

WELL-BEING APPROACH OF A POWER SYSTEM CONTAINING RUN-OF-THE-RIVER POWER PLANTS**Esmail Khalilzadeh, *Assistant Professor*****Department of Electrical and Computer Engineering, Arsanjan Branch, Islamic Azad University,
Arsanjan, Iran
esmail.khalilzadeh@iau.ac.ir****Received:** 14 February 2024**Revised:** 02 April 2024**Accepted:** 09 April 2024**Abstract:**

Renewable energies, especially Run-Of the-River (ROR) power plants are increasingly used for the electricity generation in the power systems. The uncertain and intermittent nature of these plants arisen from variability of water flow, however, has led to some problems in their integration to power systems. Thus, the operating reserve requirement in a power system containing large ROR plants is a main challenge, which has to be addressed properly. In this way, this paper presents an analytical approach to determine the adequate spinning reserve based on the well-being approach during the system operation. For this purpose, a comprehensive reliability model of ROR units considering both associated components failure rates and uncertainty nature of the output power resulted from the variability in the water flow is developed and multi-state model for these resources is obtained based on the Fuzzy c-means clustering method (FCM) approach. This approach not only evaluates the interaction between these energies and conventional units but also determines the contribution that ROR power plants can make in load carrying capability of a power generating system. Two reliability test systems, i.e., RBTS and IEEE-RTS, have been examined to demonstrate the effectiveness of the proposed reliability model. Also, these two reliability test systems, utilized from water flow data of Sheshpir River in Pars Province of Iran, are examined to demonstrate the effectiveness of the proposed model.

Keywords: Operating reserve, Run-Of the-River (ROR) power plants, Spinning reserve, Uncertainty, Water flow, Well-being approach.

Corresponding Author: Dr. Esmail Khalilzadeh

Corresponding Author Address: Department of Electrical and Computer Engineering, Arsanjan Branch, Islamic Azad University, Arsanjan, Iran.

مدل سلامت سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های آبی جریان

اسماعیل خلیل زاده، استادیار

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد ارسنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، ارسنجان، ایران
esmail.khalilzadeh@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

چکیده: انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه نیروگاه‌های آبی جریان (ROR) به طور فزاینده‌ای برای تولید برق در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شوند. ماهیت نامطمئن و متناوب این نیروگاه‌ها از تغییر جریان آب ناشی می‌شود که منجر به ایجاد مشکلاتی در ترکیب آنها با سیستم‌های قدرت شده است. بنابراین، نیاز به رزرو بهره‌برداری در یک سیستم قدرت حاوی نیروگاه‌های آبی جریان بزرگ یک چالش اصلی است که باید به درستی مورد توجه قرار گیرد. به این ترتیب، یک رویکرد تحلیلی برای مطالعات قابلیت اطمینان و تعیین رزرو چرخان کافی بر اساس مدل سلامت در طول بهره‌برداری سیستم ارائه می‌شود. برای این منظور یک مدل قابلیت اطمینان جامع با در نظر گرفتن هر دو نرخ خرابی اجزای مرتبط و ماهیت عدم قطعیت جریان آب برای مطالعات بهره‌برداری این نیروگاه‌ها معرفی شده و یک مدل چند حالتی برای این منابع بر اساس الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی (FCM) به دست می‌آید. این رویکرد نه تنها تعامل بین این انرژی‌ها و واحدهای متعارف را ارزیابی می‌کند، بلکه سهمی که نیروگاه‌های آبی جریان می‌توانند در قابلیت حمل بار یک سیستم تولید برق داشته باشند را نیز تعیین می‌کند. دو سیستم تست قابلیت اطمینان شناخته شده، یعنی RBTS و IEEE-RTS در این مطالعه استفاده شده است. همچنین داده‌های جریان آب رودخانه شش‌پیر استان فارس در ایران، برای نشان دادن اثربخشی مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: جریان آب، رزرو بهره‌برداری، رزرو چرخان، عدم قطعیت، مدل سلامت، نیروگاه آبی جریان

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسماعیل خلیل زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ارسنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارسنجان - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث رشد سریع منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش تولید سیستم‌های قدرت شده است [۱]. در میان منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر، نیروگاه‌های در مقیاس بزرگ آبی جریان^۱ (ROR) رشد یافته‌اند. نیروگاه‌های آبی جریان ۶۲ مگاواتی مامکوم و ۵۵ مگاواتی Skookum در کانادا، نیروگاه ۷۳ مگاواتی یوگور در چین، ۴۲ مگاواتی برشیا در ایتالیا و نیروگاه ۳۰ مگاواتی یاسوج در ایران، تنها نمونه‌هایی از واحدهای تولیدی آبی جریان (ROR) نصب شده در سراسر جهان هستند. با زنجیره‌ای کردن واحدهای آبی جریانی ساده، امکان تحویل توان تولیدی به سیستم انتقال وجود دارد.

تغییرپذیری و غیر قابل کنترل بودن مزارع مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر شامل تولیدات نیروگاه‌های بادی، خورشیدی و آبی جریانی و همچنین ناتوانی در پیش‌بینی دقیق تولیدات آن‌ها از بزرگترین موانع برای استفاده کارآمد، موثر و بهینه از این انرژی‌ها است [۲-۵]. علاوه بر این، رویکردهای مرسوم قادر به انجام مطالعات سیستم قدرت در حضور انرژی‌های تجدیدپذیر نیستند. این نگرانی‌های چالش برانگیز در مواردی است که ترکیب مزارع بادی و همچنین مزارع PV در سیستم‌های قدرت مورد توجه قرار می‌گیرند [۲-۷]. با این حال، با توجه به دانش نویسندگان در آثار گذشته، مطالعات بهره‌برداری یک سیستم قدرت حاوی نیروگاه‌های آبی جریانی انجام نشده است و بنابراین می‌توان از تحقیقات مشابه انجام شده بر روی باد و خورشید و غیره استفاده کرد. برای تعیین ذخیره سیستم قدرت شامل نیروگاه‌های بادی و مزارع خورشیدی، اخیراً تعداد زیادی از مطالعات در مقالات منتشر شده ارائه شده است. روش‌های مبتنی بر رویکردهای قطعی [۷] قادر به استفاده برای سیستم‌های قدرت مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر نیستند. در مقابل، شاخه‌ای از تکنیک‌های احتمالاتی برای ارزیابی میزان ذخیره ظرفیت به روشی مطمئن‌تر پیشنهاد شده‌اند [۸]. تمامی این تکنیک‌ها که مبتنی بر رویکرد PJM^۲ هستند، می‌توانند به عنوان روش‌های کارآمد برای ارزیابی ریسک‌های کوتاه‌مدت معرفی شوند. منابع [۹،۱۰] تاکید می‌کنند که تعیین مقدار بهینه ذخیره بهره‌برداری در حضور نیروگاه‌های بادی در مقیاس بزرگ یک کار پیچیده است. در [۱۱]، توزیع نرمال برای مدل‌سازی مزرعه بادی استفاده می‌شود و مقدار رزرو چرخان^۳ (SR) بر اساس مفهوم هزینه-ارزش قابلیت اطمینان^۴ به‌دست می‌آید. در [۱۲]، از روش سناریوسازی برای مدل‌سازی عدم قطعیت^۵ مزرعه بادی استفاده می‌شود. منابع [۱۳،۱۴] از روش شبیه‌سازی زمانی مونت کارلو^۶ (MCS) برای ارزیابی ذخیره بهره‌برداری^۷ سیستم‌های قدرت با سطح نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کنند. مقاله [۱۵] اثر تغییرات سرعت باد، تابش خورشید، سرعت جریان‌های جزرومدی و دمای محیط بر نرخ خرابی و قابلیت اطمینان ریزشکته‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله منابع انرژی تجدیدپذیر شامل توربین بادی، توربین جزرومد جریانی و سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شده است. مقاله [۱۶] تاثیر نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی^۸ بر مطالعات برنامه‌ریزی ریزشکته‌های شامل این نیروگاه‌ها را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله، به دلیل عدم قطعیت نیروگاه‌های جزرومدی مخزنی و نیروگاه فتوولتائیک، از باتری ذخیره انرژی جهت کاهش عدم قطعیت توان تولیدی ریزشکته استفاده شده است. در [۱۷] تاثیر تغییرات سرعت باد بر قابلیت اطمینان نیروگاه‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این نیروگاه‌ها از تکنولوژی ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده و اثر تغییرات سرعت باد بر نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشکیل‌دهنده این نیروگاه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاله [۱۸] میزان رزرو چرخان موردنیاز یک سیستم قدرت با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید را به‌دست آورده است. روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته مبتنی بر ریسک انتخاب واحد سیستم قدرت بوده و به دلیل عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید، میزان رزرو چرخان موردنیاز شبکه افزایش یافته است. در [۱۹] تاثیر مبدل‌های انرژی امواج بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله از تکنولوژی ژنراتورهای شیار مخروطی^۹ در مبدل انرژی امواج استفاده شده و به دلیل

¹ Run-Of-The-River

² Pennsylvania-Jersey New-Maryland

³ Spinning reserve

⁴ Reliability cost-worth

⁵ Uncertainty

⁶ Monte Carlo simulation

⁷ Operating reserve

⁸ Barrage-type tidal power plants

⁹ Slot-coned generators

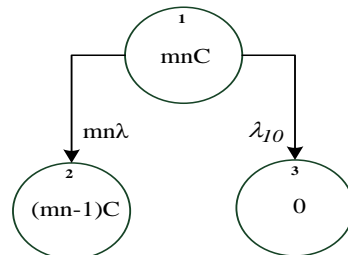
تغییر ارتفاع و دوره تناوب امواج، توان تولیدی این نیروگاه‌ها در طول زمان تغییر کرده است. بر همین اساس در مدل قابلیت اطمینان به دست آمده برای مبدل انرژی امواج بیش از دو حالت وجود دارد. در [۲۰] قابلیت اطمینان سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های جزرومدی نوع مخزنی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله اثر تغییر ارتفاع جزرومد بر نرخ خرابی تجهیزات مختلف تشکیل‌دهنده این نیروگاه‌ها از جمله توربین، ژنراتور، مبدل الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور و کابل مورد بررسی قرار گرفته است. مقاله [۲۱] اثر تغییر ارتفاع جزرومد بر توان تولیدی نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در نظر گرفته شده و میزان رزرو چرخان موردنیاز سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها مطالعه شده است. در این مقاله یک مدل قابلیت اطمینان چند حالتی برای نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی در نظر گرفته شده و احتمال حالت‌های مختلف این مدل در زمان بهره‌برداری به کمک روش ماتریسی تعیین شده است. در [۲۲] مدل قابلیت اطمینان نیروگاه جزرومدی نوع مخزنی با در نظر گرفتن اثر خرابی اجزا و تغییر توان تولیدی این نیروگاه‌ها که دلیل آن تغییر ارتفاع جزرومد است، به دست آمده است. سپس از مدل چند حالتی به دست آمده به منظور تعیین شاخص‌های کفایت سیستم قدرت با حضور این نیروگاه‌ها استفاده شده است.

این مقاله یک مدل تحلیلی را برای ارزیابی نیازهای ذخیره چرخان سیستم‌های تولید بر اساس شاخص‌های مدل سلامت^۱، در حضور نیروگاه‌های آبی جریان معرفتی می‌کند. ایده اصلی این مقاله ایجاد یک مدل احتمالاتی چند حالتی برای تولیدات این نیروگاه‌ها است تا در مطالعات رزرو بهره‌برداری سیستم قدرت استفاده شوند. یک رویکرد خوشه‌بندی مناسب، به نام الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی^۲ (FCM)، برای یافتن مناسب‌ترین حالت‌های مرتبط با واحدهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌شود. احتمال، نرخ خروج و فرکانس هر حالت با استفاده از داده‌های جریان آب تاریخی به دست می‌آید. روش پیشنهادی برای دو سیستم تست استاندارد، یعنی RBTS و IEEE-RTS اعمال می‌شود.

قسمت‌های دیگر مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است. مدل‌های تحلیلی چند حالتی مرتبط با نیروگاه آبی جریان در بخش دوم معرفی شده‌اند. در بخش سوم، عمدتاً به روش پیشنهادی، ارزیابی ذخیره چرخان بر اساس شاخص‌های مدل سلامت اختصاص داده شده است. بخش چهارم از سه زیر بخش تشکیل شده و در فرآیند اجرای تکنیک پیشنهادی از طریق دو مطالعه موردی مشارکت دارد. نتیجه‌گیری در بخش پنجم خلاصه می‌شود.

۲- مدل تحلیلی احتمالاتی نیروگاه‌های آبی جریانی

این بخش به طور کامل به مدل‌های احتمالاتی پیشنهادی نیروگاه‌های آبی جریانی اختصاص داده شده است. در [۲۳] ساختار یک نیروگاه ساده آبی جریانی و مدل قابلیت اطمینان آن مناسب برای مطالعات کفایت^۳ سیستم قدرت معرفی شده است. در [۲۳]، نیروگاه آبی جریانی با n واحد، هر کدام با m پنوستاک، می‌تواند به صورت یک واحد با $m \times n$ پنوستاک نمایش داده شود. در اینجا، مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه ROR با در نظر گرفتن هر دو نرخ خرابی اجزا و تغییر توان خروجی مناسب برای مطالعات بهره‌برداری ارائه شده است. با توجه به زمان کوتاه مطالعات بهره‌برداری، تنها یک قطعه خرابی در نظر گرفته شده است. بنابراین، تنها خرابی ترانسفورماتور قدرت یا خرابی یک عنصر مرتبط با یکی از شاخه‌های $m \times n$ بررسی می‌شود. خرابی ترانسفورماتور قدرت منجر به تولید صفر نیروگاه آبی جریانی و خرابی یک عنصر مرتبط با یکی از شاخه‌های $m \times n$ منجر به تولید صفر انشعاب مرتبط می‌شود. بنابراین مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه آبی جریانی در شکل (۱) نشان داده شده است.



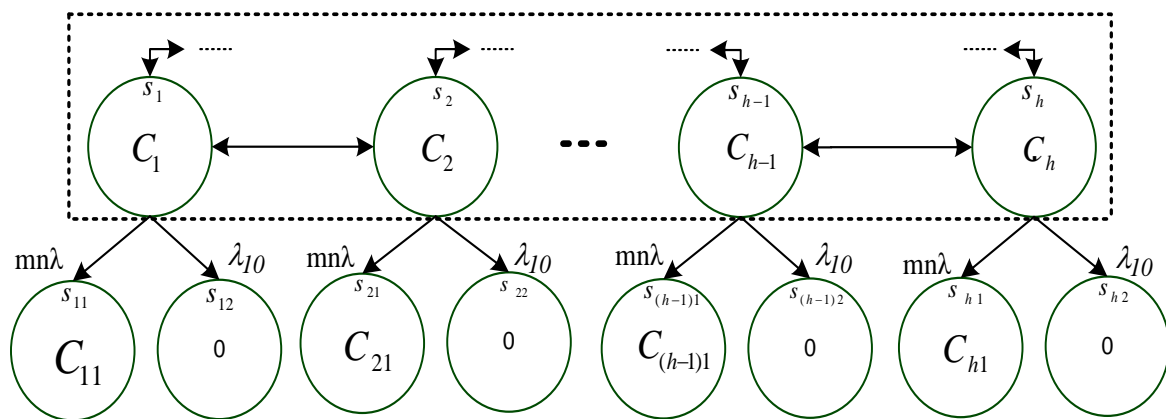
شکل (۱): مدل قابلیت اطمینان یک نیروگاه آبی جریانی (با در نظر گرفتن خرابی یک اجزا)

¹ Well-Being approach

² Fuzzy c-means clustering method

³ Adequacy

در این مدل توان تولیدی یک شاخه به نام C در نظر گرفته شده و از آنجایی که افق زمانی مطالعات بهره‌برداری کوتاه است، تعمیر یا تعویض قطعات خراب غیرممکن است. در نتیجه، نرخ تعمیر و تعویض این اجزا در این مطالعات نادیده گرفته شده است. با استفاده از داده‌های تاریخی توان تولیدی نیروگاه‌های آبی جریانی به عنوان داده‌های ورودی، تعداد و احتمال برخی از حالت‌های مناسب مرتبط با سطوح تولید این نیروگاه‌ها را می‌توان با استفاده از روش الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی تعیین کرد [۲۳]. هنگامی که مدل احتمالاتی نیروگاه آبی جریانی با استفاده از روش الگوریتم FCM به دست آمد، می‌توان مدل مارکوف^۱ یک نیروگاه آبی جریانی متشکل از $m \times n$ شاخه‌های موازی را استخراج کرد که در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل تعداد خوشه‌های مرتبط با ماهیت عدم قطعیت جریان آب، h در نظر گرفته می‌شود. نرخ گذر بین حالت‌های مختلف را می‌توان از داده‌های تاریخی توان تولیدی این نیروگاه‌ها تعیین نمود.



شکل (۲): مدل قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریانی

۳- روش ارزیابی رزرو چرخان نیروگاه‌های آبی جریانی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، روش PJM نقش اجتناب‌ناپذیر خود را در فرآیند ارزیابی ذخیره بهره‌برداری سیستم قدرت نشان داده است. برای در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی تولید نیروگاه آبی جریانی در این روش و ایجاد یک روش مؤثر سازگار با ماهیت این انرژی‌ها، یک روش جدید اصلاح‌شده PJM در این بخش ارائه می‌شود. فرض شده است که مدل قابلیت اطمینان واحدهای متعارف، مدل دو حالتی با حالت‌های up و down است. احتمال خرابی در این مدل از رابطه (۱) به دست می‌آید که در آن λ نرخ خرابی هر واحد متعارف بر حسب (occ./hr) و T مدت زمان عملکرد^۲ می‌باشد.

$$P(down) = \lambda \times T \quad (1)$$

مدل‌های مورد بحث برای نیروگاه آبی جریانی در بخش قبل به عنوان مدل‌های قابلیت اطمینان این واحدهای مبتنی بر تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس روش PJM قرار است تمام واحدها در زمان $t=0$ در حالت‌های سالم باشند [۲۴]. در زمان تعیین شده، احتمال‌های حالت‌های سالم و خرابی مرتبط با تمام واحدهای متعارف محاسبه می‌شوند و مدل تولید معادل توسعه می‌یابد. مدل چند حالتی نیروگاه آبی جریانی می‌تواند در روش PJM با تکنیک ضرب ماتریسی^۳ همان‌طور که در رابطه (۲) نشان داده شده است، بیان شود. در این رویکرد، زمان عملکرد T به چند مرحله با مدت زمان Δt تقسیم می‌شود.

$$P(T) = P(0) \cdot [STPM]^{(T/\Delta t)} \quad (2)$$

جایی که $P(0)$ ، $P(H)$ و STPM به ترتیب ماتریسی سطری مربوط به احتمال حالت‌های مختلف در مدت زمان عملکرد T، دومی، احتمال مربوط به حالت‌های مختلف در ابتدای مطالعات که از داده‌های جریان اولیه آب استخراج می‌شود و سومی، ماتریس احتمال گذر تصادفی^۴ می‌باشد و درایه‌های آن نرخ گذر بین حالت‌های مختلف بر حسب تعداد رخداد در زمان Δt

¹ Markov model

² Lead time

³ Matrix multiplication technique

⁴ Stochastic transitional probability matrix

می‌باشد. همانطور که احتمالات حالت‌های مختلف محاسبه می‌شود، می‌توان از مدل‌های چند حالتی نیروگاه‌های ROR برای ارزیابی جدول احتمال خروج ظرفیت^۱ (COPT) این واحدها برای دوره از پیش تعریف شده مطالعات استفاده کرد. سپس جدول احتمال خروج ظرفیت محاسبه شده با مدل بار ترکیب می‌شود تا شاخص‌های مدل سلامت [۲۵] از جمله احتمال سالم بودن^۲ $P(H)$ ، احتمال حاشیه‌ای^۳ $P(M)$ ، ریسک انتخاب واحد^۴ (UCR)، رزرو چرخان، میزان بار قابل تغذیه^۵ (PLCC) و قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه^۶ (IPLCC) طبق تعاریف زیر استنباط شوند.

حالت سالم بودن: در این حالت ظرفیت تولید بیش از تقاضا و ذخیره به اندازه کافی زیاد و از ظرفیت بزرگترین واحد، بیشتر است.

$$P(H) = \sum_{i=1}^k P_i, \quad (C_i > (\text{load} + \text{capacity of largest unit})) \quad (3)$$

حالت حاشیه‌ای: در این حالت ظرفیت تولید بیشتر از تقاضا است اما ذخیره به اندازه کافی، زیاد نیست و کمتر از ظرفیت بزرگترین واحد است.

$$P(M) = \sum_{i=1}^k P_i, \quad (C_i > \text{load but } C_i < (\text{load} + \text{capacity of largest unit})) \quad (4)$$

حالت ریسک: در این حالت ظرفیت تولید کمتر از تقاضا است.

$$UCR = 1 - P(H) - P(M) \quad (5)$$

ذخیره چرخان: برای بار تعریف شده، ظرفیت تولید افزایش می‌یابد تا شاخص‌های مدل سلامت برآورده شود. تفاوت بین ظرفیت تولید و تقاضا به عنوان ذخیره چرخان محاسبه می‌شود.

میزان بار قابل تغذیه: برای ظرفیت تولید مشخص، بار افزایش می‌یابد تا شاخص‌های مدل سلامت برآورده شوند.

قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه: با افزودن یک واحد تولیدی جدید، بار قبلی افزایش می‌یابد تا شاخص‌های مدل سلامت برآورده شود. تفاوت بین دو بار به صورت IPLCC محاسبه می‌شود.

۴- نتایج عددی

در این بخش، دو سیستم تست شناخته شده یعنی RBTS⁷ و IEEE-RTS⁸ با افزودن برخی واحدهای ROR مورد بررسی قرار می‌گیرند. مدل‌های قابلیت اطمینان واحدهای ROR جدید بر اساس روش پیشنهادی تعیین شده و مطالعات بهره‌برداری این دو سیستم نامبرده انجام شده و شاخص‌های مختلف مدل سلامت سیستم قدرت محاسبه می‌شوند. سپس تحلیل‌های متعددی انجام می‌شود و اثرات تغییرات زمان عملکرد، بار پیک، ظرفیت برنامه‌ریزی شده، سطح نفوذ منابع تجدیدپذیر و جریان آب اولیه بر مطالعات بهره‌برداری سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۱- مطالعه موردی سیستم تست RBTS در حضور نیروگاه‌های آبی جریان

در این بخش، RBTS به عنوان یک سیستم تست برای بررسی مطالعات ذخیره بهره‌برداری در حضور نیروگاه‌های آبی جریانی تعیین شده است. داده‌های اصلی واحدهای تولید RBTS با ظرفیت نصب شده ۲۴۰ مگاوات و ترتیب بارگیری اولویت آنها در جدول (۱) آورده شده است [۲۶].

¹ Capacity Outage Probability Table

² Healthy probability

³ Marginal probability

⁴ Unit Commitment Risk

⁵ Peak Load Carrying Capability

⁶ Increase in Peak Load Carrying Capability

⁷ Roy Billinton Test System

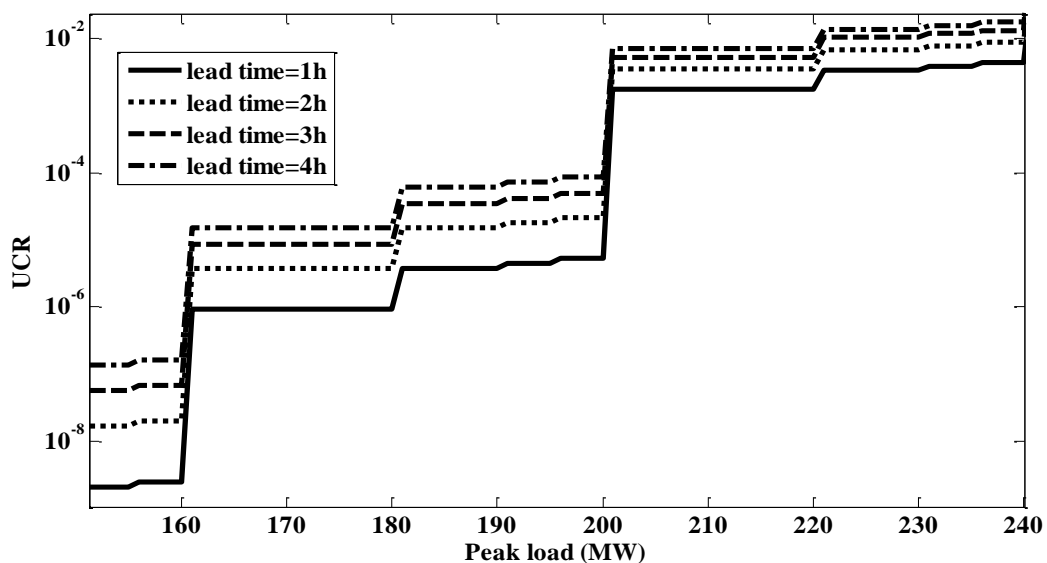
⁸ IEEE Reliability Test System

جدول (۱): داده‌های واحدهای RBTS

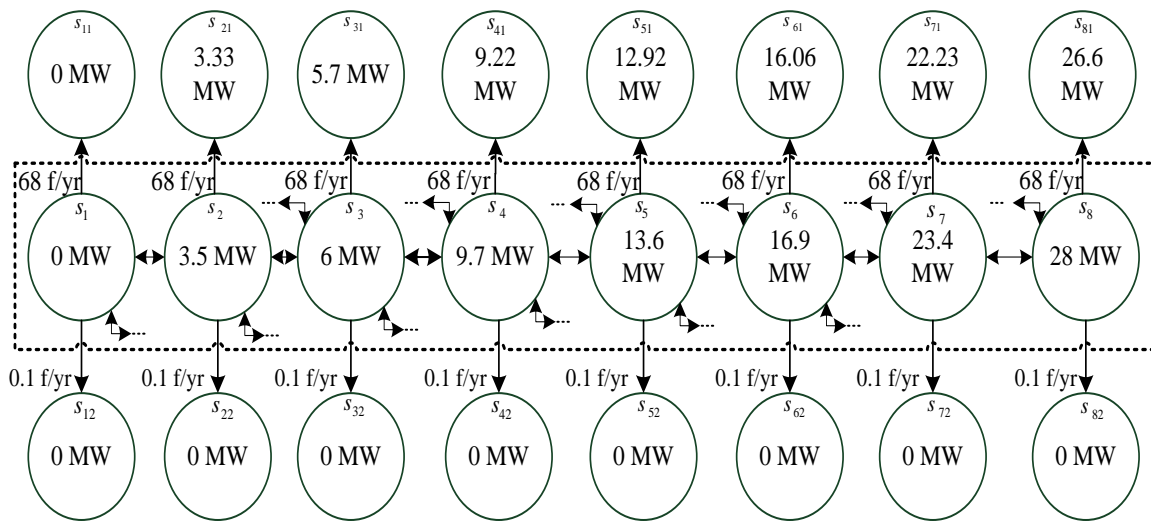
Cap. (MW)	Type	No. of units	Priority order	Failure rate (occ./yr)
40	Hydro	1	1	3
20	Hydro	2	2-3	2.4
40	Thermal	2	4-5	6
20	Thermal	1	6	5
10	Thermal	1	7	4
20	Hydro	2	8-9	2.4
5	Hydro	2	10-11	2

برای RBTS بدون اضافه کردن واحدهای جدید، مقادیر شاخص ریسک انتخاب واحد در مقابل زمان‌های مختلف عملکرد و بارهای پیک در شکل (۳) محاسبه و ترسیم شده‌اند. در این مطالعه، تمام واحدها به مدار آورده می‌شوند که ظرفیت برنامه‌ریزی شده معادل آنها ۲۴۰ مگاوات است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، هرگونه افزایش در بار پیک یا زمان عملکرد، مقدار شاخص UCR را تشدید می‌کند. همچنین استنباط می‌شود که این شاخص از ماهیت گسسته‌ای پیروی می‌کند که از ظرفیت‌های واحدهای تولیدی تکی ناشی می‌شود. برای تسهیل درک مفهومی در مورد تأثیرات واحدهای مبتنی بر تجدیدپذیر بر میزان الزامات رزرو چرخان، موارد زیر تعریف شده و تحت بررسی قرار می‌گیرند. سیستم RBTS بدون اضافه کردن واحد جدید به عنوان مورد اول در نظر گرفته می‌شود، در موارد دوم، سوم و چهارم به ترتیب، یک واحد معمولی ۳۰ مگاواتی با نرخ خرابی ۵ بار در سال، یک نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی با دبی آب اولیه کم و یک نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی با دبی آب اولیه زیاد به RBTS اصلی اضافه می‌شود. به عنوان یک اطلاعیه، واحد متعارف اضافه شده در مورد دوم به عنوان آخرین واحد برنامه‌ریزی شده است. در سایر موارد، واحدهای تجدیدپذیر به دلیل ویژگی‌های بهره‌برداری رایگان، به عنوان اولین واحدها برنامه‌ریزی می‌شوند.

یک نیروگاه آبی جریانی زنجیره‌ای ۳۰ مگاواتی با ۵ واحد ساده برای نصب بر روی رودخانه ششپیر استان فارس ایران در نظر گرفته شده است. هر واحد از ۴ مجموعه پنوستاک تشکیل شده است که ظرفیت هر پنوستاک با جریان آب ۲/۲ متر مکعب بر ثانیه، ۱/۵ مگاوات خواهد بود. داده‌های قابلیت اطمینان اجزای نیروگاه در [۲۳] آورده شده است. داده‌های جریان آب یک ساله مرتبط با رودخانه ششپیر در سال ۱۳۹۸ [۲۳] برای استخراج مدل قابلیت اطمینان این واحد آبی جریانی استفاده شده است. الگوریتم FCM به ۸ خوشه منجر می‌شود و مدل قابلیت اطمینان نیروگاه ROR مناسب برای مطالعات بهره‌برداری استخراج شده که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۳): نمودار ریسک انتخاب واحد RBTS به ازای زمان‌های عملکرد و پیک بارهای مختلف



شکل (۴): مدل قابلیت اطمینان نیروگاه آبی جریان ۳۰ مگاواتی

ماتریس احتمال گذر تصادفی مربوط به این نیروگاه به منظور انجام مطالعات بهره‌برداری نیز به صورت نشان داده شده در رابطه‌های (۶) تا (۱۰) خواهد بود.

$$STPM = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{16 \times 16} \quad (۶)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1-0.043\Delta t & 0.014\Delta t & 0.005\Delta t & 0.006\Delta t & 0.001\Delta t & 0.008\Delta t & 0.004\Delta t & 0.005\Delta t \\ 0.003\Delta t & 1-0.007\Delta t & 0.004\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.003\Delta t & 0.014\Delta t & 1-0.023\Delta t & 0.006\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.006\Delta t & 0 & 0.01\Delta t & 1-0.028\Delta t & 0.009\Delta t & 0.003\Delta t & 0 & 0 \\ 0.003\Delta t & 0 & 0 & 0.023\Delta t & 1-0.043\Delta t & 0.017\Delta t & 0 & 0 \\ 0.018\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0.011\Delta t & 1-0.038\Delta t & 0.005\Delta t & 0.004\Delta t \\ 0.001\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.009\Delta t & 1-0.021\Delta t & 0.011\Delta t \\ 0.006\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001\Delta t & 0.014\Delta t & 1-0.021\Delta t \end{bmatrix}_{8 \times 8} \quad (۷)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.008\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.008\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.008\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.008\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.008\Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.008\Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.008\Delta t & 0 \end{bmatrix}_{8 \times 7} \quad (۸)$$

$$C = [0]_{7 \times 8} \quad (۹)$$

$$D = [0]_{7 \times 7} \quad (۱۰)$$

شاخص‌های مدل سلامت برای این چهار مورد با در نظر گرفتن پیک بارهای مختلف در زمان عملکرد ۴ ساعت در جدول (۲) تا (۵) ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت و می‌توان این نتایج را از جداول استنباط نمود، اضافه نمودن واحدهای تولیدی جدید به سیستم RBTS، منجر به کاهش ریسک انتخاب واحد و افزایش احتمال سلامت^۱ می‌شود. با این حال، واحدهای متعارف، شاخص UCR را در مقایسه با واحدهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر به طور مؤثرتری بهبود می‌بخشد.

^۱ Healthy probability

جدول (۲): شاخص‌های مدل سلامت (مورد اول)

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
160	0.993149	0.006836	1.51E-05
170	0.993137	0.006848	1.52E-05
180	0.986562	0.013378	6.04E-05
190	0.984759	0.015168	7.28E-05
200	0	0.993149	0.006851
210	0	0.993137	0.006863
220	0	0.986562	0.013438

جدول (۳): شاخص‌های مدل سلامت (مورد دوم)

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
160	0.999969	3.08E-05	4.52E-08
170	0.999924	7.57E-05	1.44E-07
180	0.999897	0.000103	2.75E-07
190	0.993129	0.006855	1.52E-05
200	0.990869	0.0091	3.08E-05
210	0.984309	0.015615	7.59E-05
220	0.982511	0.017386	0.000103

جدول (۴): شاخص‌های مدل سلامت (مورد سوم)

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
160	0.998557	0.001443	7.92E-07
170	0.998399	0.001601	8.80E-07
180	0.996941	0.003056	3.31E-06
190	0.996351	0.003645	4.26E-06
200	0.156966	0.841591	0.001443
210	0.065154	0.933244	0.001601
220	0.030933	0.966007	0.003059

جدول (۵): شاخص‌های مدل سلامت (مورد چهارم)

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
160	0.999961	3.86E-05	2.09E-08
170	0.999957	4.33E-05	2.35E-08
180	0.999908	9.23E-05	9.30E-08
190	0.998239	0.00176	1.02E-06
200	0.976286	0.023675	3.87E-05
210	0.973573	0.026384	4.33E-05
220	0.966317	0.03359	9.23E-05
220	0.966317	0.03359	9.23E-05

علاوه بر این، تأثیر جریان اولیه آب بر شاخص‌های مدل سلامت از دیگر موارد مهمی است که از نتایج به دست آمده قابل استنباط است. تنها زمانی که جریان آب در ابتدای مطالعات زیاد باشد، نیروگاه آبی جریانی می‌تواند نقش کلیدی در بهبود مدل سلامت ایفا کند. مقدار ذخیره چرخان مورد نیاز برای برآورده کردن شاخص‌های مدل سلامت با در نظر گرفتن $UCR < 0.0001$ و $P(H) > 0.985$ در مقابل بارهای اوج مختلف محاسبه و در جدول (۶) نشان داده شده است. در این مطالعه، زمان عملکرد سیستم ۴ ساعت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، برای هر سطح بار سیستم، واحدهای معمولی بر اساس اولویت آنها به سیستم اضافه می‌شوند. این روند تا رسیدن شاخص‌های مدل سلامت به حد مجاز ادامه می‌یابد. در یک سطح بار مشخص، ذخیره چرخان به عنوان تفاوت بین واحدهای متعارف برنامه‌ریزی شده و سطح بار اوج محاسبه می‌شود. از این جدول به وضوح می‌توان دریافت که با اضافه شدن واحدهای مبتنی بر تجدیدپذیر، مقادیر ذخیره چرخان مورد نیاز کاهش می‌یابد. بنابراین هزینه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت از جمله منابع تجدیدپذیر کمتر از موارد

متعارف خواهد بود. همچنین از جدول نتیجه گرفته می شود که ذخیره چرخان موردنیاز برای موارد با واحدهای آبی جریان با دبی آب بالا، ذخیره چرخان موردنیاز را در مقایسه با شرایط جریان آب با دبی پایین به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.

جدول (۶): مقادیر رزرو چرخان

Peak load (MW)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
160	50	50	50	50
170	60	70	60	50
180	55	60	50	45
190	-	70	50	45
200	-	70	45	40

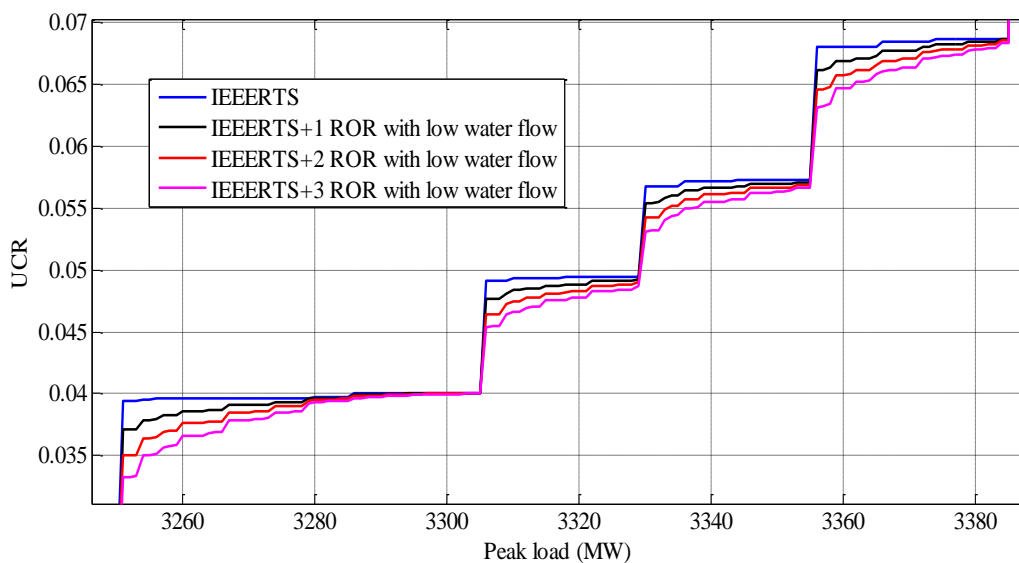
میزان بار قابل تغذیه مرتبط با موارد مختلف که شاخص های مدل سلامت را با در نظر گرفتن زمان های عملکرد مختلف برآورده می کند، در جدول (۷) نشان داده شده است. توانایی سیستم قدرت برای تامین بارها با افزودن برخی از واحدهای مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر به بخش تولید آن افزایش می یابد. با این حال، این بهبود تحت تأثیر شرایط اولیه جریان آب و مقدار زمان عملکرد است. شاخص ارزشمند دیگری، یعنی قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه، برای موارد مختلف محاسبه و تجزیه و تحلیل می شود تا تأثیرات واحدهای مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر در مقایسه با واحدهای متعارف با دقت بیشتری بررسی شود. با انجام این کار، می توان پیک بار سیستم را تا جایی که شاخص های مدل سلامت در حد مجاز باقی می ماند، افزایش داد. نتایج به دست آمده در جدول (۸) نشان داده شده است. همان طور که از جدول مشخص است، افزودن نیروگاه های ROR با دبی آب اولیه کم (مورد ۳) باعث بهبود قابل توجهی در قابلیت حمل بار سیستم قدرت در زمان عملکرد یک ساعت نمی شود. با این حال، این مورد برای شرایط نیروگاه های با دبی آب بالا به این صورت نمی باشد.

جدول (۷): میزان بار قابل تغذیه بر حسب مگاوات در حالت های مختلف

Lead time	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1 h	200	229.9	200.4	223.3
4 h	190	210	199.9	201

جدول (۸): قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه بر حسب مگاوات در حالت های مختلف

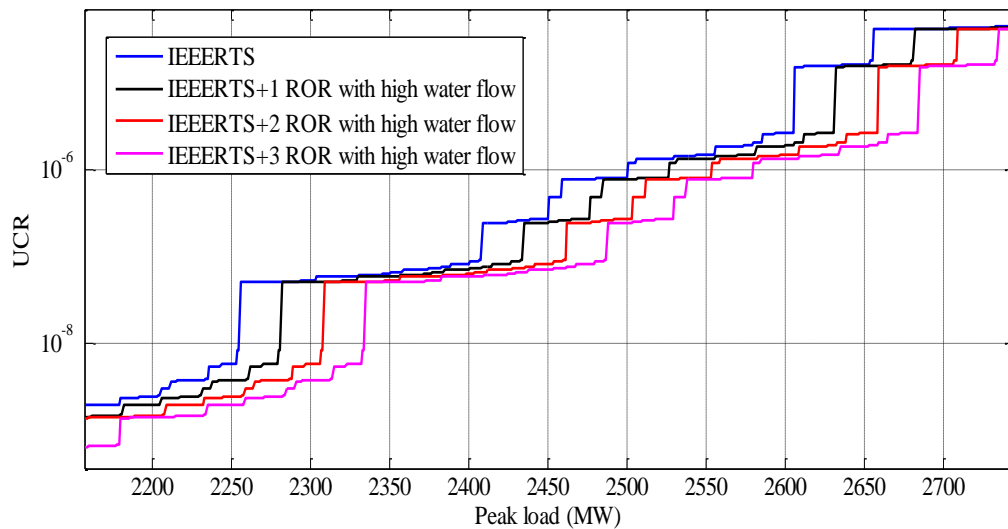
Lead time	Case 2	Case 3	Case 4
1 h	29.9	0.4	23.3
4 h	20	9.9	11



شکل (۵): تأثیرات نیروگاه های آبی جریان با دبی آب کم روی شاخص ریسک انتخاب واحد

۴-۲- مطالعه موردی سیستم تست IEEE-RTS در حضور نیروگاه‌های آبی جریانی

در این بخش، IEEE-RTS به عنوان یک سیستم تست برای بررسی اثرات سطوح نفوذ مختلف منابع تجدیدپذیر بر مطالعات بهره‌برداری سیستم در نظر گرفته شده است. اطلاعات دقیق مرتبط با این سیستم تست در [۲۷] ارائه شده است. مقدار ریسک انتخاب واحد برای نفوذ انرژی‌های مختلف آبی جریانی در شکل‌های (۵) و (۶) ارزیابی و نشان داده شده است. زمان انجام این مطالعه ۴ ساعت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از این ارقام مشخص است، اگرچه افزودن واحدهای جدید مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر سطح ریسک سیستم را بهبود می‌بخشد، اما این بهبود در سطوح نفوذ بالا کاهش می‌یابد.



شکل (۶): تاثیرات نیروگاه‌های آبی جریانی با دبی آب زیاد روی شاخص ریسک انتخاب واحد

شاخص‌های مدل سلامت مرتبط با ۴ مورد شامل: IEEE-RTS، IEEE-RTS و یک واحد معمولی ۳۰ مگاواتی با نرخ خرابی ۵ بار در سال، IEEE-RTS و یک نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی با جریان آب اولیه کم، IEEE-RTS و یک نیروگاه آبی جریانی ۳۰ مگاواتی با جریان آب اولیه بالا محاسبه و در جداول (۹) تا (۱۲) ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود، شاخص‌های مدل سلامت با اضافه شدن واحد جدید به سیستم بهبود می‌یابد. با این حال، بهبود مربوط به واحدهای متعارف بیشتر از واحدهای آبی جریانی به خصوص با جریان آب اولیه کم است. دلیل آن ماهیت نامشخص و عدم قطعیت این واحدهای تجدیدپذیر می‌باشد.

جدول (۹): شاخص‌های مدل سلامت مورد اول

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
2500	0.999644	0.000355	1.19E-06
2600	0.999083	0.000914	2.62E-06
2700	0.98889	0.011068	4.16E-05
2800	0.987565	0.012381	5.37E-05
2900	0.95992	0.039724	0.000356
3000	0.893082	0.106001	0.000917
3100	0	0.98889	0.01111

جدول (۱۰): شاخص‌های مدل سلامت مورد دوم

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
2500	0.999703	2.96E-04	7.76E-07
2600	0.999396	6.02E-04	1.87E-06
2700	0.988998	0.010961	4.08E-05
2800	0.988364	0.011589	4.69E-05
2900	0.960401	0.039302	2.97E-04
3000	0.931451	0.067946	6.04E-04
3100	0	0.988998	0.011002

جدول (۱۱): شاخص های مدل سلامت مورد سوم

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
2500	0.999653	0.000346	1.13E-06
2600	0.999103	0.000895	2.58E-06
2700	0.988901	0.011057	4.15E-05
2800	0.987631	0.012316	5.31E-05
2900	0.959948	0.039704	0.000347
3000	0.895556	0.103547	0.000897
3100	0	0.988901	0.011099

جدول (۱۲): شاخص های مدل سلامت مورد چهارم

Peak load (MW)	Healthy state probability	Marginal state probability	Risk state probability
2500	0.999702	2.97E-04	7.85E-07
2600	0.99939	6.09E-04	1.88E-06
2700	0.988995	1.10E-02	4.08E-05
2800	0.98834	1.16E-02	4.71E-05
2900	0.960391	0.039311	0.000298
3000	0.930632	0.068758	0.00061
3100	0	0.988995	0.011005

در این مرحله میزان بار قابل تغذیه موارد مختلف تعیین و در جدول (۱۳) ارائه شده است. برای تعیین این شاخص، UCR کمتر از 0.0001 و احتمال حالت سالم بودن بیشتر از 0.985 در نظر گرفته می‌شود. شاخص ارزشمند دیگری، یعنی قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه، برای موارد مختلف در جدول (۱۴) تعیین و ارائه شده است تا تأثیرات واحدهای متعارف در مقابل واحدهای تجدیدپذیر بر مطالعات بهره‌برداری سیستم قدرت را مقایسه کند.

جدول (۱۳): میزان بار قابل تغذیه بر حسب مگاوات در حالت های مختلف

Lead time	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1 h	2954	2983	2960	2982
4 h	2941	2968	2949	2956

جدول (۱۴): قابلیت افزایش میزان پیک بار قابل تغذیه بر حسب مگاوات در حالت های مختلف

Lead time	Case 2	Case 3	Case 4
1 h	29	6	28
4 h	27	8	15

۵- نتیجه‌گیری

این مقاله یک رویکرد تحلیلی برای مطالعات بهره‌برداری و تعیین رزرو سیستم‌های قدرت با سطح نفوذ بالای منابع آبی جریانی معرفی می‌کند. برای این منظور، یک مدل قابلیت اطمینان جامع از نیروگاه‌های آبی جریانی با در نظر گرفتن هر دو نرخ خرابی اجزای مرتبط و ماهیت عدم قطعیت توان خروجی ناشی از متناوب بودن جریان آب ایجاد شده و یک مدل چند حالتی برای این منابع بر اساس رویکرد الگوریتم خوشه بندی C میانگین فازی به دست می‌آید. سپس روش PJM اصلاح می‌شود و از این مدل‌های قابلیت اطمینان منابع تجدیدپذیر برای تعیین شاخص‌های مدل سلامت استفاده می‌شود. به دلیل ماهیت عدم قطعیت نیروگاه‌های آبی جریانی توصیه می‌شود که مقدار رزرو بر اساس شاخص‌های مدل سلامت تعیین شود. برای نمایش بهتر روش پیشنهادی، دو سیستم تست قابلیت اطمینان شناخته شده شامل RBTS و IEEE-RTS در نظر گرفته شده و تعداد مختلفی از نیروگاه‌های آبی جریانی ۳۰ مگاواتی ششپیر واقع در استان فارس به این سیستم‌ها اضافه شده است. چندین شاخص از جمله احتمال حالت سالم، احتمال حالت حاشیه‌ای، ریسک انتخاب واحد، رزرو چرخان، میزان بار قابل تغذیه و افزایش قابلیت میزان پیک بار قابل تغذیه برای این سیستم‌ها بر اساس تکنیک پیشنهادی تعیین می‌شود. علاوه بر این، تحلیل‌های حساسیت

متعددی انجام شده و نتیجه‌گیری می‌شود که وجود منابع تجدیدپذیر می‌تواند قابلیت اطمینان سیستم قدرت را در مطالعات بهره‌برداری بهبود بخشد. با افزایش جریان اولیه آب، بهبود در شاخص‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این نتیجه اهمیت در دسترس بودن جریان آب با دبی بالا در عملکرد و مزایای نیروگاه‌های بزرگ آبی جریانی را برجسته می‌کند. همچنین نتیجه‌گیری می‌شود به دلیل ماهیت نامطمئن و تغییرپذیری جریان آب، بهبود قابلیت اطمینان منابع تجدیدپذیر کمتر از واحدهای متعارف با اندازه‌های مشابه است.

References

مراجع

- [1] B. Zeng, J. Zhang, "Integrated Planning for Transition to Low-Carbon Distribution System with Renewable Energy Generation and Demand Response", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1153-1165, May. 2014.
- [2] M. Moeini-Aghtaie, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, "Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—Part I: Theory and algorithm", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1585-1593, 2012.
- [3] S. Kamalinia, L. Wu, M. Shahidepour, "Stochastic Midterm Coordination of Hydro and Natural Gas Flexibilities for Wind Energy Integration", *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1070-1079, Oct. 2014.
- [4] Q. Zhao, P. Wang, L. Goel, Y. Ding, "Evaluation of nodal reliability risk in a deregulated power system with photovoltaic power penetration", *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 8, no. 3, pp. 421-430, March 2014.
- [5] D. J. Burke, M. J. O'Malley, "Maximizing Firm Wind Connection to Security Constrained Transmission Networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 749-759, May 2010.
- [6] A. Ghaedi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Moeini-Aghtaie, "Toward a Comprehensive Model of Large-Scale DFIG-Based Wind Farms in Adequacy Assessment of Power Systems", *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 55-63, Jan. 2014.
- [7] H. R. Teymour, D. Sutanto, K. M. Muttaqi, P. Ciufo, "Solar PV and Battery Storage Integration using a New Configuration of a Three-Level NPC Inverter with Advanced Control Strategy", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 29, no. 2, pp. 354-365, June 2014.
- [8] S. Lu, Y. Wu, S. Lou, X. Yin, "A Model for Optimizing Spinning Reserve Requirement of Power System Under Low-Carbon Economy", *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1048-1055, Oct. 2014.
- [9] R. Doherty, M. O'Malley, "A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems with Significant Installed Wind Capacity" *IEEE Trans. On power system*, vol. 20, no. 2, pp. 587-595, May 2005.
- [10] L. Siider, "Reserve Margin Planning in a Wind-Hydro-Thermal Power System" *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 564-571, May. 1993.
- [11] M. A. Ortega-Vazquez, D. S. Kirschen, "Estimating the Spinning Reserve Requirements in Systems with Significant Wind Power Generation Penetration" *IEEE transaction on power system*, vol. 24, no. 1, pp. 114-124, Feb. 2009.
- [12] J. Wang, M. Shahidepour, Z. Li, "Security-Constrained Unit Commitment with Volatile Wind Power Generation" *IEEE transaction on power system*, vol. 23, no. 3, pp. 1319-1327, Aug. 2008.
- [13] A. M. L. L. Da Silva, W. S. Sales, "Long-Term Probabilistic Evaluation of Operating Reserve Requirements With Renewable Sources", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 106-116, Feb. 2010.
- [14] R. Billinton, B. Karki, "Unit Commitment Risk Analysis of Wind Integrated Power Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 930-939, May. 2009.
- [15] A. Nargeszar, A. Ghaedi, M. Nafar, M. Simab, "Reliability evaluation of the renewable energy-based microgrids considering resource variation", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 3, pp. 507-527, 2023.
- [16] M.R. Negahdari, A. Ghaedi, M. Nafar, M. Simab, "Optimal planning of a microgrid containing tidal barrage equipped to the hydro-pumps", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 9, pp. 2215-2224, 2023.
- [17] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Reliability evaluation of permanent magnet synchronous generator-based wind turbines considering wind speed variations", *Wind Energy*, vol. 24, no. 11, pp. 1275-1293, 2021.
- [18] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Spinning reserve scheduling in power systems containing wind and solar generations", *Electrical Engineering*, vol. 103, pp. 2507-2526, 2021.

- [19] A. Ghaedi, H. Gorginpour, "Reliability assessment of composite power systems containing sea wave slot-coned generators", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 16, pp.3172-3180, 2020.
- [20] A. Ghaedi, M. Mirzadeh, "The impact of tidal height variation on the reliability of barrage-type tidal power plants", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 9, 2020.
- [21] M. Mirzadeh, M. Simab, A. Ghaedi, "Reliability Modeling of Reservoir-Based Tidal Power Plants for Determination of Spinning Reserve in Renewable Energy-based Power Systems", *Electric Power Components and Systems*, vol. 47, no. 16-17, pp. 1534-1550, 2019.
- [22] M. Mirzadeh, M. Simab, A. Ghaedi, "Adequacy studies of power systems with barrage-type tidal power plants", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 14, pp. 2612-2622, 2019.
- [23] E. Khalilzadeh, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Ghaedi, "Reliability Modeling of Run-Of the-River Power Plants in Power System Adequacy Studies", *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1278-1286, Oct. 2014.
- [24] R. L. Cannon, V. D. Jitendra, J. C. Bezdek, "Efficient Implementation of the Fuzzy c-Means Clustering Algorithms", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 2, pp. 248-255, March 1986.
- [25] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", plenum press, second edition, London, 1992.
- [26] R. Billinton, S. Kumar, "A Reliability Test System for Educational Purposes-Basic Data", *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 9, no. 8, pp. 67-68, Aug. 1989.
- [27] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods subcommittee, "IEEE reliability test system", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 98, no. 6, pp. 2047-2054, Dec. 1979.