

ارائه روشی مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان و

ریسک در شبکه‌های قدرت

جواد کافی کندی^۱، مریم رضانی^۲ و حمید فلقی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

kafi.javad@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

mramezani@ieee.org

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

falaghi@ieee.org

چکیده: با افزایش روز افزون میزان و ارزش تقاضای مصرف برق در دهه‌های اخیر، ارتباط، امنیت و به هم پیوستگی شبکه برق اهمیت زیادی یافته است. شبکه‌های انتقال به عنوان عنصر اصلی و ارتباطی در شبکه قدرت، نقش بسیار پر رنگی در تأمین نیاز مصرف‌کنندگان دارند. شاخص‌های گوناگونی برای ارزیابی شبکه انتقال تعریف شده است، که در این میان شاخص قابلیت تبادل برای تعیین توانایی شبکه برای انتقال توان در شرایط مختلف اقتصادی در آینده ارزیابی می‌شود. در این مقاله ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل صورت گرفته و با حل یک مسأله بهینه‌سازی دوهدفه مقادیر متفاوت TTC به ازای ریسک‌های گوناگون حاصل شده است. اهداف در نظر گرفته شده در این بهینه‌سازی، افزایش میزان قابلیت تبادل توان و کاهش میزان ریسک می‌باشد. در ارزیابی احتمالی TTC عدم قطعیت واحدهای تولیدی و خطوط مورد توجه قرار گرفته و برخی از خطاهای مهم شبکه لحاظ شده‌اند. برای انتخاب خطاها از احتمال وقوع خطا و TTC متناظر با آن خطا استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی روش‌های پیشنهادی، از شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، قابلیت تبادل توان، ریسک، شبیه‌سازی مونت کارلو.

۱- مقدمه

انتقال و جلوگیری از بروز اضافه بارها یا افت ولتاژهای غیر مجاز در شبکه تعریف می‌گردد [۱]. قابلیت تبادل کلی (TTC)^۲ به عنوان شاخصی برای انجام تبادلات توان الکتریکی در شبکه انتقال به هم پیوسته استفاده می‌شود. هرچند این شاخص در شبکه‌های سنتی نیز بیشتر با در نظر گرفتن اهداف طراحی ارزیابی می‌شده است، اما انجام تجدید ساختار در صنعت برق و ظهور مفاهیمی از قبیل: حقوق فیزیکی انتقال، مدیریت ریسک انتقال و ... سبب شده است که تعیین دقیق مقدار قابلیت تبادل، به یکی از اطلاعات با ارزش برای بازیگران بازار از یک سو و برای طراحان و بهره‌برداران از سوی دیگر تبدیل شود.

شبکه‌های انتقال که وظیفه انجام تبادلات توان میان نقاط تولید و مصرف را بر عهده دارند، نقش مهمی در سیستم‌های قدرت ایفا می‌نمایند. شاخص قابلیت تبادل (TC)^۱ برای اطمینان از بهره‌برداری مناسب و ایمن شبکه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۱/۲۰

نام نویسنده مسئول : مریم رضانی

نشانی نویسنده مسئول : ایران - بیرجند - شوکت آباد - دانشگاه

بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

ارائه روشی مبتنی بر بهینه سازی چند هدفه برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان و ریسک در شبکه‌های قدرت

بررسی و ارزیابی اثر عدم قطعیت‌های سیستم مانند: عدم قطعیت در الگوی راهبردی تولید، نوسان‌های بار و دسترسی به تجهیزات، از قبیل خطوط انتقال و ژنراتورها بر روی قابلیت تبادل از روش‌های احتمالاتی استفاده می‌شود [۱۰]. در مراجع [۱۱ و ۱۲] از روش مونت کارلو برای محاسبه TTC استفاده شده است. در مرجع [۱۳] از روش مونت کارلوی ترتیبی برای شبیه‌سازی پیشامدها استفاده و برای هر پیشامد با در نظر گرفتن شبکه AC و قیود دینامیکی به محاسبه TTC پرداخته شده است. مرجع [۱۴] از روش مونت کارلو برای انتخاب پیشامد و از پخش بار DC برای بهینه کردن کاهش بار و حداکثر قابلیت تبادل استفاده کرده است. در مرجع [۱۵] از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای انتخاب سطح بار و ضریب بار استفاده شده است. همچنین، از روش RPF برای محاسبه TTC و توزیع احتمالاتی آن استفاده کرده است. در مطالعاتی از قبیل [۷ و ۸ و ۱۶ و ۱۷ و ۱۸] به تنهایی به بیشینه نمودن تبادلات توان بین نواحی پرداخته و در برخی مطالعات به جنبه‌های اقتصادی نیز توجه شده است و مقدار TTC تحویل نشده، به شیوه احتمالاتی محاسبه گردیده است [۹]. در مرجع [۱۹] بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو، حالت‌های پایه مختلفی از شبکه انتخاب و قابلیت تبادل در آنها محاسبه گردیده است. در سناریوهای شبیه‌سازی شده در این مقاله با فرض سطح بار ثابت، شرایط مختلف خروج منابع تولید در نظر گرفته شده است.

در این مقاله ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل در قالب یک مسأله بهینه‌سازی دو هدفه مطرح می‌گردد. در خروجی این بهینه‌سازی، دامنه وسیعی از مقادیر قابلیت تبادل توان، با مقادیر متنوعی از ریسک، در اختیار برنامه‌ریزان، بهره‌برداران و بازیگران بازار انرژی الکتریکی قرار می‌گیرد. TTC با افزایش تولید در ناحیه تولید کننده و بار در ناحیه مصرف کننده محاسبه می‌شود. برای حل مسأله از روش NSGA (II) استفاده شده است. در این روش از طریق محدود کردن افزایش بار در ناحیه مصرف، مقدار TTC محدود و سپس تأثیر خطاهای مختلف بر این شبکه ارزیابی می‌شود و ریسک متناظر با این سطح TTC محاسبه می‌گردد. از آنجا که تعداد خطاهای محتمل در یک شبکه

ATC^۳ به بخشی از قابلیت تبادل باقیمانده در شبکه انتقال اطلاق می‌شود که می‌تواند افزون بر تبادلات برنامه‌ریزی شده برای فعالیت‌های اقتصادی آتی استفاده شود. از نظر ریاضی ATC به صورت تفاضل قابلیت تبادل کلی از حاشیه قابلیت اطمینان انتقال (TRM)^۴ و حاشیه مفید ظرفیت (CBM)^۵ و مجموع توافق‌های موجود انتقال (ETC)^۶ (با در نظر گرفتن خدمات خرده فروشی) است و به صورت زیر بیان می‌شود [۱]:

$$ATC = TTC - TRM - CBM - ETC \quad (1)$$

TTC عاملی کلیدی در تعیین مقدار ATC می‌باشد [۲]. شیوه‌های مختلفی برای محاسبه TTC وجود دارد که به دو صورت قطعی و احتمالاتی به ارزیابی TTC می‌پردازند. روش‌های قطعی شامل CFP^۷، RPF^۸، SA^۹ و OPF^{۱۰} است. روش پخش بار تداومی (CPF) توانایی بررسی محدودیت‌های پایداری دینامیکی و لثاژ و پایداری حالت ماندگار را دارد [۳]. روش‌های مبتنی بر پخش بار پی‌درپی (RPF) به مجموعه‌ای از تکرار پخش بار احتیاج دارد [۴]. روش‌های آنالیز حساسیت (SA) یکی از روش‌های ارزیابی TTC به صورت قطعی است که مبتنی بر پخش بار DC یا AC است که علی‌رغم سرعت بالا، دقت محاسبات آن به علت تکیه آن بر روی تقریب خطی مدل سیستم قدرت پایین است [۵]. در مراجع [۶ و ۹] از روش OPF با تکنیک SQP^{۱۱} برای محاسبه TTC استفاده شده است. در مآخذ [۹] برای کاهش زمان بهینه‌سازی از روش جستجوی دوبخشی^{۱۲} استفاده گردیده است.

روش‌های قطعی تعیین قابلیت تبادل، مقادیر بسیار محافظ کارانه و دور از واقعیت برای یک شبکه در نظر می‌گیرند که سبب بهره‌برداری غیراقتصادی و کم بازده از سیستم انتقال می‌گردد [۲]. برخی مطالعات از این روش‌ها برای محاسبه TTC استفاده کرده‌اند و با در نظر گرفتن خطاهای یگانه سیستم، کمترین مقدار محاسبه شده را برای TTC در نظر گرفته‌اند [۷ و ۸]. روش‌های احتمالاتی می‌تواند اطلاعات بیشتری از قبیل: امید ریاضی، تابع توزیع احتمالاتی TTC و ریسک متناظر با هر سطح از TTC را نسبت به روش‌های قطعی فراهم کنند [۹]. همچنین برای

توان و همچنین قيود خطوط ارتباطی بین این دو ناحیه است.

با استفاده از روش OPF می‌توان قابلیت تبادل توان بین دو ناحیه را تحت شرایط تعریف شده، تعیین نمود. در این روش سعی می‌شود به منظور افزایش تبادل توان بین نواحی صادرکننده و واردکننده پارامترهای کنترلی شبکه، از جمله توان‌های حقیقی و موهومی ژنراتورها در ناحیه صادرکننده، توان مصرفی نقاط بار در ناحیه واردکننده، ولتاژ ژنراتورها، تپ ترانسفورماتورها، خازن‌های قابل کلید زنی و راکتورها و همچنین جابه‌جا کننده‌های فاز در شبکه تعیین شوند؛ ضمن آنکه قيود حاکم بر سیستم شامل حد حرارتی خطوط، ولتاژ شین‌ها، حداکثر و حداقل توان تولیدی ژنراتورها و حد پایداری گذرا و ولتاژ رعایت شود.

فرمول‌بندی ریاضی ارزیابی قابلیت تبادل کلی در شبکه، مبتنی بر روش OPF به صورت زیر است:

$$Max(\sum_{i \in Source} P_{Gi}) \quad (2)$$

قيود در نظر گرفته شده برای این تابع هدف به صورت زیر هستند:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^N |U_i| |U_j| (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$\forall i \in N$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^N |U_i| |U_j| (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$\forall i \in N$$

$$P_{Gi}^{\min} < P_{Gi} < P_{Gi}^{\max} \quad \forall i \in Source \quad (5)$$

$$Q_{Gi}^{\min} < Q_{Gi} < Q_{Gi}^{\max} \quad \forall i \in Source \quad (6)$$

$$P_{Dj}^{\min} < P_{Dj} < P_{Dj}^{\max} \quad \forall j \in Sink \quad (7)$$

$$\frac{Q_{Dj}}{P_{Dj}} = constant \quad \forall j \in Sink \quad (8)$$

$$|U_j|_{\min} < |U_j| < |U_j|_{\max} \quad \forall j \in N \quad (9)$$

$$S_{i-j} < S_{i-j}^{\max} \quad \forall (i-j) \in Lines \quad (10)$$

که در آن:

N : مجموعه کل شین‌های شبکه

Y_{ij} و θ_{ij} : زاویه و اندازه المان (i,j) در ماتریس ادیتانس شبکه

V_i و δ_i : زاویه و اندازه ولتاژ شین i آم

P_{Dj} و Q_{Dj} : توان اکتیو و راکتیو مصرفی در شین j آم

P_{Gi} و Q_{Gi} : توان اکتیو و راکتیو تولیدی در شین i آم

(به خصوص شبکه‌های واقعی) بسیار زیاد است، بخشی از خطاهای مهم در ارزیابی لحاظ شده‌اند. در کلیه مطالعات از روش مبتنی بر بخش بار بهینه برای محاسبات قابلیت تبادل و کمینه نمودن میزان قطع بار ناشی از خروج تجهیزات سیستم استفاده شده است. از شبیه‌سازی مونت کارلو و با لحاظ عدم قطعیت در واحدهای تولیدی و خطوط برای بررسی کارایی روش پیشنهادی استفاده شده است. با توجه به این که تصمیم‌گیری انسانی همواره با خطا همراه است، برای انتخاب یک جواب از بین جواب‌های جبهه کارا به عنوان جواب بهینه، از تصمیم‌گیری فازی استفاده می‌شود. برای نشان دادن کارایی روش‌های پیشنهادی، از شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS استفاده گردیده است.

۲- نحوه محاسبه TTC در شبکه

برای تعیین قابلیت تبادل، مدل‌سازی و شبیه‌سازی آثار تبادل توان بین دو ناحیه مختلف ضروری به نظر می‌رسد. این کار با شبیه‌سازی تبادل توان بین دو ناحیه صورت می‌پذیرد. به طور کلی، مراحل محاسبه قابلیت تبادل را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- ارائه مدل شبکه در حالت پایه

حالت پایه شبکه، وضعیتی از سیستم است که در آن تمام قيود در شبکه رعایت شده‌اند و سیستم پایدار است.

- تعیین ناحیه تولید و مصرف

از آنجا که قابلیت تبادل کمیته جهت‌دار است، برای محاسبه قابلیت تبادل بین دو ناحیه یا هر دو نقطه از شبکه باید ناحیه صادرکننده^{۱۳} و ناحیه واردکننده^{۱۴} مشخص شوند، سایر نواحی نیز به عنوان ناحیه بیرونی در نظر گرفته می‌شوند.

- تبادل توان در جهت مطلوب

برای تعیین قابلیت تبادل باید توان مبادله شده بین دو ناحیه صادر کننده و ناحیه وارد کننده را تا آنجا افزایش داد که حداقل یکی از قيود فیزیکی شبکه نقض گردد (میزان تولید و مصرف در نواحی خارجی ثابت است).

- رسیدن شبکه به قيود آن

این قيود شامل محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای محاسبه TTC در هر دو ناحیه وارد کننده و صادر کننده

ارائه روشی مبتنی بر بهینه سازی چند هدفه برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان و ریسک در شبکه‌های قدرت

۳-۱- ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان با

استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو

برای مدل‌سازی عدم قطعیت در ارزیابی قابلیت تبادل می‌توان از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده نمود و برای هر وضعیت، مقدار قابلیت تبادل را با به کارگیری روش OPF به دست آورد [۱۹].

روند ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل با شبیه‌سازی مونت کارلو به ترتیب زیر است:

۱- انتخاب یک وضعیت بهره‌برداری شبکه: بر اساس اطلاعات مربوط به بار و احتمال وقوع خطا، یک وضعیت بهره‌برداری شبکه انتخاب می‌شود و در این وضعیت، حالت در مدار بودن یا خروج تجهیزات سیستم به شکل تصادفی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین می‌گردد.

۲- بررسی توازن بین تولید و مصرف توان: با توجه به احتمال خروج واحدهای تولیدی یا خطوط انتقال، ممکن است توازن بین تولید و مصرف در شبکه به هم بخورد. لذا به منظور برقراری مجدد توازن، تفاوت تولید و مصرف بین واحدهای تولیدی در مدار به نسبت سهمی که از تولید دارند، توزیع می‌شود؛ یعنی واحدی که تولید بیشتری دارد، سهم بیشتری از این تفاوت را جبران می‌کند. البته، هر روش دیگری نیز برای برقراری تعادل می‌تواند استفاده شود.

۳- آرام‌سازی شبکه: برای محاسبه قابلیت تبادل باید شبکه در حالت پایدار (که قیود رعایت شده باشند) قرار داشته باشد. بنابراین، چنانچه به علت وقوع خطا، برخی از قیود نقض شده باشند، لازم است با استفاده از اعمال اصلاحی که شامل توزیع مجدد توان بین ژنراتورها^{۱۵} و قطع بار^{۱۶} است، شبکه آرام شود و قیود مرتفع گردند. برای این منظور از پخش بار بهینه، استفاده می‌شود.

۴- محاسبه قابلیت تبادل توان در شبکه با استفاده مدل ریاضی بیان شده توسط روابط (۲) تا (۱۰).

۵- تکرار مراحل فوق تا زمانی که معیار همگرایی مورد نظر حاصل گردد.

با استفاده از داده‌های حاصل از محاسبه قابلیت تبادل توان در تکرارهای مختلف شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان مقدار متوسط نهایی قابلیت تبادل و ضریب پراکندگی مربوط

$$P_{Gi}^{\min} \text{ و } P_{Gi}^{\max} \quad \text{حد بیشینه و کمینه توان حقیقی تولیدی در شین } \Delta_m$$

$$Q_{Gi}^{\min} \text{ و } Q_{Gi}^{\max} \quad \text{حد بیشینه و کمینه توان موهومی تولیدی در شین } \Delta_m$$

$$P_{Dj}^{\min} \text{ و } P_{Dj}^{\max} \quad \text{حد بیشینه و کمینه توان حقیقی مصرفی در شین } \Delta_m$$

$$S_{i-j}^{\max} \text{ و } S_{i-j}^{\min} \quad \text{توان ظاهری و توان ظاهری بیشینه عبوری از خط } j-i$$

$$|U_j|_{\max} \text{ و } |U_j|_{\min} \quad \text{محدوده بالا و پایین اندازه ولتاژ شین } \Delta_m$$

۳- ارزیابی احتمالاتی TTC

بروز خطا در تجهیزات شبکه امری اجتناب ناپذیر است، بنابراین، لازم است تا شرایط احتمالی حاکم بر شبکه، در محاسبه قابلیت تبادل مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که در بخش پیشین ذکر شد، انتخاب شبکه مبنا از جمله گام‌های مهم در ارزیابی TTC است، چرا که با تغییر شبکه مبنا، احتمال تغییر TTC بسیار زیاد است. در سیستم قدرت دائماً با تغییرات شرایط شبکه مواجه هستیم. به طور معمول عدم قطعیت در TTC محاسبه شده برای بازه‌های طولانی بیشتر است، زیرا پیش‌بینی شرایط سیستم برای بازه‌های زمانی بلند مدت مشکل‌تر است. از آنجا که احتمال بروز خطا در تجهیزات سیستم همواره وجود دارد، لازم است با در نظر گرفتن خطاهای مختلف در شبکه و در واقع تعریف شبکه‌های مبنای مختلف، TTC در شرایط بروز خطا ارزیابی شود. در روش‌های متداول محاسبه قابلیت تبادل، ماکزیمم مقدار قابلیت تبادل، بر اساس پیشامدهای سیستم ارزیابی می‌شود که عمدتاً مطالعات بر اساس معیار امنیتی N-1 انجام می‌گیرد؛ به این معنا که برای محاسبه شاخص قابلیت تبادل در یک مسیر، پس از خروج هر کدام از تجهیزات، میزان این شاخص محاسبه می‌گردد، سپس کمترین مقدار حاصل از این مرحله به عنوان قابلیت تبادل آن مسیر خاص انتخاب می‌گردد [۲۳]. چنین انتخابی سبب تعیین مقادیری غیر واقعی و سخت‌گیرانه برای مقدار TTC می‌گردد. TTC تعیین شده توسط روش‌های ارزیابی احتمالاتی به شرایط واقعی سیستم نزدیکتر است. روش‌های احتمالاتی می‌توانند اطلاعات بیشتری از قبیل مقدار و تابع توزیع احتمالاتی TTC فراهم کنند [۹].

مبنای جدید در حالت نرمال و سپس بررسی تأثیر خطاها برای این شبکه است. اگر $TTCN$ میزان توان قابل تبادل بین ناحیه صادرکننده و ناحیه واردکننده در شرایط نرمال و بدون بروز هرگونه پیشامد باشد، ریسک به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Risk(TTCN) = \frac{TTCN - E(TTC)}{TTCN} \quad (14)$$

که در این رابطه $E(TTC)$ بیانگر امید ریاضی TTC است و به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$E(TTC) = \sum_{i=1}^N Prob(i) \times TTC_i \quad (15)$$

N تعداد پیشامدهای مورد انتخاب بعلاوه حالت نرمال را معرفی می‌نماید. $Prob(TTC_i)$ و TTC_i به ترتیب بیانگر احتمال وقوع و میزان قابلیت تبادل توان در صورت وقوع حالت نام است.

۴- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه

در مطالعات قابلیت تبادل

در یک مسأله بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه باید اهداف طرح که هر کدام دارای نقطه بهینه جداگانه‌ای هستند، به طور همزمان بهینه شوند [۲۲]. از آنجا که در این نوع مسایل اهداف به گونه‌ای هستند که با بهبود یک هدف سایر اهداف تنزل می‌یابند، ازین رو به جای یک پاسخ بهینه واحد، مجموعه‌ای از پاسخ‌ها وجود دارند که به این مجموعه، پاسخ‌های کارا یا جبهه کارا گفته می‌شود.

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های توانمند بهینه‌سازی تکاملی است که در بسیاری از مسایل بهینه‌سازی تک هدفه استفاده می‌شود. از آنجا که این الگوریتم از چند نقطه به طور موازی فضای پاسخ را جستجو می‌کند، می‌توان از آن برای یافتن زیرمجموعه‌هایی از پاسخ‌های کارا به نحو مطلوب استفاده کرد. $NSGA(II)$ ویرایشی از الگوریتم ژنتیک است که برای حل مسایل بهینه‌سازی با معیارهای چندگانه طراحی و در این مقاله به کار گرفته شده است. در مدل پیشنهادی برای محاسبه قابلیت تبادل، مسأله به صورت دو هدفه مدل‌سازی گردیده است. این اهداف عبارتند از:

۱- بیشینه کردن میزان قابلیت تبادل توان

به TTC را از روابط آورده شده بعدی محاسبه نمود.

$$\overline{TTC} = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} TTC(K) \quad (11)$$

$$Var(TTC) = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} (TTC(K) - \overline{TTC})^2 \quad (12)$$

که در این روابط NS تعداد تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو و $TTC(K)$ مقدار محاسبه شده TTC در تکرار k ام است.

معیار همگرایی مونت کارلو نیز رسیدن ضریب پراکندگی (Coefficient of Variation-CoVar) پاسخ‌ها به حدی مطلوب است. این معیار به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$CoVar = \frac{\sqrt{Var(TTC)}}{\sqrt{NS} \times \overline{TTC}} \quad (13)$$

۳-۲- محاسبه ریسک

به طور کلی، ریسک خطری است که از عدم قطعیت در سیستم ناشی می‌شود. انتخاب هر میزان از قابلیت تبادل توان، ریسک خاصی به همراه دارد. هرچه میزان قابلیت تبادل توان بیشتر باشد، میزان ریسک متناظر با آن مقدار بیشتر خواهد بود و بالعکس. در مطالعات مختلف تعاریف گوناگونی برای ریسک معرفی گردیده است [۲۰ و ۲۱]. با استفاده از این تعاریف، مقادیر مختلف ریسک به ازای TTC در شرایط نرمال (شرایطی که هیچ خطایی رخ نداده است) و خطا دیده به دست می‌آید؛ یعنی به TTC در شرایط نرمال یک ریسک نسبت داده می‌شود و به TTC در هر کدام از شرایط خطا مقدار ریسک متناظرش نسبت داده می‌شود. بنابراین، اگر هر کدام از این مقادیر TTC به عنوان قابلیت تبادل بین دو ناحیه انتخاب شود، باید ریسک مربوطه را به دنبال داشته باشد. آنچه در این تعاریف از نظر دور مانده است، در نظر گرفتن قابلیت تبادل کلی متناظر با شبکه مبنای خطا دیده برای حالت نرمال بهره‌برداری از شبکه است. به عبارت دیگر، اگر برنامه‌ریزان شبکه بخواهند تبادلات را با ریسک کمتری تنظیم کنند، باید مقادیری کمتر از TTC نرمال انتخاب کنند، حال آنکه این مقادیر مربوط به شرایط خطا دیده است. آنچه پس از انتخاب یک مقدار برای TTC ($TTCN$) در عمل اتفاق می‌افتد، محدود کردن تبادل توان بین دو ناحیه به مقدار $TTCN$ و در واقع، تعریف یک شبکه

ارائه روشی مبتنی بر بهینه سازی چند هدفه برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان و ریسک در شبکه‌های قدرت

۲- کمینه کردن ریسک

انتخاب قابلیت تبادل بیشتر به معنی افزایش میزان ریسک است، بنابراین از آنجا که این اهداف در تناقض با یکدیگرند، باید با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، سنجشی مناسب از هر دو هدف انجام داد.

هر مقدار قابلیت تبادل بر بیشترین توان عبوری بین دو ناحیه در شرایط شبکه پایه دلالت دارد که با بروز خطای احتمالی برای این شبکه مقادیر دیگری نیز برای TTC بین دو ناحیه به دست می‌آید. از این رو، نیاز به شبکه‌های مبنای متفاوت است که مقادیر مختلفی را برای TTC در شرایط نرمال نتیجه می‌دهد. برای این منظور (با توجه به چگونگی افزایش تبادل توان بین دو ناحیه) حداکثر مقدار بار در ناحیه مصرف محدود می‌شود تا مقادیر مختلف TTC در شرایط نرمال برای شبکه‌های مبنای مختلف به دست آید. در ادامه چگونگی این مدل‌سازی شرح داده می‌شود.

۴-۱- نحوه کد بندی مسأله

در مدل ارائه شده کروموزوم‌های تولید شده بیانگر میزان بارها در ناحیه وارد کننده توان است، بنابراین، تعداد ژن‌های هر کروموزوم به تعداد نقاط بار در این ناحیه است. نحوه کدبندی پیشنهادی برای مسأله در شکل (۱) آمده است.

P_{D1}	P_{D2}	P_{D3}	...	$P_{D(N-1)}$	$P_{D(N)}$
----------	----------	----------	-----	--------------	------------

شکل (۱): نحوه کدبندی پیشنهادی برای الگوریتم ژنتیک

N : تعداد بارها در ناحیه وارد کننده توان است.

برای هر کدام از ژن‌های این کروموزوم‌های تولید شده باید رابطه زیر نیز برقرار باشد:

$$P_{Di}^{\min} \leq P_{Di} \leq P_{Di}^{\max} \quad (۱۶)$$

P_{Di}^{\min} : مقدار بار نام در حالت پایه مورد بررسی شبکه است.

P_{Di}^{\max} : حداکثر مقداری است که هر ژن در کروموزوم می‌تواند بگیرد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{Di}^{\max} = \sum_{k=1}^{NT} P_{Gk}^{\max} + \sum_{j=1}^{ND} P_{Gj}^{base} - \sum_{l=i}^{NL} P_{Dl} - \sum_{h=1}^{NH} P_{Dh}^{\min} \quad (۱۷)$$

که در آن

NT : تعداد واحدهای تولیدی در ناحیه صادر کننده

P_{Gk}^{\max} : حداکثر ظرفیت تولیدی واحدها در ناحیه صادرکننده

ND : تعداد واحدهای تولیدی در ناحیه وارد کننده

P_{Gj}^{base} : توان تولیدی واحدها در ناحیه واردکننده در حال پایه مورد بررسی

NL : تعداد ژن‌هایی است که مقدار آنها تعیین شده است.

P_{Dl} : توان بارها در ژن‌هایی که مقدار آنها تعیین گردیده است.

NH : تعداد ژن‌هایی است که مقدار آنها معین نشده است.

علاوه بر شرط بالا باید مجموع ژن‌های هر کروموزوم

در نامساوی زیر صدق نماید:

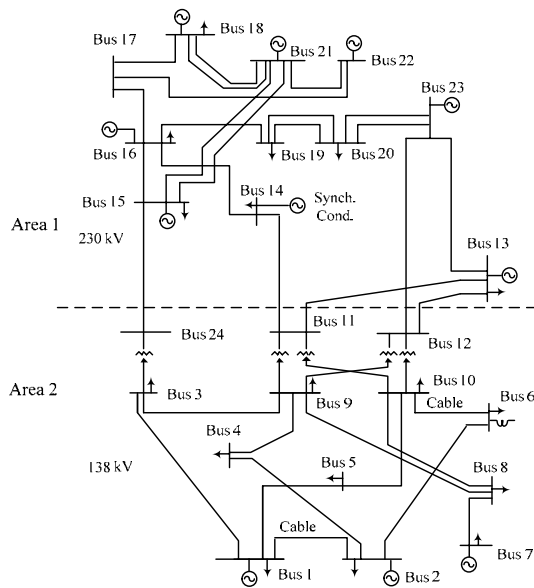
$$\left(\begin{array}{c} \text{مجموع بارهای ناحیه} \\ \text{صادر کننده توان} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{مجموع ژن‌های} \\ \text{کروموزوم تولید شده} \end{array} \right) \leq \left(\begin{array}{c} \text{مجموع حداکثر ظرفیت} \\ \text{تولید ژن‌آورها در ناحیه} \\ \text{صادر کننده توان} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{مجموع تولید ژن‌آورها} \\ \text{در ناحیه وارد کننده توان} \end{array} \right)$$

۴-۲- انتخاب خطاها در محاسبات قابلیت تبادل

در ارزیابی ریسک هر کروموزوم به محاسبه TTC در شرایط نرمال و خطادیده نیاز است. برای این منظور می‌توان این شرایط را از طریق شبیه‌سازی مونت‌کارلو ایجاد کرد یا از یکایک شماری خطاها استفاده نمود. شبیه‌سازی مونت‌کارلو به زمان زیادی نیاز دارد، از طرف دیگر شبیه‌سازی تمامی پیشامدها در روش یکایک شماری نیز فرآیندی زمان‌بر است، بنابراین، می‌توان از روش غربالگری خطاها استفاده نمود. در هر شبکه با توجه به ساختار بندی آن، وقوع برخی از خطاها نسبت به سایر خطاها، تأثیر بیشتری بر TTC بین دو ناحیه می‌گذارد. می‌توان در محاسبات قابلیت تبادل، این گونه خطاها را شناسایی نمود و با شبیه‌سازی آنها سرعت محاسبات را افزایش داد؛ ضمن آنکه دقت پاسخ‌ها نیز در حد مطلوب حفظ گردند.

۴-۳- انتخاب مناسبترین پاسخ در جبهه کارا

جواب نهایی یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه یک دسته پاسخ است که هر یک از نقاط این مجموعه جواب با توجه به نظر بهره‌بردار می‌تواند به عنوان جواب مسأله انتخاب گردد. با توجه به این که تصمیم‌گیری انسانی همواره با خطا همراه است برای انتخاب یک جواب از بین جواب‌های مغلوب نشدنی (جبهه کارا) به عنوان جواب بهینه، از تصمیم‌گیری فازی استفاده می‌شود. در این روش به هر نقطه

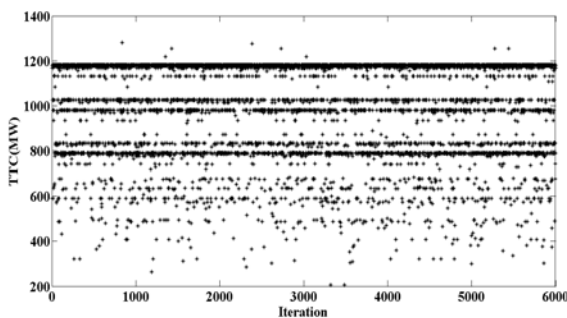


شکل (۲): دیاگرام شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS

۵-۱- محاسبه احتمالی قابلیت تبادل با استفاده

از شبیه سازی مونت کارلو

در این شبکه با در نظر گرفتن احتمال خطا در خطوط و ژنراتورها، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، با انتخاب معیار ضریب پراکندگی 0.04 ، میزان قابلیت تبادل نهایی $10.4/2$ مگاوات است. شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب مقادیر TTC حاصل شده طی تکرارهای مختلف شبیه‌سازی مونت کارلو و تغییرات مقدار متوسط TTC را در طی این تکرارها نشان می‌دهد.



شکل ۳: مقدار TTC در تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو

از جبهه کارا یک مقدار فازی تخصیص داده می‌شود که از رابطه بعد به دست می‌آید:

$$FDM_i(P_k) = \begin{cases} 1 & F_i(P_k) \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i(P_k)}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & F_i^{\min} \leq F_i(P_k) \leq F_i^{\max} \\ 0 & F_i(P_k) \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

در این صورت برای جواب k ام، عدد تصمیم‌گیری فازی به صورت زیر است:

$$FDMN(k) = \frac{\sum_{i=1}^n FDM_i(P_k)}{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^n FDM_i^j(P_k)} \quad (19)$$

که در رابطه فوق S تعداد جواب موجود در جبهه کارا، n تعداد توابع هدف، P_k جواب k ام موجود در جبهه کارا، $F_i(P_k)$ مقدار تابع هدف i ام به ازای جواب k ام، F_i^{\min} و F_i^{\max} حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف i ام است که با توجه به نظر طراح می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. با محاسبه عدد تصمیم‌گیری فازی برای همه جواب‌های موجود در دسته جواب مغلوب نشدنی، جواب با بیشترین مقدار $FDMN$ ، به عنوان بهترین جواب انتخاب می‌گردد.

۵- محاسبات عددی و نتایج

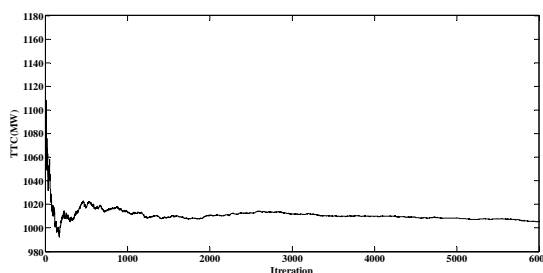
به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی برای ارزیابی احتمالی قابلیت تبادل از سیستم ۲۴ باسه IEEE-RTS^{۱۷} استفاده شده است [۲۳]. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۲) نشان داده شده است. این شبکه شامل ۲۴ باس، ۳۸ خط انتقال و ۳۲ واحد تولیدی است. کل بار سیستم ۲۸۵۰ مگاوات و کل ظرفیت نصب شده ۳۴۰۵ مگاوات است. به منظور انجام مطالعات ارزیابی قابلیت تبادل، شبکه به دو ناحیه تقسیم شده است که ناحیه ۱ به عنوان صادر کننده توان و ناحیه ۲ به عنوان وارد کننده در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت‌های در نظر گرفته شده مربوط به خطوط و ژنراتورها است که احتمال خروج بر اساس اطلاعات مرجع [۲۳] حاصل شده است.

ارائه روشی مبتنی بر بهینه سازی چند هدفه برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان و ریسک در شبکه های قدرت

جدول (۱): فهرستی خطاهای در نظر گرفته شده در بررسی

شبکه

مرتب و نوع خطا	تعداد حالات	تعداد حالات انتخاب شده
یگانه خطوط	۳۸	۳۸
یگانه ژنراتورها	۳۲	۳۲
دوگانه خطوط	۷۰۳	۱۰
دوگانه ژنراتورها	۴۹۶	۴۹۶
دوگانه خط و ژنراتور	۱۲۱۶	۹۷۳
سه گانه ژنراتورها	۴۹۶۰	۳۲۵۲
مجموع حالات	۷۴۴۵	۴۸۰۱



شکل (۴): مقدار متوسط TTC در تکرارهای شبیه سازی مونت کارلو

پس از همگرایی شبیه سازی مونت کارلو، واریانس

مقادیر محاسبه شده برای TTC بین دو ناحیه برابر با $44571 MW^2$ است.

۵-۲- اثر خطاها در محاسبات قابلیت تبادل

از آنجا که شبیه سازی تمامی حالتها خروج المانهای سیستم به زمان زیادی نیاز دارد، در شبیه سازی خروج المانها، فهرستی از خطاها در شبکه مورد مطالعه تهیه گردیده و تنها آن دسته از خطاهایی که در محاسبات قابلیت تبادل توان، از اهمیت کافی برخوردار هستند، انتخاب می گردند و شبیه سازیهای پیشامد خروج المانها بر روی این حالات صورت می گیرد.

برای نشان دادن درستی انتخاب این پیشامدها در محاسبه قابلیت تبادل توان بین دو ناحیه، آزمایشهای متعددی صورت پذیرفته و نتایج با خروجی حاصل از شبیه سازی مونت کارلو مقایسه شده است که عبارتند از:

۱- محاسبه تغییرات احتمالاتی قابلیت تبادل توان با در نظر گرفتن خطاهای یگانه تجهیزات، که این آزمایش شامل ۷۱ حالت خروج تجهیزات است.

۲- محاسبه تغییرات احتمالاتی قابلیت تبادل توان با در نظر گرفتن خطاهای یگانه و دوگانه تجهیزات، که در این آزمایش ۲۴۸۱ حالت خروج خطوط و ژنراتورها شبیه سازی گردیده است.

۳- محاسبه تغییرات احتمالاتی قابلیت تبادل توان با در نظر گرفتن فهرست خطای پیشنهادی مطابق جدول (۱). مجموع تعداد حالات مورد بررسی با احتساب حالت نرمال شبکه که در آن هیچ گونه خطایی رخ نداده، ۴۸۰۲ است.

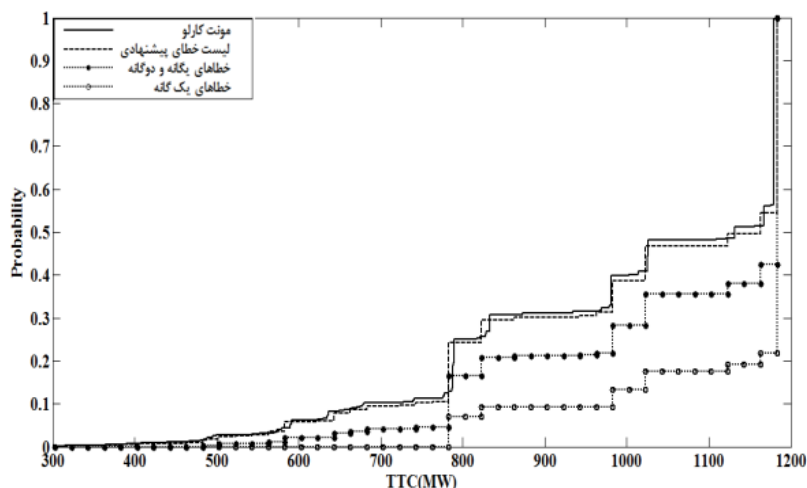
تمامی این آزمایشها توسط یک کامپیوتر پنتیوم ۴ با پردازنده Intel CORE i3 2.27 GHz و 4GB RAM انجام گرفته است. در جدول (۲) زمان انجام آزمایشها و امید ریاضی TTC حاصل از هر آزمایش آورده شده است.

جدول (۲): زمان انجام آزمایشها و امید ریاضی TTC حاصل از هر آزمایش

امید ریاضی TTC (مگاوات)	زمان (ثانیه)	
۱۱۳۰/۷	۱۵/۸۷	آزمایش شماره ۱
۱۰۶۴/۴	۴۶۶/۲۴	آزمایش شماره ۲
۱۰۰۶/۸۷	۹۱۲/۴۶	آزمایش شماره ۳
۱۰۰۴/۲	۱۲۵۳/۴۲	شبیه سازی مونت- کارلو

همانگونه که از مقایسه داده های جدول (۲) مشاهده می گردد، تفاوت زیادی میان مقادیر توابع توزیع احتمالاتی قابلیت تبادل محاسبه شده به ازای خروج یگانه خطوط و تجهیزات، با آنچه از شبیه سازی مونت کارلو حاصل شده است، وجود دارد. در مورد خطاهای توأم یگانه و دوگانه اگرچه این اختلاف کاهش یافته است، اما باز هم پذیرفتنی نیست. با مدل سازی خروج خطوط و ژنراتورها مطابق فهرست خطای پیشنهادی، نتایج حاصل بسیار مشابه با نتایج مونت کارلو می باشند و به خوبی قابل قبول هستند. از آنجا که شبیه سازی پیشامدها بر اساس خطاهای پیشنهاد شده، برخی از حالات خروج المانها را شامل نمی شود، بنابراین

زمان شبیه‌سازی پیشامدهای سیستم به صورت چشمگیری کاهش یافته؛ ضمن آن که دقت محاسبات در محدوده بسیار مناسبی قرار دارند. مقایسه تابع توزیع تجمعی احتمالاتی TTC در شکل (۵) نیز صحت ادعاهای فوق را به روشنی نشان می‌دهد.

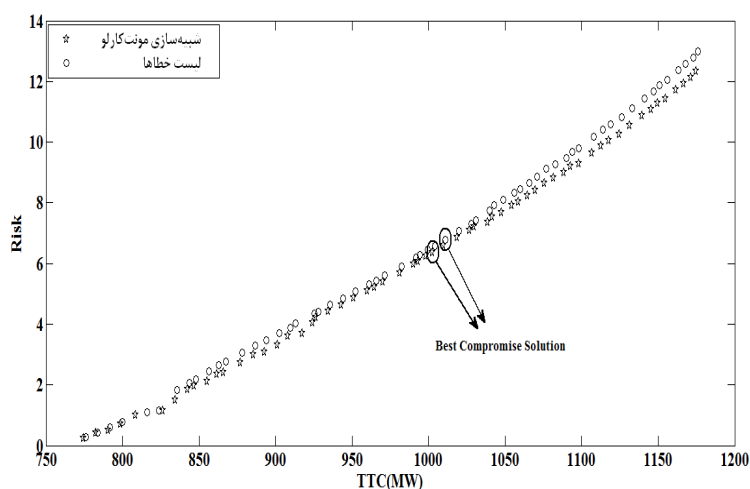


شکل (۵): تابع توزیع تجمعی احتمالاتی TTC در حالات مختلف خروج المان‌ها

فهرست خطاهای انتخاب شده، برنامه بهینه‌سازی چندهدفه اجرا می‌گردد. جبهه کارا با توزیع مناسب و یکنواخت مطابق شکل (۶) به دست آمده است. با مقایسه جبهه کارای حاصل از هر دو روش به خوبی می‌توان کارایی فهرست خطاهای انتخاب شده را مشاهده نمود.

۳-۵- ارزیابی قابلیت تبادل به صورت یک مسأله چندهدفه

بر اساس تعریفی که مطابق با رابطه (۱۴) برای ریسک متناظر با هر مقدار از قابلیت تبادل ارائه گردیده است، ابتدا با استفاده از روش مونت کارلو و سپس با در نظر گرفتن



شکل (۶): جبهه کارای قابلیت تبادل توان و ریسک شبکه

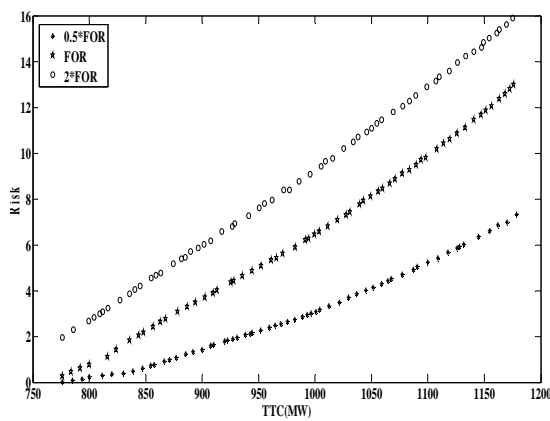
ریسکی را حساب می‌کنیم که یک نقطه از جبهه کارای فوق است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌گردد، با

چنانچه مطابق مراجع [۲۰] و [۲۱] ریسک را در نظر بگیریم، در واقع وقتی TTC برابر ۱۱۸۰ مگاوات است،

ارائه روشی مبتنی بر بهینه سازی چند هدفه برای ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل توان و ریسک در شبکه های قدرت

ریسک و قابلیت تبادل توان در شبکه بر اساس تغییر در نرخ دسترس ناپذیری ژنراتورها و خطوط انتقال صورت گرفته است.

برای مقایسه، در شکل (۷) جبهه کارای پاسخ ها در حالات تغییر در نرخ خروج اجباری تجهیزات در یک نمودار ترسیم گردیده است. در این شکل، جبهه کارا برای حالت دو برابر شدن نرخ خروج و نصف شدن آن نشان داده شده است.



شکل (۷): جبهه کارای پاسخ ها در حالات تغییر در نرخ خروج اجباری تجهیزات

در شکل (۸) منحنی تغییرات ریسک برای سه نقطه از جبهه کارای پاسخ ها در مقابل تغییرات خروج اجباری خطوط و ژنراتورها مشاهده می شود. در این شکل نقاط حداکثری و حداقلی ترسیم شده، نقاطی از جبهه کارای پاسخ ها هستند که به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر ریسک را در هر جبهه کارا دارا هستند. به عبارت دیگر، این نقاط همان نقطه های ابتدایی و انتهایی جبهه های کارای پاسخ ها هستند. در این منحنی رشد غیر خطی ریسک نسبت به افزایش ضریب FOR به خوبی نمایان است. این منحنی اطلاعات با ارزشی در مورد وابستگی ریسک قابلیت تبادل با شاخص های قابلیت اطمینان تجهیزات در اختیار طراحان و بهره برداران سیستم قرار می دهد.

افزایش میزان قابلیت تبادل توان بین دو ناحیه، تفاوت مقادیر ریسک محاسبه شده با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو و فهرست خطاها افزایش می یابد. علت آن نزدیک شدن شبکه در این حالت به حدود ماکزیمم خود، از قبیل حداکثر بارگذاری خطوط انتقال است. در چنین شرایطی خروج هر یک از تجهیزات سیستم تأثیر زیادی بر میزان قابلیت تبادل توان بین نواحی می گذارد. در جدول (۳) نتایج مطالعات عددی آورده شده اند.

جدول (۳): نتایج بهینه سازی چندهدفه قابلیت تبادل و ریسک

تابع هدف	یکایک شماری فهرست خطاها		ریسک (درصد)
	بیشینه	کمینه	
تایع هدف	بیشینه	کمینه	
قابلیت تبادل (مگاوات)	۱۱۷۶	۷۷۶/۱	۷۷۴/۲
ریسک (درصد)	۱۲/۹۹	۰/۳۰۲	۱۲/۳۴

شاخص های در نظر گرفته شده برای تصمیم گیری فازی و مناسبترین پاسخ انتخابی در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): شاخص های در نظر گرفته شده برای انتخاب

مناسبترین جواب توسط روش فازی

ریسک		TTC (MW)		پاسخ
Risk (%)	TTC (MW)	Risk (%)	TTC (MW)	
۱۳	۱۱۷۶	۱۳	۱۱۷۶	بیشترین TTC
۰/۳	۷۷۶	۰/۳	۷۷۶	کمترین ریسک
۶/۳۷۵	۱۰۰۳	۶/۷۹۴	۱۰۱۱	مناسبترین

۵-۴- آنالیز حساسیت ریسک و قابلیت تبادل

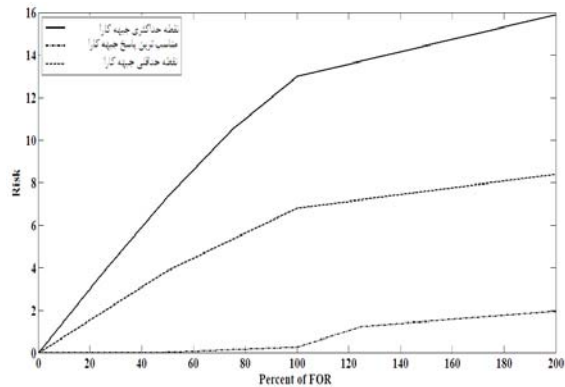
توان نسبت به تغییر شاخص های قابلیت اطمینان

در ادامه آنالیز حساسیتی نسبت به تغییرات شاخص های

شاخص قابلیت اطمینان تجهیزات بر TTC، آنالیز حساسیتی بر روی تغییرات نرخ خروج اجباری انجام گرفت که به خوبی تأثیرپذیری ریسک متناظر با هر مقدار از TTC از شاخص FOR تجهیزات را نشان می‌دهد. روش‌های پیشنهادی می‌توانند به عنوان ابزاری برای تعیین احتمالاتی قابلیت تبادل و ریسک در شبکه‌ها استفاده شوند.

مراجع

- [1] Transmission Transfer Capability Task Force, Available Transfer Capability Definitions and Determination, North American Electric Reliability Council, Princeton, NJ, 1996.
- [2] E. Audomvongseeree and A. Yokoyama, "Consideration of an Appropriate TTC by Probabilistic Approach," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 375-383, Feb. 2004.
- [3] Y. Ou, and C. Singh, "Assessment of available transfer capability and margins," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 463-468, May 2002.
- [4] X. Tong, F. F. Wu, and L. Qi, "Available transfer capability calculation using a smoothing pointwise maximum function," IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, Vol. 55, No. 1, pp.175-180, Feb 2008.
- [5] C.Liu, X.Tong, R.Zhou, and X. Deng, "Available transfer capability model and calculation considering static security constraints and the saddle node bifurcation," IEEE Industrial Technology Conference, pp 1-5, Feb. 2009.
- [6] M. Ramezani, and M. R. Haghifam, "Modeling and evaluation of wind turbines on total transfer capability," IEEE PES General Meeting, pp 1-6, June 2007.
- [7] G. C. Ejebe, J. G. Waight, M. Sanots-Nieto, and W. F. Tinney, "Fast calculation of linear available transfer capability," IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1112-1116. Aug. 2000.
- [8] S. Grijalva, P. W. Sauer, and J. D. Weber, "Enhancement of linear ATC calculations by the incorporation of reactive power flows," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 1112-1116, May 2003.
- [9] Weixing Li, Peng Wang, "Determination of Optimal Total Transfer Capability Using a Probabilistic Approach", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 43-50, May 2006.
- [10] A. B. Rodrigues, and M. G. Da Silva,



شکل (۸): منحنی تغییرات ریسک با تغییرات شاخص FOR خطوط و ژنراتورها

با توجه به شکل (۸) هر چه نرخ خروج اجباری تجهیزات کمتر باشد، مناسبترین جواب انتخاب شده دارای مقادیر ریسک کمتر و قابلیت تبادل بیشتری است. این انتخاب، معقول و مورد انتظار نیز بود، زیرا هرچه قابلیت اطمینان تجهیزات بیشتر باشد، احتمال خروج اجزای سیستم کمتر است و می‌توان توقع مقادیر بیشتری از TTC با ریسک‌های کمتر را نیز داشت.

۶- نتیجه‌گیری

شناسایی ظرفیت‌های شبکه انتقال و بهره‌برداری ایمن از آن، از اهمیت ویژه‌ای در صنعت برق برخوردار است. محاسبات قابلیت تبادل باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در سیستم انجام شود تا بتواند ارزیابی درستی از شرایط شبکه ارائه نماید. بدین منظور، در این مقاله محاسبات قابلیت تبادل به صورت یک بهینه‌سازی دو هدفه مطرح شده است که هدف نهایی آن رسیدن به مصالحه‌ای میان مقدار قابلیت تبادل و ریسک است. بر اساس شبیه‌سازی مونت-کارلو و فهرست خطاهای پیشنهاد شده، پیشامدهای خروج المان‌ها در شبکه شبیه‌سازی گردید و در هر حالت مقدار TTC و ریسک متناظر با آن به وسیله مدل پیشنهادی، تعیین شد. در مسأله چندهدفه مدل‌سازی شده از ویرایشی از الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است. نتایج ارزیابی TTC نشان می‌دهد استفاده از فهرست خطاهای پیشنهادی می‌تواند زمان انجام شبیه‌سازی‌ها را کاهش دهد؛ ضمن آن که دقت پاسخ‌ها در حد مطلوب باقی بماند. برای بررسی اثرگذاری

- Vol.2, pp. 891-896, 2000.
- [21] K. Audomvongseree, A. Yokoyama, "Risk based TRM Evaluation by Probabilistic Approach", International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAP), pp. 254-259, September 2004.
- [22] K. Deb, S. Agrawal, and A. Pratap, "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA II, Indian Inst. Technol., Kanpur, India, Tech. Rep. 200001.
- [23] Reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee, "IEEE reliability test system", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 14, pp. 2047-2054, Dec. 1979.
- [] م. رضائی، م. حق‌فام، م. پارسا مقدم و ح. سیفی "ارزیابی قابلیت عبور در دسترس شبکه‌های انتقال در حضور نیروگاه‌های بادی"، نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، سال ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۸۸.
- [12] M. Ramezani, C. Singh, and M. R. Haghifam, "Role of clustering in the probabilistic evaluation of TTC in power systems including wind power generation," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No.2, pp. 849-858, May 2009.
- [13] K. Audomvongseree, and A. Yokoyama, "Consideration of an appropriate TTC by probabilistic approach," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 375-383, Feb. 2004.
- [14] A. M. Leite da Silva, J. Guilherme de Carvalho Costa, L. Antônio da Fonseca Manso, and G. J. Anders, "Transmission capacity: availability, maximum transfer and reliability," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 843-849, Aug. 2002.
- [15] M.A. Khaburi, and M. R. Haghifam, "A probabilistic modeling based approach for total transfer capability enhancement using FACTS devices," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, No. 1, pp 12-16, Jan. 2010.
- [16] F. Xia and A. P. S. Meliopoulos, "A methodology for probabilistic simultaneous transfer capability analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 3, pp. 1269-1278, Aug. 1996.
- [17] Y. Xiao and Y. H. Song, "Available transfer capability (ATC) evaluation by stochastic programming," IEEE Power Engineering Review, Vol. 20, No. 9, pp. 50-52, Sep. 2000.
- [18] R. F. Chang, C. Y. Tsai, C. L. Su, and C. N. Lu, "Method for computing probability distributions of available transfer capability," in IEE Proc, Transm, Distrb, Vol. 149, No. 4, pp. 427-431, Jul. 2002.
- [19] A. Brizzi, C. Bovo, M. Delfanti, M. Merlo and M. Saviano, "A Monte Carlo Approach for TTC Evaluation", IEEE Trans. On PS, Vol. 22, No. 2, pp.273-277, May 2007.
- [20] B. Corniere, L. Martin, S. Vitet, N. Hadjsaid, and, "Assessment of the Congestion Cost and Risk of Curtailment Associated with Available Transfer Capability (ATC)", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting.,

زیرنویس‌ها

1. Transfer Capability
2. Total Transfer Capability
3. Available Transfer Capability
4. Transmission Reliability Margin
5. Capacity Benefit Margin
6. Existing Transmission Commitments
7. Continuation Power Flow
8. Repeated Power Flow
9. Sensitivity Analysis
10. Optimal Power Flow
11. Sequential Quadratic Programming
12. Bisection Search Method
13. Source Area
14. Sink Area
15. Power Redispatch
16. Load Shedding
17. IEEE-Reliability Test System