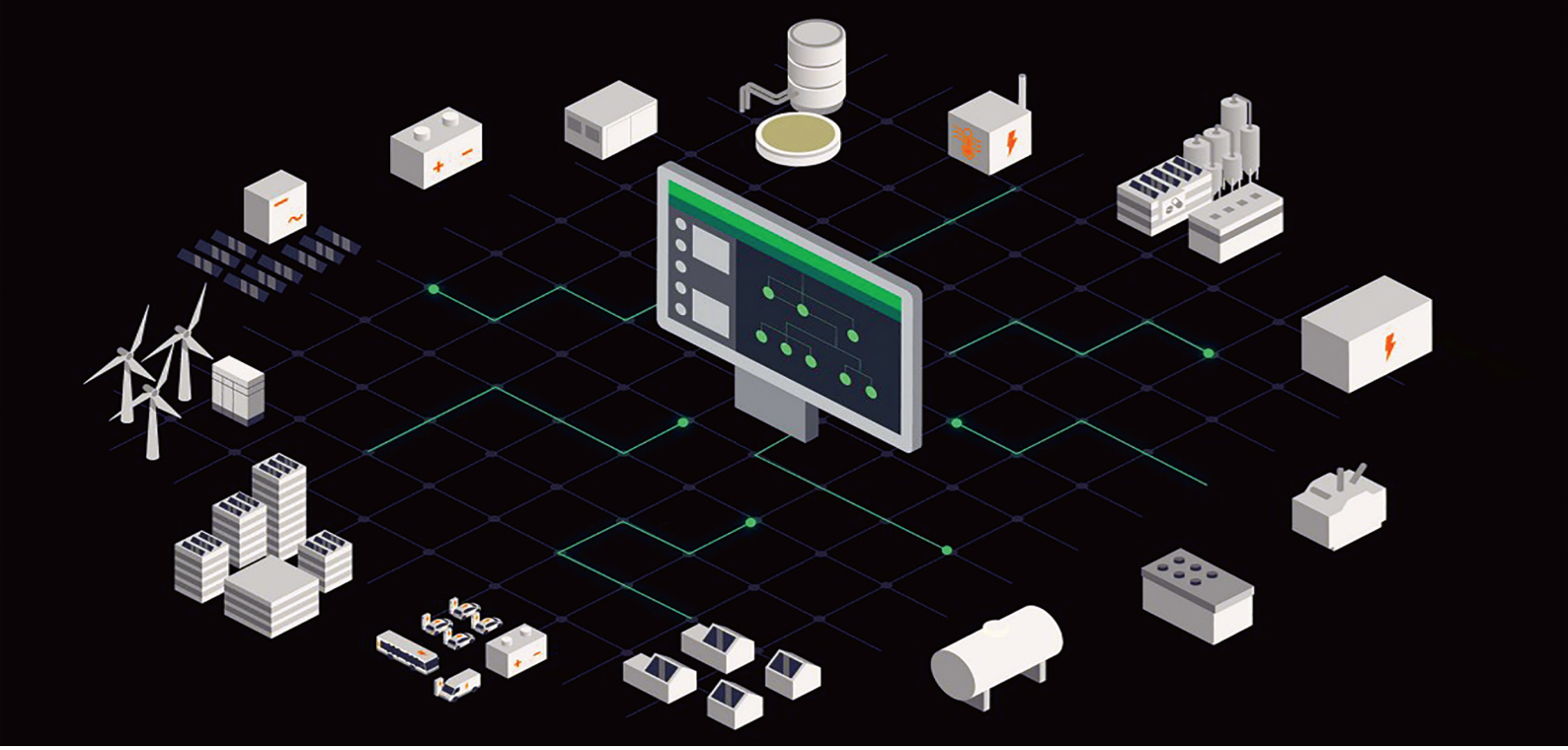


مقاله علمی-ترویجی

تاب‌آوری ریزشبکه‌ها: چالش‌ها، معیارهای ارزیابی و روش‌های بهبود

سعید جعفرپور*، دانشگاه شاهد، Saeid.jafarpour@shahed.ac.ir
سید محمد صادق‌زاده، دانشگاه شاهد، Sadeghzadeh@shahed.ac.ir
محمد حسن امیریون، دانشگاه اصفهان، M.h.amirioun@shr.ui.ac.ir
*نویسنده مسئول

چکیده

وقوع روزافزون رخدادهای طبیعی شدید در سال‌های گذشته در نقاط مختلف دنیا، توجه بهره برداران سیستم قدرت را به این گونه پدیده‌ها و اثرات آن بر روی سیستم قدرت برانگیخته است. بررسی گزارش‌های در دسترس وقوع حوادث نشان می‌دهد که پدیده‌های طبیعی شدید می‌توانند بخش قابل توجهی از سیستم قدرت را در خاموشی فرو ببرند و باعث اختلال در روند عادی زندگی مردم بشوند. پژوهشگران برای تحلیل رفتار سیستم قدرت در مقابل حوادث شدید و نادر، به تازگی مفهوم تاب‌آوری سیستم‌های قدرت را معرفی نموده‌اند. در این کار پژوهشی ابتدا با مرور انواع حوادث تهدیدکننده سیستم قدرت، اثرات این پدیده‌ها بر سیستم قدرت بررسی می‌شود. در بخش بعد مفاهیم و عناصر پایه‌ای تاب‌آوری سیستم قدرت بیان می‌شود. سپس با مرور کارهای پژوهشی انجام شده در این زمینه انواع معیارهای ارایه شده برای ارزیابی تاب‌آوری معرفی و مقایسه می‌شوند. در پایان انواع رویکردهای ارایه شده برای بهبود تاب‌آوری شرح داده می‌شود.

کلمات کلیدی: حوادث نادر و شدید، تاب‌آوری، معیارهای ارزیابی تاب‌آوری، روش‌های بهبود تاب‌آوری، ریزشبکه.

Microgrids Resilience: Challenges, Metrics, and Improvement Methods

Saeid Jafarpour*, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, saeid.jafarpour@shahed.ac.ir
Seyed Mohammad Sadeghzadeh, Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, sadeghzadeh@shahed.ac.ir
Mohammad Hassan Amirioun, Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran, m.h.amirioun@shr.ui.ac.ir
*Corresponding Author

Abstract

Recently, the ever-increasing occurrence rate of high-impact rare (HR) natural events has attracted the attention of researchers to the effects of such incidents on power systems. Examination of available data shows that HR events have the potential to shut down a significant part of the power system and disrupt the routine life of customers. To analyze the power system behavior in the face of HR events, researchers introduced the concept of power system resiliency. Reviewing HR event types threatening Microgrids, the effects of these incidents

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-05-20]

are investigated. Then, the basic concepts and elements of resilience are discussed. Presenting a state-of-the-art review of the literature, resilience-assessment metrics are discussed and compared. Finally, resilience-improving measures for Microgrids are described. Conclusive remarks are given as well.

Keywords: Microgrid, extreme weather events, resilience, resilience metrics, resilience improvement measures.

۱- مقدمه

در شبکه‌های برق، هرروزه تجهیزات متعددی از واحدهای تولید برق گرفته تا فیدرهای فشار ضعیف توزیع برق به دلایل گوناگونی از مدار خارج می‌شوند و پس از تعمیر مجدداً وارد مدار می‌گردند. با این وجود به دلیل لحاظ نمودن افزونگی در طراحی سامانه‌های زیرساختی مهندسی، برق‌رسانی به مشترکین عموماً در این شرایط تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. گاهی هم حوادث طبیعی و یا انسانی شدیدی در نقطه‌ای از جهان گزارش می‌شوند که اثرات به مراتب شدیدتر و گسترده‌تری را به جا می‌گذارد و بخش اعظمی از ساکنین آن منطقه را با مشکل و خاموشی مواجه می‌سازد. به ندرت هم حوادث تجربه نشده‌ای رخ می‌دهد که در سوابق گذشته آن منطقه هیچ رد پایی از آن موجود نیست. از دیدگاه احتمال وقوع، طبق شکل (۱) حوادث را می‌توان برحسب شدت اثرگذاری و احتمال وقوع به سه دسته حوادث شناخته‌شده، حوادث شناخته نشده‌ای قوی خاکستری و حوادث غیرقابل شناسایی یا قوی مشکی تفکیک نمود. حوادث شناخته‌شده احتمال وقوع مشخص دارند و اثرات آن‌ها نیز محدود بوده و به راحتی قابل برآورد است. برای مثال در یک شبکه برق، نرخ خروج اضطراری یک واحد تولید مشخص بوده و به صورت سالیانه به‌روزرسانی می‌شود. حوادث شناخته‌نشده به ندرت رخ می‌دهند و به همین دلیل پایگاه داده غنی از این حوادث موجود نیست که بتوان مقادیری برای تابع توزیع احتمال وقوع آن‌ها استخراج نمود. اما، عواقب وقوع این حوادث به دلیل تجربه رخدادهای مشابه قبلی تا حدی قابل برآورد است (برای مثال، وقوع یک طوفان با یک سرعت معین)؛ بنابراین می‌توان این‌گونه جمع بندی کرد که این حوادث نادر، شدید و تا حدی قابل پیش‌بینی هستند. نوع اول حوادث که احتمال وقوع زیاد و تخریب کمی دارد به صورت مکرر در اثر فرسایش، خستگی و استهلاک و در قالب خرابی تجهیزات و اشتباهات انسانی اتفاق می‌افتد که در این راستا روش‌های مختلف و متنوعی تحت عنوان مطالعات قابلیت اطمینان برای مقابله با این موارد توسعه یافته است. نوع دوم حوادث که عموماً نرخ رخداد پایینی دارند حوادث نادر و شدید نامیده می‌شوند. این نوع حوادث به‌طور معمول اثرات بسیار مخربی بر روی زیر ساخت‌ها، خصوصا شبکه‌های برق می‌گذارند. [۱]، [۲]

شکل ۱: طبقه‌بندی حوادث بر اساس نحوه شناخت پیامدها و احتمالات مربوطه[۳]

توسعه انسانی و صنعتی و به تبع آن انتشار مضاعف گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر موجب افزایش میانگین دمای کره زمین تا ۱.۵درجه سانتی‌گراد شده است. در این راستا اخیرا تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی سبب بالا رفتن نرخ وقوع پدیده‌های آب و هوایی نادر و شدید شده است [۴]. برای مثال طوفان کم سابقه‌ای در تاریخ ۱۳۹۳/۰۳/۱۲شهر تهران را درنوردید که موجب پیامدهای مختلفی ازجمله سقوط بسیاری از درختان، پارگی سیم‌های مخابراتی و قطع تعدادی از خطوط برق شد. طبق گزارش مقامات رسمی شرکت توزیع برق تهران بر اثر این طوفان ۶۵ خط ۲۰ کیلوولت دچار قطعی شد که موجب قطعی برق حدود ۵۰۰۰۰ مشترک در نواحی جنوب غربی و غرب شهر گردید [۵], [۶]. در مورد دیگر طوفان سندی که از آن به‌عنوان پرهزینه‌ترین طوفان تاریخ آمریکا یاد می‌شود باعث ایجاد خسارت ۷۰ میلیارد دلاری بر زیر ساخت ایالات متحده شد. این طوفان سبب قطعی برق ۸.۵ میلیون نفر شد که حدودا ۱۰ روز طول کشید تا شبکه برق به صورت ۹۵ درصدی بازیابی[۱] شود. در موردی مشابه در فوریه سال ۲۰۲۱ طوفان زمستانی بخش‌های وسیعی از تگزاس را در دمای زیر صفر فرو برد که زیرساخت‌های برق این ایالت را تحت تأثیر قرار داد و باعث قطعی برق گسترده شد. به دلیل این که تقریباً نیمی از کل ظرفیت تولید برق شبکه اصلی برق دولتی از مدار خارج شده بودند، در اوج بحران نزدیک به ۴۵ میلیون خانه و مرکز تجاری تگزاس چندین روز بدون برق شدند [۷]. با توجه به سوابق موجود که نشان می‌دهد احتمال وقوع این دست از حوادث افزایش پیدا کرده است لزوم آمادگی و مطالعه روش‌های مقابله و کاهش اثرات این حوادث هر چه بیشتر از پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این راستا به‌تازگی مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت مطرح شده است.

۲- مفهوم تاب‌آوری[۲]

تاب‌آوری از نظر ریشه‌شناسی از کلمه لاتین "Resilio" گرفته شده و به توانایی یک سیستم برای پیش‌بینی و مقاومت در برابر تنش‌های خارجی، بازگشت به حالت قبل از تنش خود در سریع‌ترین زمان ممکن و سازگاری برای آمادگی بهتر برای رویدادهای فاجعه بار آینده اشاره می‌کند. این مفهوم به طور گسترده درعلوم مختلف جامعه‌شناسی، محیط زیست، سیستم‌های مهندسی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته است. تاب‌آوری سیستم قدرت، توانایی یک سیستم قدرت برای پاسخگویی به حوادث نادر و شدید است و بر این تمرکز دارد که چگونه می‌توان سیستم قدرت را با سرعت و کارایی به حالت قبل از حادثه بازگرداند. به عبارت دیگرهدف از اقداماتی که جهت بالا بردن تاب‌آوری سیستم قدرت انجام می‌شود این است که سیستم در مواجهه با حوادث نادر و شدید به جای اینکه درهم‌شکسته شود از خود انعطاف نشان بدهد.[۱], [۸]

۲-۱- تفاوت تاب‌آوری و قابلیت اطمینان[۳]

در سیستم‌های قدرت برای ارزیابی حوادث نوع اول (احتمال زیاد، خسارت کم)، از مفهوم قابلیت اطمینان و معیارهای توسعه یافته مربوط به آن از جمله SAIDI[۴] و SAIFI[۵] استفاده می‌شود. از طرف دیگر، این معیارها برای حوادث نوع اول طراحی شده‌اند و برای

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-05-20]

رسیدگی به اثرات حوادث نوع دوم (احتمال کم، خسارت شدید) کافی نیست. به عبارت دیگر اگرچه معیارهای قابلیت اطمینان می‌توانند بینش بیشتری در مورد رفتار غیرعادی سیستم‌های قدرت به بهره‌برداران ارائه دهند، اما ماهیت ایستای این معیارها آن‌ها را برای اندازه‌گیری اثرات مکانی و زمانی حوادث نادر و شدید بر روی شبکه‌های قدرت نامناسب می‌سازد. به جهت شفاف سازی و درک بهتر تفاوت‌های این دو مفهوم، جدول شماره (۱) ارائه شده است [۱]، [۹] از این‌رو با توجه به محدودیت‌های معیارهای قابلیت اطمینان در ارزیابی و بهبود وضعیت شبکه در مقابل تهدیدات حوادث با تاثیر شدید و نادر، معیارهای مرتبط با مفهوم تاب‌آوری توسعه یافته‌اند.

جدول ۱: مقایسه مفاهیم قابلیت اطمینان و تاب‌آوری

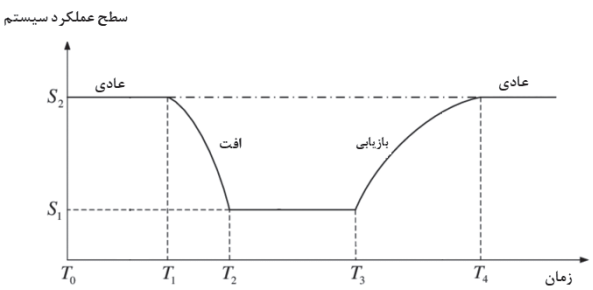
معیار مقایسه	تاب‌آوری	قابلیت اطمینان
مفهوم	پویا[۶]	لحظه‌ای و ایستا[۷]
کاربرد	انطباق‌پذیری شبکه	استحکام شبکه
تمرکز اصلی	ارائه سرویس	تجهیزات سیستم
حوزه مرتبط	طراحی و بهره‌برداری	طراحی
راهبرد تأمین	فعال	غیرفعال

۲-۲- منحنی تاب‌آوری سیستم

طبق تعریف موسسه[۸] (EPRI) تاب‌آوری یک سیستم توانایی مقاومت[۹]، جذب[۱۰] و بهبود سریع[۱۱] در مواجهه با یک حادثه نادر و شدید می‌باشد که هر کدام از ویژگی‌های نامبرده شده در بازه‌های زمانی مختلفی از رویداد به وسیله‌ی معیارهای خاصی ارزیابی می‌شود [۱۰]. قابلیت مقاومت توانایی سیستم برای حفظ سطح قابل قبولی از عملکرد ضروری در شرایط اختلال و در مدت طولانی می‌باشد. در شرایط رخداد حادثه که دیگر سیستم توانایی مقاومت نداشته باشد قابلیت جذب مطرح می‌شود. قابلیت جذب توانایی سیستم برای جذب تاثیر رویداد مخرب در زمان به‌نسبت کوتاه و در نتیجه به حداقل رساندن آسیب سیستم می‌باشد. پس از جذب شوک وارد شده به سیستم، قابلیت بازیابی نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری سیستم بازی می‌کند. در این هنگام سیستم به وسیله‌ی قابلیت بازیابی با سرعت هر چه تمام سعی در رسیدن به سطح عملکردی قابل قبولی پس از وقوع حادثه می‌کند [۱۱]، [۱۲].

در این راستا منحنی تاب‌آوری سیستم ارائه شده است که سطح عملکرد سیستم را از زمان قبل وقوع حادثه تا پس از خرابی و بازیابی کلی سیستم نشان می‌دهد. سطح عملکرد سیستم را می‌توان بسته به مورد مطالعه , با معیارهای مختلفی مانند میزان بار حیاتی تامین شده، تعداد تجهیزات حیاتی در وضعیت عملیاتی و یا مقدار انرژی تامین شده اندازه‌گیری می‌شود. عموما سطح عملکرد سیستم قبل از رخداد حادثه در بیش‌ترین حالت ممکن یعنی ۱۰۰ درصد می‌باشد که هنگام وقوع حادثه این مقدار کاهش یافته و پس از بازیابی کامل سیستم دوباره به بیش‌ترین حالت ممکن می‌رسد. به عبارت دقیق‌تر، چنانچه در شکل (۲) مشاهده می‌شود، قبل از وقوع حادثه یعنی در بازه زمانی 0 تا t_1، با توجه به اینکه سیستم در حالت عادی خود می‌باشد، سطح عملکرد در حالت عادی و به عبارتی بهترین حالت ممکن قرارداد. در این مرحله، به جهت افزایش آمادگی سیستم، اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع حادثه اعمال می‌شود. در محل اختلال هم‌زمان با وقوع حادثه در t_1، سطح عملکرد سیستم با توجه به شدت و نوع حادثه شروع به کاهش کرده و پس از مدتی در زمان t_2 به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. با توجه به میزان مقاومت و تطبیق پذیری سیستم در برابر حادثه، میزان کاهش سطح عملکرد سیستم می‌تواند متفاوت باشد.

در طول این مرحله، اقدامات اصلاحی برای کاهش تاثیر تنش خارجی و آغاز روند بازیابی سیستم اعمال می‌شود. نظر به اینکه هنگام وقوع حادثه امکان بازیابی و ارزیابی دقیق میزان خسارات به دلیل محدودیت‌های جوی، خطرات جانی و مالی و شرایط نامساعد کم می‌باشد، سیستم از t_2 تا پایان حادثه یعنی t_3 در وضعیت کمینه سطح عملکردی باقی می‌ماند. پس از اتمام رخداد اقدامات ترمیمی برای بازیابی سریع بارهای قطع شده و تعمیر/تعویض زیرساخت‌های آسیب دیده اعمال می‌شود. چنانچه واضح است در این مرحله سطح عملکرد سیستم شروع به افزایش کرده و تا رسیدن به سطح عملکرد قبل از حادثه در t_4 ادامه می‌یابد.



شکل ۲: منحنی فازهای مختلف تاب‌آوری[۱۳]

۳- معیارهای ارزیابی تاب‌آوری

چنانچه در شکل (۳) نشان داده شده با توجه به ماهیت سیستم و هدف مورد مطالعه معیارهای ارزیابی تاب‌آوری به صورت‌های گوناگون دسته‌بندی می‌شوند [۱۱]، [۱۲]، [۱۴] که در ادامه به جزئیات هر یک می‌پردازیم.

۳-۱- معیارهای منطبق بر مشخصه کلی تاب‌آوری

کلی‌ترین دسته‌بندی بر اساس مشخصه‌های کلی تاب‌آوری یعنی

شکل ۳: معیارهای مختلف ارزیابی تاب‌آوری

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-05-20]

مقاومت‌پذیری، انعطاف‌پذیری(جذب) و بازیابی می‌باشد. برای مثال در [۱۵] از سه معیار احتمال مقاومت‌پذیری، احتمال انعطاف‌پذیری و احتمال بازیابی که مبتنی بر مشخصه کلی تاب‌آوری هستند برای ارزیابی رفتار سیستم در فازهای مختلف استفاده شده است.

۳-۲- معیارهای قابلیت اطمینان پایه

دسته‌ای از معیارهای ارزیابی تاب‌آوری بر پایه‌ی معیارهای قابلیت اطمینان توسعه یافته‌اند. برای مثال در مرجع [۱۶] از شاخص انرژی تامین نشده[۱۲] که یک معیار قابلیت اطمینان پایه می‌باشد در فازهای زمانی رویداد حادثه به جهت ارزیابی تاب‌آوری سیستم استفاده شده است. در این کار سعی می‌شود تاثیر مشارکت پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتورها را بر تاب‌آوری شبکه در شرایط بحرانی حادثه ارزیابی کند. یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد که با افزایش مشارکت پنل‌های خورشیدی و دیزل ژنراتورها، شاخص انرژی تامین نشده کاهش می‌یابد که این مساله نشان دهنده‌ی افزایش تاب‌آوری سیستم در این شرایط می‌باشد.

۳-۳- معیارهای زمان، انرژی و هزینه محور

معیارهای هزینه محور تاب‌آوری سیستم را بر اساس مفاهیمی مانند: هزینه بازیابی سطح عملکرد سیستم، هزینه فرصت‌های از دست رفته به دلیل قطعی برق، هزینه انرژی تامین نشده و ارزش بار تامین نشده ارزیابی می‌کند. معیارهای مبتنی بر انرژی، تاب‌آوری را با اندازه‌گیری توان و یا انرژی از دست رفته یا حفظ شده پس از حادثه ارزیابی می‌کنند. همچنین معیارهای مبتنی بر زمان، سرعت تحت تاثیر قرار گرفتن سیستم در اثر حادثه و سرعت بازیابی سیستم پس از اتمام حادثه را ارزیابی می‌کنند [۱۲],[۱۷],[۱۸].

۳-۴- معیارهای ایستا و پویا

معیارهای پویا تحولات سیستم و اجزای آن را مبتنی بر زمان دنبال می‌کنند در حالی که معیارهای ایستا تغییرناپذیر با زمان می‌باشند. به عبارت دیگر معیارهای پویا کارکردهایی از سیستم را که مبتنی بر زمان است در نظر می‌گیرد در حالی که در معیارهای ایستا اینگونه نیست. برای مثال در مرجع [۱۶] چند معیار پویا برای فازهای زمانی مختلف منحنی ارزیابی تاب‌آوری ارائه کرده و براساس این معیارها با توزیع بهینه منابع ذخیره انرژی نسبت به افزایش تاب‌آوری اقدام می‌کند.

۳-۵- معیارهای احتمالی و قطعی

در محاسبات معیارهای تاب‌آوری احتمالی، عدم قطعیت‌ها مانند: نرخ خرابی و زمان بازیابی تجهیزات مشارکت داده می‌شود در حالی که در معیارهای قطعی، عدم قطعیت‌های تجهیزات و حادثه در نظر گرفته نمی‌شود. برای مثال در مرجع [۱۹] یک معیار تاب‌آوری برای شبکه‌های برق بر اساس مسیرهای محتمل برای تحویل توان از ژنراتور به بار، با در نظر گرفتن اهمیت بار قبل و بعد از اختلال و مبتنی بر پخش بار بهینه ایجاد شده است. در مورد دیگر مرجع [۱۵] از سه معیار احتمالی ترکیبی با مشخصه کلی تاب‌آوری، جهت ارزیابی تاب‌آوری استفاده کرده است.

۴- رویکردهای بهبود معیارهای تاب‌آوری

به صورت کلی به مجموعه اقداماتی که بهره بردار جهت بهبود و افزایش تاب‌آوری سیستم انجام می‌دهد، رویکردهای بهبود تاب‌آوری می‌گویند. رویکردهای بهبود تاب‌آوری به‌عنوان آخرین مرحله در روند بهبود تاب‌آوری سیستم قدرت و متناسب با شرایط، اولویت‌ها و اهداف بهره‌برداری و پس از انتخاب و ارزیابی دقیق معیارسنجش مد نظر پیاده‌سازی می‌گردند. رویکردهای بهبود تاب‌آوری به طورکلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- رویکردهای برنامه‌ریزی و زیرساختی[۱۳] ۲- رویکردهای بهره‌برداری[۱۴].

۴-۱- رویکردهای برنامه‌ریزی و زیرساختی

در این رویکرد سعی می‌شود شبکه به صورت بلند مدت برای مواجهه با حوادث شدید و نادر احتمالی آینده برنامه‌ریزی و طراحی شود. در این مدل رویکرد، تمرکز اصلی بر عدم قطعی بارهای حیاتی مانند: بیمارستان‌ها، ایستگاه‌های پمپاژ آب و پست‌های گاز که با نیازهای اساسی زندگی انسان مرتبط هستند می‌باشد. انواع راهبردهای ذکر شده به شرح زیر می‌باشد:

۴-۱-۱- تخصیص و ترکیب پیشگیرانه منابع

از دیرباز یکی از روش‌های سنتی تقویت شبکه در برابر آسیب‌ها و تنش‌های وارده به سیستم قدرت تخصیص و ترکیب بهینه‌ی انواع منابع در دسترس بهره‌بردار شبکه مانند منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتورها، ذخیره‌سازهای انرژی و... بوده است[۲۰], [۲۱]. در این راستا مرجع [۲۲] با معرفی یک معیار ارزیابی احتمالی و با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی به هدف کنترل بهینه‌ریز شبکه در هنگام حادثه، مدلی برای بهبود تاب‌آوری ریزشبکه‌های متصل به شبکه ارائه کرده است. در این کار معیار اصلی ارزیابی تاب‌آوری، معیار بقاپذیری در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر میزان احتمال این که در حین رویداد بارهای حساس ریزشبکه تامین شوند به‌عنوان معیار بقاپذیری برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توصیف شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده در این کار با تخصیص و ترکیب بهینه منابع در دسترس ریزشبکه مانند سلول‌های خورشیدی، دیزل ژنراتور، منابع ذخیره سوخت و باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی، تاب‌آوری ریزشبکه را بهبود می‌بخشد. نتایج عددی و کیس‌های مورد مطالعه در این کار نشان می‌دهد که تخصیص بهینه‌ی ترکیبی از منابع در این مدل، باعث کاهش مصرف سوخت و به تبع آن هزینه شبکه و همچنین افزایش تاب‌آوری شبکه می‌شود. درمرجع[۲۳] ابتدا معیارهای تاب‌آوری در معیارهای اقتصادی ادغام می‌شوند تا علاوه بر توجه به شاخصه اصلی سیستم یعنی سود و زیان مالی، تاب‌آوری نیز تضمین بشود. سپس به وسیله رویکرد تخصیص بهینه‌ی منابع، سعی در بهبود معیار تاب‌آوری می‌شود. نتایج این کار تحقیقاتی نشان می‌دهد که استفاده از منابع تولید پراکنده مانند دیزل ژنراتورها، توربین‌های بادی، پارکینگ خودروهای الکتریکی و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در کنار ادغام معیارهای تاب‌آوری و اقتصادی می‌تواند تاثیر قابل توجهی در بهبود تاب‌آوری شبکه هنگام وقوع حوادث شدید داشته باشد. مقاوم‌سازی[۱۵] دارایی‌های شبکه یکی از مهم‌ترین رویکردهای برنامه‌ریزی و زیرساختی برای ارتقای تاب‌آوری ریزشبکه‌ها در برابر حوادث شدید می‌باشد.

۴-۱-۲- تشکیل چندین ریزشبکه درون یک شبکه توزیع

در این رویکرد به هدف افزایش تاب‌آوری شبکه در مقابل حوادث شدید احتمالی، پتانسیل و زیرساخت‌های لازم برای تقسیم یک شبکه توزیع به چندین ریزشبکه با محوریت منابع تولید پراکنده فراهم می‌شود که در این حالت ریزشبکه‌های تشکیل شده با تعامل با یکدیگر می‌توانند عملکرد بسیار بهتری نسبت به یک شبکه توزیع سنتی داشته باشند. برای مثال در مرجع [۲۴] چارچوبی برای برنامه‌ریزی و توسعه یک شبکه توزیع ولتاژ پایین تاب‌آور برای یک شهر جدید ایجاد شده است. در این مدل برنامه‌ریزی، بسته به مقتضیات مسئله باید تعدادی ریزشبکه

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-05-20]

در سطح شبکه توزیع شکل بگیرند که در این مورد با مطرح کردن یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه سعی می‌شود منطقه سرویس‌دهی (مرز ریزشبکه‌ها)، مشخصات فنی و تعداد و اندازه آن‌ها مشخص بشود. در این کار جهت حل مسئله یاد شده از یک رویکرد هزینه محور در کنار مسائل مربوط به تاب‌آوری استفاده شده است. به همین لحاظ جهت اعمال ملاحظات تاب‌آوری در تابع هزینه از یک معیار جدید استفاده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل مربوطه به صورت موثری می‌تواند باعث کاهش هزینه و افزایش تاب‌آوری سیستم بشود.

۴-۱-۳- افزونگی[۱۶] و بهبود استحکام تجهیزات شبکه

تجهیزات شبکه به دلیل اینکه همواره در معرض آسیب‌های ناشی از حوادث می‌باشند معمولاً یکی از دلایل عمده‌ی اختلال عملکرد شبکه برق هنگام وقوع حادثه هستند. به این لحاظ می‌توان با مقاوم‌سازی و افزونگی تجهیزاتی که نقش کلیدی در عملکرد سیستم دارند و بیشتر در معرض حوادث طبیعی مورد نظر می‌باشند، تاب‌آوری شبکه را به صورت قابل توجهی افزایش داد. برای مثال در مناطقی که نرخ وقوع طوفان‌های شدید زیاد است، می‌توان با زمینی کردن خطوط انتقال اصلی، تاب‌آوری سیستم قدرت در مقابل طوفان را افزایش داد. در این راستا مقاله [۲۵] با ارائه روشی ترکیبی از ظرفیت‌های هر دو سمت شبکه و بار برای بهبود تاب‌آوری سیستم بهره‌گیری می‌کند. در این مدل از یک روش مقاوم‌سازی بهینه منابع، مانند زیرزمینی کردن کابل‌ها و استفاده از واحدهای ذخیره انرژی با مقاومت بالا در سمت شبکه استفاده شده و در سمت بار از ظرفیت ذخیره‌سازهای انرژی خانگی مانند خودروهای الکتریکی و پنل‌های خورشیدی در کنار زیر ساخت‌های مخابراتی مقاوم آن استفاده شده است. علاوه بر این، به وسیله یک الگوریتم کارآمد، مناطق آسیب‌پذیر خوشه‌بندی می‌شود که به صورت موثری می‌تواند مشکل بهره‌بردار را برای تامین تقاضا در شرایط اضطراری حل کند.

۴-۲-رویکردهای بهره‌برداری

رویکردهای بهره‌برداری به مجموعه اقدامات کوتاه‌مدت و اضطراری پس از وقوع حادثه گفته می‌شود که هدف آن‌ها تامین هر چه سریع‌تر انرژی الکتریکی مصرف کنندگان طبق اولویت‌های از قبل تعیین شده می‌باشد. رویکردهای بهره‌برداری ارائه شده جهت بهبود معیارهای تاب‌آوری شبکه عموماً به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۴-۲-۱- استفاده از استعداد خودروهای برقی

یکی از توانایی‌های ذاتی خودروهای برقی، توانایی انتقال انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری به شبکه برق است که قابلیت V2G نامیده می‌شود شکل (۴). این ویژگی خودروهای برقی می‌توانند خدمات جانبی مختلفی را در اختیار سیستم قدرت قرار دهد. در این راستا، در شرایط اضطراری خودروهای برقی می‌توانند نقش مهمی در بازیابی بارهای حساس شبکه پس از حادثه ایفا کنند. برای مثال در مقاله [۲۶]، یک ساختار دو سطحی با بهره‌گیری از ظرفیت ایستگاه‌های تعویض باتری خودروهای الکتریکی برای افزایش تاب‌آوری ریزشبکه‌ها در برابر رویدادهای با تأثیر کم و احتمال بالا ارائه شده است. یکی از رویکردهایی که به تازگی برای شارژ سریع خودروهای برقی ارائه شده، تعویض باتری خالی خودرو در ایستگاه و جابجایی با یک باتری کامل شارژ شده از قبل می‌باشد. این رویکرد علاوه بر تسریع زمان شارژ خودروهای الکتریکی که یکی از معضل‌های اصلی این صنعت نیز می‌باشد، سبب کنترل بهتر اپراتورهای شبکه بر روند شارژ باتری‌های خودرهای الکتریکی شده و می‌توانند در بهره‌برداری بهینه شبکه‌های توزیع شامل خودروهای الکتریکی موثر باشد. نتایج بررسی‌های عددی مدل ارائه شده نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت خودروهای برقی و به خصوص ایستگاه‌های تعویض باتری می‌توانند تاثیر به سزایی در بهبود تاب‌آوری ریزشبکه‌ها داشته باشد.

شکل۴: یک خودروی الکتریکی شرکت تسلا در حال تبادل انرژی با شبکه (V2G)

۴-۲-۲- بازآرایی شبکه[۱۷]

راهبرد کارآمد دیگری که به‌تازگی مورد استفاده قرار گرفته، بازآرایی بهینه شبکه با توجه به الزامات تاب‌آوری سیستم هنگام بروز حادثه می‌باشد. به‌طور معمول در هر شبکه توزیع تعدادی کلید حالت عادی باز و تعدادی کلید حالت عادی بسته وجود دارد که می‌توان با باز و بسته کردن این کلیدها تغییراتی در آرایش شبکه در جهت ارتقای تاب‌آوری به وجود آورد. برای مثال مرجع [۲۷] به بررسی تاب‌آوری و مدیریت انرژی در یک سیستم شامل چند ریزشبکه می‌پردازد. در مدل پیشنهادی این تحقیق، ریزشبکه اصلی از چهار ریزشبکه فرعی تشکیل شده است که این ریزشبکه‌های فرعی منابع و ظرفیت‌های خود را با هم ترکیب می‌کنند تا یک ریزشبکه جدید و پیچیده‌تر را تشکیل بدهند که عملکرد بیشتری نسبت به هر یک از ریزشبکه‌های فرعی ارائه می‌دهد. در این مدل ریزشبکه‌های فرعی به منابع تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور و ذخیره‌سازهای انرژی مجهز شده‌اند و تنها یکی از ریزشبکه‌های فرعی به شبکه بالا دست متصل می‌باشد. علاوه بر آن ریزشبکه‌های فرعی به یکدیگر نیز متصل می‌باشند به صورتی که برخی از اتصالات در حالت عادی باز و بقیه معمولاً بسته می‌باشند. در این شرایط زمانی که مقتضیات تاب‌آوری شبکه یا مقتضیات فنی و اقتصادی حکم کند وضعیت این اتصالات تغییر کرده وتوپولوژی شبکه اصلی به نوعی بازآرایی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این مدل تایید می‌کند که با اعمال مدل یاد شده تاب‌آوری بهبود می‌یابد. علاوه بر این، در همه ریزشبکه‌های فرعی، هزینه‌های بهره‌برداری به حداقل می‌رسد و حوادث به نحو مطلوب مدیریت می‌شود به صورتی‌که هم در شرایط عادی و هم در شرایط تحت خطا میزان اصلاح بار صفر می‌باشد.

۴-۲-۳- اختصاص منابع ذخیره انرژی قابل حمل[۱۸]

منابع ذخیره انرژی قابل حمل عموما به صورت یک کشنده با محموله‌ای از باتری‌ها و مبدل‌ها هستند (شکل ۵). این منابع به دلیل قابلیت جابه‌جایی، ظرفیت بالایی برای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع به وجود آورده‌اند. مقاله [۲۸] یک راهبرد بازیابی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-05-20]

بـار بـا اسـتفاده از منابـع سـیار ذخیـره انـرژی ارائـه می‌کنـد. در ایـن مـدل بـا اسـتفاده از دو راهبرد توزیـع بهینه منابع سـیار ذخیره انرژی و شـکل‌دهی بهینه ریزشـبکه‌ها در سـطح سیسـتم توزیع، سعی در به بیشـینه رسـاندن بارهای بازیابی شـده پس از حادثه شـدید می‌شـود. نتایـج شبیه‌سـازی در ایـن کار نشـان می‌دهد که سیسـتم‌های ذخیره انـرژی قابـل حمـل به طور قابـل توجهی عملکـرد بازیابـی و تاب‌آوری سیسـتم را بهبود می‌بخشـد.

شکل ۴: یک سیستم ذخیره انرژی قابل حمل[۲۹]

۴-۲-۴- پاسخگویی بار[19]

برنامه‌هـای پاسـخگویی بـار که به معنای مشـارکت مصـرف کنندگان در بهبـود الگوی مصرف انرژی می‌باشـد، یکـی از عمده‌ترین روش‌های مدیریـت مصـرف انـرژی الکتریکـی در شـبکه‌های توزیـع می‌باشـند. برنامه‌هـای پاسـخگویی بـار عمومـا از دو طریـق قیمت‌گـذاری و یـا پرداخـت طرح‌های تشـویقی به مصرف‌کننـدگان اجرا می‌شـود. علاوه بـر مـوارد ذکر شـده اسـتفاده از رویکـرد پاسـخگویی بار نیـز می‌تواند بـه صـورت موثـر در ارتقـای تـاب‌آوری مـورد اسـتفاده قـرار بگیـرد. بـرای مثـال مقالـه [۳۰] یـک چارچـوب بهینه‌سـازی ترکیبـی بـرای برنامه‌ریـزی بهینـه یـک ریزشـبکه‌ی تـاب‌آور در برابـر حوادث شـدید ارائـه کـرده اسـت. رویکرد پیشـنهادی سـعی می‌کنـد تا بهره‌بـرداری ریزشـبکه را در دو حالـت عـادی و تحـت حادثـه بهبود بخشـد. علاوه بـر ایـن در ایـن کار، برنامه‌هـای پاسـخگویی بـار به‌عنـوان ابـزاری بـرای بهبـود تاب‌آوری اسـتفاده شـده اسـت. نتایج عددی مدل نشـان می‌دهـد کـه عملکـرد ریزشـبکه در حالـت تـاب‌آور منجـر بـه افزایش هزینه‌هـای بهره‌بـرداری سیسـتم می‌شـود کـه ایـن موضـوع ناشـی از عملکرد جزیره‌ای ریزشـبکه می‌باشـد. علاوه بر این، نشـان داده شـده کـه عملیـات بهبـود تـاب‌آوری ریزشـبکه می‌توانـد بـه دلیل اسـتفاده بیشـتر از تجهیـزات سیسـتم و کاهـش طـول عمـر آن‌هـا، هزینه‌های عملیـات سیسـتم را در افـق برنامه‌ریـزی آینـده افزایـش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

سیسـتم‌های قـدرت به‌طـور معمـول به‌گونـه‌ای طراحی می‌شـوند که از اسـتقامت لازم در برابـر حـوادث عادی یعنی حـوادث با احتمال زیاد و تخریـب کـم برخوردار باشـند. امـا در عین حال این‌گونه سیسـتم‌ها بایسـتی بـه گونه‌ای طراحی شـده باشـند کـه بتوانند در برابـر حوادث نـادر و شـدید هـم مقاومـت کـرده و در سـریع‌ترین زمـان ممکـن عملکـرد عـادی خـود را بازیابـی کننـد. با توجه بـه سـوابق موجود که نشـان می‌دهـد احتمـال وقـوع حـوادث نـادر و شـدید افزایـش پیـدا کرده اسـت. معیار تاب‌آوری سیسـتم اهمیت مضاعفی نسـبت به قبل پیـدا کـرده اسـت. از این‌رو ارزیابی موثر وضعیت سیسـتم به وسـیله‌ی معیارهـای جدیـد ارایـه شـده، در کنـار رویکـرد مناسـب و منطبق بر شـرایط و گزینه‌های در دسـترس بهره‌بردار، نقش کلیدی در راسـتای ارتقـای سـطح تـاب‌آوری سیسـتم‌های قـدرت بـازی می‌کننـد که در ایـن کارپژوهشـی سـعی شـده مـروری جامـع بر کارهـای اخیـر انجام شـده در ایـن زمینه انجام بشـود.

پی‌نوشت‌ها

1 Restore
2 Resilience
3 Reliability
4 System Average Interruption Duration Index
5 System Average Interruption Frequency Index
6 Dynamic
7 Static
8 Electric Power Research Institute
9 Resist
10 Absorb
11 Rapid recovery
12 Energy not supplied
13 Planning and infrastructural Strategies
14 Operational Strategies
15 Hardening
16 Redundancy
17 Reconfiguration
18 Transportable Energy Storages
19 Demand Response

مراجع

[1] Y. Wang, A. O. Rousis, and G. Strbac, “On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol.134, no. November 2019, p.110313, 2020.

[2] M. H. Spiegel, E. M. S. P. Veith, and T. I. Strasser, “The spectrum of proactive, resilient multi-microgrid scheduling: A systematic literature review,” Energies, vol.13, no. 17, pp.1–37, 2020.

[3] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amirioun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei, “Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience,” IEEE Access, vol.6, pp.32035–32053, 2018.

[4] D. L. Swain, D. Singh, D. Touma, and N. S. Diffenbaugh, “Attributing Extreme Events to Climate Change: A New Frontier in a Warming World,” One Earth, vol.2, no. 6, pp.522–527, 2020.

[۵] "مروری بر طوفان ۱۲ خرداد سال ۱۳۹۳ تهران," پژوهشکده سوانح طبیعی.

[۶] "قطع برق ۵۰ هزار مشترک تهرانی," خبرگزاری ایسنا.

[7] SAMI SPARBER, “WINTER STORM 2021,” https://www.texastribune.org/2021/03/15/texas-winter-storm-deaths/. .

[8] M. Bao, Y. Ding, M. Sang, D. Li, C. Shao, and J. Yan, “Modeling and evaluating nodal resilience of multi-energy systems under windstorms,” Appl. Energy, vol.270, no. May, 2020.

[9] P. Cicilio, L. Swartz, B. Vaagensmith, C. Rieger, J. Gentle, T. McJunkin, and E. Cotilla-Sanchez, “Electrical grid resilience framework with uncertainty,” Electr. Power Syst. Res., vol.189, no. March, p.106801, 2020.

[10] T. Kemabonta and G. Mowry, “A syncretistic approach to grid reliability and resilience: Investigations from Minnesota,” Energy Strategy Rev., vol.38, p.100726, 2021.

[11] A. Umunnakwe, H. Huang, K. Oikonomou, and K. R. Davis, “Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol.149, no. June, p.111252, 2021.

ادامه در صفحه ۶۸

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-05-20]