

مدل سازی قابلیت اطمینان مزرعه فتولتائیک با استفاده از مدل مارکوف

وحید خلیق و حسن منصف

واحدهای فتولتائیک در شبکه قدرت در مطالعات رزرو چرخان و ارزیابی کفایت سیستم قدرت مؤثر خواهد بود.

واحد فتولتائیک متصل به شبکه قدرت به دلیل خرابی تجهیزات ممکن است قادر به تولید خروجی نباشد. عامل دیگری که قابلیت اطمینان آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد تابش خورشید است. با توجه به این که خروجی واحد فتولتائیک به صورت تصادفی تغییر می‌کند، خروجی آن متفاوت از واحدهای تولیدی مرسوم است. از این لحاظ بسیار به نیروگاه بادی شباهت دارد و می‌تواند به صورت واحدی که چند سطح از توان خروجی دارد مدل شود. بنا به طبیعت تصادفی تابش خورشید و رفتار احتمالی هر یک از اجزای واحد فتولتائیک، خروجی واحد فتولتائیک به صورت تصادفی و متفاوت از واحدهای مرسوم تغییر می‌کند. از این رو ارزیابی قابلیت اطمینان این واحد تولیدی همانند واحدهای مرسوم نخواهد بود. از لحاظ ارزیابی قابلیت اطمینان تفاوت‌هایی بین نیروگاه بادی و نیروگاه فتولتائیک وجود دارد. در مزرعه فتولتائیک، سیستم تولیدی مجموعه‌ای از پنل‌های خورشیدی است که برای تشکیل یک نیروگاه فتولتائیک به هم متصل شده‌اند. تعدادی از این پنل‌ها تحت عنوان یک آرایه با استفاده از اینورتر به شبکه متصل می‌شوند. پنل فتولتائیک از ماژول‌هایی تشکیل می‌گردد که به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل شده‌اند و هر اتصال سری از ماژول‌ها یک رشته نام دارد. به این ترتیب با خرابی بخشی از ماژول‌ها یا پنل‌ها، کل سیستم خاموش نمی‌شود بلکه تنها باعث کاهش توان خروجی خواهد شد، همچنان که با کاهش تابش خورشید، خروجی نیروگاه فتولتائیک متغیر است. لذا در به کارگیری نیروگاه فتولتائیک در مقیاس بزرگ، نیاز به مدلی است که سلامت کارکرد اجزا و همچنین طبیعت تصادفی تابش خورشید به صورت توأمان در کنار هم مدل شوند.

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های مختلف در [۲] تا [۱۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۲] یک مقاله مروری است که روش‌های مختلف ارزیابی قابلیت اطمینان نیروگاه فتولتائیک در مقیاس بزرگ را مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله ذکر شده که در روش‌های پیشین از فرایند مارکوف در مدل‌سازی تصادفی نور خورشید استفاده نشده است. در [۳] در مورد روش‌های مختلف آنالیز قابلیت اطمینان فتولتائیک اعم از شبیه‌سازی و روش‌های عددی صحبت شده است. در [۴] از روش مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتولتائیک با این فرض که خرابی در ماژول‌ها و اینورتر رخ می‌دهد استفاده شده است. همچنین حساسیت عملکرد سیستم به پارامترهای مدل مورد بررسی قرار گرفته است. اما در این روش با در نظر گرفتن نقش تمامی عناصر به دلیل ازدیاد حالات حجم محاسبات بالا می‌رود و مدلی برای تابش خورشید در نظر گرفته نشده است. در [۵] ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم فتولتائیک با تأکید بر تأثیر توان ورودی، توان تلفاتی و دما در نرخ خرابی اجزای الکترونیک قدرت صورت گرفته است. در [۶] منحنی توان واحد

چکیده: استفاده از واحدهای فتولتائیک در شبکه قدرت و مشارکت آنها در تأمین بار سیستم، رشد فزاینده‌ای در سال‌های اخیر داشته است به طوری که ظرفیت کل نصب‌شده فتولتائیک در جهان از ۱/۵ GW در سال ۲۰۰۰ به صورت نمایی به ۴۰۲ GW در سال ۲۰۱۷ رسیده است. در این تحقیق روشی تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان مزارع بزرگ فتولتائیک با در نظر گرفتن تغییرات توان ورودی و همچنین شاخص‌های قابلیت اطمینان اجزای واحد فتولتائیک ارائه شده که می‌تواند برای تخمین انرژی سالانه تولیدی واحد فتولتائیک و همچنین محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از مدل مارکوف، روش فراوانی و تداوم برای مدل‌سازی واحد فتولتائیک همانند واحدهای چندحالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و احتمال، فرکانس وقوع و نرخ گذر هر حالت بر مبنای اطلاعات آماری تابش خورشید و خصوصیات عملکردی واحد فتولتائیک می‌تواند به دست آید. به دلیل وجود تعداد زیاد حالات تابش خورشید و عملکردی ماژول‌های فتولتائیک از الگوریتم k-means برای دسته‌بندی داده‌ها استفاده شده است. برای نشان‌دادن کارآمدی مدل مذکور نتایج حاصل بر روی شبکه تست RBTS مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج تحقیق بیانگر بالابودن حاشیه ظرفیت با استفاده از شاخص LOLF نسبت به استفاده موردی از شاخص LOLE است و دلیل این موضوع، طبیعت تصادفی تابش خورشید در مقایسه با واحدهای مرسوم می‌باشد. از این رو اهمیت مطالعه شاخص‌های قابلیت اطمینان وابسته به فرکانس در این سیستم‌ها مشهود است.

کلیدواژه: قابلیت اطمینان، مزرعه فتولتائیک، مارکوف، شبیه‌سازی.

۱- مقدمه

استفاده از واحدهای فتولتائیک در شبکه قدرت و مشارکت آنها در تأمین بار سیستم رشد فزاینده‌ای در سال‌های اخیر داشته است به طوری که ظرفیت کل نصب‌شده فتولتائیک در جهان از ۱/۵ GW در سال ۲۰۰۰ به صورت نمایی به ۴۰۲ GW در سال ۲۰۱۷ رسیده است. تقریباً ۹۸ GW از این ظرفیت در سال ۲۰۱۷ به مدار اضافه شده که معادل ۲۳٪ رشد سال ۲۰۱۷ را نشان می‌دهد.

این در حالی است که متوسط رشد سالانه برای بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ حدود ۵۸٪ بوده است [۱]. با افزایش مشارکت واحدهای فتولتائیک، نوسانات توان خروجی این واحدها بر روی عملکرد سیستم قدرت و واحدهای رزرو تأثیرگذار خواهد بود و دشواری‌هایی را برای قابلیت اطمینان سیستم پدید خواهد آورد. از این رو ارزیابی قابلیت اطمینان واحدهای فتولتائیک اهمیت بالایی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت دارد و ارزیابی ریسک در تعیین سطح نفوذ و مشارکت

این مقاله در تاریخ ۵ دی ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۳ تیر ماه ۱۳۹۷ بازنگری شد. وحید خلیق (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، (email: vahid.khaligh@gmail.com). حسن منصف، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران، (email: h.monsef@ut.ac.ir).

دست می‌دهد در حالی که روش‌های قبلی مانند [۱۸] تا [۲۰] تنها قادر به مدل‌سازی احتمالی تابش خورشید بودند. به طور خلاصه نوآوری‌های این روش را می‌توان به صورت زیر ذکر کرد:

(۱) مدل مارکوف برای مدل‌سازی احتمالی تابش خورشید استفاده شده است. به این ترتیب با استفاده از این مدل تصویر روشنی از حالات مختلف توان خروجی نیروگاه فتوولتاییک و نرخ انتقال بین حالت‌ها به دست می‌آید.

(۲) مدل حاضر علاوه بر خصوصیات احتمالی تابش خورشید، نرخ انتقال بین حالات مختلف تابش خورشید را نیز مشخص می‌کند.

(۳) هر رشته از ماژول‌ها در پنل فتوولتاییک به عنوان یک نیروگاه کوچک تولید توان در نظر گرفته شده و به این ترتیب می‌توان نرخ خرابی تک‌تک اجزا را در فرایند مارکوف و مدل‌سازی احتمالی دخیل کرد.

(۴) مدل حاصل مدل جامعی است که هم نایقینی مربوط به تابش خورشید و هم نایقینی مربوط به خرابی اجزا را دربرمی‌گیرد.

در ادامه بعد از معرفی روش مارکوف، مدل احتمالی مزرعه فتوولتاییک توضیح داده و در مرحله بعدی این مدل روی شبکه تست RBTS^۱ پیاده‌سازی می‌شود. یک مزرعه فتوولتاییک ۱۰ مگاواتی در آتلانتا به شبکه تست مذکور اضافه می‌گردد تا اثر آن بر روی کفایت سیستم مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور تأثیر دسته‌بندی داده‌ها بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر بار پیک، نرخ خرابی اجزا و ظرفیت نیروگاه فتوولتاییک روی شاخص‌های قابلیت اطمینان بررسی شده و برای بررسی صحت مدل، نتایج با نتایج روش مونت کارلو مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲- روش مارکوف

برای آن که یک فرایند تصادفی به صورت زنجیره مارکوف مدل شود این فرایند باید ساکن باشد یعنی نرخ انتقال بین حالات مختلف در طی فرایند ثابت بماند. در صورتی که سری زمانی یک فرایند تصادفی تابع شرایط زمانی نباشد و حجم داده‌ها به مقدار کافی بزرگ باشد می‌توان از مدل مارکوف برای مدل‌سازی فرایند استفاده کرد [۲۱]. در مدل مارکوف فرض می‌شود که زمان باقی‌ماندن در هر یک از حالت‌ها از یک توزیع نمایی پیروی می‌کند [۱۰].

توزیع نمایی نرخ انتقال را به صورت یک عدد ثابت در نظر می‌گیرد که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\lambda_{ij} = \frac{N_{ij}}{T_i} \quad (۱)$$

که λ_{ij} نرخ انتقال از حالت i به حالت j ، N_{ij} تعداد دفعات مشاهده شده انتقال از حالت i به حالت j و T_i مدت زمانی است که حالت i در کل دوره مشاهده شده است. اگر نرخ انتقال از حالت i به حالات بالاتر و پایین‌تر به ترتیب با λ_{+i} و λ_{-i} نمایش داده شود داریم

$$\lambda_{+i} = \sum_{j=\backslash, j>i}^{N_i} \lambda_{ij} \quad (۲)$$

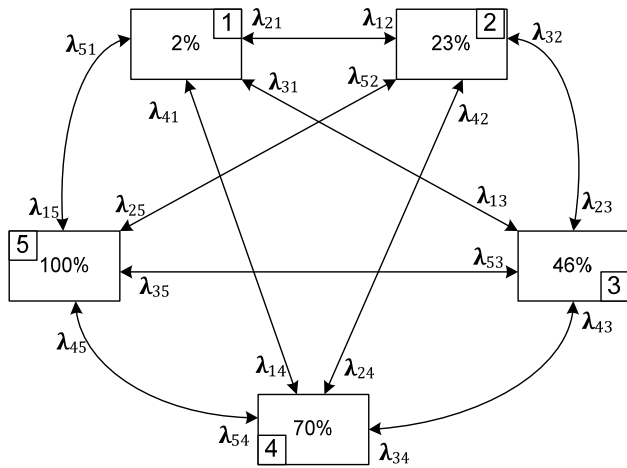
$$\lambda_{-i} = \sum_{j=\backslash, j<i}^{N_i} \lambda_{ij} \quad (۳)$$

فتوولتاییک به همراه توزیع احتمال تابش خورشید برای به دست آوردن مدل احتمالی توان خروجی واحد فتوولتاییک استفاده است. روش مشابهی که توان خروجی را در مقادیر گسسته دسته‌بندی می‌کند در [۷] به کار گرفته شده است. مدلی تحلیلی از ارزیابی قابلیت اطمینان واحد بادی در [۸] آمده است. زنجیره مارکوف برای به دست آوردن احتمال، فرکانس و نرخ انتقال بین حالت‌ها بر اساس اطلاعات گذشته سرعت باد استفاده شده است. با استفاده از نرخ خرابی و تعمیر توربین‌ها، مدل احتمالی یک توربین به دست آمده و در نهایت مزرعه بادی از ترکیب این دو مدل، مدل‌سازی شده که این مدل ایده اولیه [۹] و [۱۰] است. مرجع [۹] فرض می‌کند انتقال بین حالات غیر مجاور سرعت باد نیز ممکن است و از دسته‌بندی داده‌ها برای کاهش حجم محاسبات استفاده می‌کند. روشی مشابه [۸] بر مبنای تکنیک فرکانس و تداوم در [۱۰] مورد استفاده قرار گرفته که مدل باد به دست آمده را با خصوصیات خروجی توربین ترکیب می‌نماید. تأثیر نرخ خرابی توربین بادی و نیز سرعت باد میانگین بر شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله نشان داده شده که الگوی مصرف و رفتار تصادفی توربین بادی دو عنصر تأثیرگذار در شاخص‌های قابلیت اطمینان هستند. در [۱۱] یک مدل غیر قطعی سیستماتیک جهت برنامه‌ریزی چندساله توسعه هماهنگ تولید و انتقال با در نظر گرفتن نفوذ سطح بالایی از مزرعه‌های بادی در سیستم قدرت ارائه شده است. نویسندگان بر اساس تحلیل حداقل-حداکثر پشیمانی، مدل پیشنهادی را بر روی شبکه نمونه ۲۴ باس قابلیت اطمینان پیاده‌سازی کرده‌اند.

در [۱۲] قابلیت اطمینان به کمک روش شبیه‌سازی وزنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور یک الگوریتم ترکیبی جهت جستجوی نقطه طراحی با به کارگیری هم‌زمان الگوریتم کرم شب‌تاب و روش متا-مدل تابع پایه شعاعی پیشنهاد شده است.

در [۱۳] مقدار تشعشع دریافتی خورشیدی به صورت تجربی و عددی اندازه‌گیری شده است. در [۱۴] مدل مارکوف برای شبیه‌سازی رفتار تصادفی یک نیروگاه فتوولتاییک مجزا از شبکه به کار گرفته شده است. از شاخص‌های قابلیت اطمینان به عنوان معیاری برای تعیین سائز نیروگاه فتوولتاییک استفاده شده است. اما با این وجود نیاز به مدلی است که رفتار تصادفی خورشید را نیز در محاسبات دخیل کند. در [۱۵] از درخت خطا به همراه یک تابع احتمال نمایی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان واحد فتوولتاییک استفاده گردیده اما همچنان تابش خورشید در نظر گرفته نشده است. در [۱۶] از یک الگوریتم بازگشتی برای ساخت جدول خروج احتمالی نیروگاه فتوولتاییک استفاده شده است. در این مدل تأثیر اتصال سری و موازی اجزای فتوولتاییک در مدل‌سازی قابلیت اطمینان توان خروجی دیده شده است.

با توجه به [۱۷] در نیروگاه بادی هر توربین اجزای تشکیل‌دهنده‌ای دارد که در قابلیت اطمینان کل تأثیر می‌گذارد. مقالاتی که در بررسی مراجع مورد مطالعه قرار گرفت هر توربین بادی را به عنوان یک واحد تولیدی در نظر می‌گرفتند. ایده اصلی ارائه‌شده در این مقاله در نظر گرفتن هر رشته از ماژول‌ها در پنل فتوولتاییک به عنوان یک نیروگاه کوچک تولید توان است و به وسیله آن نشان داده شده که چگونه خرابی‌های جزئی در توان خروجی مزرعه فتوولتاییک مؤثر خواهند بود. برای مدل‌سازی رفتار تصادفی نیروگاه فتوولتاییک از روش مارکوف استفاده شده که این روش قادر است تا تمام حالات ممکن توان خروجی نیروگاه را در خود بگنجانند و علاوه بر آن خصوصیات فرکانسی مربوط به نرخ انتقال از یک حالت تابش خورشید به حالت دیگر تابش خورشید را نیز به



شکل ۳: مدل مارکوف ۵ حالتی بر اساس درصدی از توان نامی ماژول.

به دست می‌آید و تنها خصوصیات عملکردی اجزا مانند تعداد ماژول‌های خورشیدی و نرخ خرابی و تعمیر آنها در نظر گرفته می‌شود. هر رشته از ماژول‌ها به عنوان یک نیروگاه کوچک تولید توان در نظر گرفته شده و جدول COPT برای تمام این نیروگاه‌های کوچک به دست آورده می‌شود.

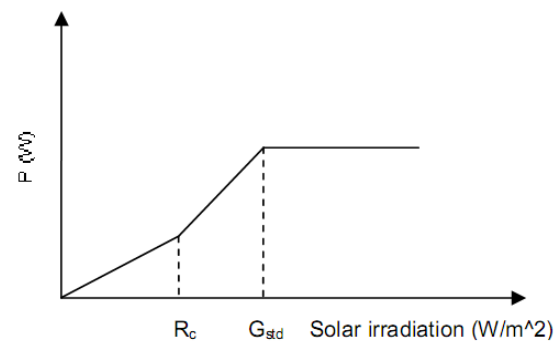
۳) مدل‌سازی مزرعه فتوولتاییک: در این مرحله مدل‌هایی که در مراحل ۱ و ۲ به دست آورده شد با یکدیگر ترکیب شده تا جدول COPT برای سطوح مختلف توان خروجی برای مزرعه فتوولتاییک به دست آید. سپس اینورتر و تجهیزات حفاظتی به عنوان خط ارتباطی^۲ به جدول COPT به دست آمده اضافه می‌شوند.

در ادامه مراحل گفته شده به صورت کامل شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل تعداد زیاد حالات سطوح توان خروجی، الگوریتم K-means [۲۲] تا [۲۴] برای دسته‌بندی داده‌ها استفاده می‌شود و هدف از دسته‌بندی قراردادن عناصر در دسته‌ای است که خصوصیات مشابه داشته باشند.

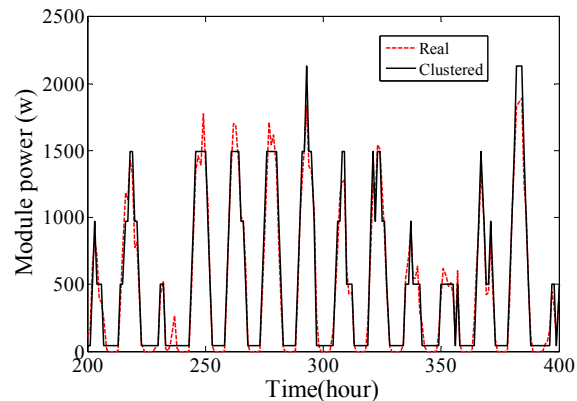
۲-۲ مدل مارکوف توان خروجی بر مبنای تابش خورشید

در مطالعات پیشین برخی مقالات به استفاده از مارکوف در مدل‌سازی حالت تصادفی تابش خورشید پرداخته‌اند [۲۵] تا [۲۸]. منحنی توان یک ماژول فتوولتاییک در شکل ۱ نمایش داده شده است [۲۹] تا [۳۱]. همان طور که مشاهده می‌شود تعداد زیادی از حالات تابش خورشید به خروجی یکسانی در ماژول منجر می‌شود و در نتیجه تشکیل مدل مارکوف و ماتریس انتقال حالت تصادفی باعث افزایش حجم محاسبات می‌گردد. همچنین دسته‌بندی با حضور همه این حالات پیچیده خواهد بود. از این رو در اینجا به جای مدل مارکوف تابش خورشید، سری زمانی تابش خورشید به سری زمانی توان خروجی ماژول فتوولتاییک تبدیل شده و مدل مارکوف برای توان خروجی که بر مبنای تابش خورشید به دست آمده تشکیل می‌شود.

برای استفاده از زنجیره مارکوف برای توان ماژول باید توان ماژول را در تعدادی حالات گسسته که دلخواه است کلاستر کنیم. اگر برای ماژول ۵ حالت گسسته در نظر بگیریم، نمودار تیره‌رنگ در شکل ۲ سری زمانی کلاستر شده توان خروجی را نمایش می‌دهد. بر این اساس مدل مارکوف توان خروجی ماژول مطابق شکل ۳ خواهد بود. هر حالت مارکوف معادل درصدی از توان نامی می‌باشد. با استفاده از تحلیل داده‌های تابش خورشید



شکل ۱: مدل توان خروجی ماژول [۲۶].



شکل ۲: توان خروجی واقعی و کلاستر شده.

احتمال وقوع حالت i برابر است با

$$P_i = \frac{T_i}{T_s} \quad (۴)$$

که T_s کل زمان مشاهده است.

۲-۱ مدل‌سازی احتمالی توان فتوولتاییک

شدت تابش خورشید و یا خرابی در تجهیزات هر کدام می‌توانند خروجی نیروگاه فتوولتاییک را تحت تأثیر قرار دهند و از این لحاظ نیروگاه فتوولتاییک کاملاً با سایر نیروگاه‌ها متفاوت است. در نیروگاه‌های فسیلی فرض می‌شود تا زمانی که واحد در دسترس است می‌تواند توان نامی خود را تحویل دهد. در حالی که در نیروگاه فتوولتاییک اگر تجهیزات سالم هم باشند خروجی به شدت تابش خورشید بستگی دارد. از این رو برای مدل‌سازی بر مبنای احتمال توان خروجی نیروگاه فتوولتاییک مراحل زیر باید انجام شود:

۱) مدل احتمالی توان خروجی یک ماژول فتوولتاییک (در این مرحله خرابی تجهیزات در نظر گرفته نشده است و تنها تابش خورشید مدل می‌شود).

۱-۱ تقسیم توان خروجی یک ماژول به مقادیر گسسته به صورت درصدی از توان نامی

۲-۱ به دست آوردن مدل مارکوف مرحله قبل

۳-۱ اجرای (۱) تا (۴) برای هر سطح از توان خروجی و تشکیل جدول COPT^۱

۲) مدل‌سازی مزرعه فتوولتاییک مستقل از تابش خورشید: در این مرحله مدل مارکوف سیستم فتوولتاییک مستقل از تابش خورشید



شکل ۵: مدل مارکوف N ماژول با صرف نظر از تابش خورشید.

جدول ۱: COPT ۵ حالتی برای یک ماژول بر اساس داده های تابش خورشید.

مرحله	ظرفیت موجود (%)	احتمال	نرخ انتقال به بالا	نرخ انتقال به پایین	فرکانس
۱	۲	۰.۳۷۴۲	۰.۲۱۱۸	۰	۰.۰۷۹۳
۲	۲۳	۰.۱۹۲۵	۰.۳۱۲۱	۰.۳۷۲۹	۰.۱۳۱۹
۳	۴۶	۰.۱۶۷۵	۰.۲۹۸۸	۰.۳۶۳۱	۰.۱۱۰۹
۴	۷۰	۰.۱۵۱۶	۰.۲۱۴۵	۰.۳۴۷۰	۰.۰۸۵۱
۵	۱۰۰	۰.۱۱۴۲	۰	۰.۳۲۳۲	۰.۰۳۶۹

جدول ۲: شاخص های قابلیت اطمینان سیستم های تشکیل دهنده واحد فتوولتاییک.

نام سیستم	MTTR (hour)	λ (f/year)
تولید توان	۹۶۰	۰.۰۰۱۹۵۷
انتقال توان	۱۷۶۶۷۰.۲	۰.۳۸۹۸۵۲۹
حفاظت	۹۶۰	۰.۵۱۷۲۵

سیستم مورد آزمایش سیستمی ۱۰ MW است که در این سیستم هر رشته از ۲۱ ماژول تشکیل شده و از در کنار هم قرار گرفتن هر ۱۰۰ رشته یک آرایه ۲۵۰ کیلوواتی به وجود می آید. هر دو آرایه به یک اینورتر ۵۰۰ کیلوواتی متصل می گردد [۳۳]. نمایی از این سیستم که از ۲۰ بلوک ۵۰۰ کیلوواتی تشکیل شده را در شکل ۴ مشاهده می کنید.

سیستم فتوولتاییک می تواند به سیستم ها و زیرسیستم هایی تقسیم شود و از این رو برای بیان فتوولتاییک سه زیرسیستم در نظر گرفته شده است:

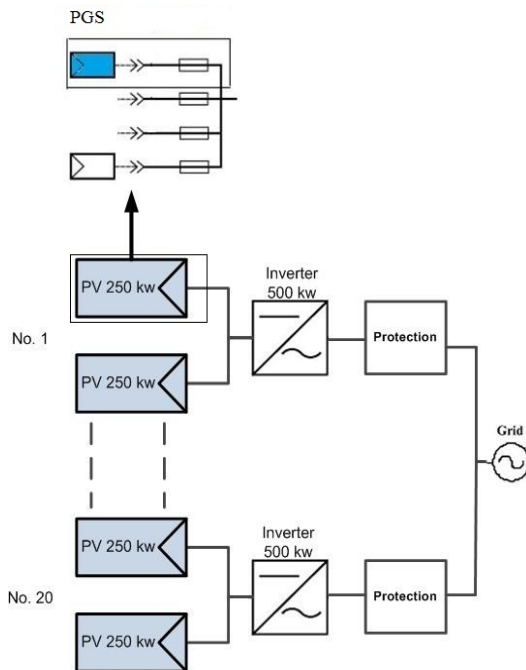
- هر رشته از ماژول ها که یک نیروگاه کوچک تولید توان است و در شکل ۴ مشخص شده است.
- اینورتر و کانورتر که تحت عنوان سیستم انتقال توان نام گذاری شده اند.
- سیستم حفاظت که شامل اجزای حفاظتی مانند مدارشکن و کلید AC می شود.

شاخص های قابلیت اطمینان این سه زیرسیستم در جدول ۲ آورده شده است [۳۴].

فضای حالت توان N ماژول با در نظر گرفتن نرخ خرابی و تعمیر و در یک تابش ثابت خورشید به صورت شکل ۵ است.

با توجه به این مدل مارکوف ماژول ها، تعداد حالات توان خروجی نیروگاه بسیار زیاد می شود. با توجه به این که اساساً ظرفیت نیروگاه فتوولتاییک در مقایسه با واحدهای تولیدی سنتی بسیار کمتر است، تعداد زیاد حالات توان برای یک نیروگاه فتوولتاییک مطلوب نیست و حجم محاسبات را در مطالعات قابلیت اطمینان به شدت بالا می برد. به این ترتیب دوباره می توان برای توان خروجی یک نیروگاه مستقل از تابش خورشید تعداد دلخواهی حالت گسسته تعریف کرد و توان های واقعی به دست آمده برای نیروگاه را با استفاده از الگوریتم k-means در این حالت ها کلاستر کرد.

بر اساس تحلیل فرکانس و تداوم در محاسبات قابلیت اطمینان، می توان شاخص های احتمال، فرکانس و نرخ خروج را برای هر حالت غیر دقیق از شاخص های حالت های دقیقی که در آن حالت غیر دقیق کلاستر می شوند پیدا کرد. اگر اندیس i مربوط به حالت هایی باشد که در یک حالت غیر دقیق کلاستر می شوند و اندیس k مربوط به حالت غیر دقیق



شکل ۴: تصویری از یک سیستم ۱۰۰ MW.

نرخ های انتقال نشان داده شده در شکل ۳ محاسبه گردیده و در ماتریس λ آورده شده است. محاسبه این ماتریس با استفاده از (۱) و با فرض ۵ حالت مارکوف برای توان ماژول صورت گرفته است.

مطابق با ماتریس λ می توان گفت مثلاً نرخ انتقال از حالت ۱ به ۳ برابر ۰.۰۳۱۳ occ/hr است. قابل ذکر است که به دلیل نمونه برداری گسسته و ساعتی از تابش خورشید امکان انتقال بین حالات غیر مجاور وجود دارد

$$\lambda = \begin{bmatrix} 0.07874 & 0.1808 & 0.313 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.3557 & 0.3083 & 0.2823 & 0.0337 & 0.0000 \\ 0.479 & 0.3177 & 0.3275 & 0.2818 & 0.0250 \\ 0 & 0.0649 & 0.2834 & 0.4404 & 0.2113 \\ 0 & 0.0016 & 0.0336 & 0.2880 & 0.6768 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ماتریس به دست آمده نرخ انتقال از حالتی به حالت دیگر را برای توان خروجی یک ماژول فتوولتاییک نشان می دهد. در محاسبات فرکانس ما تنها به نرخ انتقال به حالات بالاتر و پایین تر احتیاج داریم [۳۲] و از این رو نیازی به عناصر قطری نیست و می توانند حذف شوند. بنابراین جمع عناصر هر سطر برابر واحد نیست.

با استفاده از (۲) تا (۴) احتمال و نرخ انتقال بین حالات مختلف می تواند به دست آید. جدول ۱، COPT توان خروجی یک ماژول فتوولتاییک را در حالتی که یک مدل مارکوف ۵ حالتی برای آن در نظر گرفته شده نشان می دهد. لازم به ذکر است که نرخ خرابی تجهیزات در این حالت در نظر گرفته نشده است. همان طور که گفته شد تعیین تعداد پله های گسسته توان اختیاری است و می توان جدول را بر اساس تعداد پله های دلخواه برای ماژول تشکیل داد.

۳-۲ مدل سازی توان خروجی مستقل از تابش خورشید

تاکنون مدل مارکوف برای توان تولیدی یک ماژول بدون در نظر گرفتن نرخ خرابی و تعمیر اجزا به دست آمد. در این مرحله مدل مزرعه فتوولتاییک شامل N رشته از ماژول های فتوولتاییک یکسان با در نظر گرفتن نرخ خرابی و تعمیر اجزا به دست می آید.

جدول ۳: COPT واحد فتوولتاییک مستقل از تابش خورشید.

مرحله	ظرفیت موجود (MW)	احتمال	λ_{+i} (occ/hr)	λ_{-i} (occ/hr)
۱	۱	۰٫۰۶۸۶	۳٫۷۲۱۶	۰
۲	۳	۰	۲٫۸۹۳۴	$۳٫۸۵۵۴e^{-۴}$
۳	۵	۰	۲٫۰۶۷۱	$۵٫۶۲۷۶e^{-۴}$
۴	۷	۰	۱٫۲۴۱۹	$۷٫۳۹۷۴e^{-۴}$
۵	۹	۰٫۹۳۱۴	۰	$۹٫۱۷۶۶e^{-۴}$

برای ساده‌سازی سیستم، سیستم انتقال توان و سیستم حفاظت در هر بلوک تولید توان مانند یک خط ارتباطی در نظر گرفته شده و پس از تکمیل مدل مارکوف مزرعه فتوولتاییک با ظرفیتی برابر ظرفیت هر بلوک تولید توان شکل ۴ به سیستم اضافه می‌شوند. نرخ خرابی و تعمیر این اجزا مطابق آن چیزی است که در جدول ۲ آورده شد. این مهم به وسیله الگوریتم بازگشتی انجام می‌شود. بعد از این که واحدی با ظرفیت C مگاوات و نرخ خروج اجباری U به سیستم اضافه می‌شود، روابط بازگشتی برای X مگاوات خروج ظرفیت به صورت (۱۰) تا (۱۲) خواهد بود [۱۰]

$$P(X) = P'(X)(1-U) + P'(X-C)U \quad (10)$$

$$\lambda_{+}(X) = \frac{P'(X)(1-U)\lambda'_{+}(X)}{P(X)} + \frac{P'(X-C)U(\lambda'_{+}(X-C) + \mu)}{P(X)} \quad (11)$$

$$\lambda_{-}(X) = \frac{P'(X)(1-U)(\lambda'_{-}(X) + \lambda)}{P(X)} + \frac{P'(X-C)U(\lambda'_{-}(X-C))}{P(X)} \quad (12)$$

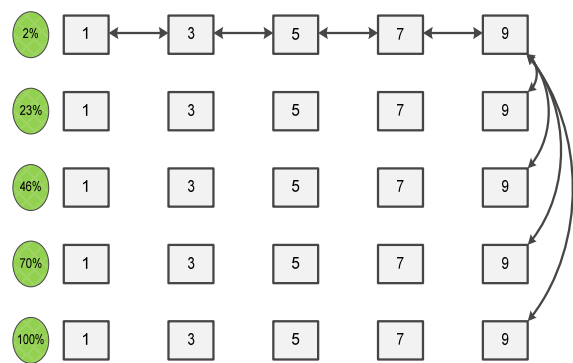
که پارامترهای $P(X)$ ، $\lambda_{+}(X)$ و $\lambda_{-}(X)$ به ترتیب احتمال وقوع هر حالت، نرخ انتقال به حالت بالاتر و نرخ انتقال به حالت پایین‌تر و علامت آپستروف مقادیر قبل از اضافه‌شدن واحد را مشخص می‌کنند. در این روابط اگر X کمتر از C باشد، $P'(X-C)$ ، $\lambda'_{+}(X-C)$ و $\lambda'_{-}(X-C)$ صفر در نظر گرفته خواهند شد. به این ترتیب یک جدول COPT کامل برای مزرعه فتوولتاییک با تعداد حالات گسسته انتخابی مطابق جدول ۴ به دست می‌آید.

برای فهم بهتر روشی که در بخش ۳ معرفی شد روندنمایی در شکل ۷ رسم شده است.

۴- قابلیت اطمینان سیستم تولید با در نظر گرفتن مزرعه فتوولتاییک

با تشکیل جدول COPT برای مزرعه فتوولتاییک این واحد تولیدی همانند سایر واحدهای تولیدی مرسوم مدل شد. حال می‌بایست با استفاده از الگوریتم بازگشتی معرفی‌شده در بخش ۳-۳ مزرعه فتوولتاییک به ظرفیت تولید سیستم RBTS اضافه گردد.

سیستم RBTS از سه واحد MW ۴۰، پنج واحد MW ۲۰، یک واحد MW ۱۰ و دو واحد MW ۵ تشکیل شده که معادل با ظرفیت نصب‌شده MW ۲۴۰ است. بار پیک سالانه این سیستم MW ۱۸۵ است [۳۵]. قسمت‌هایی از COPT سیستم RBTS را قبل و بعد از اضافه‌کردن مزرعه فتوولتاییک به ترتیب در جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌کنید.



شکل ۶: مدل مارکوف مزرعه فتوولتاییک.

جدید باشد آن گاه می‌توان نوشت [۱۰]

$$C_k = C_1 = C_2 = \dots = C_i \quad (6)$$

$$P_k = \sum P_i \quad (7)$$

$$\lambda_{+k} = \frac{\sum P_i \lambda_{+i} - \sum_{(x,y) \in A_k} P_x \lambda_{xy}}{P_k} \quad (8)$$

$$\lambda_{-k} = \frac{\sum P_i \lambda_{-i} - \sum_{(x,y) \in A_k} P_y \lambda_{yx}}{P_k} \quad (9)$$

که در این روابط C ، f و λ به ترتیب نشان‌دهنده ظرفیت، فرکانس و نرخ خروج هستند. در A_k (۸) و (۹) نشان‌دهنده زوج حالت‌هایی است که منجر به پله توان C_k می‌شوند و بین آنها انتقال وجود دارد. لازم به ذکر است در این روابط حالت x دارای ظرفیت کمتری نسبت به حالت y می‌باشد. در واقع توسط این رابطه فرکانس رخدادهایی که بین دو حالت کلاستر شده رخ می‌دهد از مجموع فرکانس دو حالت کم می‌شود. با انتخاب ۵ کلاستر جدول COPT بر اساس (۵) تا (۸) طبق جدول ۳ به دست می‌آید.

۳- مدل تحلیلی مزرعه فتوولتاییک

تا کنون مدل مارکوف برای توان تولیدی واحد فتوولتاییک در دو حالت مستقل از تابش خورشید و مستقل از شرایط سیستم به دست آمد. برای یک نیروگاه فتوولتاییک که از N ماژول یکسان تشکیل شده است فضای حالت هم باید تابش خورشید را در نظر بگیرد و هم نرخ خرابی و تعمیر اجزا را مدل کند. در نتیجه می‌توان فضای حالت را برای یک مزرعه فتوولتاییک به صورت شکل ۶ تعریف کرد. دقت شود که برای وضوح شکل نرخ انتقال بین سایر حالات نمایش داده نشده است. در واقع انتقال بین حالات هم ردیف و هم ستون برای هر یک از حالات وجود دارد. در این شکل هر ردیف افقی مربوط به یک حالت از تابش خورشید و هر ردیف عمودی مربوط به یک حالت از توان مزرعه فتوولتاییک مستقل از تابش خورشید است.

در اینجا نیز با توجه به این که حالات تابش خورشید و حالات توان خروجی مزرعه فتوولتاییک هر یک در ۵ کلاستر دسته‌بندی شدند، ۲۵ حالت برای توان خروجی نیروگاه به دست می‌آید و همان طور که گفته شد در مقایسه با ظرفیت واحدهای تولیدی سنتی مطلوب نیست. بنابراین با تعریف تعدادی کلاستر، توان‌های واقعی به دست آمده برای نیروگاه در این حالت‌ها دسته‌بندی می‌گردد. تأثیر دسته‌بندی در دقت جواب‌ها در بخش نتایج مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

جدول ۴: COPT کامل ۵ حالت برای یک مزرعه فتوولتاییک ۱۰ MW

مرحله	ظرفیت موجود (MW)	احتمال	λ_{+i} (occ/hr)	λ_{-i} (occ/hr)
۱	۰٫۱	۰٫۳۹۸۹	۲٫۲۱۷۵	۰
۲	۱٫۱	۰٫۱۱۸۲	۳۷٫۷۲۶۲	۱۵٫۳۴۸۷
۳	۲٫۷	۰٫۱۷۹۳	۰٫۸۱۹	۱٫۴۵۹۴
۴	۴٫۷	۰٫۱۵۶۰	۰٫۵۲۹۲	۰٫۹۶۹۱
۵	۷٫۵	۰٫۳۴۷۵	۰	۰٫۳۸۵۵

جدول ۵: بخش هایی از جدول COPT سیستم RBTS

ظرفیت خارج شده (MW)	احتمال	λ_{+i} (occ/hr)	λ_{-i} (occ/hr)
۰	۰٫۸۱۲۹	۰	۰٫۰۰۴۳
۵	۰٫۱۶۴	۰٫۰۲۲۲	۰٫۰۰۴۱
۱۰	۰٫۱۶۷	۰٫۰۴۴۴	۰٫۰۰۳۶
۱۵	$۳٫۳۵۱۵e^{-۴}$	۰٫۰۶۶۷	۰٫۰۰۳۴
۲۰	۰٫۰۷۰۴	۰٫۰۸۶۰	۰٫۰۰۳۰

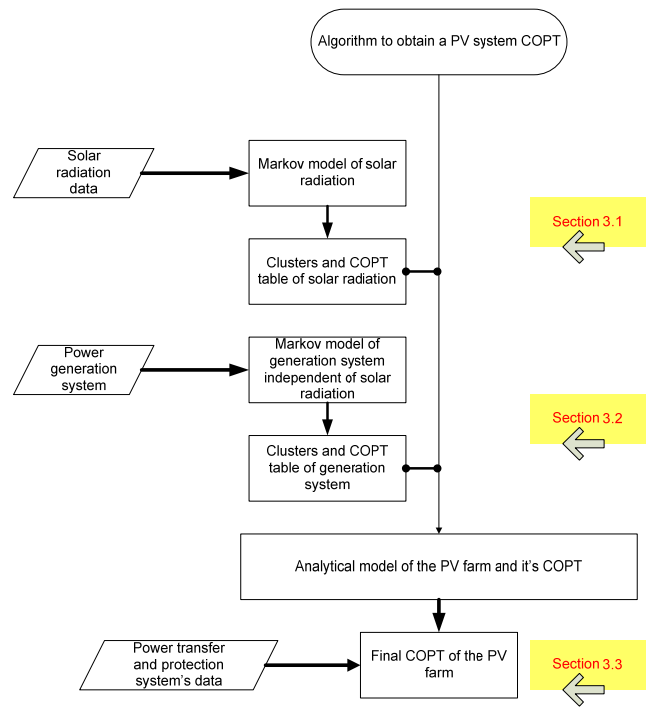
جدول ۶: بخش هایی از جدول COPT مجموعه سیستم RBTS و مزرعه فتوولتاییک ۱۰ MW

ظرفیت موجود (MW)	احتمال	λ_{+i} (occ/hr)	λ_{-i} (occ/hr)
۰	۰٫۲۰۱۲	۰	۰٫۳۸۹۸
۲٫۷	۰٫۱۲۶۸	۰٫۵۲۹۲	۰٫۹۷۳۴
۴٫۷	۰٫۱۴۵۷	۰٫۸۱۹۰	۱٫۴۶۳۷
۵	۰٫۰۰۴۱	۲٫۲۳۹۸	۰٫۰۰۴۱
۱۰	۰٫۰۰۴۱	۰٫۵۵۵۵	۰٫۰۰۳۵

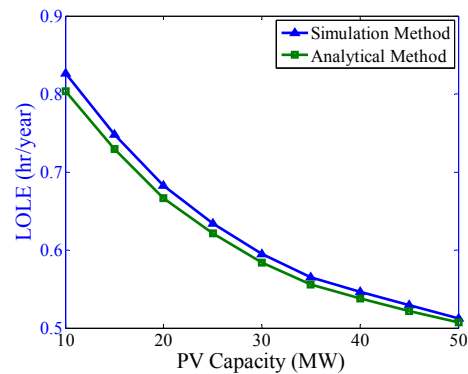
اصلی به ترتیب برابر (hr/year) $۱٫۰۹۳۹$ و (occ/year) $۰٫۱۱۷۴$ است. به این دلیل که تعداد کلاستر در هر سه حالت به صورت دلخواه تعیین شده اند، LOLE و LOLF برای تعداد کلاستر دلخواه در جداول ۷ تا ۹ بررسی شده است. در این جداول تعداد کلاستر برای خروجی مزرعه فتوولتاییک به ترتیب ۳، ۴ و ۶ عدد تعیین شده و همچنین N_1 تعداد کلاستر برای حالات تابش خورشید و N_2 تعداد کلاستر برای حالات خروجی مزرعه فتوولتاییک مستقل از تابش خورشید است. به عنوان مثال اگر ۵ کلاستر برای خروجی مزرعه فتوولتاییک، ۴ کلاستر برای تابش خورشید و ۲ کلاستر برای خروجی مزرعه فتوولتاییک مستقل از تابش خورشید در نظر بگیریم، مقدار LOLE و LOLF به ترتیب برابر (hr/year) $۰٫۸۷۵۵$ و (occ/year) $۰٫۰۸۵۳$ خواهد بود.

۵-۲ تأثیر FOR اجزای واحد فتوولتاییک

با توجه به FOR^3 کوچک ماژول و تعداد زیاد آن در مزرعه فتوولتاییک و همچنین با توجه به رابطه احتمال دوجمله ای، عملاً FOR ماژول تأثیری در احتمال حالت ها و شاخص های قابلیت اطمینان ندارد و می تواند در محاسبات کنار گذاشته شود. جدول ۱۰ تأثیر FOR سیستم انتقال توان و حفاظت را بر توزیع احتمال خروجی مزرعه فتوولتاییک نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش FOR احتمال حالات با خروجی



شکل ۷: روند نامی روش پیشنهادی.



شکل ۸: سطح ریسک به عنوان تابعی از ظرفیت فتوولتاییک در دو حالت مدل پیشنهادی و روش مونت کارلو.

۵- آنالیز نتایج

با استفاده از جدول COPT به دست آمده برای سیستم قدرت به اضافه مزرعه فتوولتاییک نتایج با روش مونت کارلو مورد مقایسه قرار گرفتند و هر دو یکسان بودند. روش مونت کارلوی مورد استفاده در [۳۶] توضیح داده شده و برای ارزیابی قابلیت اطمینان، این روش برای ۵۰۰۰۰ مرتبه تکرار گردیده است. برای بررسی دقت نتایج تأثیر تغییر بار پیک بر شاخص های قابلیت اطمینان در شکل ۸ آمده است. در شکل تغییر سطح ریسک سیستم وقتی ظرفیت های مختلف فتوولتاییک به سیستم اضافه می شوند با یکدیگر مقایسه شده اند. در این تصویر مشخص است که با افزایش ظرفیت فتوولتاییک ریسک سیستم کاهش می یابد اما فرم نمایی آن نشان می دهد که در نقطه ای دیگر افزایش ظرفیت فتوولتاییک بهبودی در سطح ریسک ایجاد نخواهد کرد.

۵-۱ تأثیر تعداد کلاستر بر شاخص های قابلیت اطمینان

مقدار شاخص های $LOLE^1$ [۳۲] و $LOLF^2$ [۳۷] در سیستم RBTS

2. Loss of Load Frequency
3. Forced Outage Rate

1. Loss of Load Expectation

جدول ۷: تأثیر تعداد کلاستر بر شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن ۳ کلاستر برای خروجی مزرعه فتوولتاییک.

N_i	۲		۴		۶	
N_r	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)
۲	۰٫۹۱۳۵	۰٫۱۰۸۶۶	۰٫۹۵۶۶	۰٫۱۰۹۰۶	۰٫۹۷۰۱	۰٫۱۰۹۲۰
۴	۰٫۹۱۳۵	۰٫۱۰۸۶۶	۰٫۹۶۲۰	۰٫۱۰۹۱۲	۰٫۹۱۵۷	۰٫۱۰۸۶۴
۶	۰٫۹۱۳۵	۰٫۱۰۸۷۱	۰٫۹۵۹۹	۰٫۱۰۹۱۰	۰٫۹۶۸۰	۰٫۱۰۹۱۸

جدول ۸: تأثیر تعداد کلاستر بر شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن ۴ کلاستر برای خروجی مزرعه فتوولتاییک.

N_i	۲		۴		۶	
N_r	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)
۲	۰٫۸۳۰۳	۰٫۱۰۷۹۰	۰٫۸۹۴۱	۰٫۱۰۸۶۶	۰٫۱۰۹۳۰	۰٫۱۰۸۷۱
۴	۰٫۸۱۷۰	۰٫۱۰۸۱۰	۰٫۸۴۲۷	۰٫۱۰۸۱۱	۰٫۸۸۶۷	۰٫۱۰۸۵۶
۶	۰٫۸۰۵۳	۰٫۱۰۸۳۱	۰٫۸۹۳۰	۰٫۱۰۸۶۶	۰٫۸۸۱۸	۰٫۱۰۸۵۱

جدول ۹: تأثیر تعداد کلاستر بر شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن ۴ کلاستر برای خروجی مزرعه فتوولتاییک.

N_i	۲		۴		۶	
N_r	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)	LOLE (hr/year)	LOLF (occ/year)
۲	-	-	۰٫۸۷۵۵	۰٫۱۰۸۵۳	۰٫۸۸۵۱	۰٫۱۰۸۶۵
۴	۰٫۸۱۸۲	۰٫۱۰۸۰۷	۰٫۸۵۶۰	۰٫۱۰۸۵۹	۰٫۸۵۲۴	۰٫۱۰۸۲۵
۶	۰٫۸۲۳۴	۰٫۱۰۸۲۹	۰٫۸۶۳۹	۰٫۱۰۸۵۳	۰٫۸۶۱۵	۰٫۱۰۸۳۸

جدول ۱۰: تأثیر FOR بر توزیع احتمال حالت‌ها.

FORtie						ظرفیت
۰٫۱۲	۰٫۱	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۲	
۰٫۴۱۶۶	۰٫۴۰۹۴	۰٫۴۰۲۳	۰٫۳۹۹۵	۰٫۳۸۰۸	۰٫۳۷۰۲	۰٫۱
۰٫۳۳۲۳	۰٫۳۲۶۹	۰٫۳۲۱۵	۰٫۳۱۶۱	۰٫۳۰۵۴	۰٫۲۹۰۲	۱٫۱
۰٫۱۶۶۸	۰٫۱۷۰۶	۰٫۱۷۴۴	۰٫۱۷۸۲	۰٫۱۸۵۸	۰٫۱۹۰۲	۲٫۷
۰٫۱۴۷۷	۰٫۱۵۱۱	۰٫۱۵۴۴	۰٫۱۵۷۸	۰٫۱۶۴۵	۰٫۱۷۰۲	۴٫۷
۰٫۲۳۶۶۲	۰٫۲۴۲۰	۰٫۲۴۷۳	۰٫۲۵۲۲	۰٫۲۶۳۵	۰٫۲۷۰۲	۵٫۷

استفاده از این تصاویر می‌توان افزایش توانایی حمل بار پیک (IPLCC)^۲ [۲۹] سیستم در ازای ظرفیت منصوب اضافی را محاسبه نمود. در ازای افزودن واحد فتوولتاییک ۱۰ MW، IPLCC برابر ۳ MW و در ازای افزودن واحد فتوولتاییک ۳۰ MW برابر ۶٫۸ MW است. در حالی که در ازای افزودن واحد ۵ hydroMW IPLCC برابر ۵٫۸ MW است و این قابلیت اطمینان کمتر واحد فتوولتاییک را در برابر hydro نشان می‌دهد. نمای دیگری از این تفاوت در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. در ازای افزودن واحد hydro، IPLCC یکسانی در مقایسه با قبل ایجاد می‌کند در حالی که در ازای افزودن واحد فتوولتاییک مقدار IPLCC حدود ۱ MW بیشتر به دست می‌آید. دلیل این موضوع خاصیت تناوبی تابش خورشید است که فرکانس وقوع پایین‌تری را رقم می‌زند.

۶- نتیجه‌گیری

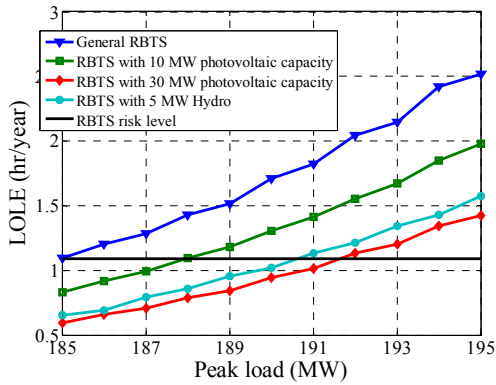
در این مقاله مدل جدیدی از قابلیت اطمینان مزرعه فتوولتاییک ارائه شد که می‌تواند در محاسبات قابلیت اطمینان با استفاده از روش‌های تحلیلی مورد استفاده قرار گیرد. در این مدل از طبیعت تصادفی تابش خورشید به علاوه خصوصیات عملکردی اجزا استفاده شده است. همان گونه که نشان داده شد از زنجیره مارکوف برای مدل‌سازی تابش خورشید

نزدیک به صفر افزایش و احتمال حالات با خروجی نزدیک به توان نامی کاهش می‌یابد. شکل ۹ تأثیر FOR را بر شاخص‌های قابلیت اطمینان نمایش می‌دهد. همان طور که در این تصویر مشاهده می‌شود تأثیر FOR بر شاخص‌های قابلیت اطمینان به دلیل ضریب نفوذ پایین مزرعه فتوولتاییک قابل اغماض است.

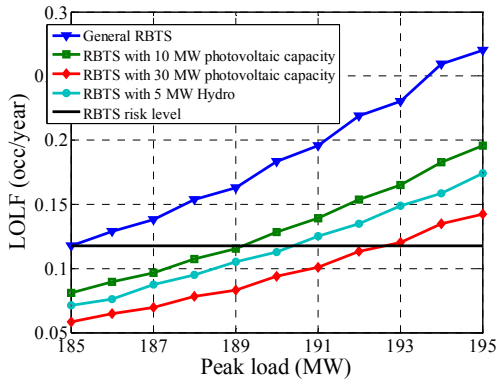
توانایی حمل بار پیک سیستم (PLCC)^۱ می‌تواند به صورت تابعی از سطح ریسک سیستم برآورد شود [۲۹]. در شکل ۱۰، PLCC در سطح ریسک (hr/year) برابر ۱۰۰۹ برابر ۱۸۷٫۹ MW در حالی که در LOLF برابر (occ/year) ۰٫۱۱، برای نرخ خاموشی اجباری ۶٪ است. همچنین در صورتی که بار پیک سیستم ۱۹۰ MW و نرخ خاموشی اجباری سیستم انتقال توان و حفاظت ۶٪ باشد، باید ۲٫۱ MW ظرفیت اضافی منصوب داشته باشد تا سطح ریسک (hr/year) ۱۰۰۹ را راضی نماید و ۱ MW اضافی منصوب داشته باشد تا سطح ریسک (occ/year) ۰٫۱۱ را راضی نماید.

۵-۳ تأثیر بار پیک و ظرفیت واحد فتوولتاییک

در شکل ۱۱ ریسک سیستم به صورت تابعی از بار پیک در حالتی که ظرفیت‌های مختلف به سیستم اضافه می‌شود نمایش داده شده است. با

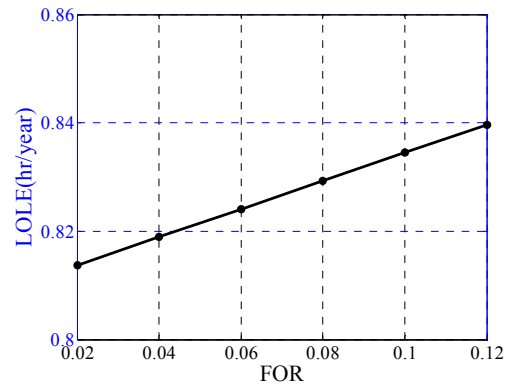


(الف)

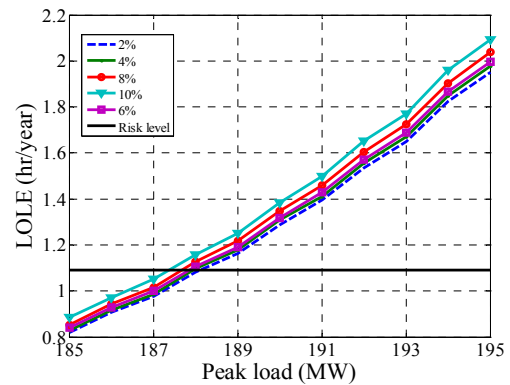


(ب)

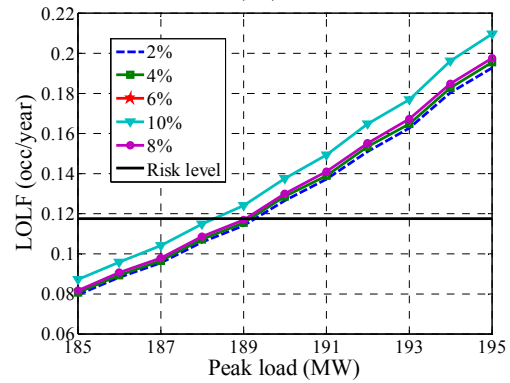
شکل ۹: ریسک سیستم به صورت تابعی از بار پیک در ظرفیت‌های منصوب مختلف (LOLE و LOLF).



شکل ۹: تأثیر FOR سیستم انتقال توان و سیستم حفاظت بر شاخص‌های قابلیت اطمینان.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: LOLE و LOLF به صورت تابعی از بار پیک در FORهای مختلف.

استفاده شد و با توجه به این که مدل نهایی مشابه واحدهای سنتی مرسوم است محاسبات قابلیت اطمینان به سهولت انجام پذیرفت. در این خصوص تأثیر FOR اجزاء، تأثیر ظرفیت مزرعه فتوولتاییک و تأثیر بار پیک بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین حاشیه ظرفیت واحد فتوولتاییک با استفاده از شاخص PLCC مورد آنالیز قرار گرفت. نشان داده شد که حاشیه ظرفیت با استفاده از شاخص LOLE مقدار بیشتری را نسبت به حالت استفاده از شاخص LOLF رقم می‌زند و دلیل این موضوع طبیعت تصادفی تابش خورشید در مقایسه با واحدهای مرسوم می‌باشد. از این رو اهمیت مطالعه شاخص‌های قابلیت اطمینان وابسته به فرکانس در این سیستم‌ها مشهود است.

مراجع

[1] "Renewables 2018 global status report," REN21 Renewable Energy Policy Network, Worldwatch Institute, 2018.
 [2] P. Zhang, W. Li, S. Li, Y. Wang, and W. Xiao, "Reliability assessment of photovoltaic power systems: review of current status

[3] and future perspectives," *Applied Energy*, vol. 104, pp. 822-833, Apr. 2018.
 [4] L. H. Stember, W. R. Huss, and M. S. Bridgman, "A methodology for photovoltaic system reliability & economic analysis," *IEEE J.*, vol. 31, no. 3, pp. 296-303, Aug. 1982.
 [5] S. V. Dhople and A. D. Dominguez-Garcia, "Estimation of photovoltaic system reliability and performance metrics," *IEEE J.*, vol. 27, no. 1, pp. 554-563, Feb. 2012.
 [6] P. Zhang, Y. Wang, W. Xiao, and W. Li, "Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems," *Sustainable Energy, IEEE J.*, vol. 3, no. 3, pp. 379-389, Jul. 2012.
 [7] J. Park, W. Liang, J. Choi, A. A. El-Keib, M. Shahidehpour, and R. Billinton, "A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator," in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting.*, 6 pp., Calgary, AB, Canada 26-28 Jul. 2009.
 [8] R. Karki, A. Alferidi, and R. Billinton, "Reliability modeling for evaluating the contribution of photovoltaics in electric power systems," in *Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., PVSC'11*, pp. 1811-1816, Seattle, WA, USA, 19-24 Jun. 2011.
 [9] F. Castro Sayas and R. N. Allan, "Generation availability assessment of wind farms," *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 5, pp. 507-518, Sept. 1996.
 [10] A. P. Leite, C. L. T. Borges, and D. M. Falcao, "Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites," *Power Systems, IEEE J.*, vol. 21, no. 4, pp. 1493-1501, Nov. 2006.
 [11] A. S. Dobakhshari and M. Fotuhi-Firuzabad, "A reliability model of large wind farms for power system adequacy studies," *Energy Conversion, IEEE J.*, vol. 24, no. 3, pp. 792-801, Sept. 2009.

[۱۲] ش. دهقان و ن. امجدی، "برنامه‌ریزی غیر قطعی توسعه چندساله سیستم قدرت با در نظر گرفتن مزرعه‌های بادی به کمک ترکیب برنامه‌ریزی تصادفی و معیار حداقل - حداکثر پشیمانی،" *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال ۱۴، شماره ۴۷، صص. ۴۱-۵۰، زمستان ۱۳۹۵.

[۱۳] م. رخشانی‌مهر، م. راشکی، م. میری و م. اژدری مقدم، "ارزیابی قابلیت اطمینان قاب‌های خمشی فلزی با استفاده از روش شبیه‌سازی وزنی و درون‌یابی تابع پایه شعاعی،" *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال ۱۴، شماره ۴۷، صص. ۲۱-۳۲، زمستان ۱۳۹۵.

- [30] M. R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999.
- [31] M. K. C. Marwali, M. Haili, S. M. Shahidehpour, and K. H. Abdul-Rahman, "Short term generation scheduling in photovoltaic-utility grid with battery storage," *IEEE J. Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1057-1062, Aug. 1998.
- [32] R. H. Liang and J. H. Liao, "A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems," *Power Systems, IEEE J.*, vol. 22, no. 4, pp. 1665-1674, Nov. 2007.
- [33] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, (vol. 2) Plenum Press New York, 1984.
- [34] M. Ito, K. Kato, K. Komoto, T. Kichimi, and K. Kurokawa, "A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 16, no. 1, pp. 17-30, 2008.
- [۳۵] و. خلیق، ح. منصف و ا. باقری، "روشی جدید برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان شبکه فتولتائیک،" *بیست و هفتمین کنفرانس سیستم قدرت*، صص. ۲۵-۳۵. تهران، ایران، آبان ۱۳۹۱.
- [36] R. Billinton, S. Kumar, N. Chowdhury, K. Chu, K. Debnath, L. Goel, and J. Oteng-Adjei, "A reliability test system for educational purposes-basic data," *Power Systems, IEEE J.*, vol. 4, no. 3, pp. 1238-1244, Aug. 1989.
- [37] R. Billinton and W. Li, *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, New York: Plenum, p. 300, 1994.
- [38] A. C. G. Melo, M. V. F. Pereira, and A. M. Leite da Silva, "A conditional probability approach to the calculation of frequency and duration indices in composite reliability evaluation," *Power Systems, IEEE J.*, vol. 8, no. 3, pp. 1118-1125, Aug. 1993.
- وحید خلیق** دارنده مدرک کارشناسی مهندسی برق گرایش قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۸۹ است. وی سپس در سال ۱۳۹۱ کارشناسی ارشد خود را در دانشگاه تهران با درجه ممتاز در رشته برق گرایش قدرت به اتمام رسانید. هم اکنون دانشجوی دکترا قدرت دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. دارای تالیفات متعدد در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و هماهنگی شبکه‌های برق و گاز است. زمینه کاری مورد علاقه او بهره‌برداری و توسعه شبکه‌های برق و گاز و نیز انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد.
- حسن منصف** مدرک کارشناسی خود را در رشته برق قدرت در سال ۱۳۶۴ از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. سپس در سال ۱۳۶۸ از مقطع کارشناسی ارشد برق قدرت دانشگاه تهران فارغ التحصیل شد. وی مدرک دکترای خود را در سال ۱۳۷۵ از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود و هم‌اکنون استاد تمام گروه قدرت دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران است. وی دارای تالیفات متعدد در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه‌های هوشمند، بهره‌برداری شبکه‌های توزیع، حفاظت سیستم قدرت و نیز قابلیت اطمینان شبکه‌های برق است.
- [۱۴] م. ر. مزیدی شرف‌آبادی و ا. ر. فقیه خراسانی، "مقایسه تجربی و عددی مقدار تشعشع دریافتی خورشیدی بر یک سقف گنبدی شکل با یک سقف مسطح،" *مجله مدل‌سازی در مهندسی*، سال ۱۳، شماره ۴۳، صص. ۲۴-۱۵، زمستان ۱۳۹۴.
- [15] M. Theristis and I. A. Papazoglou, "Markovian reliability analysis of standalone photovoltaic systems incorporating repairs," *IEEE J.*, vol. 4, no. 1, pp. 414-422, Jan. 2014.
- [16] A. Ahadi, N. Ghadimi, and D. Mirabbasi, "Reliability assessment for components of large scale photovoltaic systems," *J. of Power Sources*, vol. 264, pp. 211-219, 15 Oct. 2014.
- [17] L. H. Koh, W. Peng, K. J. Tseng, and G. ZhiYong, "Reliability evaluation of electric power systems with solar photovoltaic & energy storage," in *Proc. Int. IEEE Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS'14*, pp. 130-141, Durham, UK, 7-10, Jul. 2014.
- [18] F. Spinato, P. J. Tavner, G. J. W. van Bussel, and E. Koutoulakos, "Reliability of wind turbine subassemblies," *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp. 387-401, Dec. 2009.
- [19] Z. M. Salameh, B. S. Borowy, and A. R. A. Amin, "Photovoltaic module-site matching based on the capacity factors," *IEEE J. Energy Conversion*, vol. 10, no. 2, pp. 326-332, Jun. 1995.
- [20] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV system," *Energy Conversion, IEEE J.*, vol. 9, no. 3, pp. 482-488, Sept. 1994.
- [21] S. H. Karaki, R. B. Chedid, and R. Ramadan, "Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems," *IEEE J. Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 766-772, Sept. 1999.
- [22] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems-Concepts and Techniques*, Plenum Press New York, 1992.
- [23] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, vol. 4, Springer New York, 2006.
- [24] R. Xu and D. Wunsch, "Survey of clustering algorithms," *IEEE J. Neural Networks*, vol. 16, no. 3, pp. 645-678, May 2005.
- [25] 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 J. Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 849-858, May 2009.
- [26] P. Poggi, G. Notton, M. Muselli, and A. Louche, "Stochastic study of hourly total solar radiation in Corsica using a Markov model," *J. of Climatology*, vol. 20, no. 14, pp. 1843-1860, 30 Nov. 2000.
- [27] D. Niyato, E. Hossain, and A. Fallahi, "Analysis of different sleep and wakeup strategies in solar powered wireless sensor networks," in *IEEE Int. Conf. Proc. Communications, ICC'06*, vol. 7, pp. 3333-3338, Istanbul, Turkey, 11-15 Jun. 2006.
- [28] M. Miozzo, D. Zordan, P. Dini, and M. Rossi, "Solarstat: modeling photovoltaic sources through stochastic Markov processes," in *Proc. IEEE Int. Conf. Energy Conf., ENERGYCON'14*, pp. 688-695, Cavtat, Croatia, 13-16 May 2014.
- [29] J. P. Coelho and J. Boaventura-Cunha, "Long term solar radiation forecast using computational intelligence methods," *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2014, Article ID 729316, 2014.