Islamic Azad University , Shiraz Branch
نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis
sanad.iau.ir/journal/jcdsa

مدل سلامت سیستم قدرت با حضور نیروگاه فتوولتاییک

ایوب علی‌پور[۱] ، امیر قائدی[۲*]، حمید کیوانی[۱]

۱- گروه مهندسی برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
۲- گروه مهندسی برق، واحد داریون، دانشگاه آزاد اسلامی، داریون، ایران
Amir.ghaedi@iau.ac.ir

چکیده: نیروگاه‌های فتوولتاییک انرژی تابشی خورشید را به برق تبدیل می‌کند. به دلیل تغییر تابش خورشید، توان تولیدی این نیروگاه‌ها تغییر می‌کند که بر موضوعات مختلف از جمله بهره‌برداری سیستم قدرت تاثیر می‌گذارد. در بهره‌برداری سیستم قدرت، به منظور حفظ تعادل تولید و مصرف و ثابت نگه داشتن فرکانس مقداری رزرو در نظر گرفته می‌شود. برخلاف مطالعات قبل که رزرو را به صورت درصدی از بار، تولید یا بر اساس ریسک محاسبه می‌کردند، در مدل سلامت سیستم قدرت، هم از مدل احتمالاتی نیروگاه‌های موجود و هم از قواعد تجربی جهت تعیین شاخص‌ها استفاده می‌شود. این مدل، هم مبتنی بر ریسک بوده و هم میزان رزرو از ظرفیت بزرگترین واحد تولید بیشتر می‌باشد. در این مقاله مدل سلامت سیستم قدرت با حضور نیروگاه فتوولتاییک به دست آورده می‌شود. برای این منظور مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک با در نظر گرفتن خرابی اجزای تشکیل‌دهنده و تغییرات تابش خورشید به دست آورده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نیز به منظور بررسی تاثیر نیروگاه‌های فتوولتاییک بر شاخص‌های مدل سلامت شامل احتمال حالت‌های سلامت، حاشیه و ریسک ارائه می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد نیروگاه‌های فتوولتاییک سبب بهبود شاخص‌های بهره‌برداری سیستم قدرت می‌شوند اما تاثیر آن‌ها به دلیل تغییرات تابش خورشید کمتر از نیروگاه‌های متداول است.

واژه های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌برداری شبکه قدرت، رزرو چرخان، مدل سلامت، نیروگاه فتوولتاییک

Well-Being Model of Power System with Photovoltaic Unit

Ayub Alipour[1], Amir Ghaedi[2*], Hamid Keyvani[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Kazeroun Branch, Islamic Azad University, Kazeroun, Iran
[2] Department of Electrical Engineering, Daiun Branch, Islamic Azad University, Dariun, Iran
amir.ghaedi@iau.ac.ir

Abstract:

PV units convert solar energy into electricity. Since, the solar radiation is variable, the production power changes that affects various topics such as power system operation. In the operation of the power system, to maintain the balance of production and consumption, some reserve is considered. Unlike past studies that reserve is considered as percentage of power or load, or based on risk criteria, in well-being model of power system, both probabilistic model and empirical rules are used to determine the indices. This model is based on risk and the amount of reserve is higher than the capacity of the largest unit. In this paper, the well-being model of the power system with the presence of PV plants is obtained. For this purpose, the reliability model of PV plant is obtained by considering components failure and changes in solar radiation. The simulation results are also presented to investigate the impact of PV plants on well-being model indices. Numerical results show the PV units improve reliability-based operation indices of power system. However, due to the variation in solar radiation, the impact of PV units on reliability indices is less than conventional units.

Keywords: renewable energies, power system operation, spinning reserve, well-being model, photovoltaic power plant.

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱ تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

* نویسنده مسئول؛ نشانی: ایران – فارس- داریون –دانشگاه آزاد اسلامی داریون – گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه اهمیت برقراری تعادل بین تولید و مصـــرف انرژی الکتریکی بر متخصصـان صـنعت برق پوشـیده نیسـت. ثابت و در محدوده مجاز قرار گرفتن فرکانس برق در شبکه‌های قدرت مستلزم این است که به همان اندازه که توان الکتریکی توســط نیروگاه‌های مختلف تولید می‌گردد، توان الکتریکی مصــرف شــود. از طرف دیگر شــبکه قدرت در معرض حوادث مختلفی از جمله خروج واحدهای تولید، خرابی خطوط انتقال الکتریکی و سایر تجهیزات می‌باشد که ممکن است تهدیدی برای برهم زدن این تعادل باشـــد. لذا به منظور جلوگیری از قطعی بار معمولا مقداری رزرو چرخان در شـــبکه قدرت قرار می‌دهند. این امر ســـبب می‌شـود با بروز اغتشـاش در شـبکه قدرت نیروگاه‌های که توان تولیدی آن‌ها کمتر از ظرفیت نامی‌شـان اسـت توان تولیدی خود را افزایش داده و کمبود توان مورد نیـاز را جبران نمـایند. برای در نظر گرفتن میزان رزرو چرخان مورد نیاز از گذشته تاکنون روش‌های مختلفی دنبال شده است. در گذشته میزان رزرو چرخان را به اندازه بزرگترین واحد تولیدی سـنکرون در شـبکه و یا درصـدی از آن در نظر می‌گرفتند. این امر منجر می‌شـــد که ســـیســـتم قدرت یا بیش از اندازه قابل اعتماد باشـــد که اقتصادی نیست و یا اینکه قابلیت اطمینان این سیستم کم باشد. لذا در این مقاله با استفاده از روشی موسوم به روش PJM میزان رزرو چرخان مورد نیاز در شبکه محاسبه می‌شود که برای محاسبه این رزرو وضعیت واحدهای تولید موجود در شـــبکه قدرت لحاظ می‌گردد. از طرف دیگر کشـورهای مختلف جهان در برنامه‌ریزی توسـعه تولید خود چند سـالی اســـت که نگاه ویژه‌ای به منابع انرژی تجدیدپذیر دارند و درصـــدد جایگزین نمودن منابع مبتنی بر سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر هســـتند. نیروگاه‌هایی که در ســـال‌های اخیر در نقاط مختلف جهان به بهره‌برداری رســـیده اســـت از منابع انرژی تجدیدپذیر باد، خورشـــید، جزرومد، امواج و زیســـت توده که تجدیدپذیر و پاک هسـتند اسـتفاده می‌کنند. این نیروگاه‌ها در عین داشـتن مزایای فراوان دارای یک مشـکل اساسـی هسـتند و آن این اسـت که توان تولیدی این نیروگـاه‌هـا متغیر بـا زمـان اســـت. بـه عنوان نمونـه در نیروگـاه‌هـای فتوولتاییک توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک به میزان تابش خورشـید وابسـته اسـت و چون در طول روز، ماه و سـال شـدت تابش خورشـید به صـورت گسـترده تغییر می‌کند توان خروجی این نیروگاه‌ها نیز متغیر با زمان خواهد بود. لذا به دلیل این عدم قطعیت برقراری تعادل تولید و مصرف در شبکه‌های قدرتی که نیروگاه‌های فتوولتاییک در آن‌ها سـهم قابل توجهی را در تولید توان دارا می‌باشـــد چالش بیشـــتری خواهد داشت. بنابراین در این مقاله پیشـنهاد شـده اسـت میزان رزرو مورد نیاز در سیسـتم قدرت با حضـور نیروگاه فتوولتاییک بر اسـاس مدل سـلامت تعیین گردد. با توجه به اهمیت موضوع تاکنون کارهای زیادی در زمینه نیروگاه‌های فتوولتاییک و ســـایر منابع انرژی تجدیدپذیر و مطالعه بهره‌برداری آن‌ها انجام شـــده اســـت. در [۱] تکنولوژی ســـیســـتم فتوولتاییک خورشـــیدی توضـــیح داده شـــده و مروری بر انواع مختلف سلول‌های خورشیدی و آینده آن‌ها انجام شده است. در [۲] نیز مروری بر انواع مختلف سلول‌های خورشـیدی فتوولتاییک صـورت گرفته اسـت. در [۳] تحلیل قابلیت اطمینان سـیسـتم فتوولتاییک برای اسـتفاده در یک سـاختمان صـورت گرفته اسـت. در این مقاله مبدل DC به DC، مبدل AC به DC و اینورتر همواره ســـالم در نظر گرفته شـــده‌اند، اما ســـایر تجهیزات شـــامل بار، باتری و ماژول‌های فتوولتاییک در برخی سـاعات در دسـترس نیسـتند. در [۴] کارکرد طولانی مدت و همچنین قـابلیـت اطمینـان مـاژول‌هـای فتوولتـاییـک در شـــرایط آب و هوای گرمسیری ساهاران مورد بررسی قرار گرفته است. در [۵] با استفاده از روش مونت کارلو قابلیت اطمینان ســـیســـتم فتوولتاییک مورد ارزیابی قرار گرفته اســـت. در این مقاله نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشـــکیل دهنده سـیسـتم فتوولتاییک با در نظر گرفتن اثر تغییرات شـرایط آب و هوایی به دسـت آورده شـده اسـت. در [۶] مطالعه بهره‌برداری سـیسـتم قدرت با حضـور نیروگاه‌های بادی و خورشـیدی مقیاس بزرگ صـورت گرفته و میزان رزرو چرخان مورد نیاز در این شـــبکه قدرت بر اســـاس شـــاخص ریســـک محاســـبه شـــده اســـت. در [۷] قابلیت اطمینان یک ریزشـــبکه متشـــکل از واحدهای بادی، جزرومدی جریانی و ســـیســـتم فتوولتاییک مورد بررسی قرار گرفته است. در [۸] کفایت سیستم قدرت با حضور مزارع فتوولتاییک مقیاس بزرگ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۹] تاثیر استفاده از سیستم‌های ردیاب مختلف بر عملکرد سیستم فتوولتاییک مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا نیز سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است: حالت بدون ردیاب و پنل ثابت، حالت مجهز به ردیاب تک محوره و حالت مجهز به ردیاب دو محوره. در [۱۰] یک روش کنترلی مبتنی بر دنبال نمودن نقطه توان اکتیو برای نیروگاه‌های فتوولتاییک پیشـنهاد شـده اسـت تا بتوان فرکانس اولیه ریزشـبکه‌های AC را در شـــرایطی که ســـهم نیروگاه‌های فتوولتاییک در تامین برق مورد نیاز ریزشـبکه قابل توجه است تنظیم نمود. در [۱۱] طراحی یک سیستم متشکل از پنل فتوولتاییک و سلف ابررسانا در یک ریزشبکه که دارای نوسانات توان زیادی می‌باشد صورت گرفته است تا بتواند کنترل بر روی فیلتر نمودن هارمونیک‌های مختلف داشـــته باشـــد. در [۱۲] سـیسـتم‌های مختلفی که می‌توانند به منظور پمپ نمودن آب در مکان دور از شـبکه مورد اسـتفاده قرار بگیرند مورد بررسـی قرار گرفته اسـت. این سـیسـتم‌ها شـامل توربین بادی، پنل فتوولتاییک و سـیسـتم هیبرید متشکل از توربین بادی و پنل فتوولتاییک می‌باشند.

همان‌گونه که در مرور مقالات مشخص است تاکنون مطالعه بهره‌برداری مبتنی بر مدل سلامت سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های فتوولتاییک انجام نشـــده اســـت. بر اســـاس اهدافی که این مقاله دنبال می‌کند ســـازماندهی آن به صـــورت زیر خواهد بود: در بخش دوم نیروگاه‌های فتوولتاییک و در بخش سوم مطالعه بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها بر اساس مدل سلامت تشریح می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری مقاله در بخش چهارم و پنجم آورده می‌شود.

۲- نیروگاه فتوولتاییک

یک سلول فتوولتاییک یک پیوند p-n می‌باشد که بر اثر تابش خورشید به آن برق تولید می‌کند. برق تولیدی این سلول DC بوده و دامنه ولتاژ و جریان تولیدی آن نیز کم می‌باشد. از طریق سری و موازی نمودن سلول‌های خورشیدی هم ولتاژ و هم جریان تولیدی آن‌ها افزایش می‌یابد و ساختاری جدید به نام پنل خورشیدی ایجاد می‌گردد. یک پنل خورشیدی از تعدادی سلول خورشیدی به صورت سری و موازی تشکیل شده و در نتیجه جریان و توان تولیدی آن نسبت به سلول فتوولتاییک بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر با افزایش ولتاژ و جریان در یک پنل، توان پنل خورشیدی نیز به همین نسبت بیشتر خواهد بود. هر سلول دارای یک مشخصه جریان – ولتاژ و همچنین توان – ولتاژ می‌باشد. در این مشخصه یک نقطه وجود دارد که توان الکتریکی بیشتری دارد که به آن نقطه کار ماکزیمم سلول یا پنل گفته می‌شود. در صورتی که بتوان پنل خورشیدی را در این نقطه قرار داد، توان تولیدی آن بیشتر خواهد بود. برای اینکه بتوان پنل خورشیدی را در نقطه توان ماکزیمم قرار داد از یک مبدل الکترونیک قدرت DC به DC استفاده می‌شود. به این مبدل، مبدل دنبال کننده توان ماکزیمم گفته می‌شود. به مجموعه شامل چندین پنل فتوولتاییک که به یک مبدل الکترونیک قدرت جهت دنبال کردن ماکزیمم توان متصل شده‌اند، یک زیر آرایه گفته می‌شود. با توجه به اینکه توان تولیدی پنل‌های فتوولتاییک DC می‌باشد در صورتی که تمایل به اتصال برق تولیدی آن‌ها به شبکه قدرت باشد بایستی از یک مبدل الکترونیک قدرت که توان DC را به توان AC تبدیل می‌کند استفاده نمود. به این مبدل، اینورتر گفته می‌شود. به مجموعه شامل چندین زیر آرایه که به یک اینورتر وصل شده‌اند نیز یک آرایه گفته می‌شود. یک مزرعه فتوولتاییک از چندین آرایه تشکیل شده است. در شکل (۱) ساختار یک مزرعه فتوولتاییک نشان داده شده است.

۳- مدل سلامت سیستم قدرت با حضور نیروگاه فتوولتاییک

قابلیت اطمینان یک تجهیز به معنای این است که آن تجهیز بتواند وظیفه‌ای را که به آن محول شده است به خوبی انجام دهد. در شبکه قدرت که بایستی برق مشترکین را تامین کند قابلیت اطمینان به معنای تامین برق مشترکین بدون قطعی می‌باشد.

۳-۱- مطالعه بهره‌برداری

برای انجام مطالعه بهره‌برداری مبتنی بر قابلیت اطمینان، یکی از معروفترین روش‌ها که در کشور آمریکا در ایالت‌ها پنسیلوانیا، نیوجرسی و مریلند استفاده می‌شده است روش PJM بوده است. این روش احتمال سالم یا خراب بودن نیروگاه‌ها را در زمان مطالعه یا زمان عملکرد به دست می‌آورد. احتمال خراب بودن یک نیروگاه که مبتنی بر مدل مارکوف دو حالته می‌باشد در زمان عملکرد T عبارت است از:

$$P(down)=\frac{\lambda}{\lambda+\mu}-\frac{\lambda}{\lambda+\mu}e^{-(\lambda+\mu)T} \qquad (۱)$$

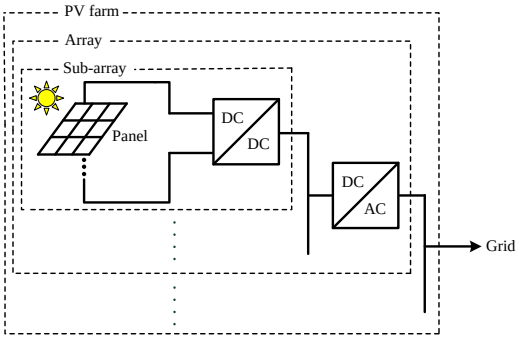
در این روابط لاندا نرخ خرابی و میو نرخ تعمیر می‌باشد. با توجه به اینکه مدت زمان بهره‌برداری کوتاه است امکان انجام تعمیر وجود ندارد و لذا از نرخ تعمیر صرف‌نظر می‌گردد. بنابراین نتیجه می‌شود:

$$P(down)=1-e^{-\lambda T},\ \lambda T \ll 1$$
$$\Rightarrow P(down)=ORR=\lambda T \qquad (۲)$$

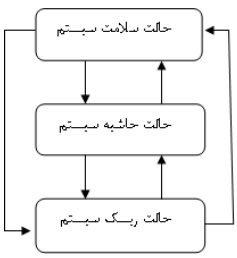
این رابطه احتمال خراب بودن یک نیروگاه در زمان عملکرد است. برای نیروگاه‌هایی که دارای مدل مارکوف دو حالته هستند از این رابطه می‌توان استفاده نمود و احتمال خرابی آن‌ها را تعیین کرد. با توجه به اینکه ممکن است شبکه قدرت از تعدادی نیروگاه تشکیل شده باشد بایستی برای همه نیروگاه‌ها احتمال سالم بودن و احتمال خراب بودن را به دست آورد و از ترکیب مدل این نیروگاه‌ها، جدول کلی سیستم قدرت که شامل ظرفیت هر حالت و احتمال مربوطه می‌باشد به دست آورده شود.

۳-۲- روش پیشنهادی

در مدل سلامت سیستم قدرت معیارهای قطعی با معیارهای احتمالاتی ترکیب می‌شوند. این مدل برای انجام مطالعات بهره‌برداری مناسب است. بر اساس این مدل سه حالت سلامت، حاشیه و ریسک برای شبکه قدرت می‌توان در نظر گرفت. در حالت سلامت هم بار سیستم تامین می‌گردد و هم مقدار رزرو از بزرگترین واحد موجود در شبکه بیشتر است. در حالت حاشیه بار سیستم تامین می‌گردد اما میزان رزرو از بزرگترین واحد تولید سنکرون کمتر است. در حالت ریسک نیز بار سیستم تامین نمی‌گردد. در شکل (۲) این مدل نشان داده شده است.



شکل (۱): ساختار مزرعه فتوولتاییک



شکل (۲): حالت‌های سه گانه مدل سلامت

در این قسمت از مقاله روش پیشنهادی برای انجام مطالعه بهره‌برداری یک شبکه قدرت که در آن نیروگاه فتوولتاییک نیز وجود داشته باشد تشریح می‌گردد. با توجه به اینکه تابش خورشید تغییر می‌کند توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک نیز که به تابش خورشید وابسته است تغییر خواهد کرد و بنابراین امکان نشان دادن نیروگاه فتوولتاییک با دو حالت وجود ندارد و بایستی تعداد حالت‌های مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک را بیشتر از ۲ در نظر گرفت. فرض می‌شود مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک m حالته باشد. می‌توان تعداد تغییر از هر حالت به حالت‌های دیگر را شمرد و ماتریس زیر را که نشان دهنده تعداد جابه‌جایی از هر حالت به حالت‌های دیگر است به دست آورد.

$$[P]=\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1m} \\ N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{m1} & N_{m2} & \dots & N_{mm} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در رابطه فوق N_{ij} برابر با تعداد ساعات یا دفعاتی در سال یا هر مدت زمان دیگر است که تغییر توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک از حالت iام به حالت jام صورت گرفته است. برای تعیین احتمال هر کدام از این حالت‌ها در زمان t باید وضعیت نیروگاه فتوولتاییک در ابتدای مطالعه یا t=0 مشخص باشد. در شروع مطالعه مشخص است که تابش خورشید چقدر است و لذا مشخص است که نیروگاه در چه توانی تولید می‌کند. لذا در ماتریس اولیه نیروگاه احتمال مربوط به آن توان ۱ و بقیه احتمال‌ها صفر قرار داده می‌شود. بر این اساس ماتریس اولیه $[P(0)]$ که نشان می‌دهد در شروع مطالعه نیروگاه چه توانی را تولید می‌کند به دست می‌آید. این امر در (۴) نشان داده شده است. به عبارت دیگر به منظور تعیین ماتریس اولیه نیروگاه می‌توان از این رابطه استفاده کرد.

$$P(0)=[P_{11}\ \dots P_{1m}]\ P_{1i}=\begin{cases}0 & i=1,..,m\ \ i\neq k\\ 1 & i=k\end{cases} \quad (۴)$$

برای محاسبه احتمال هر کدام از حالت‌ها در مدت زمان t بایستی ابتدا این زمان به پله‌های زمانی کوچکتر Δt تقسیم شود. بنابراین مشخص می‌شود که در زمان t چند پله زمانی باید طی شود. در هر کدام از این پله‌های زمانی، یک جابه‌جایی اتفاق می‌افتد. لذا برای تعیین احتمال حالت‌ها کافی است ماتریس اولیه در ماتریس انتقال به توان تعداد جابه‌جایی‌ها ضرب شود. البته ابتدا بایستی ماتریس انتقال در مدت زمان برابر با پله زمانی به دست آورد. در (۵) این امر انجام شده است.

$$[P]=\begin{bmatrix} 1-(\sum_{i=2}^{m}\lambda_{1i})\Delta t & \lambda_{12}\Delta t & \dots & \lambda_{1m}\Delta t \\ \lambda_{21}\Delta t & 1-(\sum_{i=1,i\neq 2}^{m}\lambda_{2i})\Delta t & \dots & \lambda_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{m1}\Delta t & \lambda_{m2}\Delta t & \dots & 1-(\sum_{i=1,i\neq m}^{m}\lambda_{mi})\Delta t \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در رابطه فوق داریم:

$$\lambda_{ij}=\frac{N_{ij}}{\sum_{k=1}^{m}N_{ik}},i\neq j \quad (۶)$$

در این روش باید مشخص نمود که در مدت زمان مطالعه t چند انتقال اتفاق می‌افتد که برابر است با $n=t/(\Delta t)$. بنابراین برای به دست آوردن احتمال حالت‌های مختلف نیروگاه فتوولتاییک بایستی به صورت رابطه (۷) ماتریس اولیه در ماتریس انتقال به توان n ضرب شود. به این قاعده روش ضرب ماتریسی گفته می‌شود.

$$[P(t)]=[P(0)][P]^n \quad (۷)$$

ماتریس $[P(t)]$ یک ماتریس سطری با m ستون است که احتمال حالت‌های ۱ تا m مربوط به مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک را در لحظه t نشان می‌دهد. با داشتن احتمال حالت‌های mگانه نیروگاه فتوولتاییک در هر لحظه از زمان t، جدول احتمال ظرفیت‌های این نیروگاه نیز مشخص بوده و با جدول احتمال ظرفیت‌های سایر واحدهای تولید، جدول احتمال ظرفیت‌های مربوط به کل شبکه قدرت که از نیروگاه‌های متداول و نیروگاه فتوولتاییک تشکیل شده است به دست می‌آید. با مقایسه بار سیستم با ظرفیت حالت‌های مختلف این جدول شاخص‌های زیر محاسبه می‌گردد:

- ریسک انتخاب واحد: مجموع احتمال حالت‌هایی است که بار سیستم از توان تولیدی سیستم بیشتر است.
- احتمال حالت سلامت: مجموع احتمال حالت‌هایی است که هم توان تولیدی از بار سیستم بیشتر است و هم به اندازه بزرگترین نیروگاه موجود در مدار رزرو وجود دارد.
- احتمال حالت حاشیه: مجموع احتمال حالت‌هایی است که توان تولیدی سیستم از بار سیستم بیشتر است اما رزرو به اندازه بزرگترین واحد سنکرون شبکه وجود ندارد.
- رزرو چرخان: در تعیین رزرو چرخان به ترتیب اولویت واحدهای تولید به مدار وارد می‌شود. به ازای یک بار مشخص هر بار معیار قابلیت اطمینان سیستم محاسبه می‌شود. اگر این معیار برآورده نشد باز واحد جدید اضافه می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که معیار قابلیت اطمینان برآورده شود. حال رزرو چرخان به دست می‌آید که با میزان کل تولید منهای بار سیستم برابر است. در تعیین رزرو چرخان می‌توان معیار قابلیت اطمینان را تنها بر اساس ریسک در نظر گرفت. در این حالت آنقدر واحد تولید اضافه می‌شود تا ریسک از مقدار مجاز کمتر شود. اما اگر معیار قابلیت اطمینان بر اساس مدل سلامت باشد بایستی آنقدر نیروگاه به سیستم اضافه شود تا احتمال حالت سلامت از مقدار مجاز بیشتر و ریسک از مقدار مجاز کمتر شود.

۳-۳- مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک

با توجه به اینکه نیروگاه فتوولتاییک از پنل‌های فتوولتاییک، مبدل‌های الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل تشکیل شده است خراب شدن هرکدام از این تجهیزات، سبب خراب شدن کل نیروگاه یا کاهش توان

تولیدی آن می‌گردد. لذا بایستی در مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک، تاثیر خرابی تجهیزات در نظر گرفته شود. از طرف دیگر، احتمال خراب شدن برخی از تجهیزات سیستم فتوولتاییک از جمله پنل‌های خورشیدی کم بوده و لذا با دقت خوبی می‌توان از خرابی این تجهیزات صرف‌نظر نمود. در این قسمت خرابی سلول فتوولتاییک، خرابی پنل فتوولتاییک و خرابی اینورتر در نظر گرفته می‌شود. یک مزرعه فتوولتاییک در نظر گرفته می‌شود که از G آرایه، هر کدام شامل L زیرآرایه تشکیل شده باشد. در هر زیرآرایه نیز R پنل با M شاخه موازی، و هر شاخه شامل N سلول فرض می‌شود. اگر توان ماکزیمم هر سلول در شرایط تابش نامی P_C در نظر گرفته شود توان خروجی مزرعه خورشیدی $GLRMNP_C$ خواهد بود. در این مرحله تأثیر خرابی قسمت‌های مختلف مزرعه فتوولتاییک بر توان خروجی مزرعه در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که در مطالعات بهره‌برداری، زمان مطالعه کوتاه است و همچنین مدل مارکوف تنها یک تغییر را در نظر می‌گیرد، تنها خرابی یک تجهیز در نظر گرفته می‌شود. اگر هر کدام از سلول‌های فتوولتاییک که در پنل‌های فتوولتاییک قرار دارند تحت تأثیر تنش‌های حرارتی، مکانیکی و الکتریکی خراب شود، شاخه مربوط به آن سلول نیز خراب شده و جریان مربوط به پنل کاهش یافته و در نتیجه توان به مقدار $(M\text{-}1)NP_C$ کاهش می‌یابد. در زیرآرایه، پنل‌ها با هم سری بوده و قانون جریان KCL ایجاب می‌کند جریان پنل‌ها با هم برابر باشد. با کم شدن جریان یک پنل، مبدل DC/DC جریان سایر پنل‌ها را نیز به مقدار جریان پنل دارای شاخه خراب کاهش داده و توان مربوط به آن زیرآرایه به مقدار $(M\text{-}1)RNP_C$ کاهش می‌یابد. لذا توان خروجی مزرعه خورشیدی به مقدار $(GLM\text{-}1)RNP_C$ کاهش می‌یابد. با خراب شدن هر کدام از سلول‌های فتوولتاییک این اتفاق رخ می‌دهد. لذا نرخ گذر برابر است با:

$$\lambda_{12} = GLRMN\,\lambda_C \qquad (۸)$$

ممکن است به دلایلی مانند بارش برف و تگرگ بر روی پنل، شکسته شدن پایه پنل و .... کل پنل خراب شود که به این خطاها، خطای مشترک گفته می‌شود. در صورت خراب شدن پنل، توان خروجی زیرآرایه صفر می‌شود؛ زیرا در یک زیرآرایه، پنل‌ها با هم سری هستند. همچنین در صورت خراب شدن مبدل DC/DC نیز توان خروجی زیرآرایه صفر خواهد شد. خرابی مبدل می‌تواند به دلیل خرابی سوییچ‌ها، سیستم کنترل و درایو سوییچ‌ها و سایر اجزا بروز کند. بنابراین با نرخ گذری برابر با مجموع نرخ خرابی مبدل DC/DC و نرخ خطای مشترک پنل، توان مربوط به یکی از زیرآرایه‌ها صفر شده و گذر از حالت ۱ به ۳ در مدل نشان داده شده در شکل (۳) اتفاق می‌افتد. ظرفیت حالت ۳ به مقدار توان یک زیرآرایه از حالت ۱ کمتر بوده و برابر با $(GL\text{-}1)RMNP_C$ می‌باشد. نرخ گذر حالت ۱ به ۳ برابر است با:

$$\lambda_{13} = G.L.R.\lambda_{common-panel} + G.L.\lambda_{DC/DC} \qquad (۹)$$

ممکن است یکی از مبدل‌های DC/AC یا همان اینورترها که توان DC را به توان AC جهت اتصال به شبکه تبدیل می‌کنند خراب شود و در این صورت توان تولیدی مربوط به آرایه مربوطه صفر خواهد شد. خرابی مبدل می‌تواند به دلیل خراب شدن سوییچ‌ها، تایریستور و یا دیودها، سیستم کنترل و ... باشد. با خراب شدن این مبدل گذر به حالت ۴ اتفاق می‌افتد و توان این حالت برابر با $(G\text{-}1)LRMNP_C$ می‌باشد. نرخ خرابی این حالت نیز برابر است با:

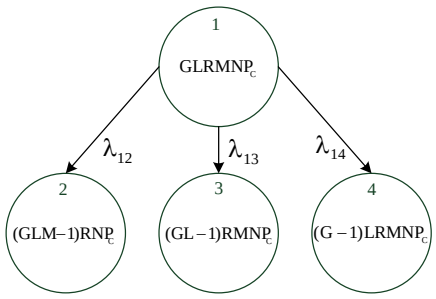
$$\lambda_{14} = G\,\lambda_{DC/AC} \qquad (۱۰)$$

در شکل (۳) مدلی که برای نیروگاه فتوولتاییک با در نظر گرفتن خرابی اجزا به دست آورده شده است نمایش داده شده است. در این مرحله باید تغییرات توان خروجی نیروگاه فتوولتاییک که ناشی از تغییر شدت تابش خورشید است در نظر گرفته شود. با توجه به تغییرات تابش خورشید و اینکه توان تولیدی این نیروگاه‌ها به شدت تابش خورشید وابسته است توان تولیدی این نیروگاه‌ها نیز تغییر می‌کند. در شکل (۴) تغییرات شدت تابش خورشید در منطقه کازرون نشان داده شده است.

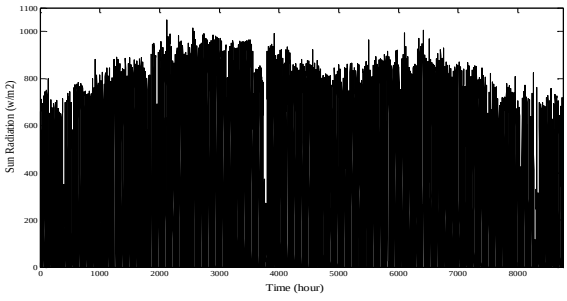
به همین دلیل تعداد حالت‌های توان در این نیروگاه‌ها زیاد بوده و بایستی به کمک روش‌های خوشه‌بندی این تعداد حالت‌ها را کاهش داد. در اینجا روش خوشه‌بندی فازی پیشنهاد شده است. با فرض اینکه این روش منجر به کاهش تعداد حالت‌ها به H حالت شود مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک به صورت شکل (۵) خواهد بود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

این بخش با شبیه‌سازی سیستم تست RBTS کارایی روش پیشنهادی را بررسی نموده و تاثیر نیروگاه فتوولتاییک بر مطالعات بهره‌برداری را با در نظر گرفتن مدل سلامت سیستم قدرت نشان می‌دهد. یک نیروگاه فتوولتاییک با ظرفیت ۳۰ مگاوات که از ۵۰ آرایه ۶۰۰ کیلوواتی تشکیل شده و در منطقه کازرون نصب شده است مورد مطالعه قرار



شکل (۳): تاثیر خرابی اجزا بر مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک

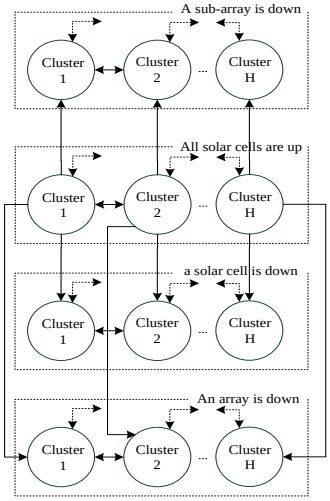


شکل (۴): شدت تابش ساعت به ساعت خورشید در منطقه کازرون

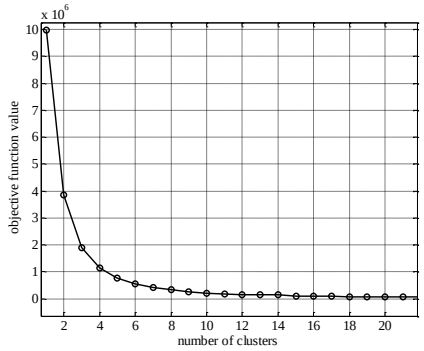
می‌گیرد. در این نیروگاه هر آرایه فتوولتاییک نیز شامل ۵۰ زیرآرایه ۱۲ کیلوواتی و هر زیر آرایه فتوولتاییک نیز شـــامل ۴۰ پنل ۳۰۰ واتی می‌باشـد. پنل فتوولتاییک نیز از ۳ شـاخه موازی که هر شـاخه از ۳۲ سلول فتوولتایک سری ساخته شده است تشکیل شده است. ظرفیت هر کدام از مبدل‌های DC به DC که برای دنبال کردن ماکزیمم توان استفاده شده‌اند برابر با ۱۲ کیلووات بوده و بنابراین ظرفیت هر کدام از اینورترها برابر با ۶۰۰ کیلووات می‌باشـد. در این نیروگاه بازده پنل‌های فتوولتاییک ۱۸/۴ درصد و بازده تجهیزات دیگر شامل مبدل‌ها، سیم و اتصالات ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. پنل فتوولتاییک دارای مساحت ۲ مترمربع در نظر گرفته شده و با شدت تابش خورشید ۹۰۰ وات بر مترمربع توان خروجی هر پنل فتوولتاییک در مزرعه فتوولتاییک ۳۰۰ وات می‌باشد. بنابراین اگر شدت تابش خورشید نامی ۹۰۰ وات بر مترمربع بتلبد توان خروجی مزرعه فتوولتاییک ۳۰ مگاوات خواهد بود. این مزرعه فتوولتاییک در منطقه کازرون نصب شده است. داده‌های تابش ساعت به ساعت مربوط به این منطقه در شکل (۵) رسم شده است. با داشتن مساحت و بازده پنل‌ها و شدت تابش هر ساعت می‌توان توان این نیروگاه را در هر ساعت محاسبه نمود. با توجه به اینکه شدت تابش خورشـــید تغییرات زیادی دارد توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک نیز تغییرات زیادی خواهد داشت و به کمک الگوریتم خوشه‌بندی فازی تعداد حالات توان کاهش می‌یابد. در الگوریتم خوشه‌بندی فازی بایستی تعداد خوشـــه‌ها مشـــخص باشـــد. به همین خاطر نمودار تابع هدف بر حسب خوشه‌ها محاسبه شده و در شکل (۶) رسم شده است. همانگونه که در شکل مشخص است زمانی که تعداد خوشه‌ها از ۱ تا ۷ تغییر می‌کند مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد و میزان کاهش تابع هدف ملموس است. اما با افزایش تعداد خوشه‌ها به بیشتر از ۷ کاهش تابع هدف دیگر ملموس نیست و به اصطلاح کاهش تابع هدف متوقف شده اســـت. بنابراین می‌توان تعداد ۷ خوشـــه را برای مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک به کار برد. ماتریس انتقال بین این ۷ حالت به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\lambda = \begin{bmatrix} 0.6991 & 0.2663 & 0.0213 & 0.0053 & 0.0080 & 0 & 0 \\ 0.1755 & 0.5135 & 0.2266 & 0.0706 & 0.0111 & 0.0027 & 0 \\ 0.0254 & 0.2516 & 0.4037 & 0.1903 & 0.1078 & 0.0201 & 0.0011 \\ 0.0099 & 0.1176 & 0.3212 & 0.1440 & 0.1656 & 0.2003 & 0.0414 \\ 0.0116 & 0.0252 & 0.1818 & 0.2805 & 0.0967 & 0.1044 & 0.2998 \\ 0.0024 & 0.0048 & 0.0384 & 0.1799 & 0.2326 & 0.0839 & 0.4580 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0083 & 0.0337 & 0.0416 & 0.9164 \end{bmatrix}$$

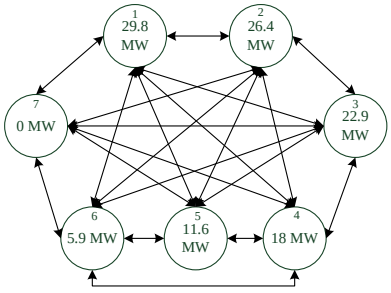
همچنین مرکز خوشه‌های هفت گانه‌ای که برای این نیروگاه به دست آورده شده به صورت جدول (۱) خواهد بود. مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه نیز در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به ماتریس انتقال بین این ۷ حالت و داشتن مرکز خوشه‌ها می‌توان محاسبات مربوط به بهره‌برداری سیستم قدرت با حضور این نیروگاه فتوولتاییک را انجام داد. در ادامه این بخش از مدل قابلیت اطمینان به دست آمده برای نیروگاه فتوولتاییک به منظور انجام مطالعه بهره‌برداری مبتنی بر مدل سلامت سیستم تست $RBTS$ استفاده می‌شود. با توجه به پایین بودن نرخ خرابی نیروگاه فتوولتاییک در مقایسه با نرخ انتقال بین حالت‌های هفت گانه از خرابی اجزا صرف‌نظر شده است.



شکل (۵): مدل نهایی نیروگاه فتوولتاییک به لحاظ قابلیت اطمینان



شکل (۶): نمودار تابع هدف بر حسب تعداد خوشه‌ها



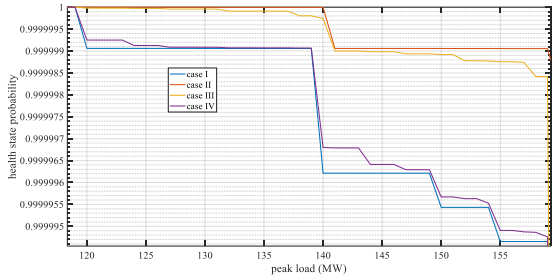
شکل (۷): مدل ۷ حالته نیروگاه فتوولتاییک ۳۰ مگاواتی

جدول (۱): مرکز خوشه‌ها

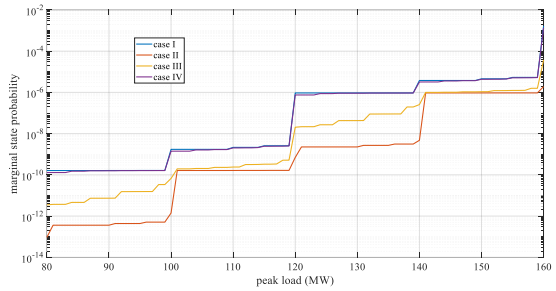
شماره خوشه‌ها	مرکز خوشه بر حسب مگاوات
۱	۳۰
۲	۲۶
۳	۲۳
۴	۱۸
۵	۱۲
۶	۶
۷	۰

به منظور انجام مطالعه بهره‌برداری شبکه قدرت بر اساس مدل سلامت ۴ حالت در نظر گرفته می‌شود: حالت اول سیستم اولیه *RBTS* است و در حالت دوم تا چهارم به ترتیب نیروگاه متداول ۳۰ مگاواتی با نرخ خرابی ۵ بار در سال، نیروگاه فتوولتاییک مورد مطالعه با تابش اولیه خورشید زیاد و نیروگاه فتوولتاییک مورد مطالعه با تابش اولیه خورشید کم به این سیستم اضافه می‌شود. در شکل‌های (۸-۱۰) احتمال سه گانه مدل سلامت یعنی احتمال حالت سلامت، احتمال حالت حاشیه و احتمال حالت ریسک مربوط به زمان عملکرد ۱ ساعت آورده شده است. همانگونه که مشخص است اضافه نمودن نیروگاه فتوولتاییک احتمال حالت سلامت را افزایش و ریسک را کاهش می‌دهد. اما در صورتی که تابش اولیه خورشید کم باشد این نیروگاه‌ها تاثیر کمتری بر شاخص‌های مدل سلامت دارند. در صورتی که تابش اولیه خورشید بیشتر باشد تاثیر این نیروگاه‌ها در بهبود احتمال حالت سلامت و کاهش ریسک سیستم بیشتر خواهد بود. بنابراین به دلیل تغییر نمودن تابش خورشید، در مطالعات بهره‌برداری که مدت زمان مطالعه کم است، میزان تابش خورشید و توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک در شروع مطالعه مهم است. از طرف دیگر تاثیر نیروگاه فتوولتاییک در مقایسه با نیروگاه متداول که توان ثابتی دارد کمتر است زیرا توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک در طول زمان متغیر بوده و در بیشتر اوقات از توان نامی نیروگاه کمتر است. بنابراین بایستی سعی گردد نیروگاه‌های فتوولتاییک در مناطقی که تابش خورشید بالایی دارند نصب گردند تا تاثیر بیشتری بر شاخص‌های مدل سلامت سیستم قدرت داشته باشند. از طرف دیگر همان‌گونه که مشخص است با زیاد شدن بار سیستم، احتمال حالت سلامت کاهش می‌یابد و احتمال حالت ریسک افزایش می‌یابد. بنابراین در صورتی که خواسته شود احتمال حالت سلامت از یک مقدار مجاز کمتر نشود و همچنین ریسک سیستم از مقدار مجاز بیشتر نشود بایستی در بارهای بزرگتر، نیروگاه جدید مانند نیروگاه فتوولتاییک به مدار آورده شود.

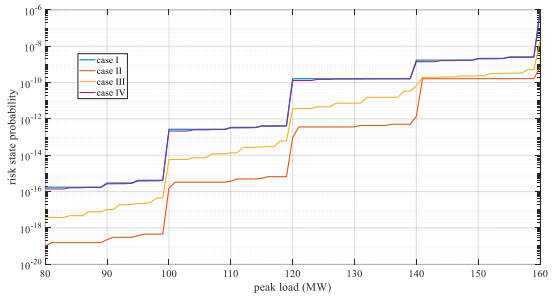
در ادامه رزرو چرخان بر اساس شاخص‌های مدل سلامت به دست می‌آید. فرض می‌شود شاخص قابلیت اطمینان مورد نظر به این صورت باشد: ریسک مجاز ۰/۰۰۰۰۱ بوده و نباید ریسک از این مقدار بیشتر شود و احتمال حالت سلامت نیز ۰/۹۹۸ بوده و نباید احتمال این حالت از این مقدار کمتر شود. حال به ازای بارهای مختلف یکی یکی واحدها به مدار آورده و هر بار این دو شاخص به دست می‌آید. در صورتی که این دو شاخص براورده نشود واحد جدید بر اساس اولویت ورود به سیستم وارد می‌شود تا اینکه این شاخص‌ها براورده شوند. برای سه حالت: سیستم اولیه *RBTS*، سیستم *RBTS* با نیروگاه فتوولتاییک با تابش اولیه زیاد، و سیستم *RBTS* با نیروگاه فتوولتاییک با تابش اولیه کم به عنوان حالت‌های اول تا سوم در زمان عملکرد ۴ ساعت مقدار ظرفیتی که باید در مدار باشد تا شاخص‌های دوگانه مبتنی بر مدل سلامت براورده گردند آورده شده است. در شکل (۱۱) نتایج این محاسبات نشان داده شده است.



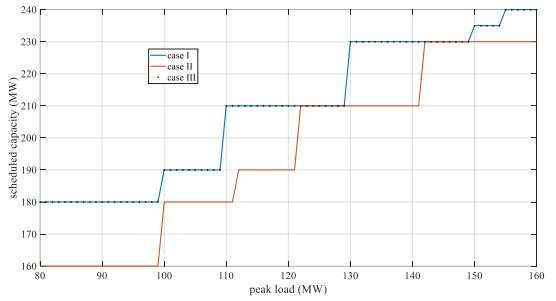
شکل (۸): احتمال حالت سلامت در زمان عملکرد ۱ ساعت



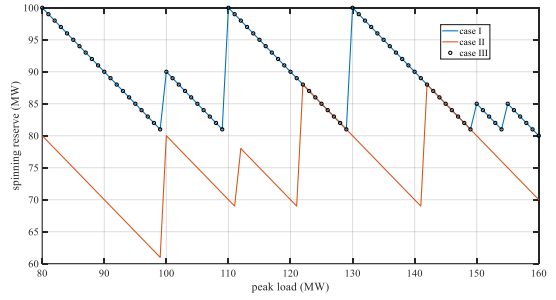
شکل (۹): احتمال حالت حاشیه در زمان عملکرد ۱ ساعت



شکل (۱۰): ریسک سیستم در زمان عملکرد ۱ ساعت

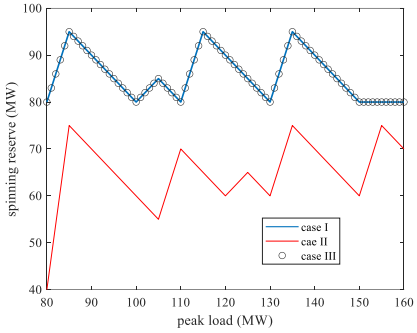


شکل (۱۱): مقدار ظرفیت نیروگاه‌های به مدار آورده شده جهت تامین ملزومات شاخص‌های مدل سلامت



شکل (۱۲): اثر نیروگاه فتوولتاییک بر رزرو چرخان بر اساس شاخص-های مدل سلامت

با توجه به شکل انتظار می‌رود نسبت به حالت تعیین ظرفیت مورد نیاز بر اساس ریسک سیستم، زمانی که شاخص‌های دوگانه مطرح هستند ظرفیت بیشتری باید به مدار آورده شود. از طرف دیگر همان‌گونه که انتظار می‌رود با زیاد شدن بار سیستم، بایستی ظرفیت تولید بیشتری به مدار آورده شود تا شاخص‌های مدل سلامت در مقدار مجاز قرار بگیرند. همچنین اضافه شدن نیروگاه فتوولتاییک به سیستم قدرت، سبب می‌شود نیروگاه‌های کمتری در مدار باشند و بنابراین کاهش ظرفیت مورد نیاز اتفاق می‌افتد. تاثیر نیروگاه‌های فتوولتاییک در شرایطی که تابش خورشید زیاد است قابل توجه است اما در شرایطی که تابش خورشید کم است تاثیر نیروگاه‌های فتوولتاییک بسیار کم رنگ خواهد بود. در شکل (۱۲) نیز رزرو چرخان مورد نیاز برای سه حالت ذکر شده بر اساس شاخص‌های مدل سلامت به دست آورده شده است. به منظور انجام مقایسه، میزان رزرو مورد نیاز بر اساس شاخص ریسک سیستم نیز به دست آورده شده است. در شکل (۱۳) میزان رزرو چرخان در شرایطی که میزان ریسک کمتر از ۰/۰۰۰۰۱ باشد برای سه حالت بیان شده آورده شده است. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۲-۱۳) مشخص است میزان رزرو مورد نیاز بر اساس شاخص‌های مدل سلامت نسبت به حالتی که شاخص ریسک تنها در نظر گرفته می‌شود بیشتر است، چرا که علاوه بر اینکه بایستی میزان احتمال حالت ریسک از مقدار مجاز کمتر باشد بایستی احتمال حالت سلامت نیز از مقدار مجاز فراتر رود. همان‌گونه که در شکل مشخص است اضافه نمودن نیروگاه فتوولتاییک به سیستم قدرت سبب کاهش میزان رزرو چرخان و در نتیجه کاهش هزینه می‌شود. البته زمانی نیروگاه فتوولتاییک تاثیرگذار است که تابش اولیه خورشید زیاد باشد.



شکل (۱۳): اثر نیروگاه فتوولتاییک بر رزرو چرخان بر اساس ریسک

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مطالعه بهره‌برداری مبتنی بر مدل سلامت سیستم قدرت با در نظر گرفتن اثر نیروگاه‌های فتوولتاییک انجام شد. ابتدا مدل قابلیت اطمینان نیروگاه فتوولتاییک با در نظر گرفتن خرابی تجهیزات تشکیل دهنده نیروگاه و تغییرات تابش خورشید به دست آورده شد. در مدل قابلیت اطمینان این نیروگاه‌ها، خرابی اجزای تشکیل دهنده شامل پنل‌ها، مبدل‌های الکترونیک قدرت *DC* به *DC* و اینورتر در نظر گرفته شد. در این تحقیق به منظور انجام بهره‌برداری سیستم قدرت از روش *PJM* تعمیم یافته که برای تعیین رزرو چرخان از شاخص‌های قابلیت اطمینان مبتنی بر مدل سلامت بهره می‌برد، استفاده شد. برای نیروگاه فتوولتاییک که مدل قابلیت اطمینان آن چند حالته بود جهت تعیین احتمال حالت‌ها از روش ضرب ماتریسی استفاده شد. برای بررسی تاثیر نیروگاه فتوولتاییک بر شاخص‌های مدل سلامت، شبیه‌سازی سیستم تست *RBTS* در نرم‌افزار متلب انجام شد. نتایج حاصل نشان داد نیروگاه متداول نسبت به نیروگاه فتوولتاییک تاثیر بیشتری در بهبود شاخص‌های مدل سلامت داشت زیرا توان تولیدی آن‌ها ثابت بود اما توان تولیدی نیروگاه فتوولتاییک در طول زمان تغییر می‌کرد و در بیشتر مواقع کمتر از توان نامی بود. همچنین در صورتی که تابش اولیه خورشید کم باشد تاثیر نیروگاه فتوولتاییک کم رنگ است اما اگر تابش خورشید زیاد باشد تاثیر نیروگاه فتوولتاییک قابل توجه خواهد بود.

مراجع

[1] Dambhare, Mugdha V., Bhavana Butey, and S. V. Moharil. "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1913. No. 1. IOP Publishing, 2021.

[2] Al-Ezzi, Athil S., and Mohamed Nainar M. Ansari. "Photovoltaic Solar Cells: A Review." Applied System Innovation 5.4 (2022): 67.

[3] Fara, Laurentiu, and Dan Craciunescu. "Reliability analysis of photovoltaic systems for specific applications." Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules; Gok, A., Ed (2020): 79-92.

[4] Atsu, Divine, et al. "Analysis of long-term performance and reliability of PV modules under tropical climatic conditions in sub-Saharan." Renewable Energy 162 (2020): 285-295.

[5] Shahidi Rad, N., M. Niroomand, and R. Hooshmand. "Failure Rate Calculation and Reliability Assessment of a PV System based on Monte-Carlo Simulation Considering Environmental Conditions." TABRIZ JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING 48.3 (2018): 1215-1225

[6] Ghaedi, Amir, and Hamed Gorginpour. "Spinning reserve scheduling in power systems containing wind and solar generations." Electrical Engineering (2021): 1-20.

[7] Nargeszar, Ayoub, et al. "Reliability evaluation of the renewable energy-based microgrids considering resource variation." IET Renewable Power Generation 17.3 (2023): 507-527.

[8] Ghaedi, A., et al. "Incorporating Large Photovoltaic Farms in Power Generation System Adequacy Assessment." Scientia Iranica 21.3 (2014): 924-934.

[9] Bazyari, Shahriar. "A study on the effects of solar tracking systems on the performance of photovoltaic power plants." Journal of Power and Energy Engineering 2.04 (2014): 718.

[10] Li, Zhongwen, et al. "Adaptive power point tracking control of PV system for primary frequency regulation of AC microgrid with high PV integration." IEEE Transactions on Power Systems 36.4 (2021): 3129-3141.

[11] Wang, Jian, et al. "Design and Performance Analysis of PV-SMES-Based Microgrid Integrated with Power Fluctuation Suppression and Active Filtering Control." IEEE Transactions on Applied Superconductivity 31.8 (2021): 1-5.

[12] Angadi, Sachin, et al. "Comprehensive review on solar, wind and hybrid wind-PV water pumping systems-an electrical engineering perspective." CPSS Transactions on Power Electronics and Applications 6.1 (2021): 1-19.