

ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل کلی شبکه‌های انتقال در حضور مزرعه‌های بادی

مریم رضانی، محمودرضا حقی‌فام، محسن پارسامقدم و حسین سیفی

انرژی تجدیدپذیر، قابلیت تولید انرژی الکتریکی در حد وسیع را از طریق نصب توربین‌های بادی (مزرعه بادی) دارا می‌باشد. این امر موجب شده است توربین‌های بادی بیش از دیگر تکنولوژی‌های تولید برق مبتنی بر انرژی‌های نو توانایی رقابت با ژنراتورهای معمولی را پیدا کنند و کاربرد آنها در سیستم‌های کوچک جدا از شبکه و در سیستم‌های قدرت بزرگ به هم پیوسته افزایش چشم‌گیری داشته باشد [۱] و [۲].

از آنجا که باد به‌عنوان عامل محرک توربین‌های بادی دارای ماهیتی متغیر و تصادفی است، رفتار این واحدهای تولیدی نیز با ژنراتورهای معمولی تفاوت داشته و اثرات متفاوتی را روی سیستم قدرت به‌جای می‌گذارد. با وجود این که سعی شده است تا با بهره‌برداری ترکیبی از توربین‌های بادی و ادوات ذخیره‌کننده انرژی رفتار احتمالاتی این منابع کاهش یابد [۳]، اما به‌دلیل هزینه بالای این ادوات و نیز محدودیت‌های فنی در به‌کارگیری آنها، همچنان در اکثریت قریب به اتفاق نقاط جهان توربین‌های بادی به تنهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با افزایش ضریب نفوذ مزرعه‌های بادی، تأثیر این منابع بر شاخص‌های تعریف‌شده برای سیستم قدرت و مطالعات وابسته به آن بیش از پیش مهم جلوه می‌نماید. تاکنون از جنبه‌های مختلفی اثر حضور مزرعه‌های بادی در سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به بررسی تأثیر مزرعه‌های بادی بر قابلیت اطمینان شبکه قدرت [۱] و [۴]، مطالعات در مدار آوردن نیروگاه‌ها [۵]، ارزیابی اقتصادی احداث و توسعه شبکه انتقال برای اتصال این منابع [۶] و [۷] و محاسبات پخش بار [۸] اشاره کرد.

شبکه‌های انتقال که تبادلات توان میان نقاط تولید و مصرف از طریق آنها انجام می‌شود، نقش مهمی در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته بازی می‌کنند. از این رو برای اطمینان از بهره‌برداری مناسب و ایمن از شبکه انتقال و برای پیشگیری از بروز اضافه بار و افت ولتاژ در شبکه، آگاهی از قابلیت تبادل توان این شبکه‌ها بسیار مهم بوده و ارزیابی آن از وظایف مهم بهره‌بردار سیستم قدرت محسوب می‌شود.

قابلیت تبادل در دسترس شبکه‌های انتقال^۱ (ATC) شاخصی کلیدی در تعیین حد مجاز تبادل‌های آتی توان بین نواحی سیستم افزون بر موارد قبلی است که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]

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

که در آن TTC قابلیت تبادل کلی شبکه^۲ است که بیشترین حد مجاز انتقال توان بین نواحی با توجه به خطاهای محتمل در شبکه را نشان می‌دهد که این حد توان با توجه به قیود ولتاژ باس‌ها، حد حرارتی خطوط و پایداری تعیین می‌شود. CBM حاشیه مفید ظرفیت^۳ است و مربوط به

چکیده: اخیراً تولید برق از باد به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است. با روند رو به افزایش نفوذ مزرعه‌های بادی در سیستم‌های قدرت، اصلاح روش‌های موجود ارزیابی و مدیریت این سیستم‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. بررسی قابلیت تبادل شبکه انتقال یکی از مطالعات مهم در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار یافته است که به‌منظور ارزیابی حد تبادل توان میان نواحی سیستم از طریق شبکه و مدیریت تبادلات آتی انجام می‌شود. در این مقاله چگونگی ارزیابی احتمالاتی قابلیت تبادل در سیستم‌های قدرت چندناحیه‌ای برخوردار از مزرعه‌های بادی مطرح می‌شود. ابتدا روش کلی ارزیابی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو، با لحاظ تغییرات بار شبکه و توان خروجی مزرعه بادی مطرح می‌گردد. در هر تکرار شبیه‌سازی، قابلیت تبادل با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی مبتنی بر پخش بار بهینه محاسبه می‌شود. سپس تغییرات احتمالاتی قابلیت تبادل برای یک سطح بار ثابت مورد بررسی قرار گرفته و استفاده از تحلیل ریسک به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری و سنجش پیشنهاد می‌شود. در ادامه تغییرات توأم باد و بار برای ارزیابی قابلیت تبادل لحاظ‌شده و کاربرد روش دسته‌بندی اطلاعات در کاهش واریانس شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطرح می‌شود. کارایی روش‌های پیشنهادی با استفاده از شبکه آزمون ۲۴ باسه IEEE-RTS مورد بحث قرار می‌گیرد.

کلید واژه: تحلیل ریسک، دسته‌بندی داده‌ها، شبیه‌سازی مونت‌کارلو، قابلیت تبادل شبکه‌های انتقال، مزرعه بادی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، محدودبودن منابع سوخت فسیلی و آلودگی‌های محیطی منتهی به آن توجه محققین را به بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف ساخته است به‌طوری که بسیاری از کشورهای جهان تلاش می‌کنند طی دهه آتی ۵ تا ۲۵ درصد از ظرفیت‌های تولیدی سیستم قدرت خود را به انرژی‌های تجدیدپذیر اختصاص دهند [۱]. دلیل عمده این امر سیاست‌گذاری دولت‌ها در بخش انرژی، افزایش انگیزه‌های اجتماعی و کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از تجهیزات وابسته به استحصال انرژی از منابع تجدیدپذیر می‌باشد. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، باد به‌عنوان یک منبع انرژی پاک مورد توجه خاص جهت تولید برق قرار گرفته است. انرژی باد برخلاف بسیاری از دیگر منابع

این مقاله در تاریخ ۳۰ مهر ماه ۱۳۸۶ دریافت و در تاریخ ۱۹ بهمن ماه ۱۳۸۷ بازنگری شد.

مریم رضانی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند
(email: mramezani@ieee.org)

محمودرضا حقی‌فام، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
(email: haghifam@modares.ac.ir)

محسن پارسامقدم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
(email: seifi_ho@modares.ac.ir)

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

1. Available Transfer Capability
2. Total Transfer Capability
3. Capacity Benefit Margin

در این مقاله روشی کلی به منظور دستیابی به تغییرات احتمالاتی TTC در حضور توربین‌های بادی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو پیشنهاد شده است. در این مطالعات با در نظر گرفتن احتمال خطا در تجهیزات (واحدهای تولیدی، خطوط و توربین‌های بادی) و تغییرات احتمالاتی توان خروجی توربین‌های بادی و نیز تغییرات بار، TTC محاسبه می‌شود. با استفاده از روش پیشنهادی علاوه بر مقدار قابل انتظار TTC، تابع توزیع احتمالی TTC نیز حاصل می‌شود که می‌توان از آن برای انتخاب یک مقدار نهایی برای TTC بهره گرفت. به این منظور تغییرات احتمالاتی TTC برای یک سطح بار ثابت بررسی شده و روشی مبتنی بر ریسک جهت انتخاب مقدار نهایی TTC ارائه شده است. در ادامه تغییرات باد و بار شبکه در نظر گرفته شده و TTC با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و دسته‌بندی داده‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای دسته‌بندی داده‌های ورودی از روش k-means [۲۰] تا [۲۳] استفاده شده است. در پایان با استفاده از شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS کارایی روش‌های پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی مزرعه‌های بادی از اطلاعات واقعی سرعت باد در ناحیه منجیل در شمال ایران استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی مزرعه‌های بادی

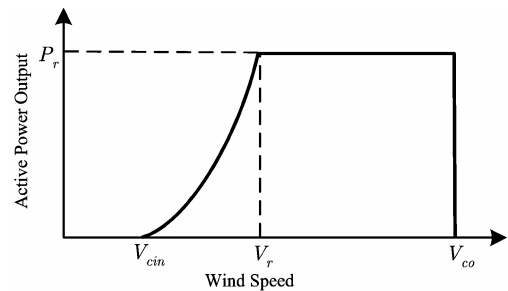
توربین‌های بادی دارای ظرفیت‌های متنوعی هستند و می‌توانند به شبکه‌های توزیع و انتقال متصل شوند. برای فراهم‌نمودن ظرفیت‌های بالای تولید انرژی الکتریکی، توربین‌های بادی در کنار هم نصب می‌شوند که به مجموعه آنها نیروگاه بادی یا اصطلاحاً مزرعه بادی گفته می‌شود. مدل مزرعه بادی به مدل سرعت باد و مدل توربین وابسته است [۲]. در ادامه مدل‌ها و مفاهیم ضروری برای مدل‌سازی مزرعه بادی آمده است.

۲-۱ مدل سرعت باد

توان تولیدی یک مزرعه بادی به سرعت باد که به صورت تصادفی تغییر می‌کند وابسته است. لذا در مطالعات وابسته به مزرعه‌های بادی مدل‌سازی مناسب تغییرات سرعت باد برای منطقه مورد مطالعه امری ضروری محسوب می‌شود. روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی سرعت باد پیشنهاد شده که در اکثر آنها از سری‌های زمانی استفاده شده است [۱] و [۴]. در مطالعات این مقاله مدل باد بر اساس داده‌های ساعتی سرعت باد در منطقه منجیل در شمال ایران تنظیم شده که از سازمان هواشناسی کشور [۲۴] اخذ شده است.

۲-۲ مدل توربین‌های بادی

مشخصه توان خروجی یک توربین بادی با یک واحد نیروگاهی معمولی تفاوت بسیاری دارد. در این توربین‌ها توان اکتیو خروجی متأثر از سرعت باد بوده و یک رابطه غیر خطی بین این دو پارامتر وجود دارد. با استفاده از این رابطه که مشخصه "توان - سرعت" نام دارد و به پارامترهای بهره‌برداری از توربین وابسته است، امکان محاسبه توان اکتیو خروجی توربین‌های بادی فراهم می‌شود. این مشخصه مقدار توان اکتیو تولیدی توربین بادی را به‌ازای سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد. در شکل ۱ یک نمونه از مشخصه مورد نظر نمایش داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، یک توربین بادی به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که در سرعت باد V_{cin} شروع به کار نماید. با افزایش سرعت باد، توان تولیدی توربین از مقدار صفر به تدریج افزایش می‌یابد تا به مقدار نامی P_r در سرعت نامی V_r برسد. پس از آن با وجود افزایش سرعت باد توان خروجی ثابت می‌ماند و در سرعت V_{co} به دلیل حفظ



شکل ۱: مشخصه "توان - سرعت" توربین بادی.

بخشی از قابلیت تبادل شبکه انتقال است که توسط نهادهای مسئول تأمین‌کننده بار رزرو می‌شود تا اطمینان لازم جهت دسترسی به منابع تولیدی در دیگر نواحی در شرایط اضطراری فراهم شود. TRM معرف حاشیه اطمینان انتقال^۱ است و به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت‌های موجود در شرایط سیستم رزرو می‌شود تا امنیت شبکه را تضمین نماید. پارامتر ETC^۲ نیز تبادلات توافق شده موجود میان نواحی را نشان می‌دهد. TTC عاملی کلیدی در تعیین مقدار ATC محسوب می‌شود [۱۰]. ارزیابی TTC مطالعات متعددی را به خود اختصاص داده است که از دیدگاه‌های مختلف قابل بررسی‌اند. در برخی از مطالعات از روش‌های قطعی برای تعیین TTC استفاده شده است که با در نظر گرفتن کلیه خطاهای یگانه سیستم، در نهایت کمترین مقدار حاصل شده به‌عنوان TTC معرفی می‌شود [۱۱] و [۱۲]. بخشی دیگر از مطالعات به بررسی احتمالاتی TTC پرداخته‌اند و از روش‌های مونت کارلو غیر ترتیبی^۳ [۱۳]، برنامه‌ریزی تصادفی^۴ [۱۴]، تکنیک Bootstrap [۱۵] و روش شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی^۵ [۱۶] به این منظور استفاده کرده‌اند. در برخی از این مطالعات مانند [۱۱] تا [۱۵] به تنهایی بیشینه‌کردن تبادلات توان بین نواحی مد نظر قرار گرفته و در برخی دیگر به جنبه‌های اقتصادی نیز توجه شده است [۱۰] و [۱۷]. محققین در مطالعات قابلیت تبادل عمدتاً مقدار TTC را با توجه به قیود حرارتی خطوط و ولتاژ باس‌ها ارزیابی کرده‌اند. در دسته دیگری از مطالعات، قیود پایداری ولتاژ [۱۸] و پایداری گذرا [۱۹] نیز برای ارزیابی TTC مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

با توجه به احتمال بروز خطا در تجهیزات، استفاده از روش‌های قطعی برای تعیین TTC کار خردمندانه‌ای نیست چرا که ممکن است به عدم بهره‌برداری کارا از ظرفیت شبکه منجر شود [۱۰]. در صورت حضور توربین‌های بادی با توان تولیدی متغیر در سیستم، عملاً عوامل تصادفی مسأله افزایش یافته و لزوم استفاده از روش‌های احتمالاتی در ارزیابی TTC را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.

در سیستم قدرت دائماً با تغییرات شرایط شبکه مواجه هستیم که دلیل عمده آن، تغییرات بار سیستم است. از سوی دیگر حضور توربین‌های بادی و افزایش نفوذ آنها در شبکه موجب شده است که با منابع تولیدی متغیر نیز روبه‌رو شویم. سرعت باد نیز مانند بار شبکه، علاوه بر تغییرات فصلی و ماهانه که نسبتاً قابل پیش‌بینی هستند دارای تغییرات روزانه و ساعتی نیز است. لذا نوعی همبستگی بین مقادیر بار سیستم و سرعت باد و به طبع آن توان خروجی توربین‌های بادی وجود دارد که تبادل شبکه انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باید در مطالعات ارزیابی TTC مورد توجه قرار گیرد.

1. Transmission Reliability Margin
2. Existing Transmission Commitments
3. Non-Sequential Monte Carlo
4. Stochastic Programming
5. Sequential Monte Carlo

Subject to:

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in N} V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = 0 \quad (5)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in N} V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = 0 \quad (6)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad \forall i \in \text{Source} \quad (7)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad \forall i \in \text{Source} \quad (8)$$

$$P_{Lj}^{\min} \leq P_{Lj} \leq P_{Lj}^{\max} \quad \forall j \in \text{Sink} \quad (9)$$

$$\frac{Q_{Lj}}{P_{Lj}} = \text{constant} \quad \forall j \in \text{Sink} \quad (10)$$

$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad \forall j \in N \quad (11)$$

$$S_{i-j} \leq S_{i-j}^{\max} \quad \forall (i-j) \in \text{Lines} \quad (12)$$

که در آن

N : مجموعه کل باس‌های شبکه

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

δ_i, V_i : اندازه و زاویه ولتاژ باس i ام

Q_{Lj}, P_{Lj} : توان اکتیو و راکتیو مصرفی در باس j ام

Q_{Gi}, P_{Gi} : توان اکتیو و راکتیو تولیدی در باس i ام

$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$: حد بیشینه و کمینه توان اکتیو تولیدی در باس i ام

$Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$: حد بیشینه و کمینه توان راکتیو تولیدی در باس i ام

$P_{Lj}^{\min}, P_{Lj}^{\max}$: حد بیشینه و کمینه توان اکتیو مصرفی در باس j ام

S_{i-j}^{\max}, S_{i-j} : توان ظاهری و توان ظاهری بیشینه عبوری از خط $i-j$

V_j^{\min}, V_j^{\max} : حد بیشینه و کمینه مجاز دامنه ولتاژ در باس j ام

در مدل فوق توان تولیدی ژنراتورها در ناحیه تولیدکننده و بار در ناحیه مصرف‌کننده به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که تبادل توان اکتیو میان این دو ناحیه بیشینه شود. باید توجه داشت که افزایش بار ناحیه مصرف‌کننده با ضریب قدرت ثابت انجام می‌شود (قید (۱۰)). روش‌های مختلفی همچون پخش بار تداومی [۲۶]، پخش بار مکرر [۲۷] و پخش بار بهینه (OPF) [۱۷] و [۲۸] برای حل مدل مذکور ارائه شده است. در این مقاله از روش OPF مبتنی بر تکنیک برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی که توانایی بالایی در حل مدل‌های غیر خطی مقید دارد [۱۷]، برای حل مدل (۴) تا (۱۲) استفاده شده است.

۲-۳ فرایند ارزیابی احتمالاتی TTC مبتنی بر

شبیه‌سازی مونت کارلو

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد وجه تمایز عمده مزرعه‌های بادی با نیروگاه‌های معمولی، تفاوت توان خروجی آنهاست. در نیروگاه‌های معمولی، توان خروجی کاملاً کنترل شده است در حالی که در مزرعه‌های بادی این توان به سرعت باد وابسته می‌باشد. بنابراین در ارزیابی TTC شبکه انتقال در حضور مزرعه‌های بادی لازم است علاوه بر تغییرات بار، ماهیت متغیر و تصادفی سرعت باد و به دنبال آن توان خروجی مزرعه‌های بادی به‌گونه‌ای مناسب مدل‌سازی شوند.

در این مقاله برای مدل‌سازی تغییرات تصادفی باد و بار شبکه و نیز احتمال خروج تجهیزات سیستم در ارزیابی TTC از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. در این فرآیند ابتدا شبکه مبنا که در آن تولید ژنراتورها و مقدار بار باس‌ها مشخص است و قیود سیستم در محدوده مجاز قرار دارند انتخاب می‌شود. سپس برای شبکه مذکور وضعیت سیستم با روش

امنیت، واحد نیروگاهی متوقف می‌شود. مقادیر $V_{co}, P_r, V_r, V_{cin}$ مشخصات هر توربین بادی هستند و توسط شرکت سازنده ارائه می‌شوند. مدل ریاضی مشخصه "توان-سرعت" به‌صورت زیر است [۲۵]

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & x < V_{cin} \\ P_r \cdot (A + Bx + Cx^2) & V_{cin} \leq x < V_r \\ P_r & V_r \leq x < V_{co} \\ 0 & x \geq V_{co} \end{cases} \quad (2)$$

مقادیر A, B و C به مشخصات توربین بادی وابسته و بر اساس روابط ارائه‌شده در [۲۵] قابل محاسبه‌اند.

توان راکتیو توربین بادی بسته به نوع توربین و با توجه به مقدار توان اکتیو تولیدی آن تعیین می‌شود. در حال حاضر چهار نوع توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از توربین‌های بادی سرعت ثابت، توربین‌های بادی سرعت متغیر محدود، توربین بادی سرعت متغیر با مبدل فرکانسی جزئی و توربین‌های سرعت متغیر با مبدل فرکانسی کامل. توربین‌های آسنکرون سرعت ثابت و متغیر محدود، بخشی از توان راکتیو مورد نیاز خود را از طریق خازن‌های نصب‌شده در محل و مابقی را (در صورت نیاز) از شبکه جذب می‌کنند. اما توربین‌های سرعت متغیر امکان کنترل توان راکتیو و ولتاژ باس اتصال را دارند [۲].

۳-۲ تعیین توان خروجی مزرعه بادی

پس از دستیابی به مدل مناسب برای سرعت باد و توربین بادی امکان تعیین توان خروجی مزرعه بادی فراهم می‌شود. در صورت در مدار بودن تمامی توربین‌ها، توان خروجی یک مزرعه بادی (P_{WF}^{Out}) برابر است با مجموع توان خروجی توربین‌های بادی نصب‌شده در آن. باید توجه داشت که با توجه به احتمال وقوع خطا، توربین‌های بادی همیشه در مدار نیستند از این رو توان خروجی مزرعه بادی در هر زمان را می‌توان با توجه به تعداد توربین‌های در مدار با استفاده از (۳) اصلاح کرد

$$P_{WF}^{Out} = \left(\frac{N_T - N_f}{N_T} \right) \cdot P_{WF}^{Out} \quad (3)$$

که در آن P_{WF}^{Out} توان خروجی مزرعه بادی اصلاح‌شده، N_f تعداد توربین‌های غیر فعال و N_T تعداد کل توربین‌ها است.

۳-۱ ارزیابی احتمالاتی TTC

۱-۳ فرمول‌بندی ریاضی محاسبه TTC

در شبکه انتقال به هم پیوسته، TTC بین دو ناحیه مورد محاسبه قرار می‌گیرد که ناحیه می‌تواند یک سیستم الکتریکی، ناحیه کنترلی، زیرناحیه یا باس باشد. نواحی سیستم به سه دسته تغذیه‌کننده، مصرف‌کننده^۲ و خارجی^۳ دسته‌بندی می‌شوند. شاخص TTC بیشترین حد انتقال توان از ناحیه تولیدکننده به ناحیه مصرف‌کننده بدون نقض هیچ یک از قیود سیستم را در شرایط اولیه مشخص (حالت مبنا) نشان می‌دهد. تعیین TTC را می‌توان به‌صورت یک مسأله برنامه‌ریزی غیر خطی مقید با تابع هدف و قیود زیر فرمول‌بندی کرد

$$\max f(P_{Gi(i \in \text{Source})}, P_{Lj(j \in \text{Sink})}, Q_{Lj(j \in \text{Sink})}) = \sum_{i \in \text{Source}} P_{Gi} \quad (4)$$

1. Source
2. Sink
3. External

که در آن N_i تعداد تکرارهایی از شبیه‌سازی مونت کارلو را نشان می‌دهد که TTC محاسبه شده در آنها در زیربازه i ام واقع شده است.

۴- تحلیل ریسک

روش‌های احتمالاتی به جای یک مقدار معین، بازه‌ای از تغییرات TTC را به همراه احتمال وقوع آن نتیجه می‌دهند. بهره‌بردار سیستم (ISO) در نهایت می‌بایست یک مقدار خاص از این بازه را انتخاب نماید. روش‌های مختلفی برای انتخاب TTC نهایی مبتنی بر روش‌های احتمالاتی وجود دارد [۱۰] و [۱۷] که استفاده از مقدار متوسط نهایی پرکاربردترین روش است [۲۸] و [۲۹]. تحلیل ریسک نیز یکی از روش‌های انتخاب مقدار نهایی TTC می‌باشد. در این مقاله چگونگی استفاده از تحلیل ریسک برای انتخاب مقدار نهایی TTC مورد بحث قرار می‌گیرد.

به‌طور کلی ریسک خطری است که از عدم قطعیت در سیستم ناشی می‌شود. در مسأله حاضر با توجه به تغییرات احتمالی TTC، هرچه مقدار بالاتری برای TTC نهایی انتخاب شود، ریسک آن بیشتر خواهد بود. در این مسأله ریسک را می‌توان به‌صورت زیر تعریف و محاسبه کرد.

وقوع TTC به هر میزان کمتر از مقدار تعیین شده (TTC_T) به‌عنوان ریسک تلقی می‌شود. بنابراین ریسک عدم دستیابی به (یا به‌عبارت دیگر قطع) یک TTC خاص برابر است با احتمال این که حد انتقال کلی سیستم کمتر از آن مقدار خاص باشد. بنابراین ریسک مربوط به انتخاب TTC_T به‌عنوان مقدار نهایی برابر است با

$$\text{Risk}(TTC_T) = \frac{N(TTC \leq TTC_T)}{NS} \quad (17)$$

که در آن $N(TTC \leq TTC_T)$ تعداد تکرارهایی از شبیه‌سازی مونت کارلو را نشان می‌دهد که مقدار TTC به‌دست آمده در آنها کمتر یا مساوی TTC_T است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با تغییر TTC_T ، مقدار ریسک بین صفر تا یک تغییر می‌کند. بهره‌بردار سیستم می‌تواند یک حد قابل قبول برای ریسک تعریف کرده و سپس از بین مقادیر مختلف TTC، مقدار متناظر با این حد ریسک را به‌عنوان مقدار نهایی حد تبادل کلی شبکه انتخاب نماید.

۵- دسته‌بندی داده‌ها و کاربرد آن

امروزه در بسیاری از علوم با حجم فراوانی از داده‌ها روبه‌رو هستیم که تحلیل و نتیجه‌گیری مناسب از آنها را دشوار ساخته است. در دسته‌بندی^۲ داده‌ها که با استفاده از روش‌های مختلف و بر اساس شباهت‌ها یا فاصله‌های آنها نسبت به هم انجام می‌شود، داده‌های تحت بررسی در دسته‌های متفاوت جای می‌گیرند. به‌صورتی که داده‌های قرارگرفته در یک دسته بیشترین شباهت و نزدیکی را به هم و بیشترین تفاوت و فاصله را با داده‌های دیگر دسته‌ها دارند [۲۰] و [۲۱].

با استفاده از دسته‌بندی، به‌جای بررسی حجم زیاد اطلاعات تنها دسته‌های محدودی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. تاکنون روش‌های متعددی برای دسته‌بندی داده‌ها معرفی شده است. این روش‌ها از وجود نوعی هم‌بستگی یا رابطه بین داده‌ها استفاده می‌کنند. در این مقاله از روش دسته‌بندی k -means برای دسته‌بندی داده‌های ورودی شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مونت کارلو شبیه‌سازی شده و برای هر وضعیت مقدار TTC با به‌کارگیری مدل ریاضی (۴) تا (۱۲) بر پایه OPF تعیین می‌شود. منحنی تغییرات توان خروجی مزرعه بادی با توجه به تغییرات ساعتی سرعت باد و منحنی "توان-سرعت" حاصل شده و در شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارزیابی احتمالاتی TTC شامل گام‌های زیر است:

گام ۱: با استفاده از تابع توزیع احتمالی یکسان یکی از ساعات در بازه مورد مطالعه به‌صورت تصادفی انتخاب شده و مقدار بار شبکه و توان خروجی مزرعه بادی در آن ساعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. گام ۲: با توجه به اطلاعات مربوط به احتمال وقوع خطا، وضعیت در مدار بودن یا نبودن تجهیزات سیستم از جمله توربین‌های بادی، به‌صورت تصادفی تعیین می‌شود.

گام ۳: توان تولیدی مزرعه بادی با توجه به تعداد توربین‌های در مدار با استفاده از (۳) اصلاح می‌شود.

گام ۴: با توجه به توان اکتیو تولیدی مزرعه بادی و احتمال خروج واحدهای تولیدی، توازن بین بار و تولید دچار تغییر می‌شود که می‌بایست اصلاح شوند. لذا تفاوت کل توان اکتیو تولیدی و بار بین ژنراتورهای معمولی سیستم، متناسب با ظرفیت آنها تقسیم می‌شود. توان اکتیو تولیدی به‌دست آمده در این گام برای ژنراتورهای موجود در نواحی مصرف‌کننده و خارجی در گام بعدی ثابت خواهند بود.

گام ۵: با مدل کردن مزرعه بادی به‌صورت PQ در سیستم و حل مدل ریاضی (۴) تا (۱۲) بر پایه OPF، میزان TTC در تکرار حاضر محاسبه می‌شود.

گام ۶: چنانچه معیار ایستایی شبیه‌سازی فراهم شد، شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد و در غیر این صورت گام‌های ۱ الی ۵ تکرار می‌شود. معیار ایستایی می‌تواند تعداد تکرار مشخص برای پروسه مونت کارلو یا حد مشخصی برای ضریب پراکندگی^۱ باشد.

با استفاده از داده‌های TTC به‌دست آمده از شبیه‌سازی مونت کارلو می‌توان مقدار متوسط نهایی، واریانس و ضریب پراکندگی مربوط به TTC را به‌ترتیب از روابط زیر محاسبه نمود

$$\overline{TTC} = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} TTC(k) \quad (13)$$

$$\text{Var}(TTC) = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} (TTC(k) - \overline{TTC})^2 \quad (14)$$

$$\text{CoVar}(TTC) = \frac{\text{Var}(TTC)}{\sqrt{NS} \times \overline{TTC}} \quad (15)$$

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

یکی دیگر از خروجی‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، نحوه توزیع احتمالی TTC است که حاوی اطلاعات با ارزشی در خصوص این پارامتر است. برای به‌دست آوردن این توزیع بازه تغییرات مقادیر TTC که از شبیه‌سازی مونت کارلو به‌دست آمده است، به چند زیربازه مساوی تقسیم می‌شود. سپس احتمال مربوط به هر زیربازه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\text{Prob}(i) = \frac{N_i}{NS} \quad (16)$$

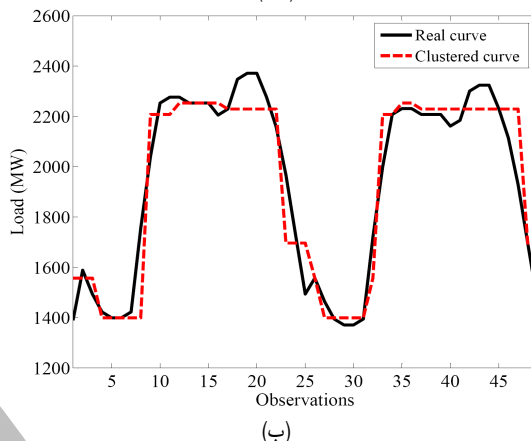
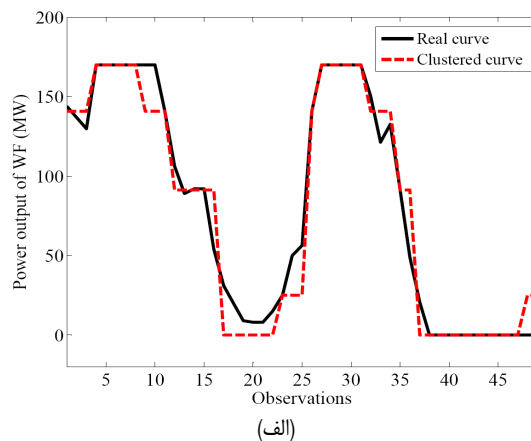
روش k -means اشکالاتی دارد که از آن جمله می‌توان به نبود متدی عمومی و کارا برای تشخیص تعداد دسته‌ها اشاره کرد [۲۰] و نیز با تغییر داده‌های اولیه در آغاز الگوریتم، نماینده نهایی هر دسته تغییر می‌کند. این روش نمی‌تواند همگرایی به سوی نقطه بهینه دسته‌بندی را تضمین کند و تنها در صورت استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری چون الگوریتم ژنتیک [۲۲] و تقبل بار محاسباتی آن می‌توان به پاسخ بهینه یا نزدیک به آن دست یافت. با تکرار چندین باره الگوریتم که با تغییر داده‌های اولیه در مرحله ۲ انجام می‌شود نیز می‌توان به پاسخ بهینه نزدیک شد [۲۳].

۲-۵ کاربرد دسته‌بندی در مطالعه ارزیابی TTC

همان‌طور که در بخش ۳ مطرح شد، ارزیابی TTC بر اساس شرایط اولیه تعریف شده (حالت مینا) برای سیستم انجام می‌شود. شرایط اولیه شامل ساختار شبکه، میزان تولید ژنراتورها و مقدار بار باس‌ها است. از آنجا که بار سیستم در حال تغییر و مزرعه بادی نیز دارای خروجی متغیر است، شرایط اولیه گوناگونی فقط با توجه به توان خروجی مزرعه بادی و بار شبکه ایجاد می‌شود که با لحاظ دیگر عوامل تصادفی تغییردهنده ساختار شبکه، تعداد بی‌شماری حالت اولیه فراهم می‌شود که بررسی آنها بار محاسباتی قابل توجهی را به دنبال دارد. لذا اگر بتوان با توجه به همبستگی داده‌های توان خروجی مزرعه بادی و مقدار بار سیستم دسته‌بندی مناسبی را ایجاد کرد، می‌توان بار محاسباتی ارزیابی TTC را کاهش داد. برای دست‌یافتن به این مهم، در این مقاله ابتدا توان خروجی مزرعه بادی (با فرض در مدار بودن همه توربین‌ها) با توجه به تغییرات سرعت باد برای تمامی ساعات در بازه مورد مطالعه محاسبه می‌شود. سپس با به‌کارگیری روش دسته‌بندی k -means اطلاعات بار سیستم و توان خروجی مزرعه بادی به‌طور توأم دسته‌بندی شده و در نهایت هر دسته توسط مقدار متوسط بار سیستم و متوسط توان خروجی مزرعه بادی که توسط داده‌های زیرمجموعه هر دسته محاسبه شده‌اند، مشخص می‌شوند.

پس در شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌جای انتخاب یکی از ساعات در گام اول، یکی از نمایندگان این دسته‌ها برای تشکیل شرایط اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روند، انتخاب هر نماینده بستگی به احتمال تعیین شده برای آن دسته دارد. احتمال هر دسته عددی بین صفر و یک است که از تقسیم تعداد داده‌های آن دسته بر کل تعداد داده‌ها حاصل می‌شود. برای انتخاب دسته‌ها از چرخ رولت استفاده می‌گردد. در این مطالعه، نماینده دسته انتخاب شده (که شامل سطح بار متوسط و تولید متوسط مزرعه بادی دسته انتخاب شده است) به همراه ساختار تصادفی تولید شده برای شبکه و توربین‌های در دسترس مزرعه بادی یکی از شرایط اولیه را در شبیه‌سازی مونت‌کارلو تشکیل می‌دهند. در این صورت به‌جای انتخاب وضعیت بار شبکه و توان خروجی مزرعه بادی از میان حجم وسیعی از داده‌ها، از مجموعه کوچک‌تری (مجموعه نمایندگان دسته‌ها) که خصوصیات کل داده‌ها (هم‌زمانی و ارتباط بین بار و توان توربین‌ها) را نیز حفظ کرده است، استفاده می‌شود. این امر می‌تواند به کاهش واریانس و تسریع همگرایی شبیه‌سازی مونت‌کارلو کمک نماید. البته باید توجه داشت که تغییرات TTC در شبیه‌سازی مونت‌کارلو از چند منبع ناشی می‌شود: عدم قطعیت در شرایط شبکه (وضعیت واحدهای تولیدی و خطوط)، تغییرات توان خروجی مزرعه بادی و تغییرات بار. میزان تأثیر دسته‌بندی بر کاهش تعداد تکرارهای مونت‌کارلو وابسته به این است که تغییرات باد و بار بیشتر TTC را تغییر می‌دهد یا دیگر عوامل.

شکل ۲ بخشی از اطلاعات توان خروجی مزرعه بادی و بار سیستم را به همراه دسته‌بندی انجام شده برای آنها نشان می‌دهد.



شکل ۲: (الف) تغییرات توان خروجی مزرعه بادی قبل و پس از دسته‌بندی و (ب) تغییرات بار سیستم قبل و پس از دسته‌بندی.

۱-۵ الگوریتم دسته‌بندی k -means

الگوریتم k -means یکی از متدهای متداول برای دسته‌بندی داده است که علاوه بر سادگی، به آسانی در بسیاری از مسائل عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توانایی دسته‌بندی حجم زیادی از داده‌ها را نیز دارد [۲۰]. مراحل اجرای الگوریتم به‌طور خلاصه عبارتست از:

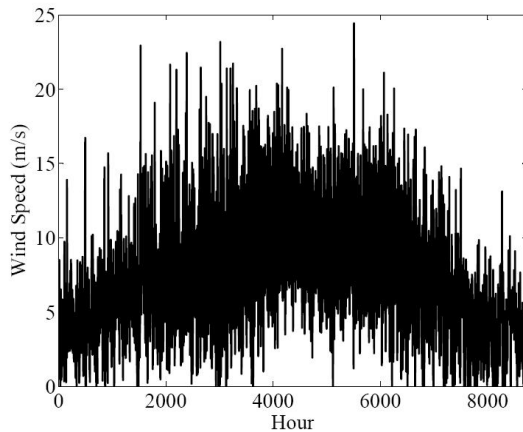
- ۱) تعیین تعداد دسته مورد نظر (k).
- ۲) انتخاب k داده اولیه به‌صورت تصادفی از میان کل داده‌ها و اختصاص آن به‌عنوان نماینده دسته (a_i), $i = 1, 2, \dots, k$.
- ۳) اختصاص سایر داده‌ها به دسته‌های تشکیل شده، بر اساس کم‌ترین فاصله تا نماینده دسته

$$m_j \in G_h \quad \text{if} \quad |m_j - a_h| < |m_j - a_i| \quad (18)$$

$$i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad i \neq h$$

- ۴) که در آن N معرف تعداد کل داده‌ها، m_j داده j ام و G_h دسته h ام است.
- ۵) محاسبه متوسط اعضای هر دسته و انتخاب آن به‌عنوان نماینده هر دسته $a_i = \sum_{j \in G_i} m_j / N_{G_i}$, $i = 1, 2, \dots, k$ که در آن N_{G_i} تعداد اعضای دسته i ام را نشان می‌دهد.
- ۶) تکرار مراحل ۳ و ۴ تا زمانی که کم‌ترین تغییر در مقدار نماینده هر دسته ایجاد شود.

فاصله اعداد در مرحله ۳ می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های مختلف چون City-block، Mikowski و Euclidean حساب شود [۲۰]. در نهایت خروجی الگوریتم دسته‌بندی k -means، متوسط (نماینده) دسته‌ها و احتمال آنهاست. احتمال هر دسته از تقسیم تعداد اعضای آن دسته بر کل تعداد داده‌ها حاصل می‌شود.



شکل ۴: تغییرات ساعتی سرعت باد در منطقه منجیل.

جدول ۱: مشخصات توربین‌های بادی [۶] و [۳۱].

Forced Outage Rate	Power Factor	V _{cin} (m/s)	V _r (m/s)	V _{co} (m/s)	Pr (MW)
۰٫۰۱	۰٫۹۶	۴	۱۰	۲۲	۲

نهایی TTC استفاده می‌شود. سپس تغییرات توأم باد و بار شبکه در نظر گرفته شده و با استفاده از ترکیب روش دسته‌بندی داده‌ها و شبیه‌سازی مونت کارلو، TTC با سطح واریانس کمتری مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این مطالعات از مقدار متوسط نهایی TTC استفاده شده است.

الف) ارزیابی تغییرات احتمالاتی TTC برای یک سطح بار ثابت

به منظور بررسی اثرات حضور مزرعه‌های بادی روی تغییرات احتمالاتی قابلیت تبادل شبکه انتقال آزمایش‌های زیر انجام شده است:

الف-۱) مقایسه مزرعه‌های بادی و معمولی و بررسی اثر ضریب نفوذ مزرعه‌های بادی.

الف-۲) بررسی اثر خطاهای سیستم.

الف-۳) بررسی اثر تغییرات سرعت باد.

الف-۴) بررسی اثر تغییرات پارامترهای توربین‌های بادی.

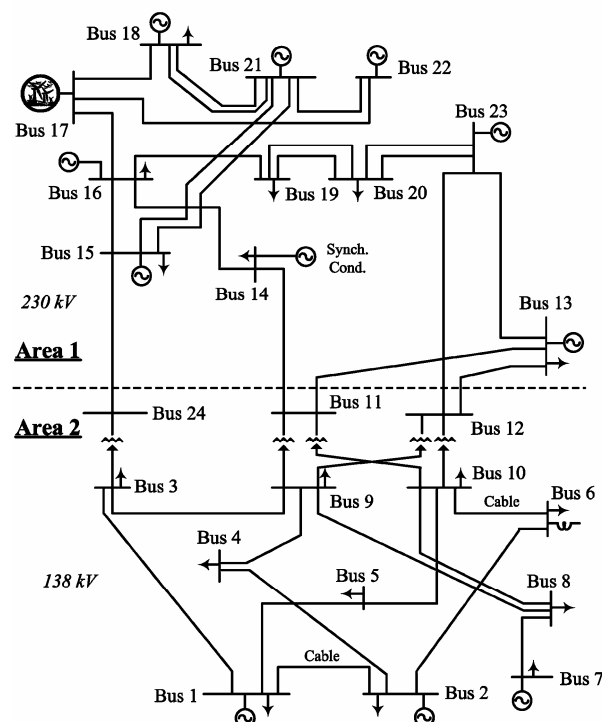
الف-۵) بررسی کاربرد تحلیل ریسک.

در ادامه ضمن تشریح هر یک از آزمایش‌های فوق، نتایج به دست آمده ارائه و بررسی شده است.

آزمایش الف-۱) مقایسه مزرعه‌های بادی و معمولی و اثر ضریب نفوذ مزرعه‌های بادی

به منظور بررسی اثر حضور مزرعه‌های بادی روی TTC و مقایسه آن با نیروگاه‌های معمولی، TTC شبکه در دو حالت اتصال یک مزرعه بادی با ظرفیت ۱۷۰ مگاوات و یک نیروگاه معمولی با ظرفیت ۱۷۰ مگاوات (شامل سه واحد ۵۰ مگاواتی و یک واحد ۲۰ مگاواتی) به باس شماره ۱۷ محاسبه و با هم مقایسه شده است. از آنجا که هدف اصلی این آزمایش مقایسه اثر ماهیت تولید مزرعه‌های بادی و مقایسه آن با نیروگاه‌های معمولی است، ارزیابی TTC در این آزمایش بدون در نظر گرفتن خطا در تجهیزات سیستم انجام شده است.

در صورت وصل نیروگاه معمولی، TTC از ناحیه ۱ به ۲ برابر ۱۳۴۴/۴۰ مگاوات می‌شود. در حالت وصل مزرعه بادی مقدار متوسط نهایی TTC برابر ۱۲۴۷/۲۷ مگاوات می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار TTC در این دو حالت متفاوت بوده و در حالت مزرعه بادی به علت ماهیت متغیر و تصادفی توان خروجی این نیروگاه‌ها، این مقدار کمتر است.



شکل ۳: دیاگرام تک خطی شبکه ۲۴ باس IEEE.

در این شکل اطلاعات به شش دسته تقسیم‌بندی شده‌اند. در اینجا دسته‌بندی برای دو گروه داده به‌طور همزمان انجام می‌شود. بنابراین تعداد بهینه دسته‌ها بیشتر از حالتی است که هر یک از گروه‌ها به تنهایی دسته‌بندی می‌شوند. چرا که می‌بایست تغییرات هر دو گروه داده در دسته‌بندی لحاظ شود. باید توجه داشت که در قبال کاهش حجم محاسبات از طریق دسته‌بندی، دقت در نتیجه محاسبات نیز کاهش می‌یابد.

۶- محاسبات عددی و نتایج

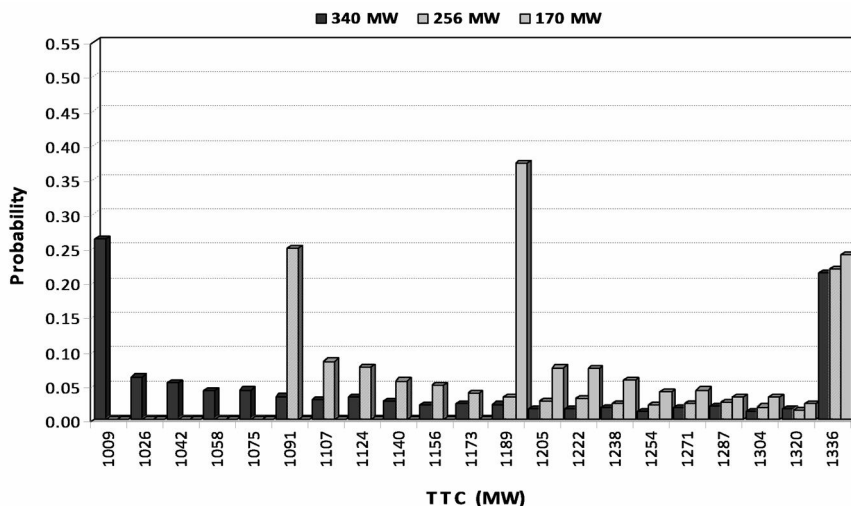
به منظور بررسی کارایی روش‌های پیشنهادی برای ارزیابی احتمالاتی TTC در حضور مزرعه‌های بادی از سیستم ۲۴ باس IEEE - RTS استفاده شده است. شکل ۳ دیاگرام تک خطی این سیستم را نشان می‌دهد. این سیستم دارای ۳۲ واحد نیروگاهی معمولی و ۳۳ خط انتقال است. کل بار سیستم ۲۸۵۰ مگاوات و کل ظرفیت نصب‌شده ۳۴۰۵ مگاوات بوده و دیگر اطلاعات این سیستم در [۳۰] ذکر شده است.

به منظور انجام مطالعات ارزیابی TTC، شبکه به دو ناحیه تقسیم شده که ناحیه ۱ به‌عنوان تغذیه‌کننده و ناحیه ۲ به‌عنوان مصرف‌کننده در نظر گرفته شده است. در این شبکه بدون در نظر گرفتن احتمال خطا در تجهیزات، TTC بین دو ناحیه برابر ۱۱۸۰ مگاوات است.

برای انجام مطالعات این مقاله یک مزرعه بادی به باس شماره ۱۷ این سیستم اضافه شده است. لازم به ذکر است که مکان اتصال مزرعه بادی در این مطالعه به‌عنوان اطلاعات ورودی در نظر گرفته می‌شود و دیگر باس‌های شبکه نیز می‌توانند برای اتصال مزرعه بادی انتخاب شوند. این مزرعه بادی شامل توربین‌های سرعت ثابت با توان نامی ۲ مگاوات است که مشخصاتشان در جدول ۱ آمده است.

همان‌طور که اشاره شد برای مدل‌سازی توربین‌های بادی، اطلاعات سرعت باد در منطقه منجیل در ایران استفاده شده است. شکل ۴ منحنی تغییرات سرعت باد در این ناحیه را برای ۸۷۳۶ ساعت نشان می‌دهد.

ابتدا طبق آنچه در اغلب محاسبات TTC مرسوم است، ارزیابی برای یک سطح بار ثابت انجام می‌شود و از تحلیل ریسک جهت انتخاب مقدار



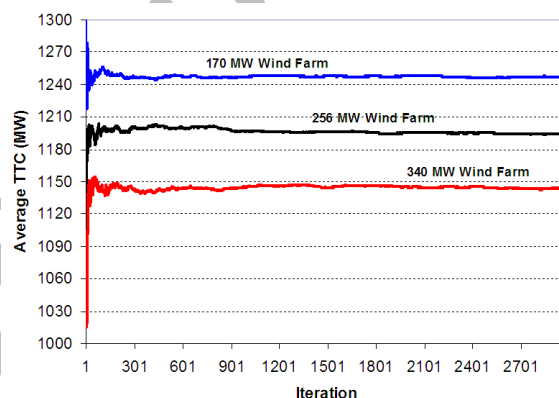
شکل ۵: منحنی توزیع احتمالی TTC در سه حالت نصب مزرعه بادی با ظرفیت‌های مختلف در آزمایش الف-۱.

جدول ۲: اندیس‌های آماری مربوط به TTC در آزمایش الف-۱.

ظرفیت مزرعه بادی (MW)	مقدار متوسط نهایی (MW)	بازه تغییرات (MW)	واریانس (MW ^۲)	انحراف معیار (MW)
۱۷۰	۱۲۴۷٫۲۷	۱۶۳٫۵۳	۴۲۸۹٫۵۷	۶۵٫۴۹
۲۵۶	۱۱۹۵٫۰۵	۲۴۵٫۰۶	۹۴۵۳٫۲۵	۹۷٫۲۳
۳۴۰	۱۱۴۴٫۲۰	۳۲۲٫۲۴	۱۶۳۵۷٫۶۱	۱۲۷٫۹۰

جدول ۳: اندیس‌های آماری مربوط به TTC در آزمایش الف-۲.

نیروگاه باس ۱۷	مقدار متوسط نهایی (MW)	بازه تغییرات (MW)	واریانس (MW ^۲)	انحراف معیار (MW)
معمولی ۱۷۰ مگاوات	۱۱۵۲٫۵۹	۹۸۲٫۰۴	۴۸۳۵۲٫۹۹	۲۱۹٫۸۹
بادی ۱۷۰ مگاوات	۱۰۶۶٫۹۳	۱۱۴۶٫۶۹	۵۰۹۲۱٫۹۸	۲۲۵٫۶۶



شکل ۶: تغییرات مقدار متوسط TTC طی تکرارهای مونت کارلو در آزمایش الف-۱.

در آزمایش‌های بعدی بخش (۶-الف)، حالت اتصال مزرعه بادی با ظرفیت ۱۷۰ مگاوات به باس شماره ۱۷ به‌عنوان "حالت پایه" در نظر گرفته شده و نتایج با آن مقایسه شده است.

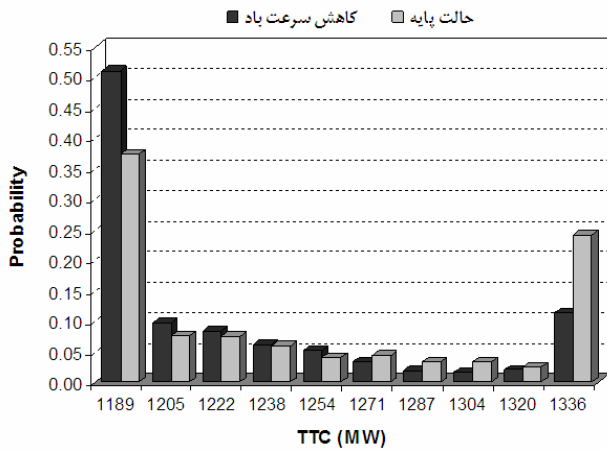
آزمایش الف-۲) اثر خطاهای سیستم

این آزمایش برای بررسی اثر مزرعه‌های بادی روی TTC با در نظر گرفتن خطا در تجهیزات سیستم طراحی شده است. از این رو TTC بین دو ناحیه در دو حالت اتصال یک نیروگاه معمولی با ظرفیت ۱۷۰ مگاوات (شامل سه واحد ۵۰ مگاواتی و یک واحد ۲۰ مگاواتی) و یا یک مزرعه بادی با همین ظرفیت به باس شماره ۱۷ با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ارزیابی شده است. در این آزمایش احتمال خطا در خطوط انتقال، ژنراتورهای معمولی و توربین‌های بادی در شبیه‌سازی لحاظ شده است.

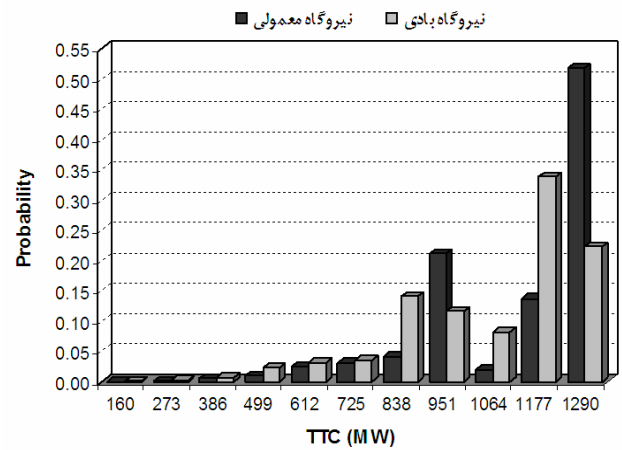
توزیع احتمالی TTC به‌دست آمده در دو حالت فوق در شکل ۷ نمایش داده و با هم مقایسه شده است. اندیس‌های آماری مربوط به این آزمایش نیز در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، منظور نمودن خطاها به‌عنوان یک منبع عدم قطعیت موجب ایجاد تغییرات احتمالی در میزان TTC حتی بدون حضور مزرعه بادی شده است.

در حالت اتصال مزرعه بادی این تغییرات تشدید شده به‌نحوی که بازه تغییرات از ۹۸۲٫۰۴ در حالت اتصال نیروگاه معمولی به ۱۱۴۶٫۶۹ افزایش

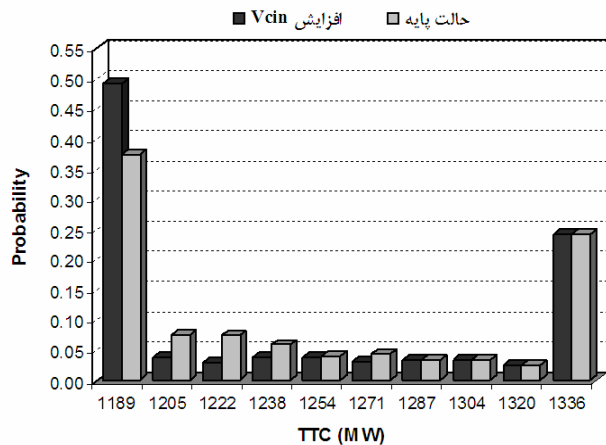
اثر ضریب نفوذ مزرعه‌های بادی در سیستم روی تغییرات TTC نیز در این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور با تغییر ظرفیت مزرعه بادی متصل به باس شماره ۱۷ به مقادیر ۲۵۶ و ۳۴۰ مگاوات، ارزیابی TTC با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تکرار شده است. برای فراهم‌نمودن امکان مقایسه با حالت اتصال مزرعه بادی ۱۷۰ مگاواتی و ثابت نگه داشتن کل ظرفیت تولید، ظرفیت ژنراتورهای معمولی ناحیه ۱ در دو حالت مذکور به‌ترتیب به میزان ۸۶ و ۱۷۰ مگاوات کاهش داده شده است. این کاهش ظرفیت متناسب با ظرفیت اولیه ژنراتورهای معمولی بین آنها تقسیم شده است. در شکل ۵ توزیع احتمالی TTC برای سه وضعیت نصب مزرعه بادی با ظرفیت‌های ۱۷۰، ۲۵۶ و ۳۴۰ مگاوات نمایش داده شده است. از آنجا که RTS دارای شبکه انتقال قوی است، در اغلب تکرارهای شبیه‌سازی قیود واحدهای تولیدی عامل محدودکننده TTC است، از این رو مزرعه بادی می‌تواند تأثیر قابل توجهی ایجاد کند. شکل ۵ نشان می‌دهد که احتمال مقادیر کم و زیاد TTC بیشتر از سایر مقادیر است که دلیل آن رفتار غیر خطی مزرعه بادی است. چنانچه سرعت باد کمتر از V_{cin} یا بیشتر از V_{co} باشد، توان نیروگاه بادی صفر بوده و اگر سرعت باد در بازه $[V_r, V_{co}]$ باشد، مزرعه بیشترین تولید را خواهد داشت. بدیهی است که بخش قابل توجهی از داده‌های سرعت باد در این بازه‌ها قرار می‌گیرند. شکل ۶ تغییرات مقدار متوسط TTC طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در حالت اتصال مزرعه بادی با ظرفیت‌های مختلف به باس شماره ۱۷ را نشان می‌دهد. در جدول ۲ نیز نتایج محاسبه مقدار متوسط نهایی، بازه تغییرات، واریانس و انحراف معیار TTC در این سه وضعیت آمده است.



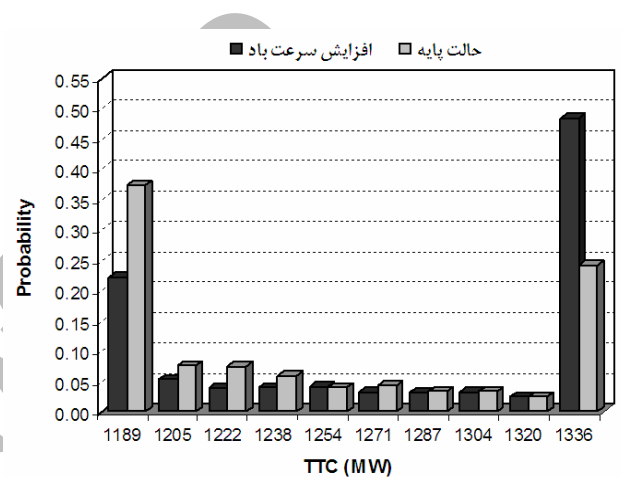
شکل ۹: منحنی توزیع احتمالی TTC در حالت کاهش سرعت باد در آزمایش الف-۳.



شکل ۷: منحنی توزیع احتمالی TTC در دو حالت با در نظر گرفتن خطاها در آزمایش الف-۲.



شکل ۱۰: منحنی توزیع احتمالی TTC در حالت افزایش V_{cin} در آزمایش الف-۴.



شکل ۸: منحنی توزیع احتمالی TTC در حالت افزایش سرعت باد در آزمایش الف-۳.

با افزایش سرعت باد در حالت اول، بیشترین فراوانی سرعت باد حدوداً به بازه $[6\text{ m/s}, 10\text{ m/s}]$ منتقل شده و همان گونه که شکل ۸ نشان می‌دهد، احتمال وقوع TTC‌های پایین، کم و به همان اندازه احتمال وقوع TTC ماکزیمم، زیاد شده است. نکته قابل توجه این است که مقدار TTC ماکزیمم تغییر نکرده است. علت این امر وجود رابطه غیر خطی میان سرعت باد و توان خروجی در توربین‌های بادی است که در آن به‌ازای سرعت‌های باد در بازه $[V_r, V_{co}]$ مقدار توان خروجی تغییر نمی‌کند. همچنین در شکل ۹ مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت باد احتمال وقوع سرعت‌های کمتر از V_{cin} بیشتر شده و در نتیجه احتمال وقوع TTC‌های بالا کاهش پیدا کرده و به‌جای آن احتمال وقوع TTC‌های پایین زیاد شده است.

آزمایش الف-۴) اثر تغییرات پارامترهای توربین‌های بادی

در این آزمایش اثر پارامترهای توربین بادی روی TTC مطالعه شده است. چون توان خروجی مزرعه بادی به شدت به مشخصات توربین‌ها وابسته است، پیش‌بینی می‌شود TTC نیز با تغییرات قابل توجهی روبه‌رو شود. بنابراین در دو حالت، ارزیابی TTC انجام و نتایج به‌دست آمده با حالت پایه در آزمایش الف-۱ مقایسه شده است. برای بررسی اثر V_{cin} در حالت اول این پارامتر به 6 m/s تغییر پیدا کرده که بیشتر از حالت پایه است. در حالت دوم به‌منظور مطالعه اثر تغییر V_r ، مقدار این پارامتر به 12 m/s تغییر داده شده است. دیگر شرایط و اطلاعات ورودی در این دو حالت مشابه حالت پایه در آزمایش الف-۱ است. توزیع احتمالی TTC حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو در این دو حالت به‌ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمایش و با حالت پایه مقایسه شده است.

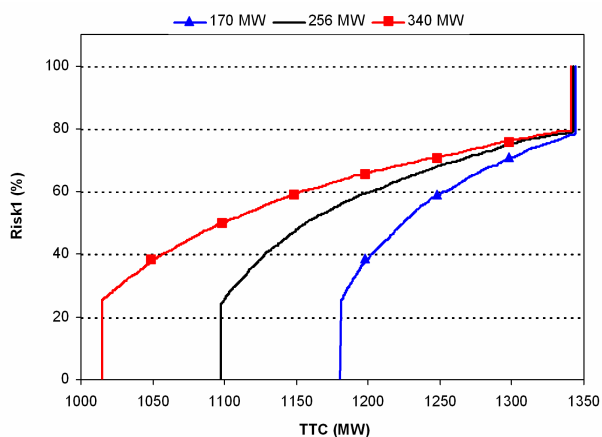
جدول ۴: اندیس‌های آماری مربوط به TTC در آزمایش الف-۳.

وضعیت سرعت باد	مقدار متوسط نهایی (MW)	بازه تغییرات (MW)	واریانس (MW ²)	انحراف معیار (MW)
افزایش با ضریب ۱/۵	۱۲۸۲/۱۹	۱۶۳/۵۳	۴۶۶۰/۱۹	۶۸/۲۶
کاهش با ضریب ۰/۸	۱۲۲۵/۱۰	۱۶۳/۵۳	۱۷۳۴/۷۲	۴۱/۶۵

پیدا کرده است. علاوه بر این واریانس تغییرات TTC نیز در حالت اتصال مزرعه بادی بیشتر از حالت نیروگاه معمولی است. همچنین مقادیر متوسط نهایی TTC در حالت مزرعه بادی به‌علت ماهیت متغیر و تصادفی توان تولیدی توربین‌های بادی، کمتر از حالت نیروگاه معمولی است.

آزمایش الف-۳) اثر تغییرات سرعت باد

هدف از اجرای این آزمایش بررسی اثر تغییرات سرعت باد روی TTC بین دو ناحیه در سیستم مورد مطالعه است. به‌همین منظور در دو حالت مسأله اجرا شده است که در آنها مقادیر سرعت باد با ضریب ۱/۵ و ۰/۸ به‌ترتیب افزایش و کاهش داده شده است. دیگر شرایط و اطلاعات ورودی در این آزمایش همانند حالت پایه در آزمایش الف-۱ است. توزیع احتمالی TTC حاصل از اجرای این دو حالت به‌ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده و با حالت پایه در آزمایش الف-۱ مقایسه شده‌اند. در جدول ۴ نیز نتایج محاسبه اندیس‌های آماری مرتبط با TTC در این دو حالت آمده است.



شکل ۱۲: تغییرات ریسک برای سه ظرفیت مزرعه بادی در آزمایش الف-۱.

جدول ۶: مقدار TTC نهایی در آزمایش‌های الف-۱ و الف-۲ متناظر با ریسک ۳۰ و ۴۰ درصد.

مقدار ریسک	آزمایش‌ها	
	%۴۰	%۳۰
آزمایش الف-۱	۱۲۰۲/۰۵	۱۱۸۶/۷۰
	ظرفیت مزرعه بادی ۱۷۰ مگاوات (حالت پایه)	
	۱۱۲۷/۹۸	۱۱۰۷/۵۳
آزمایش الف-۲	۱۰۵۶/۱۹	۱۰۲۷/۱۵
	ظرفیت مزرعه بادی ۳۴۰ مگاوات	
	۱۱۴۶/۵۰	۹۹۸/۷۷
	با وجود خطاها با نیروگاه معمولی	
	۱۰۴۲/۴۷	۹۵۸/۰۱
	با وجود خطاها با مزرعه بادی	

منحنی‌هایی از این دست اطلاعات با ارزشی را در خصوص تغییرات ریسک TTC در اختیار بهره‌بردار سیستم قرار می‌دهد و این امکان را فراهم می‌کند که بهره‌بردار سیستم بتواند مقدار TTC نهایی شبکه را متناظر با حد ریسک مورد قبول تعیین نماید. در جدول ۶ به‌عنوان نمونه TTC نهایی متناظر با ریسک ۳۰ و ۴۰ درصد در آزمایش‌های الف-۱ و الف-۲ داده شده است.

نتایج حاصل از این قسمت حاکی از آن است که تحلیل ریسک ضمن ارائه اطلاعات ارزشمند در خصوص قابلیت تبادل کلی شبکه‌های انتقال، می‌تواند به‌عنوان ابزاری توانمند و قابل انعطاف در انتخاب مقادیر نهایی TTC شبکه‌های انتقال در حضور مزرعه‌های بادی در شرایط مختلف کاربرد داشته باشد.

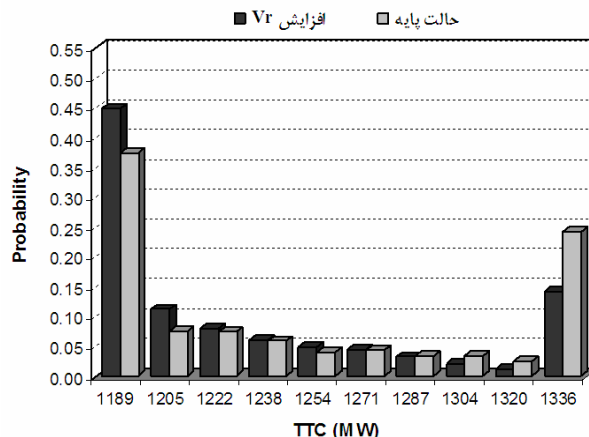
ب) ارزیابی احتمالاتی TTC با لحاظ تغییرات باد و بار

در مطالعات این قسمت علاوه بر تغییرات توان خروجی مزرعه‌های بادی، تغییرات بار شبکه نیز در ارزیابی احتمالاتی TTC لحاظ شده است.

آزمایش ب-۱) ارزیابی احتمالاتی TTC با لحاظ تغییرات ساعتی باد و بار

در این آزمایش از داده‌های ساعتی توان خروجی مزرعه بادی و بار شبکه برای تعیین TTC استفاده می‌شود. از آنجا که علاوه بر رفتار توربین‌های بادی و بار سیستم، خطای تجهیزات شبکه نیز بر مقدار TTC مؤثر است، برای مطالعه تأثیر عوامل تصادفی مذکور، این آزمایش در دو حالت زیر اجرا می‌شود:

آزمایش ب-۱-۱): TTC با در نظر گرفتن تغییرات بار سیستم و توان خروجی مزرعه بادی و با فرض عدم وجود خطا در تجهیزات سیستم ارزیابی می‌شود.



شکل ۱۱: منحنی توزیع احتمالی TTC در حالت افزایش Vr در آزمایش الف-۴.

جدول ۵: اندیس‌های آماری مربوط به TTC در آزمایش الف-۴.

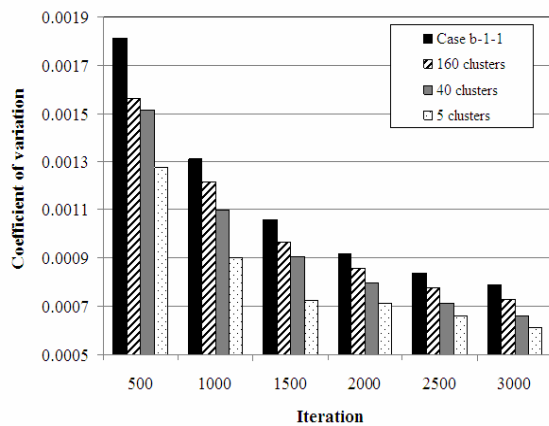
تغییر در توربین بادی	مقدار متوسط نهایی (MW)	بازه تغییرات (MW)	واریانس (MW ²)	انحراف معیار (MW)
افزایش پارامتر V _{cin}	۱۲۴۱/۵۶	۱۶۳/۵۳	۴۷۴۷/۶۰	۶۸/۹۰
افزایش پارامتر V _r	۱۲۲۹/۸۹	۱۶۳/۵۳	۳۳۰/۴	۵۷/۴۸

در جدول ۵ نیز اندیس‌های آماری TTC در این دو حالت ارائه شده است. با افزایش V_{cin} در حالت اول، خروجی توربین‌های بادی به‌ازای تمامی سرعت‌های کمتر از ۶ m/s برابر صفر خواهد بود و عملاً به‌ازای حالت‌های بیشتری خروجی مزرعه بادی صفر می‌باشد. در نتیجه همان‌طور که در شکل ۱۰ نیز مشاهده می‌شود، احتمال وقوع TTC مینیمم زیاد شده است. در حالت دوم همان‌گونه که در شکل ۱۱ نمایان است، احتمال وقوع TTC‌های پایین زیاد و برای TTC‌های بالا نسبت به حالت پایه کمتر شده است. چرا که عملاً احتمال وقوع سرعت‌های باد در بازه [V_r, V_{co}] که مقادیر TTC بالاتری را نتیجه می‌دهند، کاهش و در بازه [V_{cin}, V_r] که مقادیر TTC پایین‌تر را نتیجه می‌دهند، افزایش یافته است.

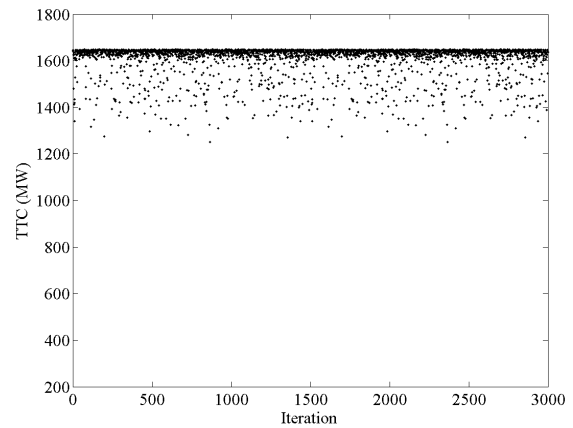
آزمایش الف-۵) بررسی کاربرد تحلیل ریسک

در آزمایش‌های قبل اثر حضور مزرعه‌های بادی روی توزیع احتمالی TTC در سیستم مورد مطالعه بررسی شد. در این قسمت کاربرد تحلیل ریسک در انتخاب مقدار نهایی TTC در آزمایش‌های الف-۱ و الف-۲ مبتنی بر دیدگاه ارائه‌شده در قسمت ۴ مقاله نشان داده شده است.

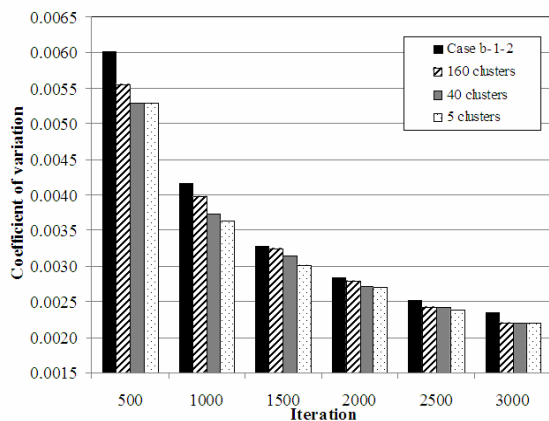
در شکل ۱۲ تغییرات ریسک به‌ازای انتخاب مقادیر مختلف TTC در سه حالت ظرفیت مزرعه بادی که در آزمایش الف-۱ به آن اشاره شد، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، مقدار ریسک به‌ازای انتخاب مقادیر مختلف TTC بین صفر تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌کند. علاوه بر این، مقدار ریسک متناظر با یک مقدار خاص TTC با افزایش ضریب نفوذ مزرعه‌های بادی زیاد می‌شود. از این رو بهره‌بردار سیستم برای دستیابی به یک حد ریسک مورد قبول با افزایش ضریب نفوذ مزرعه‌های بادی، می‌بایست مقادیر پایین‌تری را برای TTC شبکه انتخاب نمایند. همچنین در این شکل ملاحظه می‌شود که حداقل ریسک موجود برای TTC حدود ۲۵٪ است. علت این امر رابطه بین توان تولیدی و سرعت باد توربین‌های بادی است که در آن برای مقادیر سرعت باد کمتر از V_{cin} توان خروجی توربین صفر است. این امر عملاً احتمال عدم تولید توان در مزرعه بادی را افزایش می‌دهد.



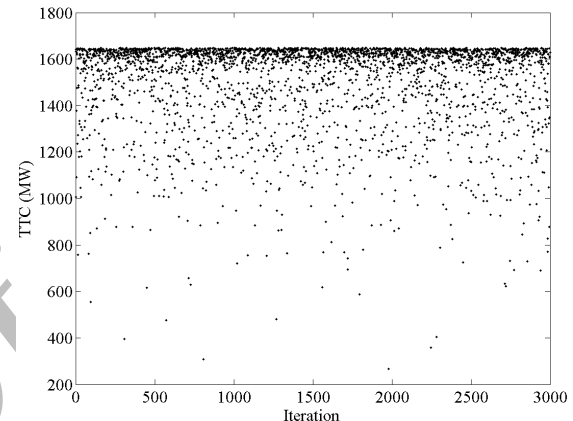
شکل ۱۵: تغییرات ضریب پراکندگی ارزیابی TTC در آزمایش ب-۱-۱ برای دسته‌های مختلف.



شکل ۱۳: مقادیر TTC به دست آمده طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در آزمایش ب-۱-۱.



شکل ۱۶: تغییرات ضریب پراکندگی ارزیابی TTC در آزمایش ب-۱-۲ برای دسته‌های مختلف.



شکل ۱۴: مقادیر TTC به دست آمده طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در آزمایش ب-۱-۲.

جدول ۷: نتایج نهایی ارزیابی TTC در آزمایش ب-۱-۲.

ضریب پراکندگی	واریانس (MW)	TTC (MW)	تعداد دسته‌ها
۰/۰۰۰۶۱۱	۲۰۶۱/۴	۱۶۲۱/۱	۵
۰/۰۰۰۶۶۲	۳۴۱۶/۲	۱۶۱۳/۹	۴۰
۰/۰۰۰۷۳۹	۴۱۴۵/۶	۱۶۱۲/۳	۱۶۰
۰/۰۰۰۷۸۹	۴۳۳۴/۵	۱۶۱۰/۸	۸۷۳۶ (Case ۱-۱)

آزمایش ب-۲) بررسی کاربرد دسته‌بندی داده‌ها در ارزیابی TTC

این آزمایش به منظور بررسی کاربرد دسته‌بندی داده‌های ورودی در ارزیابی TTC و نیز نمایش اثر تعداد دسته‌ها روی افزایش سرعت همگرایی مونت کارلو طراحی شده است. از این رو در دو حالت زیر TTC محاسبه و نتایج با آزمایش‌های ب-۱-۱ و ب-۱-۲ مقایسه شده است:

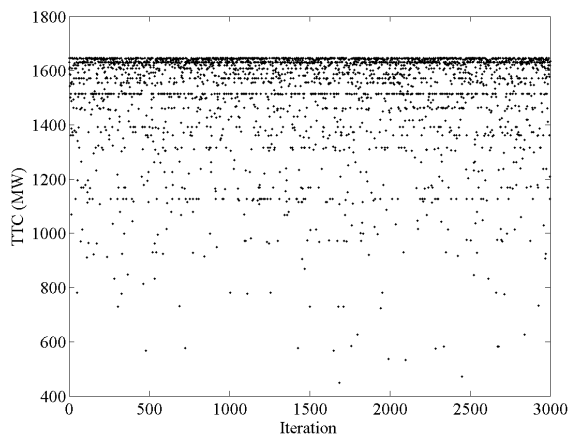
آزمایش ب-۱-۲: اطلاعات به تعداد مختلف (۵، ۴۰ و ۱۶۰ دسته) دسته‌بندی می‌شوند و سپس ارزیابی TTC با در نظر گرفتن تغییرات توان مزرعه بادی و بار سیستم و با فرض عدم وجود خطا در تجهیزات سیستم ارزیابی می‌شود.

آزمایش ب-۲-۲: اطلاعات به دسته‌های مختلف (۵، ۴۰ و ۱۶۰) دسته‌بندی می‌شوند و سپس ارزیابی TTC با در نظر گرفتن تغییرات توان مزرعه بادی و بار سیستم و خطاهای محتمل در تجهیزات شبکه و توربین‌های بادی انجام می‌شود.

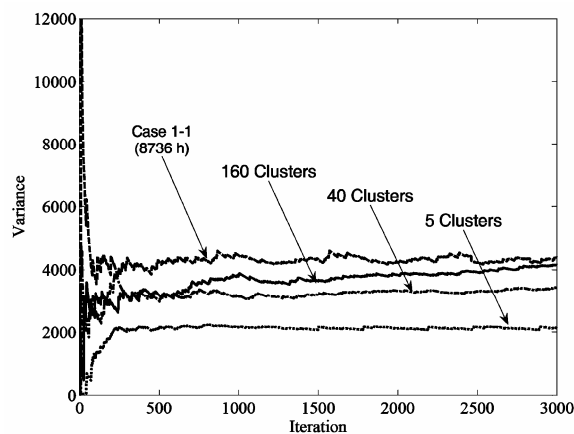
شبیه‌سازی مونت کارلو در این دو حالت نیز برای ۳۰۰۰ تکرار انجام شده است. به منظور نشان دادن نتایج بررسی‌ها و مقایسه سرعت همگرایی از دو شکل ۱۵ و ۱۶ استفاده شده است که به ترتیب تغییرات ضریب پراکندگی (CoVar) نتایج محاسبات TTC را طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو برای آزمایش‌های ب-۱-۲ و ب-۲-۲ نشان می‌دهند. برای فراهم نمودن امکان مقایسه، تغییرات CoVar طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در آزمایش‌های ب-۱-۱ و ب-۲-۱ نیز به ترتیب در این دو شکل نشان داده شده‌اند. نتایج نهایی حاصل شده در این آزمایش‌ها نیز به ترتیب در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است.

آزمایش ب-۱-۲: TTC با در نظر گرفتن تغییرات بار شبکه، توان خروجی مزرعه بادی و احتمال وقوع خطا در تجهیزات شبکه ارزیابی می‌شود.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب مقادیر TTC حاصل شده طی تکرارهای مونت کارلو در دو حالت فوق را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پراکندگی مقادیر TTC در حالت وجود خطا در تجهیزات سیستم بیشتر می‌باشد. شبیه‌سازی مونت کارلو در این دو حالت برای ۳۰۰۰ تکرار انجام شده است. مقدار TTC نهایی در آزمایش‌های ب-۱-۱ و ب-۲-۱ به ترتیب عبارتند از ۱۶۱۰/۸ مگاوات و ۱۵۰۷/۶ مگاوات. از آنجا که در آزمایش ب-۱-۲ خطای تجهیزات لحاظ شده‌اند، بدیهی است که مقدار نهایی حاصل شده برای TTC کمتر از مقدار به دست آمده در آزمایش ب-۱-۱ باشد. در صورت اعمال خطا در محاسبات (آزمایش ب-۱-۲)، بازه تغییرات TTC از [۱۶۴۸، ۱۲۵۱/۲] مگاوات در آزمایش ب-۱-۱ به [۲۶۷/۲۸، ۱۶۴۸/۲] مگاوات افزایش می‌یابد. علاوه بر این واریانس تغییرات TTC نیز در صورت لحاظ کردن خطاها از ۴۳۳۴/۵ به ۳۷۶۱۵ افزایش یافته است.



شکل ۱۹: مقادیر TTC طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در آزمایش ب-۲ برای دسته ۵.



شکل ۱۷: واریانس تغییرات TTC طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در آزمایش ب-۲ برای دسته‌بندی‌های مختلف.

جدول ۸: نتایج نهایی ارزیابی TTC در آزمایش ب-۲.

ضریب پراکندگی	واریانس (MW)	TTC (MW)	تعداد دسته‌ها
۰/۰۰۲۲۰۵	۳۳۶۹۸	۱۵۱۹/۸	۵
۰/۰۰۲۲۲۱	۳۳۷۹۲	۱۵۱۱/۵	۴۰
۰/۰۰۲۲۸۹	۳۵۵۰۹	۱۵۰۹/۳	۱۶۰
۰/۰۰۲۳۴۹	۳۷۶۱۵	۱۵۰۷/۶	(Case ۱-۲) ۸۷۳۶

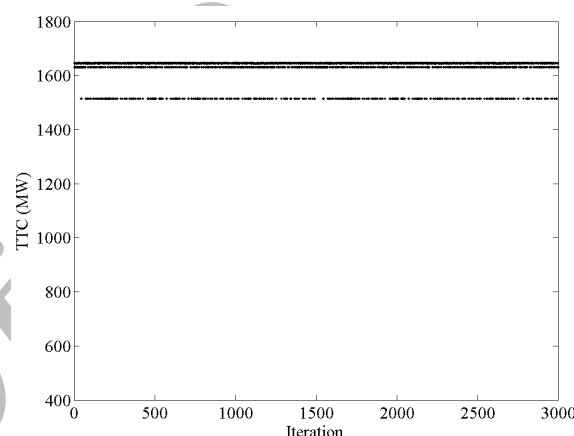
توجه است به طوری که در حالت مربوط به ۵ دسته داده، استفاده از دسته‌بندی تنها موجب کاهش ۳۹۶ تکرار مونت کارلو نسبت به آزمایش ب-۱ شده است. مقدار نهایی ضریب پراکندگی در آزمایش ب-۱-۲ برابر ۰/۰۰۲۳۴۹ است که در تکرار ۳۰۰۰ پروسه مونت کارلو حاصل شده است. دیگر آزمایش‌ها که از ۱۶۰، ۴۰ و ۵ دسته در شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کرده‌اند به ترتیب در تکرارهای ۲۹۳۱، ۲۶۸۴ و ۲۶۰۴ به این مقدار دست یافته‌اند.

در شکل ۱۷ تغییرات واریانس به‌ازای تعداد دسته‌های مختلف در آزمایش ب-۲ طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده و با حالت بدون استفاده از دسته‌بندی (آزمایش ب-۱-۱) مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل نمایان است، استفاده از دسته‌بندی اطلاعات موجب کاهش واریانس نتایج محاسبات TTC شده است و این کاهش برای حالت ۵ دسته بیش از همه می‌باشد.

شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب مقادیر TTC به‌دست آمده در تکرارهای مختلف برای حالت ۵ دسته در آزمایش‌های ب-۲-۱ و ب-۲-۲ را نشان می‌دهد. با مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که پراکندگی مقادیر TTC در حالت استفاده از دسته‌بندی اطلاعات با ۵ دسته داده در مقایسه با حالت بدون استفاده از دسته‌بندی کاهش پیدا کرده است.

۷- نتیجه‌گیری

از آنجا که بار سیستم و توان خروجی مزرعه‌های بادی دارای تغییراتی نسبت به زمان هستند لازم است تغییرات این عوامل و ارتباط احتمالی بین آنها در ارزیابی TTC مورد توجه قرار گیرد. به این منظور در این مقاله روشی برای ارزیابی احتمالاتی TTC شبکه انتقال در حضور مزرعه‌های بادی مطرح گردید و در روش پیشنهادی از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. با استفاده از روش پیشنهادی توزیع احتمالی و دیگر شاخص‌های احتمالاتی مربوط به TTC شبکه قابل محاسبه است که اطلاعات با ارزشی را در خصوص طبیعت متغیر TTC شبکه در حضور مزرعه‌های بادی در اختیار اپراتور سیستم قرار می‌دهد. با توجه به اهمیت بحث



شکل ۱۸: مقادیر TTC طی تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو در آزمایش ب-۲ برای دسته ۵.

همان‌گونه که تغییرات ضریب پراکندگی در شکل ۱۵ نشان می‌دهد، مقدار CoVar که معیار همگرایی شبیه‌سازی مونت کارلو است، در صورت استفاده از دسته‌بندی داده‌ها کاهش پیدا کرده است. این امر نشان می‌دهد که استفاده از دسته‌بندی اطلاعات می‌تواند به همگرایی سریع‌تر نتایج محاسبات کمک نماید. این بهبود همگرایی برای ۵ دسته بیش از سایرین بوده و با افزایش تعداد کلاسترها کاهش می‌یابد. به طوری که آزمایش ب-۱-۱ که با استفاده از تمامی داده‌ها (۸۷۳۶) اجرا شده است، دارای کمترین سرعت همگرایی است. مقدار نهایی ضریب پراکندگی در تکرار ۳۰۰۰ در آزمایش ب-۱-۱ برابر ۰/۰۰۰۷۸۹ است. دیگر آزمایش‌ها که از ۱۶۰، ۴۰ و ۵ دسته در شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کرده‌اند به ترتیب در تکرارهای ۲۴۴۲، ۲۰۵۲ و ۱۲۹۳ به این مقدار دست یافته‌اند. ملاحظه می‌گردد که محاسبات اجرا شده برای ۵ دسته دارای بیشترین سرعت است که ۱۷۰۷ تکرار کمتر از آزمایش ب-۱-۱ است.

در حالت عدم وجود خطا در تجهیزات سیستم، دقیق‌ترین مقدار TTC با استفاده از آزمایش ب-۱-۱ تعیین می‌شود که در آن تمامی ساعات در ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد، استفاده از تعداد دسته‌های کمتر با این که سرعت همگرایی را افزایش می‌دهد، اما دقت محاسبات را نیز اندکی کاهش می‌دهد.

بررسی نتایج ارائه شده در شکل ۱۶ و جدول ۸ نشان می‌دهد که در صورت منظور کردن خطای تجهیزات و توربین‌های بادی در ارزیابی TTC، اثر دسته‌بندی بر بهبود همگرایی محاسبات کاهش می‌یابد. این امر نشانگر این است که تأثیری که لحاظ کردن خطاها بر TTC ایجاد می‌کند، قابل

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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. -Gener, Transm, Distrib.*, vol. 149, no. 4, pp. 427-431, Jul. 2002.
- [16] A. B. Rodrigues and M. G. Da Silva, "Probabilistic assessment of available transfer capability based on Monte Carlo method with sequential simulation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 484-492, Feb. 2007.
- [17] W. Li, P. Wang, and Z. Guo, "Determination of optimal total transfer capability using a probabilistic approach," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 862-868, May 2006.
- [18] C. Singh and Y. Kim, "An efficient technique for reliability analysis of power systems including time dependent sources," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 1090-1096, Aug. 1988.
- [19] D. Fogel, "An introduction to simulated evolutionary optimization," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 5, no. 1, pp. 3-14, Jan. 1994.
- [20] J. Peña, J. Lozano, and P. Larrañaga, "An empirical comparison of four initialization methods for the K-means algorithm," *Pattern Recognition Letter.*, vol. 20, no. 10, pp. 1027-1040, Oct. 1999.
- [21] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang, and W. F. Tinney, "Available transfer capability calculations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1521-1527, Nov. 1998.
- [22] Y. Ou and C. Singh, "Assessment of available transfer capability and margins," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 463-468, May 2002.
- [23] P. Giorsetto and K. F. Utsurogi, "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 1, pp. 134-143, Jan. 1983.
- [24] R. Xu and D. Wunsch, "Survey of clustering algorithms," *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 16, no. 3, pp. 645-678, May 2005.
- [25] J. C. O. Mello, A. C. G. Melo, and S. Granville, "Simultaneous transfer capability assessment by combining interior point methods and Monte Carlo simulation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 736-742, May 1997.
- [26] Y. Cheng, T. S. Chung, C. Y. Chung, and C. W. Yu, "Dynamic voltage stability constrained atc calculation by a qss approach," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 28, no. 6, pp. 408-412, Jul. 2006.
- [27] C. Y. Chung, L. Wang, F. Howell, and P. Kundur, "Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small-signal stability," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 524-530, Feb. 2004.
- [28] Iran Meteorological Organization, <http://www.weather.ir>.
- [29] Y. Cui, Z. Bie, and X. Wang, "Study on calculation of probabilistic available transfer capability," in *Proc. Int. Conf. on Power System Technology, PowerCon 2002*, vol. 4, pp. 2052-2056, 2002.
- [30] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee, "IEEE reliability test system," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 98, no. 6, pp. 2047-2054, Nov./Dec. 1979.
- [31] J. Ribrant and L. M. Bertling, "Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 167-173, Mar. 2007.

مریم رضائی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مهندسی برق - کنترل در سال ۱۳۷۷ در دانشگاه فردوسی مشهد و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۷ در دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم اکنون استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند می باشد. ایشان در سال های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ به عنوان همکار تحقیقاتی در دانشگاه A&M تگزاس فعالیت داشته است. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه وی عبارتند از: سیستم های قدرت تجدید ساختار شده، شبکه های توزیع انرژی الکتریکی، مطالعات احتمالاتی سیستم های قدرت، قابلیت اطمینان.

محمودرضا حقی فام تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی برق در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه تبریز، در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۶۹ از دانشگاه تهران و در مقطع دکتری در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم اکنون استاد دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس می باشد. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه

ریسک و مدیریت آن در بهره برداری از سیستم های قدرت تجدید ساختار یافته، روشی مبتنی بر ریسک برای انتخاب مقدار نهایی TTC مبتنی بر آن ارائه شد. نتایج مطالعات نشان می دهد حضور توربین های بادی در سیستم، مقدار TTC شبکه انتقال را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می دهند. البته این تأثیر به مشخصات توربین های بادی و رفتار باد در ناحیه وابسته است. همچنین نتایج حاکی از این است که با افزایش نفوذ مزرعه های بادی میزان تأثیرپذیری TTC از حضور این نیروگاه ها بیشتر می شود و با توجه به ماهیت توأم با عدم قطعیت این نیروگاه ها، به کارگیری ابزارها و روش های محاسباتی برای ارزیابی دقیق تر TTC امری اجتناب ناپذیر خواهد بود.

نتایج ارزیابی TTC با استفاده از داده های ورودی دسته بندی شده در مقایسه با این ارزیابی در صورت استفاده از تمام داده ها در بازه تحت مطالعه، نشان می دهد به کار بردن دسته بندی بهبود قابل توجهی در همگرایی شبیه سازی مونت کارلو ایجاد می کند. همچنین استفاده از دسته بندی اطلاعات می تواند به کاهش واریانس TTC نیز کمک کند. روش های پیشنهادی می تواند به عنوان ابزاری جهت تعیین احتمالاتی TTC و نیز ارزیابی و مدیریت ریسک مرتبط با آن در حضور مزرعه های بادی مورد استفاده قرار گیرد.

۸- سپاس گذاری

نویسندگان از آقای پروفیسور چنان سینگ استاد دانشگاه Texas A&M بابت پیشنهادهای و راهنمایی های ارزنده ایشان در این تحقیق نهایت قدرانی را ابراز می دارند.

مراجع

- [1] R. Karki, P. Hu, and R. Bilinton, "A simplified wind power generation model for reliability evaluation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 533-540, Jun. 2006.
- [2] T. Ackerman, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, 2005.
- [3] K. S. Kook, K. J. McKenzie, Y. Liu, and S. Atcity, "A study on applications of energy storage for the wind power operation in power systems," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp 18-22, Jun. 2006.
- [4] R. Bilinton and B. Bai, "Generating capacity adequacy associated with wind energy," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 91, no. 3, pp. 641-646, Sep. 2004.
- [5] B. C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W. L. Kling, and A. J. Brand, "Impact of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 22, no. 1, pp. 44-51, Mar. 2007.
- [6] R. Billinton and W. Wangdee, "Reliability - based transmission reinforcement planning associated with large - scale wind farms," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 34-41, Feb. 2007.
- [7] G. W. Ault, K. R. W. Bell, and S. J. Galloway, "Calculation of economic transmission connection capacity for wind power generation," *IET*, vol. 1, no. 1, pp. 61-69, Mar. 2007.
- [8] A. E. Feijdo and J. Cidras, "Modeling of wind farms in the load flow analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 110-115, Feb. 2000.
- [9] North American Electric Reliability Council (NERC), *Available Transfer Capability Definitions and Determination*, NERC Report, Jun. 1996.
- [10] E. Audomvongseere 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

ایشان عبارتند از: سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده، شبکه‌های توزیع، قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، محاسبات نرم و کاربردهای آن در سیستم‌های قدرت.

حسین سیفی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی از دانشگاه شیراز در سال ۱۳۵۹ و کارشناسی ارشد و دکترای خود را از دانشگاه منچستر (یومبست) در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ دریافت کرد و از همان سال در دانشگاه تربیت مدرس مشغول فعالیت گردید. دکتر سیفی اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر این دانشگاه و رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه ریزی شبکه‌های قدرت است. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان، برنامه‌ریزی، دینامیک، بهره برداری و بازار در سیستم‌های قدرت است.

محسن پارسامقدم تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی برق در سال ۱۳۵۹ از دانشگاه شریف و در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سالهای ۱۳۶۲ و ۱۳۶۵ از دانشگاه های تویوهاشی و توهوکو ژاپن به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس تهران می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی، کنترل و تجدیدساختار در سیستم‌های قدرت.

Archive of SID