاظ نمی‌شود. به عبارت دیگر، 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 به دست آمده با مدل واقعی بسیار متفاوت باشد. با این وجود، 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 تعیین شده 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	L۲۹	۲/۸۹۱۵
				L۲۸	۲/۲۰۴۹
				L۳۰	۳/۵۴۲۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ به دست آمده در هر دو حالت (با عدم قطعیت و بدون عدم قطعیت)، 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 عدم قطعیت) مجموع ظرفیت بهینه SFCL برابر با ۳/۸۰۹۴ pu تعیین شده است اما این مقدار در حالت دوم (بدون عدم قطعیت) ۸/۶۳۹۲ pu 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 عدم قطعیت در توان تولیدی توربین‌های بادی و مدل‌سازی دقیق آن‌ها است. نتایج عددی نیز این موضوع را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که لحاظ کردن این فاکتور در تعیین

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 به عنوان شاخصی برای میزان محدودکنندگی جریان خطا است، به مقدار ۸/۱۸۹۵ برسانند. در حالی که مقدار  $OF_2$  به ازای بهترین پاسخ از نظر  $L_2$  norm برابر ۲۲/۶۱۹ است. این میزان کاهش، بسیار چشمگیر است. اگر چه 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 راه حل 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.

جدول ۸: 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	L۲۹	۰/۵۵۱۰۵
				L۲۸	۰/۴۰۸۸۱
				L۳۰	۲/۴۳۷۳
از لحاظ $OF_2$	۸۰/۳۰۸	۸/۱۸۹۵	۱۵	L۲۹	۵
				L۳۰	۵
				L۳۱	۵
از لحاظ $OF_3$	۱۰۸۲/۸	۴۴/۳۲۶	صفر	*	صفر
				*	صفر
				*	صفر

با مقایسه پاسخ‌های سطر دوم و سوم 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 در صورتی که 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 نصب شده 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. به عبارت دیگر، چون توربین نصب شده 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

- 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

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

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان خروجی توربین‌های بادی، محل و ظرفیت بهینه برای نصب SFCL در شبکه تعیین گردید. لحاظ کردن عدم قطعیت در مسئله مورد مطالعه، نه تنها خطای مدل‌سازی را کاهش می‌دهد بلکه بر روی پاسخ به‌دست‌آمده نیز تاثیرگذار است. مدل‌سازی عدم قطعیت، با استفاده از سناریوهای مختلف باد و تعیین احتمال وقوع هر یک از آن‌ها صورت گرفت. همان‌طور که مشاهده شد ظرفیت تعیین شده برای محدودساز جریان خطا در شرایطی که عدم قطعیت در شبکه مدل‌سازی شود مقدار کم‌تری است؛ اما با این وجود، نتایج عددی نشان داد که این پاسخ علاوه بر 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. Tomovic, D. Secret, 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

- 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, “Multiobjective 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/research/pstca/](http://www.ee.washington.edu/research/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.

#### زیر نویس ها

- ∖ Distributed Generation
- ∧ Superconducting Fault Current Limiter
- ∧ Fault current Limiter
- ∧ Power Change between Area
- ∧ Multi-Attribute Decision Making
- ∧ Directional Overcurrent Relay
- ∧ Autoregressive Moving Average
- ∧ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
- ∧ Weibull
- ∧ Pareto Front