

ارزیابی امنیت استاتیکی و دینامیکی سیستم قدرت بر اساس ریسک و بهبود آن به وسیله برنامه‌ریزی مجدد تولید

مرتضی سعیدی و حسین سیفی

سیستم قدرت را اندازه‌گیری کنند. اندازه‌گیری سطح امنیت سیستم قدرت باعث می‌شود بتوانیم سطح امنیت را در یک سطح قابل قبول نگه داشته و سیستم قدرت را در برابر حوادث پیش‌بینی نشده محافظت نماییم. تعیین سطح امنیت سیستم قدرت، به‌طور سنتی با استفاده از معیارهای قطعی انجام می‌پذیرد. با استفاده از این معیار در نهایت نقاط بهره‌برداری سیستم قدرت به دو دسته دارای امنیت و فاقد امنیت دسته‌بندی می‌شود. اگر مشخص شود در صورت وقوع یک خطای مشخص، متغیرهای بهره‌برداری از حدود خود خارج می‌شوند (شرایط فاقد امنیت) لازم است تصمیمات پیشگیرانه‌ای اتخاذ شود تا از امنیت سیستم در صورت وقوع یک خطا اطمینان حاصل گردد. اما اگر مطالعات نشان دهد پس از رخداد خطا هیچ کدام از متغیرهای سیستم از حدود خود خارج نخواهند شد، آنگاه جهت تصمیمات بهره‌برداری می‌تواند در جهت بهبود قیود اقتصادی سیستم انجام پذیرد [۱].

علاوه بر معیار قطعی جهت تعیین سطح امنیت سیستم قدرت، اخیراً از معیار احتمالاتی و یا معیار بر اساس ریسک استفاده می‌شود. ارزیابی امنیت بر اساس ریسک، بر محاسبه شاخص ریسک استوار خواهد بود [۲]. تصمیمات پیشگیرانه بهره‌بردار بر اساس شاخص ریسک می‌تواند منجر به بهبود سطح امنیت سیستم قدرت گردد. در صورتی که شبکه همچنان در وضعیت ناامن باقی بماند ولی ریسک به مقدار قابل توجهی کاهش بیاید، بهره‌بردار سیستم می‌تواند با تنظیم دقیق متغیرهای فیزیکی که در اختیار او می‌باشد امنیت سیستم را بهبود بخشد.

متغیرهای فیزیکی در اختیار بهره‌بردار در کوتاه‌مدت عبارتند از:

- میزان توان تولیدی نیروگاه‌ها
- ولتاژ مرجع نیروگاه‌ها
- تپ ترانسفورماتورها
- فاز ترانسفورماتورهای تغییردهنده فاز
- میزان تولید نواحی مختلف در سیستم‌های چندناحیه‌ای
- میزان بار سیستم (توسط اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف، بارزدایی)

در این مقاله برای اولین بار از شاخص ریسک امنیت به‌عنوان تابع هدف جهت برنامه‌ریزی مجدد تولید استفاده شده و تصمیم بهره‌بردار در دو حالت ارزیابی قطعی و ارزیابی بر اساس ریسک مقایسه شده است. متغیر حالت بهره‌برداری میزان توان اکتیو تولیدی نیروگاه‌ها بوده و از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی پرندگان به دلیل کارایی بالای آن جهت رسیدن به نقطه بهینه تولید استفاده شده است. تابع هدف پیشنهادی شامل حداقل‌سازی هزینه تولید و حداکثرسازی امنیت (حداقل‌سازی شاخص ریسک امنیت) می‌باشد. قابلیت بالای روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ شین IEEE نشان داده شده است و اطلاعات مورد نیاز این شبکه در [۳] آورده شده است. در بخش ۲ مقاله معیارهای ارزیابی امنیت شامل معیار قطعی و معیار بر اساس ریسک بررسی شده است. در بخش ۳

چکیده: تعیین سطح امنیت سیستم قدرت، به‌طور سنتی با استفاده از معیارهای قطعی انجام می‌پذیرد. با استفاده از این معیار در نهایت نقاط بهره‌برداری سیستم قدرت به دو دسته دارای امنیت و فاقد امنیت دسته‌بندی می‌شود. اگر در صورت وقوع یک خطای مشخص، متغیرهای بهره‌برداری از حدود خود خارج شوند (شرایط فاقد امنیت) لازم است تصمیمات پیشگیرانه‌ای اتخاذ شود تا از امنیت سیستم در صورت وقوع خطا اطمینان حاصل گردد. علاوه بر معیار قطعی جهت تعیین سطح امنیت سیستم قدرت، اخیراً از معیار احتمالاتی و یا معیار بر اساس ریسک استفاده می‌شود. ارزیابی امنیت بر اساس ریسک، بر محاسبه شاخص ریسک استوار می‌باشد.

در این مقاله شاخص‌های ریسک امنیت استاتیکی و امنیت دینامیکی مطالعه و بررسی شده است. یک شاخص جدید ریسک پایداری گذرا تعریف شده و از آن در تصمیمات بهره‌بردار استفاده شده است.

به‌طور معمول امنیت به‌عنوان یک قید در تصمیمات بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله برای اولین بار، شاخص ریسک امنیت استاتیکی به‌عنوان تابع هدف و شاخص ریسک امنیت دینامیکی به‌عنوان قید مسأله برنامه‌ریزی مجدد تولید لحاظ شده است. تصمیم بهره‌بردار در دو حالت ارزیابی قطعی و ارزیابی بر اساس ریسک مقایسه شده است. متغیر حالت بهره‌برداری، میزان توان اکتیو تولیدی نیروگاه‌ها و ولتاژ مرجع ژنراتورها بوده و از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی پرندگان به دلیل کارایی بالای آن جهت رسیدن به نقطه بهینه تولید استفاده شده است. تابع هدف پیشنهادی شامل حداقل‌سازی هزینه تولید و حداکثرسازی امنیت (حداقل‌سازی شاخص ریسک امنیت) و قید مسأله شامل در محدوده‌بودن شاخص ریسک پایداری گذرا می‌باشد. قابلیت بالای روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ شین IEEE نشان داده شده است.

کلید واژه: امنیت استاتیکی، امنیت دینامیکی، پایداری گذرا، شاخص ریسک، برنامه‌ریزی مجدد تولید، الگوریتم بهینه‌سازی گروهی پرندگان.

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت به‌طور معمول با یک حاشیه امنیت مطمئن بهره‌برداری می‌شوند تا اطمینان حاصل گردد خطاها و دیگر خروج‌های برنامه‌ریزی نشده باعث از دست رفتن مقداری از بار سیستم و یا خاموشی بخش یا کل سیستم نگردد. با آغاز رقابت در صنعت برق در محیط تجدید ساختار، موضوع حاشیه امنیت بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. پاسخ به این سؤال که "سطح مناسب امنیت سیستم قدرت چه سطحی می‌باشد؟" نیازمند استفاده از ابزارهایی است که قادر باشند سطح امنیت

این مقاله در تاریخ ۱۱ مرداد ماه ۱۳۸۹ دریافت و در تاریخ ۲۵ مرداد ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

مرتضی سعیدی، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: m.saedi.eng@gmail.com).

حسین سیفی، استاد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: seifi_ho@modares.ac.ir).

۲-۲ معیار احتمالاتی یا بر اساس ریسک

در این روش جهت مشخص کردن سطح امنیت شبکه چند شاخص ریسک تعریف می‌شود. هدف اصلی از به‌دست آوردن شاخص‌های ریسک امنیت شبکه مدل‌سازی، عدم قطعیت‌های موجود مختلف مانند عدم قطعیت در وقوع خطا، عدم قطعیت در آب و هوا، عدم قطعیت در بار و ... می‌باشد. مدل‌سازی این عدم قطعیت‌ها می‌تواند به روش‌های مختلف از جمله فازی یا احتمالاتی انجام گیرد و همچنین در به‌دست آوردن شاخص‌های ریسک، از فاکتور "شدت عواقب" نیز استفاده می‌شود. این فاکتور شدت عواقب پس از وقوع، نوسانات مختلف را ارزش‌گذاری می‌کند و می‌تواند بسته به دیدگاه‌های مختلف انتخاب شود. شدت عواقب وقوع خطا می‌تواند بر اساس میزان انرژی تأمین‌نشده، میزان شدت نوسان ایجادشده در سیستم قدرت، احتمال رخداد خطاهای پی در پی پس از خطای اولیه و ... تعریف گردد [۱] و [۲].

دستورالعمل روش انجام ارزیابی امنیت بر اساس ریسک با کمی تغییرات نسبت به روش قطعی به‌صورت زیر می‌باشد:

(۱) ابتدا باید شرایط اولیه شبکه، متناظر با دوره زمانی مورد مطالعه (سال، ماه و ...) در شرایط مختلف بهره‌برداری (پیک، غیر پیک و ...) مشخص گردد. در هر دوره باید نحوه مشارکت واحدها و توپولوژی شبکه بر اساس شرایط مورد انتظار در آن دوره زمانی انتخاب گردد.

(۲) مجموعه پیشامدها انتخاب می‌شود، این پیشامدها بر اساس حالت‌شماری^۱ انجام می‌شود و تمامی پیشامدهای ممکن انتخاب می‌شود و احتمال وقوع هر پیشامد نیز تعیین می‌شود. در حقیقت به هر پیشامد یک وزن به خصوص نسبت داده می‌شود.

(۳) قیود مطالعه می‌بایست مشخص گردد. مثلاً ممکن است فقط بخواهیم امنیت استاتیکی را بررسی کنیم و یا این که بخواهیم از بین قیود امنیت دینامیکی فقط پایداری ولتاژ را مد نظر قرار دهیم. مطالعه‌ای جامع خواهد بود که تمامی قیود امنیت دینامیکی و استاتیکی مطالعه شود.

(۴) شاخص ریسک محاسبه می‌شود و اگر از آستانه تعیین‌شده تجاوز کرده بود، تصمیمات پیشگیرانه اتخاذ می‌شود.

(۵) مجموعه‌ای از متغیرهای بهره‌برداری را که به موجب خطاهای محدودکننده باعث افزایش شاخص ریسک از مقدار آستانه شده است، شناسایی می‌کنیم. این مجموعه متغیرهای بهره‌برداری را می‌توان به‌صورت خط (دو متغیر)، صفحه (سه متغیر) و فضا (بیش از سه متغیر) نمایش داد. این منحنی‌ها مرزهای امنیت سیستم قدرت را نشان می‌دهند.

(۶) مرزهای امنیت به‌صورت قابل فهم برای بهره‌برداری سیستم نمایش داده شود و در صورت نیاز عملیات پیشگیرانه یا اصلاحی اتخاذ شود.

۲-۳ مقایسه معیار قطعی و معیار احتمالاتی

در حقیقت ارزیابی قطعی امنیت سیستم قدرت بر اساس تست‌هایی است که انجام می‌شود و مشخص می‌کند که سیستم قدرت در برابر پیشامدهای از قبل تعیین شده مقاوم هست یا خیر. ولی ارزیابی احتمالاتی سیستم قدرت بر اساس "نقطه برش"^۲ به‌دست آمده از حدود شاخص‌های تعریف‌شده استوار است.

نحوه محاسبه شاخص‌های ریسک امنیت استاتیکی به‌طور کامل شرح و شاخص ریسک امنیت دینامیکی نیز در بخش ۴ توضیح داده شده است. در بخش ۵ برنامه‌ریزی مجدد تولید شرح داده شده است. روش پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی مجدد تولید در بخش ۶ آمده است. الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان در بخش ۷ و نتایج عددی بر روی شبکه ۲۴ شین IEEE در بخش ۸ آمده است. بخش ۹ نیز به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- معیارهای ارزیابی امنیت

۱-۲ معیار قطعی

در ارزیابی قطعی امنیت سیستم قدرت تمامی پیشامدهای ممکن در نظر گرفته می‌شود و به‌طور معمول فرض بر این است که در هر بازه زمانی فقط یک خطا رخ می‌دهد و احتمال وقوع ۲ خطا بسیار ناچیز است (معیار $(N-1)$ و بر اساس این که آیا معیارهای بهره‌برداری تأمین می‌شود یا نه، تصمیماتی اتخاذ می‌گردد. در این روش، بر اساس مطالعه مجموعه پیشامدهای ممکن تعیین می‌شود که معیارهای بهره‌برداری ارضا می‌شوند یا نه؟

اجرای این روش به دو معیار در حین مطالعات بستگی دارد. اعتبار: ساختار شبکه/مجموعه حوادث ممکن و شرایط بهره‌برداری که در مطالعات در نظر گرفته می‌شوند، به‌صورت منطقی اعتبار رخ‌دادن داشته باشند.

شدت: به‌طور مشخص دو حالت که در آن خط ۱۰۴٪ یا ۱۱۰٪ اضافه بار شده است در شدت رخ‌دادن متفاوت هستند. تصمیمات نهایی که اتخاذ می‌شود باید بر اساس شرایطی اتخاذ شود که شدیدتر است.

دستورالعمل ارزیابی قطعی امنیت سیستم قدرت بر اساس زیر می‌باشد:

(۱) ابتدا باید شرایط اولیه شبکه، متناظر با دوره زمانی مورد مطالعه (سال، ماه و ...) در شرایط مختلف بهره‌برداری (پیک، غیر پیک و ...) مشخص گردد. در هر دوره باید نحوه مشارکت واحدها و توپولوژی شبکه بر اساس شرایط مورد انتظار در آن دوره زمانی انتخاب گردد.

(۲) مجموعه‌ای از پیشامدهای ممکن انتخاب گردد. به‌طور نرمال این مجموعه شامل خطاهایی می‌باشد که دارای اهمیت هستند. البته می‌توان تک‌تک خطاهای ممکن را نیز بررسی کرد.

(۳) قیود مطالعه می‌بایست مشخص گردد. مثلاً ممکن است فقط بخواهیم امنیت استاتیکی را بررسی کنیم و یا این که بخواهیم از بین قیود امنیت دینامیکی فقط پایداری ولتاژ را مد نظر قرار دهیم. مطالعه‌ای جامع خواهد بود که تمامی قیود امنیت دینامیکی و استاتیکی مطالعه شود.

(۴) خطاهایی که باعث ایجاد نوسان، تنش و یا ناپایداری در سیستم قدرت می‌شود را شناسایی می‌کنیم. این خطاها به‌عنوان خطاهای محدودکننده شناسایی می‌شوند.

(۵) مجموعه‌ای از شرایط بهره‌برداری را که به موجب خطاهای محدودکننده، نوسان، تنش و یا ناپایداری در آن ایجاد شده است، شناسایی می‌کنیم. این مجموعه از شرایط بهره‌برداری (شامل متغیرهای بهره‌برداری) را می‌توان به‌صورت خط (دو متغیر)، صفحه (سه متغیر) و فضا (بیش از سه متغیر) نمایش داد. این منحنی‌ها مرزهای امنیت سیستم قدرت را نشان می‌دهند.

(۶) مرزهای امنیت به‌صورت قابل فهم برای بهره‌برداری سیستم نمایش داده شود و در صورت نیاز عملیات پیشگیرانه یا اصلاحی اتخاذ شود.

1. Enumeration
2. Cut off Point

۲-۳ شاخص‌های ریسک فیزیکی

شاخص ریسک امنیت را می‌توان بر اساس نوسان متغیرهای فیزیکی نیز تعریف کرد. این شاخص علاوه بر آن که یک شاخص سیستمی می‌باشد، می‌تواند به صورت منطقه‌ای نیز تعریف و مورد استفاده قرار گیرد. تصمیم بهره‌بردار می‌بایست بر اساس شاخص فیزیکی که نوسان متغیرهای فیزیکی سیستم را نشان می‌دهد، انجام گیرد.

شاخص تعریف شده برای ریسک امنیت سیستم قدرت [۱] و [۴]

$$Risk = \sum_i \sum_j \Pr(E_i) \Pr(X^{(j,i)} | X^{(f,i)}) Sev(X^{(j,i)}) \quad (1)$$

X : متغیر بهره‌برداری مانند توان عبوری از خطوط و یا ولتاژ شین.
 $X^{(f,i)}$: مقدار متغیر محاسبه شده در شرایط بهره‌برداری پیش‌بینی

شده (f) در i امین پیشامد.

$X^{(j,i)}$: مقدار متغیر محاسبه شده در j امین شرایط بهره‌برداری پیش‌بینی شده در i امین پیشامد.

$\Pr(E_i)$: مدل سازی عدم قطعیت در وقوع خطا.

$\Pr(X^{(j,i)} | X^{(f,i)})$: مدل سازی عدم قطعیت در شرایط بهره‌برداری در آینده.

$Sev(X^{(j,i)})$: فاکتور شدت عواقب.

شاخص فوق برای مجموعه‌ای از پیشامدهای از پیش انتخاب شده انجام شده و با هم جمع می‌شوند و در نهایت شاخص ریسک امنیت شبکه به دست می‌آید.

برخی از شاخص‌های ریسک فیزیکی عبارتند از:

۱) شاخص ریسک افت ولتاژ.

۲) شاخص ریسک اضافه بار.

جهت محاسبه هر کدام از شاخص‌های ریسک فوق باید تابع شدت عواقب هر پیشامد تعیین گردد. تابع شدت عواقب، آسیب وارده به سیستم پس از خطا را به صورت کمی بیان می‌کند. این تابع می‌تواند بر اساس هزینه یا توالی رخداد خطا و یا تأثیر هر خطا بر روی متغیرهای فیزیکی مانند ولتاژ، اضافه بار و ... تعریف گردد. تابع شدت عواقب می‌تواند به شکل‌های مختلفی به صورت زیر تعریف گردد:

۳-۲-۱ تابع شدت عواقب افت ولتاژ

این تابع برای هر شین بر اساس دامنه ولتاژ آن تعیین می‌گردد. سه نوع تابع شدت عواقب در ادامه توضیح داده می‌شود.

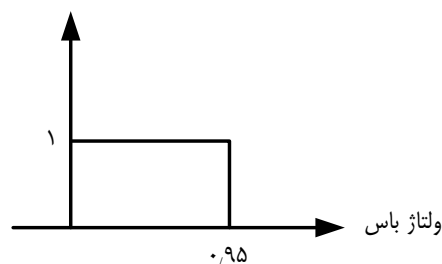
الف) تابع شدت عواقب گسسته:

در این تابع اگر دامنه ولتاژ کمتر از حد پایین مجاز ولتاژ گردد، شدت عواقب ۱ و اگر دامنه ولتاژ در محدوده مجاز باشد، شدت عواقب صفر تعریف می‌گردد. هنگامی که جهت محاسبه ریسک از این تابع استفاده گردد، ریسک محاسبه شده بیانگر تعداد شین‌هایی می‌باشد که دامنه ولتاژ در آنها ممکن است نوسان داشته باشد. مزیت این تابع سادگی و شباهت آن با روش ارزیابی قطعی و عیب آن نیز عدم نشان دادن میزان نوسان می‌باشد. شکل ۱ تابع شدت عواقب گسسته افت ولتاژ را نشان می‌دهد.

ب) تابع شدت عواقب پیوسته:

در این تابع شدت عواقب دامنه ولتاژ ۰/۹۵ برابر با ۱ فرض شده است و در صورت افت بیشتر دامنه ولتاژ نیز افزایش می‌یابد. در این تابع میزان نوسان نیز در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای کار در محدوده ۱ تا ۰/۹۵ نیز ریسک مخالف صفر در نظر گرفته شده است که نشان دهنده این واقعیت است که شرایط کاملاً مطلوب نیست. شکل ۲ تابع شدت عواقب پیوسته افت ولتاژ را نشان می‌دهد.

شدت عواقب



شکل ۱: تابع شدت عواقب گسسته افت ولتاژ.

به عنوان مثال معیارهای نوعی دو روش قطعی و احتمالاتی در زیر آورده می‌شود.

روش قطعی:

- قید دینامیکی: زاویه روتور تمامی ژنراتورها باید در محدوده مجاز باشد.

- قید استاتیکی: توان عبوری از خطوط در شرایط قبل و پس از خطا باید حداکثر توان نامی باشد.

روش احتمالاتی:

در این روش شاخص ریسک محاسبه شده و بسته به میزان فاصله از حد انتخاب شده برای آن انعطاف‌پذیری وجود خواهد داشت.

دو روش قطعی و بر اساس ریسک منجر به معیارهایی می‌شوند که بهره‌بردار را از شرایط متغیرهای بهره‌برداری آگاه می‌سازند. در صورتی که شرایط متغیرهای بهره‌برداری مناسب نباشند، بهره‌بردار باید تصمیمات پیشگیرانه اتخاذ نماید. البته بهره‌بردار می‌تواند منتظر وقوع خطا بماند و در صورت وقوع خطا عملیات اصلاحی انجام دهد که دارای ریسک بالایی است و به هیچ وجه پیشنهاد نمی‌گردد.

۳-۲ شاخص‌های ریسک امنیت استاتیکی سیستم قدرت

یک شاخص احتمالاتی امنیت سیستم قدرت باید نیازهای بهره‌بردار از جمله قابل استفاده بودن در بهره‌برداری، صحیح بودن و عملی بودن اندازه‌گیری را داشته باشد. این شاخص می‌تواند بر اساس نوسان متغیرهای فیزیکی یا میزان بار تأمین نشده یا خسارت وارده به مشتریان محاسبه شود.

۳-۱-۱ شاخص ریسک هزینه امنیت

از شاخص‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری هزینه امنیت سیستم قدرت می‌توان استفاده کرد. این شاخص‌ها شامل $EENS^1$, $LOLE^2$, $LOLP^3$ و چندین شاخص دیگر می‌باشند. ترجیحاً شاخص مورد استفاده باید نشان‌دهنده فرکانس، مدت زمان و دامنه خاموشی باشد. شاخص EENS نشان‌دهنده مدت زمان و دامنه خاموشی بوده و می‌تواند به عنوان شاخص ریسک هزینه امنیت محاسبه شود. این شاخص جهت ارزیابی امنیت سیستم قدرت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد اما جهت تصمیم‌گیری بهره‌بردار باید از شاخص‌هایی استفاده شود که نوسان متغیرهای فیزیکی را به صورت سیستمی یا منطقه‌ای نشان می‌دهند. در این مقاله در حالات مختلف تصمیم‌گیری بهره‌بردار جهت برنامه‌ریزی مجدد تولید، این شاخص محاسبه و مقایسه شده است.

1. Loss of Load Probability
2. Loss of Load Expectation
3. Expected Energy not Supplied

خواهد بود (در (۳)، ها ۰ به ۰ تبدیل شد)

$$P_n = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!} = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

در رابطه فوق P_n احتمال رخداد صفر خطا، λ میانگین نرخ رخداد خطا و t طول دوره مطالعه می‌باشد. احتمال رخداد خطا در دوره زمانی t برابر خواهد بود با

$$P_0 = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4)$$

که همان تابع چگالی احتمال نمایی می‌باشد. در حقیقت تابع چگالی احتمال پواسون وقتی نرخ رخداد خطا ثابت است با تابع چگالی احتمال نمایی برابر است [۷].

۴-۱-۲ مدل سازی محل وقوع خطا

محل وقوع خطا در یک خط به طور کلی از توزیع یکنواخت تبعیت نمی‌کند. یک تابع احتمال گسسته بر اساس اطلاعات ثبت شده جهت مدل سازی محل وقوع خطا قابل استفاده خواهد بود. یک خط به M قسمت تقسیم می‌شود که احتمال وقوع خطا در بخش i ام از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^M f_i} \quad (5)$$

که در آن f_i تعداد وقوع خطا در قسمت i ام می‌باشد. تعداد بخش‌ها با توجه به نوع خط و اطلاعات در دسترس متفاوت می‌باشد [۸]. برای مثال یک خط را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم کرد:

- (۱) ۲۰٪ ابتدای خط
- (۲) ۶۰٪ میانه خط
- (۳) ۲۰٪ انتهای خط

۴-۱-۳ مدل سازی نوع خطا

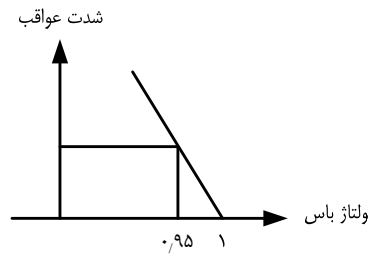
انواع خطاها عبارتند از:

- تک فاز به زمین
- دوفاز به زمین
- سه فاز
- فاز به فاز
- ...

همانند قبل یک تابع احتمال گسسته بر اساس اطلاعات ثبت شده قابل استفاده خواهد بود.

۴-۱-۴ مدل سازی احتمالی عملکرد ناموفق کلید اتوماتیک

اکثر خطوط فشار قوی شبکه‌های قدرت مجهز به کلید اتوماتیک قطع خطا می‌باشند. تقریباً در اکثر موارد رخداد یک پیشامد (به عنوان مثال اتصال کوتاه) در صورتی که کلید قطع اتوماتیک صحیح عمل کند نمی‌تواند منجر به حادثه‌ای جدی برای سیستم گردد. تنها هنگامی که کلید قطع اتوماتیک صحیح عمل نمی‌کند، خطای دوم و سپس خطاهای پی در پی بعدی رخ می‌دهد. احتمال عملکرد ناموفق کلید اتوماتیک را می‌توان با مراجعه به اطلاعات گذشته سیستم به دست آورد. به طور کلی یک ارتباط مستقیم بین علت رخداد خطا و عملکرد صحیح یا غیر صحیح کلید اتوماتیک وجود دارد. به عنوان نمونه با مراجعه به اطلاعات ثبت شده



شکل ۲: تابع شدت عواقب پیوسته افت ولتاژ.

ج) تابع شدت عواقب بر اساس درصد نوسان:

در این تابع درصد نوسان به عنوان شدت عواقب در نظر گرفته می‌شود و میزان نوسان نیز در نظر گرفته شده است

$$Sev_n(V_j) = \begin{cases} \frac{0.95 - V_j}{0.95}, & V_j \leq 0.95 \\ 0, & V_j > 0.95 \end{cases} \quad (2)$$

۳-۲-۲ تابع شدت عواقب اضافه بار

این تابع نیز می‌تواند مانند فوق به سه صورت گسسته، پیوسته و درصد نوسان تعریف گردد. در این مقاله جهت محاسبه شاخص ریسک به پیشنهاد [۲] از تابع شدت عواقب پیوسته استفاده شده است.

۴- شاخص ریسک امنیت دینامیکی

همان طور که توضیح داده شده است جهت محاسبه شاخص ریسک فیزیکی امنیت می‌بایست جهت هر پیشامد، عدم قطعیت رخداد آن پیشامد، عدم قطعیت در شرایط بهره‌برداری و شدت عواقب آن پیشامد مدل سازی و محاسبه گردد [۱]. شاخص ریسک فیزیکی امنیت استاتیکی در [۱] و [۲] ارائه شده است اما تا کنون جهت امنیت دینامیکی شاخص ریسک فیزیکی محاسبه نشده است. در این مقاله شاخص جدید ریسک فیزیکی امنیت دینامیکی تعریف و در تصمیمات بهره‌بردار از آن استفاده می‌گردد. جهت تعریف این شاخص، مدل سازی عدم قطعیت در شرایط بهره‌برداری همانند شاخص ریسک فیزیکی امنیت استاتیکی می‌باشد. جهت مدل سازی عدم قطعیت خطا، به دلیل متفاوت بودن خطا و اهمیت و مؤثر بودن محل، زمان و نوع خطا در نتایج شبیه سازی زمانی، باید تمامی پارامترهای مؤثر در ارزیابی به صورت احتمالاتی شبیه سازی شوند. معمولاً از شبیه سازی مونت کارلو جهت مدل سازی عدم قطعیت این متغیرها استفاده می‌گردد [۵]. همچنین جهت مدل سازی تابع شدت عواقب پایداری گذرا از یک تابع ابتکاری^۱ که نشان دهنده شدت پایداری یا ناپایداری شبکه می‌باشد، استفاده شده است. این تابع ابتکاری برای اولین بار در [۶] به عنوان شاخص پایداری گذرا جهت استفاده در برنامه ریزی مجدد تولید تعریف شده است. در این مقاله از شاخص مذکور به عنوان تابع شدت عواقب در شاخص جدید ارائه شده استفاده شده است. در ادامه به تشریح شاخص ریسک امنیت دینامیکی می‌پردازیم.

۴-۱-۱ مدل سازی عدم قطعیت خطا

۴-۱-۱-۱ مدل سازی احتمالاتی وقوع خطا

احتمال رخداد خطا در خطوط شبکه را می‌توان با استفاده از تابع چگالی احتمال پواسون با یک نرخ رخداد خطای ثابت مدل سازی نمود. بر این اساس احتمال رخداد صفر خطا در طول دوره t بر اساس رابطه زیر

است. در این مقاله این تابع به‌عنوان تابع شدت عواقب پایداری گذرا جهت محاسبه شاخص ریسک استفاده شده است.

شاخص ریسک پایداری گذرا شامل سه قسمت مدل‌سازی عدم قطعیت رخداد خطا، مدل‌سازی عدم قطعیت شرایط بهره‌برداری و تابع شدت عواقب می‌باشد. در این مقاله این سه پارامتر تعریف و محاسبه شده است. تعریف شاخص ریسک پایداری گذرا برای اولین بار در این مقاله بر اساس مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و محاسبه تابع شدت عواقب صورت می‌گیرد. این تابع ابتکاری به‌صورت زیر است

$$SEV(TS) = J(x(t_f), u) \equiv \Phi(x(t_f)) \quad (7)$$

$$= \max_{\forall i, j} \{ \delta_i(t_f) - \delta_j(t_f) \}^2 - \rho^2$$

که در آن i و j شماره ژنراتورهای شبکه، $x(t_f)$ متغیر بهره‌برداری شبکه، $SEV(TS)$ شدت عواقب پایداری گذرا، زمان t_f زمانی است که زاویه رتور در حداکثر مقدار خود قرار دارد و همچنین ρ آستانه پایداری سیستم می‌باشد. بنابراین با انتخاب صحیح ρ قید پایداری گذرا را می‌توان به‌صورت زیر قرار داد

$$J(x(t_f), u) < \rho \quad (8)$$

توضیح این که (۸) در صورتی قابل استفاده است که فقط تابع فوق بدون در نظر گرفتن احتمال رخداد خطا محاسبه گردد. در صورتی که شاخص ریسک پایداری گذرا در نظر گرفته شود، می‌بایست یک نقطه برش برای آن در نظر گرفته شده و سپس قید پایداری گذرا به این صورت اصلاح گردد که شاخص ریسک از آن نقطه برش بیشتر نگردد.

۴-۱-۷ تعیین زمان t_f

جهت محاسبه تابع $J(x(t_f), u)$ شبیه‌سازی زمانی برای تمام پیشامدهای ممکن در بازه زمانی $[t, t_{max}]$ انجام می‌گیرد [۱۰] و [۱۱]. جهت خطاهایی که منجر به ناپایداری می‌گردند حداکثر زاویه رتور به‌دست آمده در بازه زمانی کمتر از t_{max} بسیار بزرگ‌تر از حد آستانه ρ می‌رسد. جهت این موارد ادامه‌دادن شبیه‌سازی زمانی تا حد t_{max} نالازم می‌باشد. جهت صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی یک حد محدودکننده $\rho(2 \sim 3) = \rho$ جهت توقف شبیه‌سازی استفاده شده است.

۵- برنامه‌ریزی مجدد تولید بر اساس ریسک

برنامه‌ریزی مجدد تولید توان اکتیو در حقیقت همان جابه‌جایی تولید از یک یا چند ژنراتور به یک یا چند ژنراتور دیگر به‌عنوان یک اقدام پیشگیرانه با هدف بهبود و حفظ امنیت استاتیکی و امنیت دینامیکی سیستم قدرت می‌باشد.

برنامه‌ریزی مجدد تولید در مقالات متفاوت از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است و هدف از آن در مقالات مختلف، متفاوت می‌باشد. در برخی برنامه‌ریزی مجدد تولید جهت بهبود امنیت استاتیکی و در برخی جهت بهبود امنیت دینامیکی می‌باشد. جهت انجام برنامه‌ریزی مجدد تولید ابتدا باید شاخص امنیت مشخص گردد تا جهت بهبود آن شاخص برنامه‌ریزی مجدد تولید صورت گیرد. در حقیقت برنامه‌ریزی مجدد تولید فرآیندی است که اگر نتایج ارزیابی امنیت سیستم نشان‌دهنده شرایط نامن در آینده (یک ساعت آینده تا یک هفته آینده) در این بازه فرض می‌شود حالت سیستم قابل پیش‌بینی است) باشد بهره‌بردار اقدام به برنامه‌ریزی مجدد تولید جهت کاهش ریسک امنیت سیستم نماید.

برنامه‌ریزی مجدد تولید یک مسأله بهینه‌سازی می‌باشد که در مقالات مختلف توابع هدف و قیود متفاوتی در نظر گرفته شده است. همچنین

در می‌یابیم که کلید اتوماتیک در ۹۰٪ از خطاهایی که بر اثر برخورد صاعقه ایجاد شده و در ۵۰٪ از خطاهایی که به دلایلی به غیر از صاعقه رخ داده است، عملکرد موفق داشته است. بنابراین احتمال عملکرد ناموفق کلید اتوماتیک را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد

$$P_{ru} = P(L) \times P(U|L) + P(O) \times P(U|O) \quad (6)$$

که در آن P_{ru} احتمال عملکرد ناموفق کلید قدرت، $P(L)$ و $P(O)$ احتمال رخداد خطا بر اثر صاعقه و سایر موارد و $P(U|L)$ و $P(U|O)$ احتمال شرطی عملکرد ناموفق کلید قدرت در خطاهای پیش‌آمده بر اثر صاعقه و سایر موارد می‌باشد [۹].

۴-۱-۵ مدل‌سازی احتمالی "زمان قطع خطا" (FCT)

فرآیند قطع خطای پیش‌آمده از سه عامل تشکیل شده است:

(الف) تشخیص رخداد خطا

(ب) عملکرد رله حفاظتی

(ج) عملکرد کلید قطع

زمانی که طول می‌کشد تا رله و کلید قطع هر دو عمل کنند تصادفی می‌باشد. از روش جهت شبیه‌سازی زمان قطع خطا می‌توان استفاده کرد: (۱) زمان عملکرد رله و عملکرد کلید قطع به‌صورت جداگانه با استفاده از دو تابع توزیع احتمال مدل‌سازی شود و توزیع احتمال عملکرد هم‌زمان با استفاده از کانولشن به‌دست آید.

(۲) زمان عملکرد رله و کلید قطع به‌طور مستقیم و توسط یک تابع احتمال مدل‌سازی شود.

به‌طور کلی تابع توزیع احتمال نرمال جهت شبیه‌سازی زمان عملکرد رله و کلید قطع و یا زمان کلی قطع خطا استفاده می‌شود. تخمین میانگین و انحراف معیار تابع توزیع نرمال بر اساس اطلاعات آماری گذشته قابل محاسبه می‌باشد. سیستم هنگامی پایداری خود را از دست می‌دهد که زمان قطع خطا بیشتر از "زمان بحرانی قطع خطا" باشد.

بنابراین احتمال رخداد خطا، نوع خطا، محل خطا و سایر موارد مؤثر در ارزیابی پایداری گذرا را می‌توان به‌صورت احتمالاتی شبیه‌سازی کرد. جهت تمامی خطوط شبکه تمامی موارد فوق محاسبه و در هم ضرب شده است تا عدم قطعیت رخداد خطا به‌صورت صحیح محاسبه گردد [۴].

از ضرب عوامل به‌دست آمده از "مدل‌سازی وقوع خطا"، "مدل‌سازی محل وقوع خطا"، "مدل‌سازی نوع خطا"، "مدل‌سازی عملکرد ناموفق کلید اتوماتیک" و "مدل‌سازی زمان قطع خطا" نهایتاً عدم قطعیت خطا محاسبه می‌گردد. این عدم قطعیت در شاخص ارائه‌شده پایداری گذرا استفاده می‌شود.

۴-۱-۶ مدل‌سازی تابع شدت عواقب

تابع شدت عواقب، آسیب وارده به سیستم پس از خطا را به‌صورت کمی بیان می‌کند. این تابع می‌تواند بر اساس هزینه یا توالی رخداد خطا و یا تأثیر هر خطا بر روی متغیرهای فیزیکی مانند زاویه رتور ژنراتورها، ولتاژ و ... تعریف گردد [۴].

تعریف تابع شدت عواقب جهت پایداری گذرا برای اولین بار در این مقاله انجام می‌پذیرد. در مراجع مختلف جهت ارزیابی کمی، از امنیت دینامیکی شاخص‌های مختلفی تعریف شده است. در این مقاله جهت تعریف تابع شدت عواقب پایداری گذرا از یک تابع ابتکاری استفاده شده است. این تابع در [۶] به‌عنوان شاخص قطعی پایداری گذرا استفاده شده

1. Fault Clearing Time
2. Critical Clearing Time

قرار گیرد، حد بالا و یا پایین آن توسط بهره‌بردار مشخص گردیده و ممکن است آن نقطه بهینه نبوده و دستیابی به حداکثر امنیت همراه با هزینه بهینه را غیر ممکن سازد.

شکل ۳ مراحل برنامه‌ریزی مجدد تولید را نشان می‌دهد.

در فرمول‌بندی مسئله برنامه‌ریزی مجدد تولید به شرح فوق امنیت استاتیکی و امنیت دینامیکی به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است، بدین صورت که امنیت استاتیکی در تابع هدف مسأله و شاخص ریسک امنیت دینامیکی در قید مسأله قرار گرفته است. یعنی در نقطه کار به‌دست آمده بعد از برنامه‌ریزی مجدد تولید جهت حداکثرسازی امنیت استاتیکی و حداقل‌سازی هزینه تولید، شاخص امنیت دینامیکی محاسبه و چک می‌شود آیا در محدوده مجاز خود قرار دارد یا نه. در صورتی که در محدوده مجاز خود قرار نداشته باشد برنامه‌ریزی مجدد تولید ادامه یافته یا این قید تأمین گردد. ممکن است فقط با استفاده برنامه‌ریزی مجدد تولید قید امنیت دینامیکی تأمین نگردد که در این صورت باید قطع بار انجام گیرد.

۶-۱ الگوریتم برنامه‌ریزی مجدد تولید واحدها بر اساس شاخص ریسک

چنانچه شاخص ریسک شبکه از مقدار معینی که برای هر شبکه بر اساس دیدگاه و تجربه بهره‌بردار به‌دست می‌آید بیشتر باشد، نشان‌دهنده این است که بهره‌بردار باید تصمیمات اصلاحی اتخاذ کند. یکی از تصمیمات بهره‌بردار جهت کاهش شاخص ریسک و بهبود امنیت برنامه‌ریزی مجدد واحدها می‌باشد. با تغییر در تولید واحدها ممکن است بتوان این شاخص را کاهش داد تا شبکه با ریسک کمتری بهره‌برداری شود. بر این اساس برای کاهش ریسک امنیت چند روش پیشنهاد می‌شود.

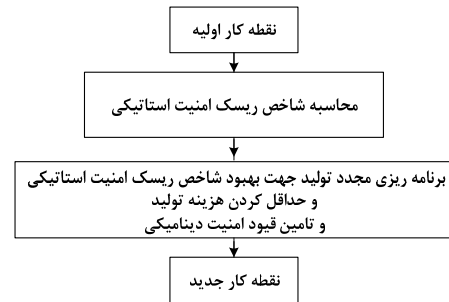
- ۱) قراردادن شاخص ریسک در قید مسأله برنامه‌ریزی مجدد تولید با هدف حداقل‌کردن هزینه تولید.
 - ۲) قراردادن شاخص ریسک در تابع هدف مسأله.
 - ۳) قراردادن شاخص ریسک به‌عنوان تابع هدف به همراه حداقل‌نمودن هزینه به‌صورت یک مسأله چندهدفه^۱.
- در این مقاله برنامه‌ریزی مجدد تولید به‌صورت یک مسئله چندهدفه حل شده است. شکل ۴ الگوریتم کلی مسئله را نشان می‌دهد.

۶-۲ الگوریتم اصلاح تولید واحدها

روش‌های مختلفی برای اصلاح تولید واحدها وجود دارد که از جمله می‌توان به روش‌های مبتنی بر حساسیت اشاره کرد. همان طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، در بسیاری از مقالات از روش PSO برای اصلاح تولید واحدها استفاده شده است که دارای مزیت‌های زیادی می‌باشد. در این الگوریتم می‌توان حداقل تغییر در مقدار تولید واحدها (حرکت هر جزء) و کمترین تعداد واحدهای دارای تغییر (تعداد اجزای متحرک) را اعمال نمود. همچنین این روش همگرایی بسیار خوبی داشته و به ندرت در نقاط بهینه محلی همگرا می‌شود.

۶-۱-۲ الگوریتم بهینه‌سازی گروهی پرندگان^۲ (PSO)

روش PSO مانند سایر روش‌های محاسبه تکاملی، جستجو را برای رسیدن به بهینه با استفاده از یک جمعیت اولیه از اجزا انجام می‌دهد. اجزای این جمعیت اولیه با توجه به برخی از انواع فرایندها به روز شده و



شکل ۳: مراحل برنامه‌ریزی مجدد تولید بر اساس ریسک.

روش‌های حل مسأله مختلفی نیز به کار برده شده است.

تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی مجدد تولید شامل حداقل‌کردن هزینه تولید و تلفات [۱۲]، حداکثرکردن رزرو توان اکتیو هر ژنراتور [۱۳]، حذف اضافه بار [۱۴]، حداقل‌سازی شدت عواقب افت ولتاژ [۱۵]، حداقل‌سازی پرداخت مصرف‌کنندگان [۱۶]، حداقل‌سازی هزینه تولید و آلودگی هوا به‌صورت هم‌زمان [۱۷]، حداقل‌سازی تلفات خطوط انتقال و حداقل‌سازی عبور توان از خطوط بحرانی [۱۸] و ... می‌باشد.

به‌طور کلی تابع هدف برنامه‌ریزی مجدد تولید می‌تواند شامل موارد مختلفی باشد که به‌طور کلی عبارتند از:

- ۱) حداقل‌سازی هزینه تولید
- ۲) حداقل‌سازی آلودگی محیط زیست
- ۳) حداقل‌سازی تلفات
- ۴) حداکثرسازی امنیت

قیود مسئله نیز شامل قیود پخش بار، قیود نامساوی تولید و ولتاژ باس‌ها، رعایت حداقل رزرو ژنراتورها و محدوده توان عبوری از خطوط انتقال و قیود امنیت با معیار قطعی می‌باشد.

در تمامی مراجع فوق‌الذکر امنیت با استفاده از معیار قطعی ارزیابی شده است. همان طور که می‌دانیم با استفاده از معیار بر اساس ریسک می‌توانیم سطح امنیت سیستم را اندازه‌گیری و همچنین عدم قطعیت‌های موجود در سیستم را نیز شبیه‌سازی کنیم.

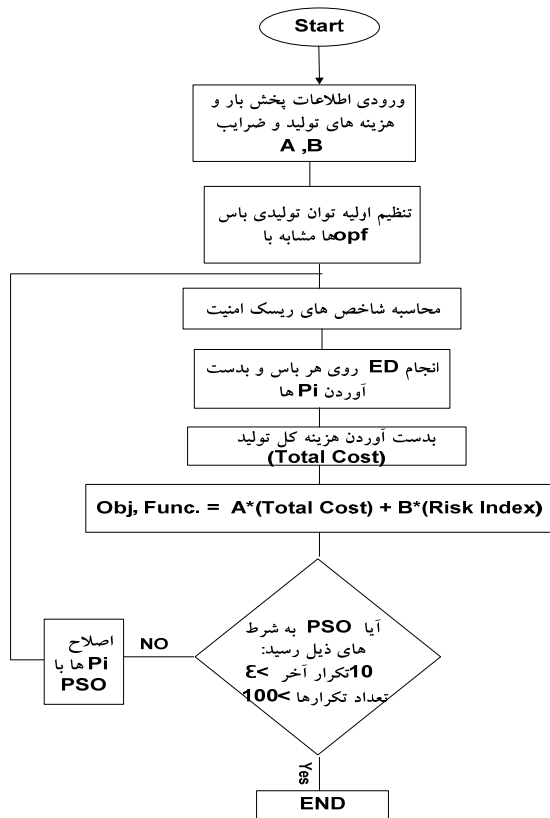
۶-۲ روش پیشنهادی

همان طور که در بخش قبل اشاره شد تقریباً در تمامی مراجع، امنیت با استفاده از معیار قطعی ارزیابی شده است. با استفاده از معیار بر اساس ریسک می‌توانیم سطح امنیت سیستم را به‌صورت کمی اندازه‌گیری و همچنین عدم قطعیت‌های موجود در سیستم را نیز شبیه‌سازی کنیم. در اکثر قریب به اتفاق مراجع، امنیت به‌صورت قید در مسأله برنامه‌ریزی مجدد تولید آمده است و همچنین امنیت استاتیکی و امنیت دینامیکی به‌صورت جداگانه لحاظ شده است.

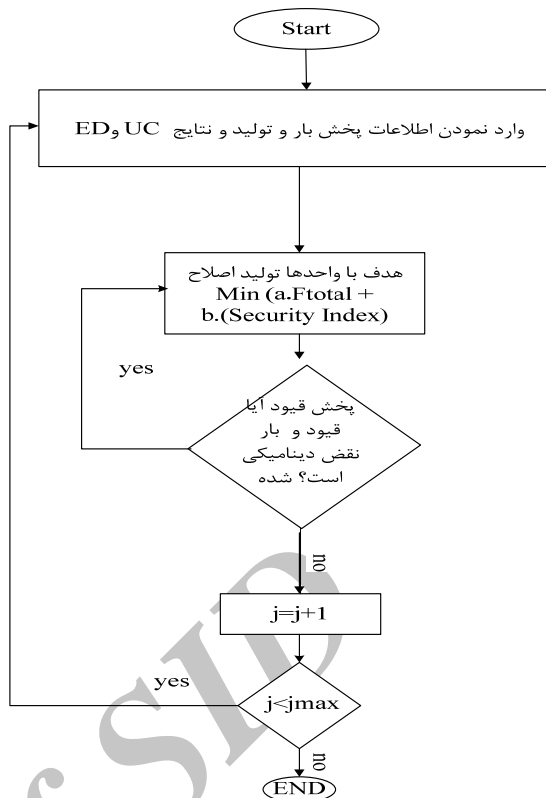
روش پیشنهادی در این مقاله جهت برنامه‌ریزی مجدد تولید به‌عنوان یکی از تصمیمات بهره‌بردار بر اساس بهبود شاخص ریسک امنیت استاتیکی در تابع هدف و همچنین لحاظ امنیت دینامیکی به‌عنوان قید در مسأله برنامه‌ریزی مجدد تولید می‌باشد. در حقیقت مسأله برنامه‌ریزی مجدد تولید به‌صورت یک مسئله چندهدفه با حداقل‌سازی هم‌زمان شاخص ریسک امنیت استاتیکی و هزینه تولید با در نظر گرفتن قیود پخش بار و بررسی قیود امنیت دینامیکی فرمول‌بندی و حل شده است.

تفاوت در حالتی که شاخص ریسک امنیت در تابع هدف مسأله قرار می‌گیرد در مقایسه با حالتی که شاخص ریسک امنیت در قید مسأله قرار می‌گیرد این خواهد بود که در حالت اول بهبود شاخص ریسک حداکثر مقدار خود را خواهد داشت، لیکن اگر در قید مسأله به‌صورت قید نامساوی

1. Multi Objective
2. Particle Swarm Optimization



شکل ۵: الگوریتم اصلاح تولید واحدها با استفاده از PSO.



شکل ۴: الگوریتم برنامه‌ریزی مجدد تولید بر اساس حداقل‌سازی هزینه تولید و شاخص ریسک.

که c_1 و c_2 ثابت‌های مثبت بوده و r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در $[0, 1]$ می‌باشند. ضرایب c_1 و c_2 برابر در نظر گرفته شده‌اند و در هر تکرار به‌صورت خطی از 0.5 تا 2.05 افزایش می‌یابند. در این مطالعه، مقادیر بهینه پارامترهای متغیر (که تابع هدف را حداقل می‌کند) به دقت با استفاده از PSO محاسبه می‌شود. در یک اجرای متداول PSO، یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌های تصادفی تولید می‌شود. هر جزء، مسیر خود در فضای پاسخ را با توجه به مناسب‌ترین پاسخ و فاصله‌اش تا آن هماهنگ می‌نماید. مقدار تابع هدف ذخیره می‌گردد و بهترین مقادیر سایر اجزا نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم PSO در مدل سراسری از بهترین مقدار به‌دست آمده در کل مجموعه استفاده می‌نماید و در مدل محلی آن، اطلاعات بهترین مقدار موجود در اطراف هر جزء به آن جزء منتقل می‌شود. الگوریتم PSO در هر مرحله، سرعت و موقعیت همه ذرات را با توجه به بهترین مقدار هر جزء و بهترین حل کل مجموعه تغییر می‌دهد.

عملکرد PSO به ترتیب شامل دو مرحله زیر است:

- ۱) محاسبه تابع هدف برای هر یک از ذرات موجود در جمعیت برای انجام این کار: سیستم بایستی شبیه‌سازی گردد تا مقدار تابع هدف به‌دست آید.
- ۲) PSO بعد از آن با توجه به (۳) و (۴) موقعیت ذرات خود را به‌روز می‌نماید.

این دو مرحله جمعیت به جمعیت تکرار می‌گردد تا جایی که معیاری برای توقف تکرارها با توجه به جستجو برای بهره‌های بهینه حاصل شود. در این مطالعه با در نظر گرفتن روش تابع‌های جریمه^۳، مسئله مقید بالا به‌صورت مسأله‌ای نامقید در آمده و سپس بهینه شده است. به عبارت دیگر، چنانچه هر کدام از ذرات در خارج از قیود مسأله قرار گیرند،

به ناحیه حل بهتری حرکت می‌کنند. چهار الگوریتم تکاملی معروف (الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی تکاملی، استراتژی‌های تکاملی و برنامه‌ریزی ژنتیک) به دلیل تکامل رؤیت‌شده از طبیعت شکل گرفته‌اند. آنها اصل رقابت و بقای اصل را اقتباس کرده‌اند. روش PSO به‌گونه‌ای دیگر، شبیه‌سازی رفتار اجتماعی می‌باشد. این روش از اصل تعاون و رقابت میان افراد اقتباس شده است.

به هر حال، این روش نسبت به الگوریتم‌های تکاملی و ژنتیک دارای مزایایی می‌باشد. اولین مزیت PSO حافظه‌دار بودن آن است. هر جزء، بهترین حل خود^۱ را به یاد می‌سپارد. به همین ترتیب گروه نیز بهترین حل^۲ را به خاطر می‌سپارد. مزیت دیگر PSO این است که جمعیت اولیه آن نگه داشته می‌شود و بنابراین نیازی برای عمل کردن عملگرها بر روی جمعیت- که فرایندی زمان‌بر بوده و حافظه را اشغال می‌کند- نمی‌باشد.

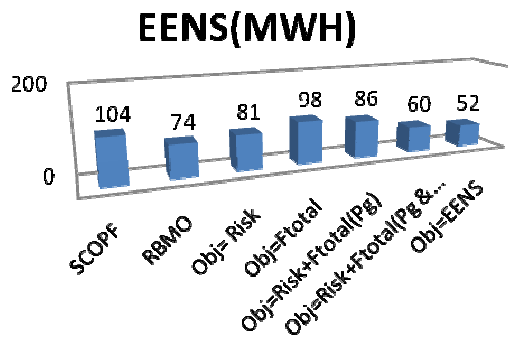
در سیستم PSO، هر جزء، پرواز خود را در فضای جستجوی چندبعدی با توجه به تجربه پرواز و تجربه پرواز همراهان تنظیم می‌کند.

هر جزء یک راه حل کاندید برای مسأله را نشان می‌دهد. هر جزء به‌عنوان نقطه‌ای در یک فضای D بعدی رفتار می‌نماید. جزء i ام به‌صورت $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ نمایش داده می‌شود. بهترین موقعیت قبلی (بهترین مقدار مناسب به‌دست آمده) برای هر جزء ضبط شده و به‌صورت $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ نشان داده می‌شود. معیار بهترین جزء در میان تمام اجزای جمعیت با علامت g نشان داده می‌شود. اجزا با توجه به معادلات زیر به‌روز می‌شوند

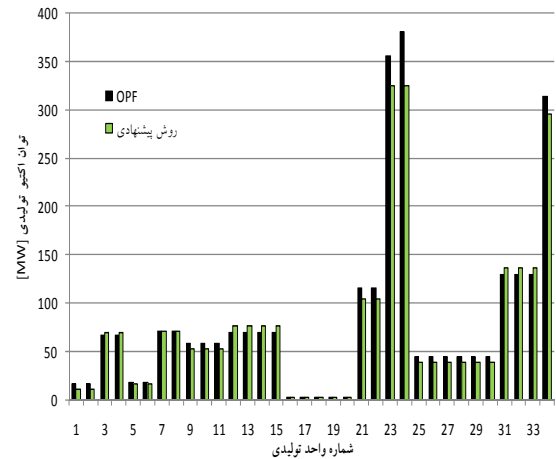
$$V_{id} = V_{id} + c_1 r_1 (X_{id} - X_{id}) + c_2 r_2 (X_{gd} - X_{id}) \quad (9)$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \quad (10)$$

1. Local Best
2. Global Best



شکل ۷: مقدار انتظاری انرژی تأمین نشده در حالات مختلف.



شکل ۶: مقایسه روش پیشنهادی و OPF در توان تولیدی واحدهای شبکه ۲۴ شین IEEE.

جدول ۱: مقایسه روش پیشنهادی و SCOPF در هزینه و شاخص‌های امنیت.

	توابع هدف						
	SCOPF [۱۲]	RBM [۱۲]	Risk	Cost	Risk & Cost Risk & Cost (Vg & Pg)	Cost (Cut - off Point)	
Cost [\$]	۴۵۱۳۸۳	۴۴۶۴۲۰	۴۶۳۵۴۱	۴۴۴۴۸۰	۴۴۶۳۷۱	۴۴۶۷۳۸	۴۵۱۵۳۲
Low Voltage Index	۰٫۴۹	۰٫۴۷	۰٫۵۱	۰٫۶۳	۰٫۴۵	۰٫۴۲	۰٫۴۹
OverLoad Index	۱٫۵۱	۰٫۸۴	۰٫۸۷	۰٫۸۷	۰٫۸۸	۰٫۸۷	۰٫۹۹
EENS (MWH)	۱۰۴	۷۴	۸۱	۹۸	۸۶	۶۰	۶۴
Losses (MWH)	۴۳٫۶	۳۹٫۹	۴۷٫۳	۳۱٫۷	۳۹٫۵	۳۸٫۸	۴۲٫۵
Transient Stability Risk Index (Cut - off Point)	-۰٫۷۱	-۰٫۷۰	-۰٫۷۰	-۰٫۷۰	-۰٫۷۸	-۰٫۷۸	-
Transient Stability Risk Index (Cut - off Point)	-	-	-	-	-	-	-۰٫۸۸

با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی پخش بار بهینه به‌عنوان مرجع خواهیم داشت

$$\text{Total Cost} = 451383 \$ \Rightarrow A = 1,7723 \times 10^{-6}$$

$$\text{Security Risk Index} = 0,7 \Rightarrow B = 0,1$$

با در نظر گرفتن مقادیر A و B مذکور در تابع هدف مقدار شاخص ریسک امنیت، هزینه کل سیستم و تولید واحدها به این صورت به‌دست می‌آید: هزینه کل تولید $446371 \$$ ، شاخص ریسک افت ولتاژ $0,45$ و شاخص ریسک اضافه بار $0,88$ است.

توان تولیدی واحدهای شبکه ۲۴ شین IEEE حاصل از روش پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده و با نتایج به‌دست آمده از OPF^۴ مقایسه شده است. در جدول ۱ نتایج روش پیشنهادی با روش OPF مقایسه شده است. در آخرین ستون جدول مقدار بهبود روش پیشنهادی در مقایسه با روش OPF به درصد آورده شده است.

همان گونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد، استفاده از الگوریتم پیشنهادشده در این مقاله در مقایسه با SCOPF^۵ موجب بهبود چشمگیر امنیت شبکه شده و هزینه بهره‌برداری کل سیستم را نیز کاهش داده است. دلیل این امر تغییر در آرایش تولید به‌وسیله الگوریتم اصلاح تولید واحدها مبتنی بر PSO می‌باشد. به‌وسیله این الگوریتم، اکثر جواب‌های قابل قبول (حلهایی که قیود بهره‌برداری مسئله را ارضا می‌نمایند) مورد تحلیل قرار گرفته و احتمال از دست دادن جواب بهینه مطلق بسیار ناچیز می‌باشد. بر این اساس همان گونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است،

جریمه‌های متناسب با فاصله‌ای که با مرز قید دارند به مقدار آنها اضافه می‌شود. این کار موجب می‌شود که ذرات خارج‌شده از چهارچوب حل مسئله به سرعت به داخل فضای حل بازگردند

$$\text{if } x_{id} < LB_d \quad \text{Value } i = \text{Value } i + \text{Penalty} \times (LB_d - x_{id}) \quad (11)$$

$$\text{if } x_{id} > UB_d \quad \text{Value } i = \text{Value } i + \text{Penalty} \times (x_{id} - UB_d) \quad (12)$$

که LB_d ^۱ و UB_d ^۲ به ترتیب حد پایین و حد بالای بعد d می‌باشند و همچنین $Value i$ مقدار جزء i ام است. الگوریتم اصلاح تولید واحدها با استفاده از PSO در شکل ۵ آمده است.

۷- نتایج عددی

روش پیشنهادی بر روی شبکه ۲۴ شین IEEE آزمایش شده است. با استفاده از الگوریتم PSO تولید واحدها به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد که تابع هدف $(A \times (\text{Total Cost}) + B \times (\text{Security Risk Index}))$ حداقل شود. مقادیر A و B با توجه به روش برنامه‌ریزی آرمان وزن‌دار^۳ به‌گونه‌ای قرار داده شده است که سهم شاخص ریسک امنیت در تابع هدف فوق تقریباً ۲۰٪ و سهم کل هزینه تولید کل سیستم ۸۰٪ باشد $A \times (\text{Total Cost}) = 0,8$, $B \times (\text{Security Risk Index}) = 0,2$

4. Optimal Power Flow
5. Security Constrained OPF

1. Lower Bound
2. Upper Bound
3. Weighted Goal Programming

به‌طور مشخص دیده می‌شود استفاده از شاخص‌های ریسک باعث تغییر چشمگیر در تصمیمات فنی و اقتصادی سیستم گردیده و نسبت به روش‌های سنتی منجر به نتایج بهتری می‌گردد.

مراجع

- [1] J. D. McCalley, et al., "Probabilistic security assessment for power system operations," in *Proc. Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, vol. 1, pp. 212-220, Jun. 2004.
- [2] N. Ming, J. D. McCalley, V. Vittal, and T. Tayyib, "Online risk-based security assessment," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 258-265, Feb. 2003.
- [3] IEEE Reliability Test System Task Force of Applications of Probability Methods Subcommittee, "IEEE reliability test system - 96," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, Aug. 1999.
- [4] H. He, J. Guo, Y. Song, and D. Zhang, "Risk based probabilistic security evaluation algorithm of bulk power system," in *Proc. 3rd Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008*, pp. 1231-1236, 6-9 Apr. 2008.
- [5] K. Bell and M. Rios, *Value of Security - User Guide*, Manchester Centre for Electrical Energy, Manchester, UK, Oct. 1999.
- [6] D. Z. Fang, Y. Xiaodong, S. Jingqiang, Y. Shiqiang, and Z. Yao, "An optimal generation rescheduling approach for transient stability enhancement," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 386-394, Feb. 2007.
- [7] E. Vaahedi, W. Li, T. Chia, and H. Dommel, "Large scale probabilistic transient stability assessment using B. C. Hydro's on-line tools," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 661-667, May 2000.
- [8] W. Li and J. K. Korczynski, "Risk evaluation of transmission systems operation modes: concept, method, and application," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1124-1129, Jan. 2002.
- [9] W. Li and J. K. Korczynski, "A reliability based approach to transmission maintenance planning and its application in BC hydro system," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 303-308, Jan. 2004.
- [10] A. L. Bettiol, D. Ruiz - Vega, D. Ernst, L. Wehenkel, and M. Pavella, "Transient stability - constrained optimal power flow," in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, p. 62, Budapest, Hungary, Aug. 1999.
- [11] L. Chen, Y. Tada, H. Okamoto, R. Tanabe, and A. Ono, "Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 48, no. 3, pp. 327-339, Mar. 2001.
- [12] L. Nepomuceno and P. S. da Silva, "An active/reactive predispach model incorporating ramp rate constraints solved by dual decomposition/Lagrangian relaxation," in *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition: Latin America*, pp. 633-638, Nov. 2004.
- [13] L. D. Aryaa, L. S. Titareb, and D. P. Kotharic, "An approach to mitigate the risk of voltage collapse accounting uncertainties using improved particle swarm optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 9, no. 4, pp. 1197-1207, Sep. 2009.
- [14] J. Hazra and A. K. Sinha, "Congestion management using multiobjective particle swarm optimization," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1726-1734, Nov. 2007.
- [15] G. Baskar and M. R. Mohan, "Contingency constrained economic load dispatch using improved particle swarm optimization for security enhancement," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 4, pp. 615-621, Apr. 2009.
- [16] W. Ongsakul and N. Petcharak, "Fast Lagrangian relaxation for constrained generation scheduling in a centralized electricity market," *Int. J. Electrical Power and Energy Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 46-59, Jan. 2008.
- [17] F. Manfred, Bedrinana, Student Member, IEEE, A. Joao Bosco, A. F. Carlos, Murari, Member, IEEE, and A. Carlos Castro, Senior Member, IEEE, "Decisions in power system operation based on fuzzy economic and environmental Dispatch," 978-1-4244-2190-9/07/\$25.00 ©2007 IEEE.
- [18] C. Rani, M. Rajesh Kumar, and K. Pavan, "Multi-objective generation dispatch using particle swarm optimization," in *Proc. of India Int. Conf. on Power Electronics*, pp. 421-424, 19-21 Dec. 2006.
- [19] F. Xiao and J. D. McCalley, "Power system risk assessment and control in a multiobjective framework," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 78-85, Feb. 2009.

با استفاده از روش پیشنهادی برای تنظیم تولید واحدها تولید برخی واحدهای کم‌هزینه کاهش یافته (مانند واحدهای شماره ۲۱ تا ۲۴ و ۳۴) و تولید برخی واحدهای پرهزینه افزایش یافته است (مانند واحدهای شماره ۱۲ تا ۱۵ و ۳۱ تا ۳۳)، اما در نهایت کل هزینه بهره‌برداری سیستم با وجود بهبود امنیت شبکه کاهش یافته است که قابلیت این الگوریتم در بهره‌برداری بهینه از سیستم را نشان می‌دهد.

همچنین در این مقاله جهت محاسبه مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده در یک ساعت پس از تعیین مقدار ولتاژ و توان اکتیو ژنراتورها الگوریتم مربوطه اجرا شده است. شایان ذکر است بهبود شاخص‌های فیزیکی ریسک امنیت باعث کاهش چشمگیر مقدار EENS می‌شود و در حالتی که تابع هدف حداقل کردن مقدار انرژی تأمین‌نشده می‌باشد، مقدار به‌دست آمده برای آن ۵۲ مگاوات ساعت بوده که بهبود چشم‌گیری را نسبت به حالات دیگر نشان می‌دهد. شکل ۷ مقدار EENS به‌دست آمده با توابع هدف متفاوت را نشان می‌دهد.

۸- نتیجه‌گیری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با تغییر در تابع هدف پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی مجدد تولید، نتایج تغییر یافته و در برخی موارد بهبود می‌یابد. به‌عنوان مثال تابع هدف حداقل کردن هزینه تولید و حداکثر کردن امنیت، منجر به نتایج بهتری در مقایسه با تابع یک‌هدفه حداقل کردن هزینه تولید و در نظر گرفتن امنیت به‌عنوان قید می‌گردد. مشاهده می‌شود تلفات شبکه در حالتی که تابع هدف تنها حداقل کردن هزینه تولید می‌باشد در کمترین حالت خود بوده و در حالتی که شاخص ریسک امنیت به تنهایی در تابع هدف قرار می‌گیرد بیشترین مقدار خود را دارد که نشان می‌دهد حداکثر کردن امنیت می‌تواند باعث افزایش هزینه بهره‌برداری و افزایش تلفات گردد.

همچنین در حالتی که تابع هدف به‌صورت چندهدفه با حداقل سازی هزینه تولید و حداکثر سازی امنیت در نظر گرفته می‌شود نتایج نسبت به باقی موارد بهبود می‌یابد. در این حالت اگر علاوه بر توان اکتیو واحدها ولتاژ مرجع شین‌ها نیز به‌عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شوند بهترین نتایج از نظر حداقل هزینه تولید، حداقل تلفات و بهبود در شاخص ریسک ولتاژ مشاهده می‌شود.

در [۱۹] امنیت دینامیکی در نظر گرفته نشده است. اما محاسبه شاخص ریسک امنیت دینامیکی در نقطه کار نهایی ارائه شده در این مرجع محاسبه شده و برابر ۰/۷۱- می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود شاخص پایداری گذرا به دو صورت زیر در قید قرار داده شده است:

- الف) نقطه برش برابر صفر
ب) نقطه برش برابر ۰/۸۰-

بدیهی است شاخص ریسک هر چه قدر کوچک‌تر باشد در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. در حالت (الف) قید مورد نظر در تمامی موارد رعایت شده است. در حالت (ب) که نقطه برش کوچک‌تر از حد معمول به‌دست آمده فرض شده است، هزینه تولید نیز جهت دستیابی به قید مورد نظر افزایش یافته است.

همان‌گونه که از نتایج به‌دست آمده مشخص است استفاده از تابع هدف پیشنهادی موجب بهبود پاسخ پخش بار هم از نظر هزینه کل تولید سیستم و هم از نظر مقدار ریسک سیستم می‌شود و پاسخی بهتر از پخش بار بهینه حاصل می‌گردد. همچنین باعث کاهش چشمگیر مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده می‌شود.

حسین سیفی در سال ۱۳۵۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز و در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه یومیست منچستر در کشور انگلستان دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۶۸ تاکنون به‌عنوان مدرس و هیأت علمی در دانشگاه تربیت مدرس به کار مشغول بوده و هم‌اکنون دارای جایگاه استاد تمام می‌باشد. ایشان در این سال‌ها علاوه بر انجام تحقیقات علمی دارای سوابق و مسئولیت‌هایی از جمله رئیس دانشکده مهندسی و معاون پژوهشی دانشگاه بوده‌اند و هم‌اکنون رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان موضوعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت، بازار برق و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

مرتضی سعیدی مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) در رشته مهندسی برق- گرایش شبکه‌های انتقال و توزیع و مدرک کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه تربیت مدرس در رشته مهندسی برق- گرایش قدرت اخذ نمود. از سال ۱۳۸۷ تا سال ۱۳۹۰ به‌عنوان کارشناس سرمایه‌گذاری در شرکت سرمایه‌گذاری صنعت برق و آب (صبا) مشغول به کار بوده و هم‌زمان نیز مسئولیت هماهنگی دبیرخانه توسعه تولید پراکنده شرکت توانیر را بر عهده داشته است. وی هم‌اکنون به‌عنوان مشاور سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تولید پراکنده به کار اشتغال دارد. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی امنیت شبکه‌های انتقال و توزیع برق، تولید پراکنده برق، بحث‌های مرتبط با توسعه سرمایه‌گذاری در سیستم تجدید ساختار شده، تجارت انرژی الکتریکی و روش‌های نوین تامین مالی در پروژه‌های صنعت برق می‌باشد.

Archive of SID