Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 2 – Summer 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Review Article

A Brief Overview of Reliability Approaches in the Restructured Power System

Masoud Shahgholian[1,4], *Ms.C.*, Mohammadreza Vasili*[2], *Assistant Professor*, Ghazanfar Shahgholian[3,4], *Professor*

[1]Department of Industrial Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, masoud.shahgholian@iau.ac.ir
[2]Department of Electrical Engineering, Lenj.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran, reza.vasili@iau.ac.ir
[3]Department of Electrical Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholian@iau.ac.ir
[4]Smart Microgrid Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:
Power system reliability refers to the ability of a power grid to continuously deliver electricity to meet consumer demand without interruption. It includes adequacy (having sufficient generation and transmission capacity) and security (withstanding unexpected disruptions). Reliability is a critical factor in power system planning and operation and is often assessed using various indicators to quantify the frequency, duration, and scale of outages. Restructured power systems, although aimed at reducing costs, can introduce complexities in maintaining reliability due to the separation of generation, transmission, and distribution functions. These systems often include independent power producers, market traders, and operators, alongside traditional power companies. Assessing reliability in this context requires considering the interactions between these different entities and developing new methods to ensure a stable and secure supply of electricity. This article provides a brief overview of the reliability approach in a restructured power system. Creating competition and potentially reducing electricity costs for consumers are among the main goals of restructuring. In a restructured power system, reliability is not solely the responsibility of a single entity. Each component including generation, transmission and distribution has a role in ensuring the overall reliability of the system. Various metrics are considered to quantify the impact of power outages. Studies have focused on developing control strategies to ensure that the system can withstand disturbances and maintain stability.

Keywords: distribution system, market operation, reliability, restructured system, transmission system.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Received: 15 May 2025
Revised: 17 July 2025
Accepted: 23 July 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Mohammadreza Vasili

Citation: M. Shahgholian, M.R. Vasili, G. Shahgholian, "A Brief Overview of Reliability Approaches in the Restructured Power System", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 2, pp. 1-18, September 2025 (in Persian).

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]

مقاله مروری

مروری کوتاه بر رویکردهای قابلیت اطمینان در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

مسعود شاهقلیان[۱،۴]، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، محمدرضا وسیلی*[۲]، استادیار، غضنفر شاهقلیان[۳،۴]، استاد

۱- گروه صنایع، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، masoud.shahgholian@iau.ac.ir
۲- گروه صنایع، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران، reza.vasili@iau.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shahgholian@iau.ac.ir
۴- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: قابلیت اطمینان سیستم قدرت به توانایی یک شبکه برق در ارائه مداوم برق برای برآوردن تقاضای مصرف‌کننده بدون وقفه اشاره دارد. این شامل کفایت (داشتن ظرفیت تولید و انتقال کافی) و امنیت (تحمل اختلالات غیرمنتظره) می‌شود. قابلیت اطمینان یک عامل حیاتی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم قدرت است و اغلب با استفاده از شاخص‌های مختلف برای تعیین کمیت فرکانس، مدت زمان و مقیاس خاموشی‌ها ارزیابی می‌شود. سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، اگرچه با هدف کاهش هزینه‌ها انجام می‌شوند، اما به دلیل جداسازی عملکردهای تولید، انتقال و توزیع، می‌توانند پیچیدگی‌هایی را در حفظ قابلیت اطمینان ایجاد کنند. این سیستم‌ها اغلب شامل تولیدکنندگان مستقل برق، معامله‌گران بازار و اپراتورها، در کنار شرکت‌های برق سنتی هستند. ارزیابی قابلیت اطمینان در این زمینه مستلزم در نظر گرفتن تعاملات بین این نهادهای مختلف و توسعه روش‌های جدید برای اطمینان از تأمین برق پایدار و ایمن است. در مقاله مروری کوتاه بر رویکرد قابلیت اطمینان در سیستم قدرت تجدید ساختاریافته ارائه شده است. ایجاد رقابت و کاهش بالقوه هزینه‌های برق برای مصرف‌کنندگان از اهداف اصلی تجدید ساختار است. در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته، قابلیت اطمینان صرفاً مسئولیت یک نهاد واحد نیست. هر جزء شامل تولید، انتقال و توزیع نقشی در تضمین قابلیت اطمینان کلی سیستم دارد. برای کمی‌سازی تأثیر قطعی برق معیارهای مختلفی در نظر گرفته می‌شود. مطالعات انجام شده بر توسعه استراتژی‌های کنترل تمرکز دارند تا اطمینان حاصل شود که سیستم می‌تواند در برابر اختلالات مقاومت کند و ثبات را حفظ کند.

کلمات کلیدی: سیستم انتقال، سیستم تجدید ساختاریافته، سیستم توزیع، عملیات بازار، قابلیت اطمینان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۵/۱

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمدرضا وسیلی
نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی صنایع، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لنجان، اصفهان، ایران

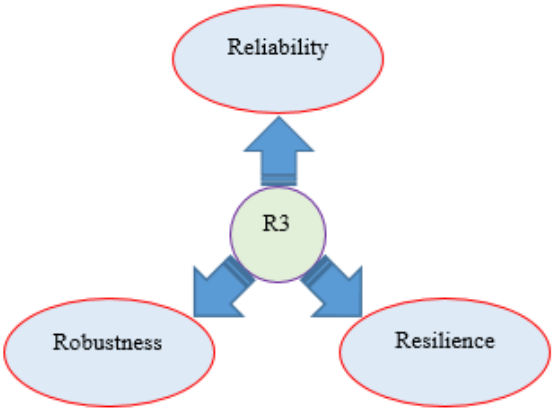
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

۱- مقدمه

انرژی اساساً برای عملکرد یک سیستم برق حیاتی است و منابع مورد نیاز برای تولید برق و برآوردن نیازهای اجتماعی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، قابلیت اطمینان و مقرون به صرفه بودن انرژی برای کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه ضروری است و بر همه چیز از زندگی روزمره گرفته تا رشد اقتصادی تأثیر می‌گذارد. انرژی طیف وسیعی از کاربردها، از جمله روشنایی، گرمایش، سرمایش و راه‌اندازی لوازم خانگی و همچنین فرآیندهای صنعتی و سیستم‌های حمل و نقل را تغذیه می‌کند. با این حال، دسترسی ناکافی به انرژی مقرون به صرفه و قابل اعتماد، فقر را تداوم می‌بخشد، در حالی که استفاده ناپایدار از انرژی به تغییرات اقلیمی کمک می‌کند و نیاز حیاتی برای گذار به منابع پاک و تجدیدپذیر را برجسته می‌کند [۱-۹].

نگرانی‌های فزاینده در مورد پایداری و قابلیت اطمینان انرژی، که با کاهش سوخت‌های فسیلی و ماهیت متناوب انرژی‌های تجدیدپذیر تشدید می‌شود، در کنار افزایش مصرف انرژی و مسائل مرتبط با منابع سنتی، باعث پذیرش جایگزین‌های انرژی تجدیدپذیر شده است. فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، مانند باتری‌ها و پمپ‌های آبی، به ویژه با ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر[۱] (RES)، برای ایجاد تعادل در عرضه و تقاضای انرژی به طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا می‌کنند [۱۰-۱۷]. انرژی خورشیدی، بادی، آبی و زیست‌توده گزینه‌ای پایدار و پاک‌تر را ارائه می‌دهند که ضمن حفظ تعادل عرضه و تقاضا، وابستگی به منابع سنتی را کاهش می‌دهند [۱۸،۱۹]. اثربخشی سیستم قدرت به عنوان معیاری از اثر ترکیبی قابلیت اطمینان[۲] [۲۰،۲۱]، استحکام[۳] [۲۲،۲۳] و تاب‌آوری[۴] [۲۴،۲۵] تعریف می‌شود، که تمایز بین مفاهیم آنها در یک سیستم قدرت در مراجع اشاره شده است. این سه ویژگی مشترک به عنوان مفهوم R3 شناخته می‌شوند. شکل (۱) نمونه‌ای از مفهوم R3 را نشان می‌دهد [۲۶].



شکل (۱): نمونه‌ای از مفهوم R3
Figure (1): An example of the R3 concept

بهبود عملکرد سیستم قدرت برای توسعه پایدار شامل ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و فناوری‌های مدرن فناوری اطلاعات و ارتباطات[۵] (ICT) برای بهبود بهره‌وری و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است. با این حال، این گذار به دلیل تنوع انرژی‌های تجدیدپذیر و پیچیدگی سیستم، چالش‌هایی را در بهره‌برداری و کنترل شبکه ایجاد می‌کند. شبکه‌های هوشمند از برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا برای مدیریت مصرف برق، تغییر بار در ساعات اوج مصرف و امکان استفاده کارآمدتر از برق از طریق سیستم‌های مدیریت و کنترل بهتر استفاده می‌کنند [۲۷-۲۹].

یک سیستم تجدید ساختار یافته[۶]، اغلب برای تقویت رقابت، بهبود کارایی و در نهایت کاهش هزینه‌ها برای مصرف‌کنندگان بسیار مهم است. بازسازی شامل تغییراتی در ساختار و عملکرد یک صنعت است که اغلب منجر به شکستن انحصارها و معرفی مکانیسم‌های مبتنی بر بازار می‌شود. این می‌تواند به یک سیستم پویاتر و پاسخگوتر منجر شود که نیازهای کاربران را بهتر برآورده می‌کند. برق قابل اعتماد برای امنیت عمومی، به ویژه در زیرساخت‌های حیاتی مانند بیمارستان‌ها و خدمات اورژانس، ضروری است. تجدید ساختار باید ایمنی و امنیت را در کنار سایر اهداف در اولویت قرار دهد. مشتریان در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته[۷] اغلب آزادی انتخاب ارائه‌دهنده برای برق را دارند و قابلیت اطمینان عامل کلیدی در تصمیم‌گیری است

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[۳۰،۳۱]. قطع برق می‌تواند منجر به ضررهای اقتصادی قابل توجهی برای صنایع و مشاغل دیگر شود. تضمین قابلیت اطمینان، این ضررها را به حداقل می‌رساند و از یک اقتصاد پایدار پشتیبانی می‌کند. ادغام فزاینده‌ی منابع انرژی تجدیدپذیر، پیچیدگی‌های جدیدی را در قابلیت اطمینان سیستم قدرت ایجاد می‌کند. این منابع اغلب متناوب هستند و برای حفظ یک منبع پایدار، به استراتژی‌های مدیریتی قوی نیاز دارند. سیستم‌های تجدید ساختار یافته برای حفظ امنیت سیستم که یکی از اجزای کلیدی قابلیت اطمینان است، نیاز به برنامه‌ریزی و بهره‌برداری دقیق دارند. این شامل ارزیابی تأثیر احتمالات احتمالی و تدوین استراتژی‌هایی برای کاهش خطرات است [۳۲-۳۴]. مطالعات مختلفی در زمینه سیستم قدرت تجدید ساختار یافته تاکنون انجام شده است، که می‌توان به مدیریت تراکم در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته برای شهرهای هوشمند [۳۵]، کنترل فرکانس بار مبتنی بر شبکه عصبی [۳۶] و تنظیم انحرافات فرکانس با کمک اداوات FACTS [۳۷] اشاره نمود. تعدادی از مقالات مروری انجام شده در زمینه سیستم قدرت تجدید ساختار یافته در جدول (۱) آمده است.

Table (1): A number of review studies in the field of restructured power systems

جدول (۱): تعدادی از مطالعات مروری در زمینه سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته

مرجع	خلاصه تحقیق	موضوع
[۳۸]	تراکم در سیستم‌های قدرت، به ویژه در بازارهای رقابتی برق نوظهور، می‌تواند منجر به عملکرد ناکارآمد و ناپایدار شود و به طور بالقوه باعث خاموشی و اختلالات سیستم شود. مدیریت مؤثر تراکم برای تضمین عملکرد اقتصادی، ایمن و پایدار سیستم قدرت بسیار مهم است. این مقاله به بررسی متون کلیدی در مورد مدیریت تراکم می‌پردازد و الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلفی را که برای کاهش تراکم در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شوند، مورد بحث قرار می‌دهد.	مدیریت تراکم
[۳۹]	تولید پراکنده از منابع متعارف و تجدیدپذیر، نقش حیاتی فزاینده‌ای در تأمین تقاضای جهانی انرژی ایفا می‌کند، اما ادغام ناهماهنگ می‌تواند شبکه برق را تحت فشار قرار دهد. این مقاله بر ادغام قوی، پایدار و قابل اعتماد تولید پراکنده، به ویژه با پاسخگویی به تقاضا و مدیریت سمت تقاضا، برای ایجاد یک شبکه برق کارآمدتر و مقاوم‌تر تمرکز دارد. همچنین یافته‌های کلیدی و چالش‌های تحقیقاتی در این زمینه بررسی شده است.	تولید پراکنده
[۴۹]	در بازارهای رقابتی برق، مدیریت تراکم خطوط انتقال بسیار مهم است. تراکم مدیریت نشده مانع تجارت برق شده و هزینه‌ها را برای مصرف‌کنندگان افزایش می‌دهد. این مقاله به بررسی تکنیک‌های هوش مصنوعی برای رسیدگی به این مسئله در یک محیط برق مقررات‌زدایی شده می‌پردازد و موثرترین روش‌ها را برای مدیریت تراکم در موارد آزمایشی شناسایی می‌کند.	هوش مصنوعی

از نکات کلیدی برای قابلیت اطمینان می‌توان به بهبود قابلیت اطمینان اجزای منفرد، اضافه کردن منابع برق اضافی یا مسیرهای انتقال به منظور حفظ تأمین برق در طول قطع برق، به حداقل رساندن زمان لازم برای تعمیر یا تعویض تجهیزات معیوب[۸]، برنامه‌های پاسخگویی به تقاضای مبتنی بر انگیزه یا مبتنی بر قیمت به منظور کمک به مدیریت تقاضا و بهبود قابلیت اطمینان کلی سیستم، و نظارت منظم بر عملکرد سیستم و نگهداری پیشگیرانه به منظور جلوگیری و کاهش قطعی برق، اشاره نمود [۴۱-۴۳].

مطالعات قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته را می‌توان به طور کلی به دو رویکرد اصلی تکنیک‌های تحلیلی و تکنیک‌های شبیه‌سازی طبقه‌بندی کرد. روش‌های تحلیلی، مانند روش‌های مبتنی بر شمارش حالت، راه‌حل‌های تقریبی ارائه می‌دهند، در حالی که تکنیک‌های شبیه‌سازی، مانند شبیه‌سازی مونت کارلو[۹]، شبیه‌سازی ترتیبی[۱۰] و شبیه‌سازی غیرترتیبی[۱۱]، تجزیه و تحلیل‌های دقیق‌تر و انعطاف‌پذیرتری را، به ویژه برای سیستم‌های بزرگ و پیچیده، ارائه می‌دهند [۴۴-۴۶].

در شبیه‌سازی مونت کارلو از نمونه‌گیری تصادفی برای شبیه‌سازی رفتار سیستم در طول زمان استفاده می‌شود و امکان در نظر گرفتن عوامل احتمالی مانند خرابی اجزا و تعمیرات فراهم است. در شبیه‌سازی ترتیبی، مدل‌سازی ترتیب زمانی رویدادها، ثبت رفتار وابسته به زمان سیستم است. در شبیه‌سازی غیر ترتیبی، تمرکز بر توزیع آماری رفتار سیستم بدون مدل‌سازی صریح توالی زمانی رویدادها است. در تکنیک‌های شبیه‌سازی امکان مدیریت سیستم‌های بزرگ و پیچیده وجود دارد، و با در نظر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

گرفتن عدم قطعیت‌ها و رفتار وابسته به زمان، اطلاعات قابلیت اطمینان دقیق‌تری ارائه می‌شود. امکان نیاز به منابع محاسباتی قابل توجه، به ویژه برای شبیه‌سازی‌های بلندمدت، از معایب تکنیک‌های شبیه‌سازی است. تکنیک‌های تحلیلی برای سیستم‌های کوچک نسبتاً ساده است، راه‌حل‌های دقیقی را برای سناریوهای خاص می‌تواند ارائه دهد، ولی از نظر محاسباتی برای سیستم‌های بزرگ و پیچیده گران و غیرعملی خواهد بود [۴۷،۴۸]. ارزیابی قابلیت اطمینان برای طراحی سیستم، برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری، ارزیابی ریسک و بهینه‌سازی عملکرد اهمیت دارد [۴۹،۵۰]. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه قابلیت اطمینان در سیستم قدرت ارائه شده است. در جدول (۲) تعدادی از مقالات مروری در این زمینه آمده است.

Table (2): A number of review studies on reliability in power systems

جدول (۲): تعدادی از مطالعات مروری در زمینه قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت

مرجع	خلاصه تحقیق	موضوع
[۵۱]	روش‌های مبتنی بر قابلیت اطمینان برای تحلیل ریسک در صنعت انرژی بادی فراساحلی و به منظور توسعه و بهره‌برداری موفقیت‌آمیز از مزارع بادی فراساحلی بسیار مهم هستند. این روش‌ها شامل ارزیابی احتمال خرابی اجزا و سیستم‌ها در شرایط عملیاتی مختلف و گنجاندن این احتمالات در استراتژی‌های طراحی و نگهداری می‌شوند. این روش‌ها امکان طراحی راه‌حل‌های انرژی بادی ایمن‌تر، مقرون‌به‌صرفه‌تر و قابل اعتمادتر را فراهم می‌کنند.	تحلیل ریسک و توسعه صنعت انرژی بادی فراساحلی
[۵۲]	ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مؤثر از سیستم‌های قدرت، به‌ویژه سیستم‌هایی که ادغام قابل توجهی با انرژی‌های تجدیدپذیر دارند، بسیار مهم است. روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع برای درک عملکرد شبکه هوشمند ضروری است. این مقاله شاخص‌های قابلیت اطمینان موجود برای بهره‌برداری از سیستم قدرت را بررسی می‌کند، شاخص‌های تاب‌آوری بالقوه‌ای را که ریسک شدت را در نظر می‌گیرند، بررسی می‌کند و روندهای آینده در شاخص‌های تاب‌آوری را بررسی می‌کند.	یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر
[۵۳]	ادغام انرژی بادی در مقیاس بزرگ، به دلیل تنوع ذاتی آن، چالش‌های قابلیت اطمینان را برای سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کند. این مقاله به بررسی مدل‌ها و الگوریتم‌های قابلیت اطمینان موجود برای انرژی بادی می‌پردازد، به طور خاص تفاوت‌های بین مراحل برنامه‌ریزی و عملیاتی را برجسته می‌کند. همچنین چگونه به کار رفتن نظریه قابلیت اطمینان سیستم قدرت برای تعیین کمیت این خطرات بررسی می‌شود.	ادغام انرژی باد
[۵۴]	قابلیت اطمینان یک سیستم ریزشبکه متصل به شبکه شامل انرژی خورشیدی، بادی و ذخیره‌سازی باتری در این مقاله تجزیه و تحلیل می‌شود. با استفاده از تکنیک انتظار از دست دادن بار، قابلیت حمل بار اوج و مدت زمان قطع برق را برای پیکربندی‌های مختلف سیستم ارزیابی می‌شود. سیستم توربین بادی با ظرفیت ۸۵۰ مگاوات، با ۰/۱ روز در سال انتظار از دست دادن بار، موثرترین سیستم در تأمین بار محلی و صادرات توان مازاد به شبکه شناخته شد.	سیستم هیبریدی
[۵۵]	بازآرایی شبکه یکی از کارکردهای اتوماسیون توزیع است که با تغییر ساختار شبکه توزیع، باعث بهبود عملکرد سیستم می‌شود. کمینه‌سازی تلفات توان اکتیو مهم است، زیرا اگر این تلفات کمتر از حد استاندارد باشد، شرکت‌های توزیع می‌توانند از نظر مالی سود ببرند. همچنین قابلیت اطمینان سیستم توزیع برای ارائه خدمات برق بدون وقفه توسعه یافته است. بهبود قابلیت اطمینان سیستم، باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های شرکت‌های توزیع برق می‌شوند. بررسی و تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای روش‌های مورد استفاده برای بازآرایی شبکه به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی تلفات در شبکه توزیع ارائه شده است.	بازآرایی شبکه

مطالعات روی سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته بر گذار از شرکت‌های برق سنتی و یکپارچه عمودی به بازارهای برق رقابتی تمرکز دارد. این مطالعات، تأثیرات مقررات‌زدایی، طراحی بازار و ادغام فناوری‌های جدید مانند منابع انرژی تجدیدپذیر را بر قابلیت اطمینان، کارایی و هزینه سیستم قدرت بررسی می‌کنند. حوزه‌های کلیدی تحقیق شامل تحلیل قدرت بازار، پیش‌بینی قیمت برق و توسعه استراتژی‌های کنترلی برای تضمین تأمین برق پایدار و قابل اعتماد در یک محیط پیچیده‌تر و بازارمحور است. در این مقاله مرور مختصر بر رویکردهای قابلیت اطمینان در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته ارائه شده است. در ادامه ساختار مقاله به این شرح است: در قسمت دوم مشخصات سیستم قدرت تجدید ساختار یافته بیان شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

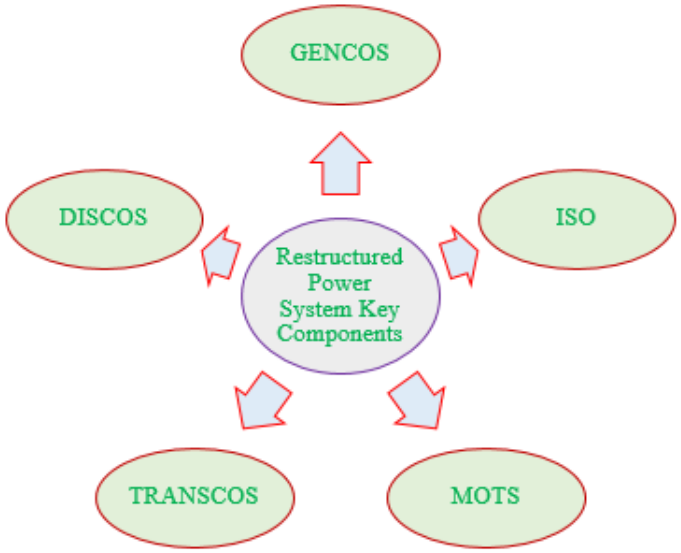
[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

در قسمت سوم اهمیت قابلیت اطمینان در سیستم قدرت اشاره شده است. در قسمت سوم مقایسه بین سیستم قدرت تجدید ساختار یافته و بازآرایی سیستم قدرت[۱۲] بیان شده است. در قسمت چهارم قابلیت اطمینان در سیستم قدرت و شاخص‌های کلیدی آن آمده است. در قسمت پنجم مروری بر مطالعات انجام شده در مورد حفظ قابلیت اطمینان سیستم قدرت در اثر تجدید ساختار آمده است. در نهایت در قسمت ششم نتیجه‌گیری و چالش‌های ادامه تحقیق بیان شده است.

۲- سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

سیستم قدرت تجدید ساختاریافته به سیستمی گفته می‌شود که در آن ساختار سنتی صنعت برق که به صورت یکپارچه بوده و دولتی اداره می‌شود، تغییر کرده و به سمت خصوصی‌سازی و رقابتی شدن پیش می‌رود. در این سیستم، مفاهیم جدیدی در تولید، انتقال، توزیع و بهره‌برداری از انرژی الکتریکی مطرح می‌شود. از مزایای سیستم قدرت تجدید ساختار یافته می‌توان به هزینه‌های کمتر به علت رقابت بین ژنراتورها، افزایش کارایی به علت جداسازی وظایف و فشارهای رقابتی، بهبود قابلیت اطمینان به علت بهبود پایداری شبکه و انتخاب بیشتر برای مصرف‌کنندگان اشاره نمود. تجدید ساختار هم فرصت‌ها و هم چالش‌هایی را برای قابلیت اطمینان سیستم برق ایجاد می‌کند. اگرچه هدف کاهش هزینه‌ها است، اما تضمین تأمین قابل اعتماد برق نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، هماهنگی بین بازیگران مختلف و توسعه روش‌های جدید برای ارزیابی و مدیریت قابلیت اطمینان سیستم در یک محیط رقابتی است. در بازارهای رقابتی، قابلیت اطمینان و قیمت‌گذاری به هم پیوسته هستند و نیاز به مدیریت دقیق منابع قدرت و قراردادهای دوجانبه دارند [۵۶،۵۷].

اجزای کلیدی سیستم قدرت تجدید ساختار یافته (یا بازار برق تجدید ساختار یافته) شامل شرکت‌های تولید[۱۳] (GENCOS)، شرکت‌های انتقال[۱۴] (TRANSCOS)، شرکت‌های توزیع[۱۵] (DISCOS)، یک اپراتور سیستم مستقل[۱۶] (ISO) برای مدیریت شبکه و اپراتورها یا بازرگانان بازار[۱۷] (MOTS) است. اپراتور مستقل سیستم به عنوان هماهنگ‌کننده مرکزی عمل می‌کند و عملکرد قابل اعتماد و کارآمد شبکه برق را، اغلب در یک بازار عمده‌فروشی رقابتی، تضمین می‌کند.

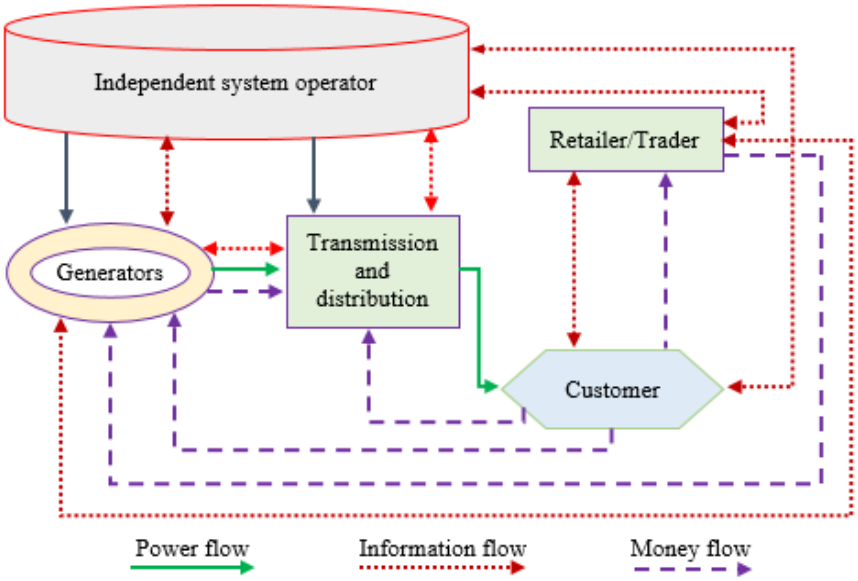


شکل (۲): اجزای کلیدی سیستم قدرت تجدید ساختار یافته
Figure (2): Key components of the restructured power system

در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، ساختار به طور قابل توجهی با مدل سنتی یکپارچه عمودی[۱۸] خدمات برق متفاوت است. به جای یک جریان خطی و واحد پول از تولید به انتقال، توزیع و در نهایت به مشتری، یک سیستم مقررات‌زدایی‌شده مسیرهای متعددی را برای تراکنش‌های مالی معرفی می‌کند. دلیل این امر آن است که نهادهای مستقل متعددی، فراتر از شرکت برق و مصرف‌کنندگان سابق، در بازار برق دخیل هستند. این نهادها شامل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

ژنراتورها، اپراتورهای سیستم انتقال، شرکت‌های توزیع، خرده‌فروشان و بالقوه دیگران هستند که هر کدام نقش‌ها و تعاملات خاص خود را دارند و طبق برخی مطالعات انجام شده، منجر به یک چشم‌انداز پیچیده‌تر و رقابتی‌تر می‌شوند.



شکل (۲): ساختار یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

Figure (2): Structure of a restructured power system

Table (3): Comparison of restructured power system with rearranged power system

جدول (۳): مقایسه سیستم قدرت تجدید ساختار یافته با سیستم قدرت بازآرایی شده

سیستم قدرت تجدید ساختار یافته	سیستم قدرت بازآرایی شده	ویژگی
طریق تغییر ساختار بازار و مالکیت برای ارتقای رقابت، افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و جذب سرمایه‌گذاری	انجام تنظیمات فیزیکی موقت در شبکه یا تولید. برای اطمینان از پایداری شبکه و بازیابی محدودیت‌های عملیاتی	هدف اصلی
تغییر اساسی در قوانین بازار، چارچوب نظارتی و ساختار مالکیت بخش برق، که اغلب شامل مقررات‌زدایی می‌شود.	یک تنظیم عملیاتی یا فیزیکی در زیرساخت یا جریان برق موجود، مانند تغییر مسیر برق یا پیکربندی مجدد پست‌های برق	ماهیت تغییر
تمایل به بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها برای مصرف‌کنندگان، رشد فناوری و بهبود خدمات از طریق آزادسازی بازار.	مدیریت ازدحام، بازیابی برق پس از خرابی، حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس، بهینه‌سازی عملکرد در زمان واقعی	عوامل کلیدی
گسترده‌تر، شامل طراحی بازار، تنظیم مقررات و تفکیک خدمات رفاهی به نهادهای رقابتی جداگانه.	محدودتر، با تمرکز بر چالش‌های عملیاتی خاص یا تغییرات در پیکربندی فیزیکی یک سیستم.	دامنه عملیاتی
جداسازی تولید، انتقال و توزیع به شرکت‌های مستقل، معرفی ژنراتورهای تجاری، ایجاد اپراتورهای مستقل سیستم	بازگرداندن بار با تنظیم جریان‌های تولید و انتقال برای برآورده کردن ظرفیت موجود، پیکربندی مجدد خطوط برای کاهش تراکم	نمونه کاربردی
افزایش رقابت، حق انتخاب مصرف‌کننده، کارایی، نوآوری	به حداقل رساندن تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، متعادل‌سازی بار، بازگرداندن سرویس، افزایش قابلیت اطمینان	اهداف اولیه
تفکیک، رقابت، تعامل مستقیم، مدیریت شبکه، تنظیم مقررات	تغییر توپولوژی، عملیات سوئیچینگ، حفظ شعاعی بودن	نحوه کار

۳- مقایسه سیستم قدرت تجدید ساختار یافته با سیستم قدرت بازآرایی شده

بازآرایی سیستم قدرت یا بازآرایی توپولوژی شبکه، یک استراتژی حیاتی برای افزایش قابلیت اطمینان در سیستم‌های توزیع برق است. با تنظیم پیکربندی سوئیچ‌ها و خطوط، می‌توان جریان برق را تغییر مسیر داد، بخش‌های معیوب را ایزوله کرد و

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

خدمات را سریع‌تر به مشتریان بازگرداند، در نتیجه توانایی سیستم در مقاومت در برابر اختلالات و تأمین برق بدون وقفه را بهبود بخشید.

یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته به یک بازنگری سیستماتیک در سازمان بازار برق برای ایجاد رقابت و سرمایه‌گذاری خصوصی اشاره دارد که اغلب با تفکیک انحصارها و جداسازی تولید، انتقال و توزیع انجام می‌شود. در مقابل، یک سیستم قدرت بازآرایی شده، تنظیمات عملیاتی و پیکربندی‌های فیزیکی مجدد در شبکه موجود، مانند اصلاح اتصالات خط برای بازیابی بار یا مدیریت تراکم، برای حفظ ثبات و کارایی در حین کار یا پس از رویدادهایی مانند خرابی تجهیزات را توصیف می‌کند. در جدول (۳) تفاوت این دو نوع سیستم قدرت براساس ویژگی‌های مختلف بیان شده است.

۴- قابلیت اطمینان

ساختار یک سیستم قدرت به طور قابل توجهی بر قابلیت اطمینان آن تأثیر می‌گذارد، که به توانایی ارائه مداوم برق برای برآوردن تقاضا اشاره دارد. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سیستم قدرت برای برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری جهت تضمین تأمین برق پایدار و قابل اعتماد بسیار مهم است.

قابلیت اطمینان سیستم قدرت را می‌توان به طور کلی به دو نوع اصلی طبقه‌بندی کرد: کفایت و امنیت. کفایت به توانایی سیستم قدرت در تأمین تقاضای برق در درازمدت اشاره دارد. از سوی دیگر، امنیت بر توانایی سیستم در مقاومت در برابر اختلالات ناگهانی و حفظ عملکرد پایدار تمرکز دارد. از عوامل مؤثر بر قابلیت اطمینان می‌توان به خرابی تجهیزات، رویدادهای آب و هوایی، خطای انسانی و حملات سایبری اشاره نمود [۵۸،۵۹]. ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم تجدید ساختار یافته پیچیده‌تر از یک سیستم سنتی و یکپارچه عمودی[۱۹] است. این امر به مدل‌های پیچیده‌ای نیاز دارد که بتوانند تعاملات چندین بازیگر و ماهیت تصادفی خاموشی‌ها را در نظر بگیرند. شاخص‌های قابلیت اطمینان به شاخص‌های پیش‌بینی‌کننده (تعیین براساس اطلاعات مربوط به قابلیت اطمینان اجزا و پیکربندی سیستم) و شاخص‌های تجربی (تعیین براساس مشاهده مستقیم و جمع‌آوری داده‌ها) تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین شاخص‌ها را می‌توان به شاخص‌های احتمال و انتظار (اندازه‌گیری احتمال و مقدار متوسط رویدادهایی مانند قطعی برق)، شاخص‌های فراوانی و مدت زمان (تمرکز بر تعداد دفعات وقوع قطعی برق و مدت زمان آن) و شاخص‌های شدت (اندازه‌گیری تأثیر قطعی برق مانند از دست دادن درآمد یا نارضایتی مشتری) تقسیم‌بندی می‌شود [۶۰،۶۱].

الف- ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم تولید

قابلیت اطمینان در یک سیستم تولید، توانایی آن در برآورده کردن مداوم تقاضای انرژی الکتریکی تجمیع شده بارها، علیرغم عدم قطعیت‌ها و عدم قطعیت‌های ذاتی ناشی از منابع انرژی و تقاضا است. این شامل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم برای اطمینان از ظرفیت کافی برای جلوگیری از اختلالات برق است. جنبه‌های کلیدی شامل استفاده از شاخص‌های قابلیت اطمینان، مانند انتظار از دست دادن بار[۲۰] (LOLE) و تقاضای مورد انتظار تأمین نشده[۲۱] (EDNS)، برای ارزیابی توانایی سیستم در برآورده کردن تقاضا و استفاده از روش‌های تحلیلی یا شبیه‌سازی‌های مونت کارلو برای محاسبه این شاخص‌ها است. انتظار قطع بار میانگین تعداد روزهای مورد انتظار در سال که بار از ظرفیت تولید موجود فراتر می‌رود را نشان می‌دهد و تقاضای مورد انتظار تامین نشده میزان بار از دست رفته ناشی از قطعی‌ها را اندازه‌گیری می‌کند.

ب- ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم توزیع

قابلیت اطمینان در یک سیستم توزیع برق به توانایی آن در ارائه مداوم برق بدون وقفه به مشتریان با به حداقل رساندن قطعی‌ها و بازیابی سریع خدمات اشاره دارد. این امر با استفاده از شاخص‌های مختلفی مانند شاخص میانگین فراوانی وقفه سیستم[۲۲] (SAIFI) و شاخص میانگین مدت زمان وقفه سیستم[۲۳] (SAIDI) ارزیابی می‌شود و از طریق تکنیک‌هایی مانند اتوماسیون پیشرفته، کابل‌های زیرزمینی و ادغام ریزشبکه‌ها و تولید پراکنده بهبود می‌یابد.

ج- ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم انتقال

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

قابلیت اطمینان در یک سیستم انتقال، چه در صنعت خودرو و چه در صنعت برق، به توانایی آن در انجام مداوم و پیوسته عملکرد مورد نظر خود بدون خرابی یا وقفه اشاره دارد. برای صنایع برق، این به معنای ارائه قابل اعتماد برق برای برآوردن تقاضای مشتری است، در حالی که در سیستم‌های خودرو، به عملکرد و دوام سیستم انتقال در طول عمر مورد انتظار آن مربوط می‌شود. استراتژی‌های کلیدی برای اطمینان از قابلیت اطمینان شامل مدل‌سازی و تحلیل قابلیت اطمینان، گنجاندن اجزای اضافی، استفاده از معیارهای طراحی مناسب مانند معیار N-1[۲۴] و نظارت و ارزیابی مداوم است. معیار N-1 یک رویکرد رایج در طراحی سیستم قدرت، که در آن سیستم برای حفظ سرویس حتی پس از خرابی یک جزء اصلی (به عنوان مثال، یک خط انتقال، ترانسفورماتور یا نیروگاه تولید) طراحی شده است.

یکی از معیارها مقایسه قابلیت اطمینان در سیستم انتقال محدودیت‌های ولتاژ و جریان برق است. در طول یک شرایط اضطراری، سطوح ولتاژ سیستم، زوایای ولتاژ و جریان برق باید در تمام گره‌ها در محدوده‌های قابل قبول از پیش تعریف شده باقی بمانند تا از آسیب یا بی‌ثباتی تجهیزات جلوگیری شود. معیار دیگر پایداری گذرا و پویا است که به معنی توانایی سیستم برای پایدار ماندن و بازیابی پس از یک اختلال ارزیابی می‌شود. این شامل جلوگیری از خرابی‌های آبشاری و اطمینان از میرایی مناسب نوسانات است. همچنین قطع بار نیز به عنوان یک معیار در نظر گرفته می‌شود که یک جنبه حیاتی از برنامه‌ریزی قابلیت اطمینان، جلوگیری از هرگونه قطع بار است، به این معنی که مشتریان نباید در طول احتمالات، قطعی برق را تجربه کنند [۶۴-۶۲].

د- تعریف معیارهای قابلیت اطمینان در سیستم توزیع

تعدادی از معیارهایی که برای تعیین کمیت قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت استفاده می‌شوند، عبارتند از: شاخص میانگین فراوانی قطع سیستم (اندازه‌گیری میانگین تعداد قطع برق به ازای هر مشتری)، شاخص میانگین فراوانی قطع برق مشتری[۲۵] (اندازه‌گیری میانگین تعداد قطع برق به ازای هر مشتری که دچار قطعی برق شده)، شاخص میانگین مدت زمان قطع برق سیستم (اندازه‌گیری میانگین مدت زمان قطع برق به ازای هر مشتری) و انرژی تأمین نشده[۲۶] (مقدار انرژی تحویل داده نشده به مشتریان به دلیل قطعی برق) [۶۷-۶۵]. پیش‌بینی تغییر شاخص‌های عملکرد سیستم با زمان برای شرکت‌های برق مهم است، زیرا این موضوع با درآمدهای و هزینه‌های آنها مستقیماً در ارتباط است. این شاخص‌ها برای شرکت‌های برق جهت پایش عملکرد سیستم‌های توزیع، شناسایی حوزه‌های نیازمند بهبود و ارزیابی اثربخشی پروژه‌های افزایش قابلیت اطمینان بسیار مهم هستند. در ادامه تعریف تعدادی از شاخص‌ها آمده است [۶۸،۶۹].

شاخص SAIDI رایج‌ترین شاخص برای ارزیابی عملکرد سیستم است که با محاسبه قطعی مداوم هر مشتری در منطقه تحت پوشش در طول دوره زمانی مشخص (دقیقه یا ساعت) در سال، عملکرد سیستم را ارزیابی می‌کند. این شاخص نسبت مجموع مدت زمان وقفه در سرویس‌دهی به مشتریان را به تعداد کل مشتریانی که به آنها خدمات ارائه شده است، نشان می‌دهد [۷۰].

$$\mathrm{SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_{sysi} N_i}{\sum_{i=1}^{n} N_i} \qquad (۱)$$

که در آن U_{sysi} مدت زمان خاموشی سالانه سیستم در نقطه بار i و N_i تعداد کل مصرف‌کنندگان در نقطه بار i است. N تعداد کل نقاط بار است. دقایق SAIDI نشان دهنده مدت زمانی است که یک مشترک به طور متوسط قطعی را تجربه می‌کند و دقایق SAIDI کمتر معادل قابلیت اطمینان الکتریکی بهتر است [۷۱].

شاخص CAIFI مشابه SAIFI است که شاخص میانگین فراوانی قطعی سرویس برای مشتری است. از شاخص SAIFI برای نشان دادن میانگین تعداد قطعی‌های رخ داده برای یک مشتری در طول یک سال استفاده می‌شود، که عبارت است از نسبت تعداد کل وقفه‌های ایجاد شده در سرویس مشتریان به تعداد کل مشتریانی که به آنها خدمات ارائه شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_{sysi} N_i}{\sum_{i=1}^{n} N_i} \quad (۲)$$

که در آن λ_{sysi} نرخ خرابی سیستم در نقطه بار است. بهبود سطح شاخص SAIFI سیستم توزیع، هدف اصلی کاهش تعداد قطعی‌های مداوم در شبکه برق است. اعداد پایین‌تر SAIFI نشان دهنده قطعی کمتر و قابلیت اطمینان الکتریکی بهتر است.

شاخص CAIDI میانگین مدت زمان قطعی برق را که یک مشتری ممکن است در معرض آن قرار گرفته باشد، ارائه می‌دهد و برابر است با نسبت مجموع مدت زمان وقفه در سرویس مشتریان به تعداد کل وقفه‌های سرویس مشتریان.

$$CAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_{sysi} N_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_{sysi} N_i} \quad (۳)$$

کاهش شاخص CAIDI منجر به کاهش تعداد شکایات مشتریان می‌شود. مدت زمان قطعی برق CAIDI یک سال است هرچه تعداد دقایق کمتر باشد، شرکت برق سریع‌تر سرویس را به مشتریان بازیابی کرده است [۷۲-۷۴].

۵- مرور تحقیقات انجام شده

مطالعات قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته نیاز به ترکیبی از تکنیک‌های مدل‌سازی پیچیده و درک عمیق از پویایی بازار دارد تا امنیت و پایداری مداوم تأمین برق تضمین شود. در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، قابلیت اطمینان از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر تضمین کننده یک منبع تغذیه پایدار و با کیفیت بالا برای مصرف‌کنندگان است. هدف تجدید ساختار، ایجاد رقابت و کارایی است، اما چالش‌هایی را نیز در حفظ قابلیت اطمینان ایجاد می‌کند. ارزیابی و مدیریت مؤثر قابلیت اطمینان برای رسیدگی به این چالش‌ها و تضمین یک منبع تغذیه‌ی پایدار و قابل اعتماد ضروری است.

مطالعات مربوط به قابلیت اطمینان در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را می‌توان به دو رویکرد اصلی طبقه‌بندی کرد: روش‌های تحلیلی و روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی. روش‌های تحلیلی از فرمول‌های ریاضی برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان استفاده می‌کنند، در حالی که روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، مانند شبیه‌سازی مونت کارلو، سناریوهای سیستم را در طول زمان مدل‌سازی می‌کنند تا قابلیت اطمینان را تخمین بزنند. علاوه بر این، مطالعات را می‌توان بر اساس تمرکز آنها بر اجزای خاص، مانند تولید، انتقال یا توزیع، و ادغام فناوری‌های پشتیبانی مانند ذخیره‌سازی انرژی و پاسخگویی به تقاضا طبقه‌بندی کرد [۷۵،۷۶] .

مطالعات سیستم قدرت تجدید ساختار یافته را می‌توان به طور کلی به مطالعات عملیات بازار، مطالعات سیستم انتقال و مطالعات سیستم توزیع طبقه‌بندی کرد. این مطالعات بر جنبه‌های مختلف سیستم قدرت تجدید ساختار یافته، از جمله رفتار بازار، جریان برق و قابلیت اطمینان، تمرکز می‌کنند تا عملکرد کارآمد و ایمن را تضمین کنند [۷۷،۷۸].

یک روش برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته در [۷۹] پیشنهاد شده است، که در آن یک مدل قابلیت اطمینان برای هر بازیگر بازار در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته در نظر گرفته شده به طوری که یک شرکت تولید توسط یک ارائه‌دهنده تولید چند حالته معادل و سیستم انتقال توسط یک ارائه‌دهنده انتقال چند حالته معادل با استفاده از روش‌های معادل شبکه قابلیت اطمینان نشان داده می‌شود. قابلیت اطمینان سمت تقاضا در این تحلیل بررسی شده است. با ارائه مفهوم قابلیت اطمینان غیریکنواخت، انتخاب‌های مشتری در مورد قابلیت اطمینان را می‌توان به راحتی با استفاده از این روش پیاده‌سازی کرد.

یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای به هم پیوسته شامل واحدهای پیل سوختی حرارتی و گازی با یک توربین بازگرمایش، ذخیره‌سازی باتری و یک کنترل‌کننده یکپارچه جریان توان[۲۷] در [۸۰] بررسی شده است. عملکرد سیستم قدرت تحت شرایط

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

مختلف بازار مقررات‌زدایی شده تجزیه و تحلیل می‌شود و بر ارائه خدمات جانبی خودروهای الکتریکی[۲۸] و تولید پراکنده برای کاهش تخلفات قرارداد تاکید دارد. همچنین یک تحلیل استحکام با پارامترهای مختلف سیستم انجام شده است. همچنین یک تحلیل پایداری شامل تغییر پارامترهای کلیدی سیستم (مانند بهره‌های کنترل‌کننده‌ها، ثابت‌های زمانی) برای ارزیابی تأثیر این تغییرات بر عملکرد سیستم و اثربخشی کنترل‌کننده ارائه شده است.

روشی مبتنی بر ترکیبی از رویکردهای معادل شبکه قابلیت اطمینان و شبیه‌سازی شبه ترتیبی برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته با بازار دو طرفه در [۸۱] پیشنهاد شده است. برای کاهش تحلیل بار محاسباتی، پیاده-سازی تکنیک‌های معادل شبکه قابلیت اطمینان در روش شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شده است. همچنین برای افزایش کارایی محاسباتی روش شبیه‌سازی غیر ترتیبی و مدل‌سازی جنبه‌های زمانی معاملات بازار و عملکرد سیستم از شبیه‌سازی شبه ترتیبی استفاده شده است. در شبیه‌سازی مدل‌های مارکوف چند حالته برای سیستم‌های تولید و انتقال پیاده‌سازی شده‌اند.

تاثیر چگونه گسترش ظرفیت در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته بر افزایش قابلیت اطمینان و کاهش ریسک در [۸۲] بررسی شده است. با تجزیه و تحلیل تأثیر افزودن واحدهای تولیدی جدید و در نظر گرفتن عواملی مانند عدم دسترسی به واحدهای تولیدی و سوئیچینگ انتقال، قابلیت حمل بار اوج[۲۹] و شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان را تحت شرایط مختلف اوج بار بررسی می‌شود. همچنین تأثیر تعمیر و نگهداری واحدهای تولیدی بر قابلیت اطمینان سیستم نیز ارزیابی می‌شود.

در یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته، از نگرانی‌های اپراتورهای سیستم می‌توان به هماهنگی بهینه تعمیر و نگهداری اشاره نمود که ارتباط نزدیکی با قابلیت اطمینان و امنیت سیستم قدرت دارد. یک رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان برای هماهنگی تعمیر و نگهداری تولید و انتقال، با تمرکز بر دیدگاه اپراتور مستقل سیستم در [۸۳] ارائه شده است، که در آن از یک مکانیسم دو فازی، با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان و تعهد واحد با محدودیت امنیتی، استفاده می‌شود و یک روش برای ارزیابی حساسیت تعمیر و نگهداری پیشنهاد شده است. این مدل یک مسئله چند هدفه است که قابلیت اطمینان و رفاه اجتماعی را در بر می‌گیرد و توسط یک الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی درجه دوم حل می‌شود.

یک رویکرد به نام تحلیل درخت خطای فازی مبتنی بر انگیزه[۳۰] برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت تجدید ساختار یافته با ادغام خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدیدپذیر (باد و خورشید) در [۸۴] ارائه شده است، که در آن هدف پرداختن به محدودیت‌های تحلیل درخت خطای سنتی در مدیریت عدم قطعیت‌ها و پیچیدگی‌های ناشی از این ادغام‌ها است.

روش پیشنهادی نظریه مجموعه فازی و توزیع گاوسی را برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها در نرخ خرابی اجزا و اثرات تشویقی مربوط به ادغام خودروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر ترکیب می‌کند. از مزایای روش فوق می‌توان به فراهم شدن امکان ارزیابی دقیق‌تر ریسک‌های سیستم اشاره نمود.

روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان بلندمدت مرسوم به خوبی توسعه یافته‌اند که بیشتر بر برنامه‌ریزی و توسعه تمرکز داشته‌اند تا بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت. یک روش برای ارزیابی قابلیت اطمینان عملیاتی سیستم‌های قدرت با نفوذ بالای انرژی بادی در یک محیط تجدید ساختار یافته در [۸۵] پیشنهاد شده است، که در آن معادل‌های شبکه قابلیت اطمینان را با شبیه‌سازی ترتیب زمانی ترکیب می‌شود. این روش مزارع بادی، تولید مرسوم، تأمین‌کنندگان ذخیره و شبکه انتقال را با استفاده از معادل‌های شبکه قابلیت اطمینان مدل‌سازی می‌کند. یک طرح مدیریت احتمال، همراه با بازار روز پیش‌رو نیز ارائه شده است. شبیه‌سازی مونت کارلو با توالی زمانی برای ثبت جنبه‌های زمانی این معادلات، به همراه یک روش ساده شده برای کارایی محاسباتی استفاده می‌شود. این رویکرد، ارزیابی قابلیت اطمینان مشتری را با در نظر گرفتن تغییرپذیری توان بادی در طول عملکرد سیستم امکان‌پذیر می‌سازد.

در چارچوب یک بازار برق مقررات‌زدایی‌شده، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت، به ویژه در سیستم‌های قدرت انبوه، به طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا می‌کند. مدل‌سازی واحدهای تولیدی چند حالته، ارزیابی شاخص عملکرد سیستم و شناسایی نقص انتقال در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم پیچیده در [۸۶] بررسی شده است. همچنین تأثیر ریسک بازار بر تصمیمات

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

سرمایه‌گذاری برای زیرساخت‌های جدید را بررسی می‌کند و روشی را برای شناسایی و رفع محدودیت‌های انتقال با استفاده از روش‌های احتمالاتی ارائه می‌دهد.

یک روش بهینه‌سازی با استفاده از جریان توان بهینه[۳۱] برای تعیین حذف بار و توزیع مجدد تولید در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته با ساختار بازار پولکو[۳۲] در [۸۷] ارائه شده است، که در آن هدف به حداقل رساندن هزینه‌های کل سیستم (تولید، ذخیره و وقفه) در عین رعایت محدودیت‌های بازار و شبکه است. این روش می‌تواند سیستم‌های مرسوم و تجدید ساختار یافته را ارزیابی کند و بینش‌هایی را برای اپراتور مستقل سیستم، تولیدکنندگان و مشتریان فراهم نماید. همچنین این روش بهترین اقدامات حذف بار و توزیع مجدد تولید را برای هر سناریوی احتمالی (مثلاً خرابی تجهیزات) تعیین می‌کند.

یک روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای یافتن مکان، نقطه کار و همچنین تعداد چند نوع ادوات FACTS در سیستم تجدید ساختار یافته به طور همزمان و بهینه در [۸۸] ارائه شده است، که شامل دو الگوریتم جداگانه است و از مزایای یک روش جستجوی اکتشافی بهره می‌برد که می‌تواند فضای جستجوی ممکن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی ترکیبی به گونه‌ای طراحی شده است، که قیمت گره‌ها به همراه انحراف معیار آنها به طور مؤثر کاهش یابد.

۶- نتیجه‌گیری

هدف تجدید ساختار بهبود راندمان سیستم برق و کاهش بالقوه هزینه‌ها است، اما چالش‌های جدیدی را نیز برای حفظ تأمین برق قابل اعتماد ایجاد می‌کند. طراحی دقیق سیستم تجدید ساختار یافته، همراه با مکانیسم‌هایی برای هماهنگی بازیگران مختلف و تشویق سرمایه‌گذاری در قابلیت اطمینان، برای تضمین تأمین برق قابل اعتماد برای مصرف‌کنندگان بسیار مهم است. هدف از این مطالعه ارائه یک مرور کوتاه بر رویکردهای قابلیت اطمینان در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته است. با ایجاد یک سیستم انعطاف‌پذیرتر و سازگارتر، تجدید ساختار می‌تواند به صنایع کمک کند تا به نیازها و چالش‌های در حال تحول پاسخ دهند. هدف از تجدید ساختار اغلب ایجاد رقابت در مکانی است که قبلاً انحصار وجود داشته است. این رقابت می‌تواند منجر به طیف وسیع‌تری از انتخاب‌ها برای مصرف‌کنندگان و کسب‌وکارها شود، زیرا شرکت‌های مختلف برای ارائه خدمات و قیمت‌های بهتر رقابت می‌کنند. به عنوان مثال، در بخش برق، تجدید ساختار می‌تواند شامل جداسازی تولید، انتقال و توزیع باشد و به شرکت‌های مختلف اجازه دهد در هر حوزه رقابت کنند. قابلیت اطمینان سیستم قدرت شامل توانایی تأمین تقاضای بلندمدت و توانایی مقاومت در برابر رویدادهای غیرمنتظره است و روش‌ها و شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی و مدیریت این جنبه‌ها استفاده می‌شود. در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته، قابلیت اطمینان فقط یک مسئله فنی نیست؛ بلکه یک الزام اساسی برای رونق اقتصادی، امنیت عمومی و رفاه اجتماعی است. استراتژی‌های مؤثر برای ارزیابی، مدیریت و هماهنگی قابلیت اطمینان برای اطمینان از تحقق مزایای تجدید ساختار در عین حفظ منبع تغذیه قابل اعتماد و ایمن ضروری است. استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند شبکه‌های هوشمند، برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا و تولید توزیع‌شده می‌تواند باعث بهبود قابلیت اطمینان و کارایی سیستم قدرت شود. هدف تجدید ساختار، بهبود کارایی و رقابت در بخش برق است، اما چالش‌هایی مانند افزایش پیچیدگی، هماهنگی اقدامات شرکت‌کنندگان مختلف بازار و نیاز به ارزیابی قوی قابلیت اطمینان برای حفظ قابلیت اطمینان می‌تواند ایجاد نماید. شاخص‌های کلیدی قابلیت اطمینان، مانند شاخص میانگین مدت زمان قطع سیستم و شاخص میانگین فرکانس قطع سیستم، مدت زمان و تعداد دفعات قطع برق را تعیین می‌کنند، در حالی که استراتژی‌های افزایش قابلیت اطمینان شامل افزایش افزونگی تجهیزات و پیاده‌سازی فناوری‌های مدرن مانند منابع مبتنی بر اینورتر است.

سپاسگزاری

مقاله فوق مستخرج از پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد است. نویسندگان از اعضای محترم هیات تحریریه نشریه و داوران محترم که در نشر و چاپ این مقاله کمک کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

References

مراجع

[1] H. Bagheri-Tolabi, A. Lashkar-Ara, "Multi-objective reconfiguration of distribution networks by combining fuzzy logic, symbiotic search algorithm and spanning tree theory to reduce power losses, load imbalances and improve voltage profile", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 11, no. 4, pp. 51-59, Dec. 2023, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1401.11.4.6.4.

[2] M.S.S. Fogliatto, H.O. Caetano, L. Desuó N., J.A.D. Massignan, R.Z. Fanucchi, J.B.A. London, B.R. Pereira, M. Bessani, C.D. Maciel, "Power distribution system interruption duration model using reliability analysis regression", Electric Power Systems Research, vol. 211, Areticle Number: 108193, Oct. 2022, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108193.

[3] F. Mohammadzamani, M. Hashemi, G. Shahgholian, "Adaptive neural control of non-linear fractional order multi-agent systems in the presence of error constraints and input saturation", IET Control Theory and Applications, vol. 16, no. 13, pp. 1283-1298, Sept. 2022, https://doi.org/10.1049/cth2.12291.

[4] P. Darvishi, H. Barati, "Reconfiguration and optimal placement of distributed generations in distribution networks in the presence of remote voltage controlled bus using exchange market algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 7, no. 2, pp. 13-24, March 2019, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1397.7.2.2.8.

[5] G. Shahgholian, "Review of power system stabilizer: Application, modeling, analysis and control strategy", International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 41-52, Sept. 2013.

[6] B. Keyvani-Boroujeni, G. Shahgholian, B. Fani, "A distributed secondary control approach for inverter-dominated microgrids with application to avoiding bifurcation-triggered instabilities", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 4, pp. 3361-3371, Dec. 2020 (https://doi.org/ 10.1109/JESTPE.2020.2974756).

[7] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, S.O. Faried, "Power system reliability enhancement using a thyristor controlled series capacitor", IEEE Tran. on Power Systems, vol. 14, no. 1, pp.369-374, Feb. 1999, https://doi.org/10.1109/59.744557.

[8] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Different types of pitch angle control strategies used in wind turbine system applications", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 4, no. 1, pp. 20-35, Feb. 2017. http://dx.doi.org/10.30501/jree.2017.70103,

[9] G. Shahgholian, N. Izadpanahi, "Improving the perfor¬m¬a¬n¬ce of wind turbine equipped with DFIG using STATCOM based on input-output feedback linearization controller", Energy Equipment and Systems, vol. 4, no. 1, pp. 65-79, June 2016, https://doi.org/10.22059/EES.2016.20128.

[10] G. Haghshenas, S.M.M. Mirtalaei, H. Mordmand, G. Shahgholian,"High step-up boost-flyback converter with soft switching for photovoltaic applications", Journal of Circuits, Systems, and Computers, vol. 28, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2019, https://doi.org/10.1142/S0218126619500142.

[11] J. Beyza, J.M. Yusta, "The effects of the high penetration of renewable energies on the reliability and vulnerability of interconnected electric power systems", Reliability Engineering and System Safety, vol. 215, Article Number: 107881, Nov. 2021, https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107881.

[12] G. Shahgholian, "Power system stabilizer application for load frequency control in hydro-electric power plant", Engineering Mathematics, vol. 2, no. 1, pp. 21-30, Feb. 2017, https://doi.org/10.11648/j.engmath.20170201.14.

[13] M.A. Hamidan, F. Borousan, "Optimal planning of distributed generation and battery energy storage systems simultaneously in distribution networks for loss reduction and reliability improvement", Journal of Energy Storage, vol. 46, Article Number: 103844, Feb. 2022, https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103844.

[14] P. Megantoro, S.A. Halim, N.A.M. Kamari, L.J. Awalin, M.S. Ali, H.M. Rosli, "Optimizing reactive power dispatch with metaheuristic algorithms: A review of renewable distributed generation integration with intermittency considerations", Energy Reports, vol. 13, pp. 397-423, June 2025, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.020.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[15] H. Karimi, G. Shahgholian, B. Fani, I. Sadeghkhani, M. Moazzami, "A protection strategy for inverter interfaced islanded micro¬grids with looped confi¬gur¬at¬io¬n", Electrical Engineering, Vol. 101, No. 3, pp. 1059-1073, Sept. 2019, https://doi.org/10.1007/s00202-019-00841-6.
[16] Z. Fang, J.K.H. Shek, W. Sun, "A review of grid-connected hybrid energy storage systems: Sizing configurations, control strategies, and future directions", Journal of Energy Storage, vol. 118, Article Number: 116226, May 2025, https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116226.
[17] N. Kumari, B. Tran, A. Sharma, D. Alahakoon, "A comprehensive review on stability analysis of hybrid energy system", Sensors, vol. 25, no. 10, Article Number: 2974, May 2025, https://doi.org/10.3390/s25102974.
[18] E. Hosseini, G. Shahgholian, "Partial- or full-power production in WECS: A survey of control and structural strategies", European Power Electronics and Drives, Vol. 27, No. 3, pp. 125-142, Dec. 2017 (https://doi.org/10.1080/09398368.2017.1413161).
[19] T.B. Nadeem, M. Siddiqui, M. Khalid, M. Asif, "Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies", Energy Strategy Reviews, vol. 48, Article Number: 101096, July 2023, https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101096.
[20] B. Moarref, S.M. Abedi, M.R. Haghifam, "Simultaneous placement of capacitive banks and distributed generation power plants in order to improve reliability and minimize power losses using genetic algorithm", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 11, no. 2, pp. 17-31, Sept. 2022, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1401.11.2.4.8.
[21] A. Sabzevari, M. Moazzami, B. Fani, G. Shahgholian, M. Hashemi, "Stochastic economic dispatch of a power system with solar farm considering generation flexibility and reliability", International Journal of Energy Research, vol. 2024, Article Number: 528243, Sept. 2024, https://doi.org/10.1155/2024/5528243.
[22] A. Eshghi, M.M. Rezaei, S. Shojaeian, "Robust control of active and reactive power of a single phase grid–connected inverter based on the current dynamic phasor", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 10, no. 2, pp. 25-33, Dec. 2021, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1400.10.2.4.1.
[23] Q.L. Lam, A.I. Bratcu, D. Riu, C. Boudinet, A. Labonne, M. Thomas, "Primary frequency H∞ control in stand-alone microgrids with storage units: A robustness analysis confirmed by real-time experiments", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 115, Article Number: 105507, Feb. 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105507.
[24] S.M. Sarhaddi, S. Soleymani, B. Mozaffari, "Resilience-oriented energy management for multiple microgrids coalition based on a cooperative game theory model", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 12, no. 2, pp. 49-60, Dec. 2023.
[25] M. Poshtyafteh, H. Barati, A. Darvish-Falehi, "Optimum energy management in the radial distribution network by considering multiple microgrids, uncertainties, and resilience index using the modified harris hawk optimization algorithm", Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System, vol. 4, no. 4, pp. 1-31, June 2026, https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1123908.
[26] J. Beyza, J.M. Yusta, "Characterising the security of power system topologies through a combined assessment of reliability, robustness, and resilience", Energy Strategy Reviews, vol. 43, Article Number: 100944, Sept. 2022, https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100944.
[27] G. Shahgholian, "An overview of hydroelectric power plant: Operation, modeling, and control", Journal of Renewable Energy and Environment, vol. 7, no. 3, pp. 14-28, July 2020, https://doi.org/10.30501/JREE.2020.221567.1087.
[28] A.M.. Nassef, M.A. Abdelkareem, H.M. Maghrabie, A. Baroutaji, "Review of metaheuristic optimization algorithms for power systems problems", Sustainability, vol. 15, no. 12, Article Number: 9434, June 2023, https://doi.org/10.3390/su15129434.
[29] E. Jafari, A. Marjanian, S. Solaymani, G. Shahgholian, "Designing an emotional intelligent controller for IPFC to improve the transient stability based on energy function", Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 8, no. 3, pp. 478-489, May 2013, https://doi.org/ /10.5370/JEET.2013.8.3.478.
[30] M. Poursaberi, H. Barati, "Optimal reconfiguration of radial distribution system with the aim of reducing losses and improving voltage profiles using the improved lightning search algorithm",

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 1-12, June 2021, http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222468.1400.10.1.2.7.

[31] F. Eftekhari, A. Lashkarara, "Reconfiguration smart distribution networks with the aim of loss reduction and voltage stability enhancement in the presence of D-STATCOM", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 9, no. 3, pp. 21-34, Dec. 2020, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1399.9.3.3.5.

[32] S. Shahzad, E. Jasińska, "Renewable revolution: A review of strategic flexibility in future power systems", Sustainability, vol. 16, no. 13, Article Number: 5454, June 2024, https://doi.org/10.3390/su16135454.

[33] I. Akhtar, S. Kirmani, M. Jameel, "Reliability assessment of power system considering the impact of renewable energy sources integration into grid with advanced intelligent strategies", IEEE Access, vol. 9, pp. 32485-32497, Feb. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060892.

[34] E.E. Che, K.R. Abeng, C.D. Iweh, G.J. Tsekouras, A. Fopah-Lele, "The impact of integrating variable renewable energy sources into grid-connected power systems: Challenges, mitigation strategies, and prospects", Energies, vol. 18, no. 3, Article Number: 689, Feb. 2025, https://doi.org/10.3390/en18030689.

[35] R. Guguloth, T.K.S. Kumar, "Congestion management in restructured power systems for smart cities in India", Computers and Electrical Engineering, vol. 65, pp. 79-89, Jan. 2018, https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.04.016.

[36] N. Kumar, H. Malik, A. Singh, M. A. Alotaibi, M.E. Nassar, "Novel neural network-based load frequency control scheme: A case study of restructured power system", IEEE Access, vol. 9, pp. 162231-162242, Dec. 2021, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3133360.

[37] K. Peddakapu, M. R. Mohamed, M. H. Sulaiman, P. Srinivasarao, A.S.Veerendra, P. K. Leung, "Performance analysis of distributed power flow controller with ultra-capacitor for regulating the frequency deviations in restructured power system", Journal of Energy Storage, vol. 31, Article: 101676, Oct. 2020, https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101676.

[38] A. Narain, S.K. Srivastava, S.N. Singh, "Congestion management approaches in restructured power system: Key issues and challenges", The Electricity Journal, vol. 33, no. 3, Article Number: 106715, April 2020, https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106715.

[39] R.N. Mishra, A. Yadav, M.P. Singh, "Artificial intelligence techniques based congestion management in restructured power systems: A review", Proceeding of the IEEE/PARC, pp. 1-7, Mathura, India, Jan. 2022, pp. 1-7, https://doi.org/10.1109/PARC52418.2022.9726592.

[40] A.K. Singh, S.K. Parida, "A review on distributed generation allocation and planning in deregulated electricity market", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 4132-4141, Feb. 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.060.

[41] A. Mohanty, A.K. Ramasamy, R. Verayiah, S. Bastia, S.S. Dash, E. Cuce, T.M.Y. Khan, M.E.M. Soudagar, "Power system resilience and strategies for a sustainable infrastructure: A review", Alexandria Engineering Journal, vol. 105, pp. 261-279, Oct. 2024, https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.06.092.

[42] A.M. Saleh, I. Vokony, M. Waseem, M.A. Khan, A. Al-Areqi, "Power system stability with high integration of RESs and EVs: Benefits, challenges, tools, and solutions", Energy Reports, vol. 13, pp. 2637-2663, June 2025, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.001.

[43] G. Shahgholian, M. Ebrahimi-Salary, "Effect of load shedding strategy on interconnected power systems stability when a blackout occurs", International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 212-216, April 2012, https://doi.org/10.7763/IJCEE.2012.V4.481.

[44] C.G. Min, "Analyzing the impact of variability and uncertainty on power system flexibility", Applied Sciences, vol. 9, no. 3, Article Number: 561, Feb. 2019, https://doi.org/10.3390/app9030561.

[45] R. Karki, P. Hu, R. Billinton, "Reliability evaluation considering wind and hydro power coordination", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, No. 2, pp. 685-693, May 2010, https://doi.org/10.1109/TPWRS. 2009.2032758.

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[46] M.N. Uddin, N. Rezaei, O.E. Olufemi, "Adaptive and optimal overcurrent protection of wind farms with improved reliability", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 58, no. 3, pp. 3342-3352, May-June 2022, https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3147151.

[47] P. Wanjoli, N.H. Abbasy, M.M.Z. Moustafa, "A state-of-the-art review on the modeling and probabilistic approaches to analysis of power systems integrated with distributed energy resources", Ain Shams Engineering Journal, vol. 16, no. 1, Article Number: 103198, Jan. 2025, https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103198.

[48] P. Afzali, S.A. Hosseini, S. Peyghami, "A comprehensive review on uncertainty and risk modeling techniques and their applications in power systems", Applied Sciences, vol. 14, no. 24, Article Nuber: 12042, Dec. 2024, https://doi.org/10.3390/app142412042.

[49] H. Abunima, J. Teh, C.M. Lai, H.J. Jabir, "A systematic review of reliability studies on composite power systems: A coherent taxonomy motivations, open challenges, recommendations, and new research directions", *Energies,* vol. 11, no. 9, Article Number: 2417, Sept. 2018, https://doi.org/10.3390/en11092417.

[50] J. Friederich, S. Lazarova-Molnar, "Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities", Journal of Manufacturing Systems, vol. 72, pp. 38-58, Feb. 2024, https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001.

[51] M. Leimeister, A. Kolios, "A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 91, pp. 1065-1076, Aug. 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004.

[52] Y.K. Wu, Q.T. Phan, B.P. Nguyen, "Review of power system reliability indices for renewable energy environments", Proceeding of the IEEE/IS3C, pp. 256-259, Taichung, Taiwan, June/July 2023, https://doi.org/10.1109/IS3C57901.2023.00075.

[53] J. Lin, L. Cheng, Y. Chang, K. Zhang, B. Shu, G. Liu, "Reliability based power systems planning and operation with wind power integration: A review to models, algorithms and applications", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 31, pp. 921-934, March 2014, https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.034.

[54] O.H. Almgbel, M.M.A. Seedahmed, A.A. Alhussainy, S. Alghamdi, M. Rawa, Y.A. Alturki, "Quantifying peak load-carrying capability: A comprehensive reliability analysis of grid-connected hybrid systems", Sustainability, vol. 16, no. 22, Article Number: 10107, Nov. 2024, https://doi.org/10.3390/su162210107.

[55] B. Sultana, M.W. Mustafa, U. Sultana, A.R. Bhatti, "Review on reliability improvement and power loss reduction in distribution system via network reconfiguration", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 66, pp. 297-310, Dec. 2016, https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.011.

[56] S. Panda, S. Mohanty, P.K. Rout, B.K. Sahu, S.M. Parida, I.S. Samanta, M. Bajaj, M. Piecha, V. Blazek, L. Prokop, "A comprehensive review on demand side management and market design for renewable energy support and integration", Energy Reports, vol. 10, pp. 2228-2250, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.049.

[57] U.T. Salman, S. Shafiq, F.S. Al-Ismail, M. Khalid, "A review of improvements in power system flexibility: Implementation, operation and economics", Electronics, vol. 11, no. 4, Article Number: 581, Feb. 2022, https://doi.org/10.3390/electronics11040581.

[58] M. Qawaqzeh, H.A. Al_Issa, R. Buinyi, V. Bezruchko, I. Dikhtyaruk, O. Miroshnyk, V. Nitsenko, "The assess reduction of the expected energy not-supplied to consumers in medium voltage distribution systems after installing a sectionalizer in optimal place", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 34, Article Number: 101035, June 2023, https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101035.

[59] S. Abbasi, G. Shahgholian, M. Moazzami, "The effect of static var compensator modelling in evaluation of power systems reliability", Journal of Novel Researches on Electrical Power, vol. 10, no. 1, pp. 21-32, June 2021, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222468.1400.10.1.4.9.

[60] C. Poulin, M.B. Kane, "Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics", Reliability Engineering and System Safety, vol. 216, Article Number: 107926, Dec. 2021, https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107926.

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[61] A. Breznická, M. Kohutiar, M. Krbaťa, M. Eckert, P. Mikuš, "Reliability analysis during the life cycle of a technical system and the monitoring of reliability properties", Systems, vol. 11, no. 12, Article Number: 556, Nov. 2023, https://doi.org/10.3390/systems11120556.
[62] Z. Nazir, M. Bollen, "Operational risk assessment of transmission systems: A review", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 159, Article Number: 109995, Aug. 2024, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109995.
[63] K. Pal, S. Sachan, F. Gholian-Jouybari, M. Hajiaghaei-Keshteli, "An analysis of the security of multi-area power transmission lines using fuzzy-ACO", Expert Systems with Applications, vol. 224, Article Number: 120070, Aug. 2023, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120070.
[64] A. Trukšinas, V. Radziukynas, G. Kairaitis, "A methodology for rating electricity transmission lines to assess the most important or critical lines", Applied Sciences, vol. 14, no. 3, Article Number: 993, Jan. 2024, https://doi.org/10.3390/app14030993.
[65] A. Banerjee, S. Chattopadhyay, M. Gavrilas, G. Grigoras, "Optimization and estimation of reliability indices and cost of power distribution system of an urban area by a noble fuzzy-hybrid algorithm", Applied Soft Computing, vol. 102, Article Number: 107078, April 2021, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107078.
[66] X. Weiss, P. Hilber, S.D. Žarković, L. Nordström, "Predicting distribution reliability indices based on exogenous data", Proceeding of the IEEE/ISGT EUROPE, pp. 1-6, Dubrovnik, Croatia, Oct. 2024, https://doi.org/10.1109/ISGTEUROPE62998.2024.10863381.
[67] M.J. Aliabadi, M. Radmehr, "Hybrid energy system optimization integrated with battery storage in radial distribution networks considering reliability and a robust framework", Scientific Reports, vol. 14, Article Number: 26597, Nov. 2024, https://doi.org/10.1038/s41598-024-73808-8.
[68] S.S. Refaat, H. Abu-Rub, M. Trabelsi, A. Mohamed, "Reliability evaluation of smart grid system with large penetration of distributed energy resources", Proceeding of the IEEE/ICIT, pp. 1279-1284, Lyon, France, Feb. 2018, pp. 1279-1284, https://doi.org/10.1109/ICIT.2018.8352362.
[69] Musthopa, B. Harsanto, A. Yunani, "Electric power distribution maintenance model for industrial customers: Total productive maintenance (TPM), reliability-centered maintenance (RCM), and four-discipline execution (4DX) approach", Energy Reports, vol. 10, pp. 3186-3196, Nov. 2023, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.129.
[70] M. Ghiasi, N. Ghadimi, E. Ahmadinia, "An analytical methodology for reliability assessment and failure analysis in distributed power system", SN Applied Sciences, vol. 1, Article Number: 44, Jan. 2019, https://doi.org/10.1007/s42452-018-0049-0.
[71] G.A. Abantao, J.A. Ibañez, P.E.D.C. Bundoc, L.L.F. Blas, X.N. Penisa, E.A. Esparcia, M.T. Castro, R.V.E. Buendia, K.E.S. Pilario, A.E.D. Tio, I.B.N.C. Cruz, J.D. Ocon, C.M.F. Odulio, "Reconceptualizing reliability indices as metrics to quantify power distribution system resilience", Energies, vol. 17, no. 8, Article Number: 1909, April 2024, https://doi.org/10.3390/en17081909.
[72] S. Garip, Ş. Özdemir, N. Altın, "Power system reliability assessment- A review on analysis and evaluation methods", vol. 6, no. 3, pp. 401-419, Sept. 2022, https://doi.org/10.30521/jes.1099618.
[73] A. Bhattacharyya, M. Hastak, "A data-driven approach to quantify disparities in power outages", Scientific Reports, vol. 13, no. 1, Article Number: 7247, May 2023, https://doi.org/10.1038/s41598-023-34186-9.
[74] M.S.S. Meegoda, B.A.D.T. Balasooriya, E.G.M.C. Dharmapriya, J.I.A.N. Kumara, P.A.G.M. Amarasinghe, S.K. Abeygunawardane, "Impact of solar PV systems on the reliability of power distribution systems", Proceeding of the IEEE/MERCon, pp. 560-565, Moratuwa, Sri Lanka, July 2020, https://doi.org/10.1109/MERCon50084.2020.9185310.
[75] A.A. Menaem, V. Oboskalov, M. Hamouda, M. Elgamal, "Reliability assessment of generation capacity in modern power systems via analytical methodologies", Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 40, Article Number: 101509, Dec. 2024, https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101509.
[76] A.A. Kadhem, N.I.A. Wahab, I. Aris, J. Jasni, A.N. Abdalla, "Computational techniques for assessing the reliability and sustainability of electrical power systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 1175-1186, Dec. 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.276.

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[77] H. Wu, J. Li, H. Yang, "Research methods for transient stability analysis of power systems under large disturbances", Energies, vol. 17, no. 17, Article Number: 4330, . Aug. 2024, https://doi.org/10.3390/en17174330.
[78] T. Wolgast, S. Ferenz, A. Nieße, "Reactive power markets: A review", IEEE Access, vol. 10, pp. 28397-28410, Jan. 2022, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141235.
[79] P. Wang, R. Billinton, "Reliability assessment of a restructured power system using reliability network equivalent techniques", IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, vol. 150, no. 5, pp. 555-560, Sept. 2003, https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20030723.
[80] K. Haldar, S.K. Goswami, S. Debnath, "Improved frequency control performance of restructured multi-area power system through optimized controller design", Electric Power Systems Research, vol. 231, Article Number: 110245, June 2024, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110245.
[81] Y. Ding, P. Wang, L. Goel, R. Billinton, R. Karki, "Reliability assessment of restructured power systems using reliability network equivalent and pseudo-sequential simulation techniques", Electric Power Systems Research, vol. 77, no. 12, pp. 1665-1671, Oct. 2007, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.11.010.
[82] A.K. Yadav, S. Mudgal, V. Mahajan, "Reliability test of restructured power system with capacity expansion and transmission switching", Proceeding of the IEEE/ICPS, pp. 1-6, Jaipur, India, Dec. 2019, https://doi.org/10.1109/ICPS48983.2019.9067741.
[83] F. Moinian, M.T. Ameli, "A reliability-based approach for integrated generation and transmission maintenance coordination in restructured power systems", Electric Power Systems Research, vol. 206, Article Number: 107737, May 2022, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107737.
[84] I. Akhtar, M. Jameel, A. Altamimi, S. Kirmani, "An innovative reliability oriented approach for restructured power system considering the impact of integrating electric vehicles and renewable energy resources", IEEE Access, vol. 10, pp. 52358-52376, May 2022, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174365.
[85] Y. Ding, L. Cheng, Y. Zhang, Y.Xue, "Operational reliability evaluation of restructured power systems with wind power penetration utilizing reliability network equivalent and time-sequential simulation approaches", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 2, pp. 329–340, Dec. 2014, https://doi.org/10.1007/s40565-014-0077-8.
[86] N.M. Lindsay, A.K. Parvathy, "Power system reliability assessment in a complex restructured power system", International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 9, no. 4, Aug. 2019, http://doi.org/10.11591/ijece.v9i4.pp2296-2302.
[87] P. Wang, Y. Ding, L.Goel, "Reliability assessment of restructured power systems using optimal load shedding technique", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 3, no. 7, July 2009, https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2008.0308.
[88] S. Rahimzadeh, M.T. Bina, A.H. Viki, "Simulaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment both: achieving both optimal number and location", IET Gen. Trans. and Dist., Vol.4, No.3, pp.349-362, 2010, http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0287.

زیرنویس‌ها

[1] Renewable energy source
[2] Reliability
[3] Robustness
[4] Resilience
[5] Information and Communication Technologies
[6] Restructured System
[7] Restructured Power System
[8] Faulty Equipment
[9] Monte Carlo Simulation
[10] Sequential Simulation
[11] Non-Sequential Simulation
[12] Power System Reconfiguration

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025

[13] Generation Companies
[14] Transmission Companies
[15] Distribution Companies
[16] Independent System Operator (ISO)
[17] Market Operators or Traders
[18] Traditional vertically integrated utility model
[19] Vertically Integrated
[20] Expected Demand Not Supplied
[21] Vertically Integrated
[22] System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)
[23] System Average Interruption Duration Index (SAIDI)
[24] N-1 Criterion
[25] Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI)
[26] Energy Not Supplied (ENS)
[27] Unified Power Flow Controller (UPFC)
[28] Electric Vehicles
[29] Peak Load Carrying Capability (PLCC)
[30] Incentive Based Fuzzy Fault Tree Analysis (NIBFFTA)
[31] Optimal Power Flow (OPF)
[32] Poolco Market

[DOI: 1082362/jeps.2025.2.1.540.fa] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 2- Summer 2025