Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 14-27

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

Evaluating the potential of cascading failure occurrence due to line outage in power systems by information theory method and radial base functions

Morteza Abedi[1], Mohammad Reza Aghamohammadi[2], Mohammad Taghi Ameli[3]

[1] *Electrical Engineering Department, Shahid Beheshti University, AC, Tehran, Iran*
[1]*Mor_Abedi@sbu.ac.ir*
[2] *Electrical Engineering Department, Shahid Beheshti University, AC, Tehran, Iran*

[2] *M_Aghamohammadi@sbu.ac.ir*
[3] *Electrical Engineering Department, Shahid Beheshti University, AC, Tehran, Iran*

[3] *M_Ameli@sbu.ac.ir*

Abstract: In power systems, a connected topology is created to increase reliability and economic performance. Increasing dimensions of power systems on the one hand and the need to continuously monitor power systems for secure operation on the other challenge the evaluation of power system security. In such conditions, due to economic conditions and considering the fast growth of consumers in a power system and the need to supply them, power systems are operated in the proximity of their allowed operation limit. Since a power system includes a large number of transmission lines, the location of the lines in the power system and the number of lines compared to other devices like transformer and generator make the lines more vulnerable to events and potent to the outage. Therefore, events like a sudden loss of one or more transmission lines might violate operation constraints of the network and threaten the stability margins of the power system, resulting in the occurrence of cascading failures. The most important concern to prevent cascading failure resulting from line outages is, thus, to determine the potential of cascading failure resulting from line outages using power system control center (PSCC) information. Since PSCC can only access the operating variables of the power system, a method based on operating variables should be presented to determine the potential of cascading failure. Considering the large number of operating variables in a power system and the limitations of measurement and communication devices, it is impossible to use all variables to estimate the cascading failure potential of a specific line outage. Therefore, dominant operating variables (DOVs) should be identified to determine the potential of cascading failure resulting from line outage. This study presents a method based on mutual information theory and boundary equation to evaluate the potential of cascading failure. In the proposed method, the mutual information theory method is used to identify DOVs. Since identifying the DOVs of a power system alone is not sufficient for evaluating the potential of line outage-induced cascading failure, an index is also required to evaluate the potential of cascading failure. A mathematical equation is, therefore, developed as the boundary equation to evaluate the potential of cascading failure using the least-squares error (LSE) method based on the radial basis function (RBF). As such, the PSCC employs the identified DOVs and the boundary equation of each line to evaluate the potential of cascading failure at each operating point of the power system online before line outage. The proposed method is implemented on a standard 39-bus power system and a standard 118-bus power system, and desired results are obtained.

Keywords: Cascading failure, mutual information theory, dominant operating variables, Radial Base Function, boundary equation

Received:2020 May 30

Accepted:2021 May 2

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص 14-27

Vol. 10 / No. 2/ Summer 2021
ISSN 2322-2344
eISSN 2717-1639

ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی به ازای خروج خط در سیستم‌های قدرت بوسیله روش تئوری اطلاعات و توابع پایه‌ای شعاعی

نوع مطالعه: پژوهشی

مرتضی عابدی[۱]، دانشجوی دکتری، محمدرضا آقامحمدی[۲]، دانشیار، محمدتقی عاملی[۳]، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه شهید بهشتی- تهران - ایران

Mor_Abedi@sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه شهید بهشتی- تهران – ایران

M_Aghamohammadi@sbu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه شهید بهشتی- تهران - ایران

M_Ameli@sbu.ac.ir

چکیده:

در این مقاله، ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط انتقال در سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. خطوط انتقال باتوجه به تعدد آن‌ها در سیستم قدرت نسبت به سایر تجهیزات، بیشتر مستعد خروج ناشی از حادثه و آغازگری حوادث پی‌درپی می‌باشند. بنابراین مهم‌ترین دغدغه در راستای جلوگیری از رخداد حوادث‌پی‌درپی ناشی از خروج خط، تعیین پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط بوسیله مرکز کنترل سیستم قدرت (PSCC)[۱] می‌باشد. از آنجا که PSCC فقط می‌تواند به متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت دسترسی داشته باشد، جهت تعیین پتانسیل حوادث پی‌درپی باید روشی مبتنی بر متغیرهای بهره‌برداری ارائه شود. با توجه به تعداد زیاد متغیرهای بهره‌برداری در سیستم قدرت، استفاده از کلیه متغیرها برای برآورد پتانسیل یک خط خاص باتوجه به محدودیت در وسایل اندازه‌گیری و ارتباطی مورد نیاز، میسر نیست. بنابراین، شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته جهت تعیین پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط دارای اولویت می‌باشد. از اینرو، در این مقاله از روش‌های مبتنی بر تئوری اطلاعات متقابل جهت شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته استفاده شده است. نهایتاً جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج هر خط، با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری برجسته و تابع پایه‌ای شعاعی (RBF)[۲] یک معادله مرزی مبتنی بر روش حداقل مربعات خطا (LSE)[۳] تشکیل می‌شود. بنابراین، PSCC با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری برجسته و معادله مرزی ایجادشده قادر خواهد بود تا در هر نقطه‌کار از سیستم قدرت به ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج هر خط بپردازد. روش پیشنهادی روی خطوط سیستم قدرت استاندارد ۳۹ باس و ۱۱۸ باس پیاده‌سازی شده و نتایج مطلوبی نیز بدست آمده است.

واژه های کلیدی: حوادث پی‌درپی، تئوری اطلاعات متقابل، متغیرهای بهره‌برداری برجسته، تابع پایه‌ای شعاعی، معادله مرزی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۲/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول : محمدرضا آقامحمدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشکده برق.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت جدید به منظور افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد اقتصادی یک توپولوژی بهم پیوسته را ایجاد نموده‌اند. افزایش ابعاد سیستم قدرت از یک سو و نیاز به پایش مستمر شبکه جهت بهره‌برداری ایمن از آن از سوی دیگر سبب شده است که مسئله ارزیابی امنیت سیستم قدرت با چالش‌هایی مواجه گردد. در این شرایط، بدلایل اقتصادی و باتوجه به رشد سریع مصرف‌کننده‌ها در یک سیستم قدرت و نیاز به تغذیه آن‌ها، سیستم‌های قدرت در نزدیکی محدوده‌ی عملکردی مجازشان بهره‌برداری می‌شوند(Henry et al. 2004). از آنجاییکه یک سیستم قدرت شامل تعداد زیادی خطوط انتقال می‌باشد، مکان قرارگیری خطوط در سیستم قدرت و تعددشان نسبت به سایر تجهیزات نظیر ترانس و ژنراتور، موجب می‌شود تا خطوط بیشتر در معرض آسیب-پذیری قرار گیرند. بنابراین حوادث بحرانی نظیر از دست‌دادن ناگهانی یک یا چند خط انتقال می‌تواند منجر به تخطی از قیود بهره‌برداری شبکه گردد و حتی حاشیه‌های پایداری سیستم قدرت را به مخاطره بیاندازد و تاثیر زیادی در عملکرد سایر تجهیزات و بطور کلی سیستم قدرت داشته باشد(Ajendra 2011).

رخداد حوادث پی‌درپی معمولاً بوسیله یک حادثه اولیه نظیر خروج خط انتقال با بارگذاری سنگین ناشی از یک خطای اتصال کوتاه اتفاق می‌افتد. در این وضعیت ممکن است حوادث پی‌درپی ایجاد شود و به تبع آن ممکن است سیستم قدرت را به سمت تجزیه و جزیره‌ای شدن ناخواسته و نهایتاً فروپاشی و خاموشی در هر یک از بخش‌ها سوق دهد(Liun 2013). در حادثه خاموشی ۱۴ آگوست ۲۰۰۳ حوادث پی-درپی نقش مهمی را در ایجاد خاموشی ایفا کردند. بطوریکه به دلیل رخداد حوادث پی‌درپی، سیستم‌قدرت به بخش‌های مجزا تبدیل شده و نهایتاً فروپاشی و خاموشی را در هر یک از بخش‌ها درپی داشته است(Alhelou 2019). بنابراین اگر بتوان پتانسیل رخداد حوادث پی-درپی به ازای خروج خطوط را با ارائه شاخص‌هایی مناسب تشخیص داد، می‌توان با انجام مجموعه عملیات و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی میزان آسیب‌پذیری سیستم قدرت را به طور قابل توجهی کاهش داد و از وقوع حوادث پی‌درپی ناشی از خروج تجهیزات در سیستم قدرت جلوگیری کرد.

توسعه و گسترش سیستم‌های قدرت موجب افزایش تعداد متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت شده است. استخراج اطلاعات متغیرهای بهره-برداری، دانشی را در اختیار PSCC قرار می‌دهد تا بتواند تصمیمات موثر و سریعی را نسبت به وضعیت‌های مخاطره‌آمیز گرفته و از وقوع حوادث دیگر جلوگیری کند(Abedi 2019). در خروج یک خط مشخص از سیستم قدرت، تعداد معدودی از متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت تاثیرگذار می‌باشند همچنین استفاده از اطلاعات تمام متغیرهای بهره-برداری سیستم قدرت در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج یک خط از نظر اقتصادی به صرفه نمی‌باشد. چراکه، دریافت اطلاعات تمام متغیرهای بهره‌برداری توسط مرکز کنترل سیستم قدرت نیاز به تعداد زیادی تجهیزات اندازه‌گیری و مخابراتی دارد و ذخیره این حجم از اطلاعات موجب افزایش در هزینه‌های محاسباتی و تامین تجهیزات می‌شود. از اینرو جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج یک خط نیاز به کاهش ابعاد متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت و باید تعداد محدودی از متغیرها با اطلاعات غنی نسبت به وضعیت بهره‌برداری انتخاب شوند.

در پژوهش‌های علمی اخیر، شناسایی، انتخاب و استخراج متغیرهای بهره‌برداری برجسته در زمینه‌های مختلفی از سیستم قدرت نظیر تشخیص خطای رتور(R.Casimir, E.Boutleux, 2006)، پیش‌بینی کوتاه مدت قیمت و بار(Faisal, Javaid et al. 2019)، تحلیل پایداری گذرا(Saunders, Alamuti et al. 2019)، مکان‌یابی موثر خطا(Hsueh-Hsien 2017)، و همچنین ارزیابی امنیت سیستم قدرت از نظر پایداری ولتاژ(Javan , Mashhadi, Armin 2017) مورد بررسی قرار گرفته است. این در حالی است که، تاکنون پژوهشی مبتنی بر استخراج اطلاعات از متغیرها و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته در مساله ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی به ازای خروج تجهیزات در سیستم قدرت، ارائه نشده است.

به منظور شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته در بین تعداد زیادی از متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت، از روش‌های کاهش ابعاد استفاده شده است. این روش‌ها معمولاً برای پردازش اطلاعات و داده‌ها استفاده می‌شوند و ویژگی‌های برجسته را انتخاب می‌کنند. یکی از مسائل متداول در پردازش داده‌ها، مواجهه با مجموعه داده‌هایی با تعداد ویژگی‌های زیاد می‌باشد. تعدد ویژگی‌ها، افزایش در هزینه محاسباتی و حافظه سیستم را درپی خواهد داشت که موجب وسیع شدن فضای جستجو یا افزایش تعداد بهینه‌های محلی می‌شود. در اغلب مسائل، ویژگی‌ها عموماً بهم وابسته‌اند و به بیان دیگر فقط تعدادی از این مجموعه ویژگی‌ها حاوی اطلاعات ارزشمند می‌باشند.

هدف اصلی برای کاهش ابعاد داده‌ها و تعداد ویژگی‌ها در کمترین حد ممکن، افزایش دقت دسته‌بندی داده‌ها در الگوریتم‌ها می-باشد(Liu, Sun 2009). روش‌های انتخاب ویژگی با انتخاب زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌هایی که موجب به حداقل رساندن تابع هزینه مشخصی می‌شوند، ابعاد را کاهش می دهند. انتخاب ویژگی در بسیاری از زمینه‌های کاربردی مربوط به سیستم‌های خبره و هوشمند مانند داده کاوی و یادگیری ماشین، پردازش تصویر، تشخیص ناهنجاری و بیوانفورماتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد(Remeseiro, Bolon-Canedo 2019). فرایند انتخاب ویژگی به عنوان انتخاب متغیر، کاهش ابعاد ویژگی یا انتخاب زیرمجموعه متغیرها نیز شناخته می‌شود. روش تئوری اطلاعات متقابل بین متغیرها از جمله روش‌های انتخاب ویژگی می‌باشد. در این روش به شناسایی میزان ارتباط و وابستگی بین متغیرها پرداخته شده‌است(Meyer, Schretter 2008).

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

در این مقاله، برای ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط، روشی جدید مبتنی بر تئوری اطلاعات متقابل و معادله مرزی ارائه شده است. در روش پیشنهادی، از روش تئوری اطلاعات متقابل برای انتخاب و شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته استفاده می‌شود. از آنجاییکه که جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی خروج خط، شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته سیستم قدرت به تنهایی کافی نمی‌باشد؛ علاوه بر متغیرهای بهره‌برداری برجسته، به یک شاخص یا معیاری جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی نیاز می‌باشد. بنابراین، یک معادله ریاضی به عنوان یک معادله مرزی جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی با استفاده از روش LSE مبتنی بر RBF (Rouhani, Javan 2016) ایجاد شده است. در هر نقطه کار مشخص، با شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته پیش از خروج خط و جایگذاری آن‌ها در معادله مرزی، پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط خمین زده می شود.

ترتیب ارائه بخش‌های مختلف مقاله به اینصورت است که در بخش۲، چهارچوب کلی روش پیشنهادی بررسی می‌شود. بخش ۳ مقاله به معرفی روش پیشنهادی می‌پردازد و در بخش ۴ روش پیشنهادی روی شبکه-های نمونه پیاده‌سازی شده و نتایج تحلیل و بررسی می‌شود. در بخش ۵، جمع‌بندی از مقاله ارائه می‌شود.

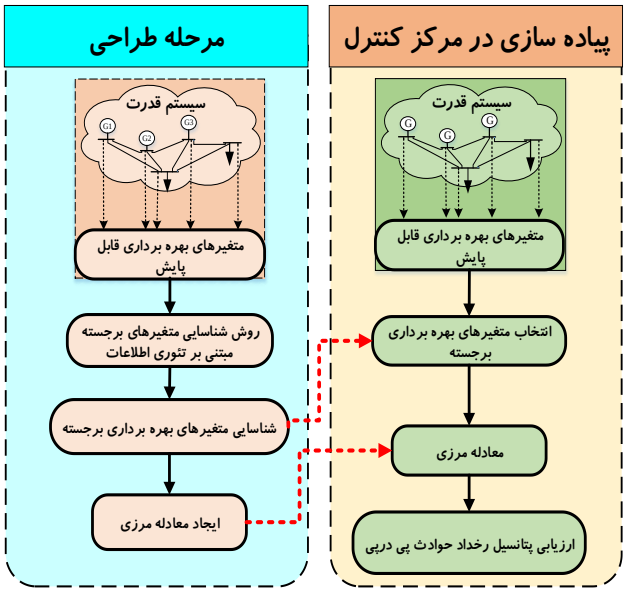
۲- چهارچوب کلی روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی از اطلاعات بهره‌برداری سیستم قدرت قبل از خروج خط جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی استفاده شده است. در این روش، خطی که خروج آن منجر به آغاز حوادث پی‌درپی یا گسترش حوادث پی‌درپی در سیستم قدرت می‌شود به عنوان خط بحرانی شناخته می‌شود. به عبارت دیگر، خروج یک خط بحرانی باعث ایجاد تغییرات در برخی متغیرهای بهره‌برداری شده و سرانجام خروج متوالی تجهیزات دیگر در سیستم قدرت را درپی خواهد داشت.

شکل (۱) چهارچوب کلی از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد که شامل دو مرحله می‌باشد. در مرحله اول به طراحی روش پیشنهادی پرداخته شده و در مرحله دوم، روش پیشنهادی در PSCC پیاده‌سازی شده است. طراحی روش پیشنهادی شامل انتخاب و شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته از بین تمام متغیرهای بهره‌برداری قابل پایش سیستم قدرت و ایجاد معادله مرزی با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری برجسته برای هر خط از سیستم قدرت جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی می‌باشد. در مرحله پیاده‌سازی روش پیشنهادی، معادله مرزی ایجادشده و متغیرهای بهره‌برداری برجسته شناسایی‌شده به ازای هر خط در اختیار مرکز کنترل سیستم قدرت قرار می‌گیرد. از اینرو، مرکز کنترل قادر به ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی در هر نقطه‌کار از سیستم قدرت می‌باشد.

۳- روش پیشنهادی

همانطور که گفته شد، طراحی روش پیشنهادی شامل دو گام می‌باشد. گام اول؛ شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته و گام دوم، ارزیابی بحرانیت برای هر خط (دارای پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط) بصورت برخط و با استفاده از معادله مرزی. در گام اول، باتوجه به خروج هر خط، متغیرهای بهره‌برداری برجسته شناسایی شده و جهت تشکیل معادله مرزی مربوطه در گام دوم مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۱): چهارچوب کلی پیشنهادی جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی

۳-۱- شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته

بطور کلی بحرانیت و پتانسیل خروج یک خط برای ایجاد هر نوسان در سیستم قدرت که در بدترین حالت منجر به رخداد حوادث پی‌درپی می‌شود، به شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت بستگی دارد. شرایط بهره-برداری سیستم‌های قدرت را می‌توان با اطلاعات بهره‌برداری قبل از خروج خط نظیر ولتاژ باس، شارش توان خطوط، بارها و تولید ژنراتورها توصیف کرد.

در سیستم‌های قدرت واقعی در هر نقطه‌کار، حجم زیادی از اطلاعات بهره‌برداری وجود دارد. با این‌حال، باتوجه به بحرانیت یک خط مشخص (#K)، تمام اطلاعات بهره‌برداری دارای ارتباط و وابستگی زیاد با وضعیت خط نیستند. در واقع، از میان همه متغیرهای بهره‌برداری تنها تعداد کمی از متغیرهای بهره‌برداری به عنوان متغیرهای بهره‌برداری برجسته با بحرانیت خط مرتبط بوده و دارای وابستگی شدیدی نسبت به آن می‌باشند. به عبارت دیگر، متغیرهای بهره‌برداری برجسته مرتبط با خروج هر خط، حداقل تعداد متغیرهای بهره‌برداری هستند که می‌توان به وسیله آن‌ها بحرانیت یک خط مشخص (#K) را ارزیابی کرد. مابقی متغیرهای بهره‌برداری به دلیل عدم ارتباط با وضعیت خط درنظر گرفته

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

نمی‌شوند. بنابراین برای ایجاد یک معادله مرزی کاربردی جهت ارزیابی بحرانیت خط، لازم است تا از متغیرهای بهره‌برداری برجسته شناسایی-شده استفاده شود. برای این منظور، باید در فضای بهره‌برداری سیستم قدرت تعدادی نقاط کاری با تنوع زیاد ایجاد شود بطوریکه به ازای برخی از آن‌ها وضعیت خط بحرانی ارزیابی شود و به ازای برخی دیگر وضعیت خط بحرانی نباشد. با طبقه‌بندی نقاط کاری به دو دسته بحرانی و غیر بحرانی باتوجه به خروج یک خط مشخص (#K)، اطلاعات بهره‌برداری مربوط به نقاط کاری مذکور نیز در دو گروه بحرانی و غیربحرانی تقسیم-بندی می‌شوند. با استفاده از اطلاعات متغیرهای بهره‌برداری و روش انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته پیشنهادی، متغیرهای بهره-برداری جهت تعیین وضعیت بحرانی خط (#K) شناسایی و انتخاب می-شوند.

۱-۱-۳- الگوریتم شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره-برداری برجسته

در سیستم‌های قدرت، در یک نقطه‌کار مشخص، وضعیت سیستم بوسیله مجموعه‌ای از اطلاعات بهره‌برداری (V) شامل ولتاژ باس، شارش توان خطوط، میزان بارها و تولید ژنراتورها تعریف می‌شود. در هر نقطه‌کار، چندین مشخصه رفتاری را می‌توان بوسیله یک رابطه علی بین مجموعه متغیرهای بهره‌برداری و ویژگی‌های رفتاری به سیستم قدرت نسبت داد. با این حال، با توجه به هر ویژگی رفتاری (A^i) ، تمام مجموعه متغیرهای بهره‌برداری دارای سهم یکسانی در شکل‌گیری ویژگی رفتاری نمی‌باشند. به عنوان مثال، اضافه‌بار ایجادشده پس از خروج خط #K ، به عنوان یک ویژگی رفتاری در نظر گرفته می‌شود که با تعدادی از متغیرهای بهره-برداری قبل از خروج خط مرتبط می‌باشد.

اثر و رابطه کلیه متغیرهای بهره‌برداری مربوط به یک ویژگی رفتاری یکسان نیستند. برخی متغیرها دارای همبستگی و رابطه قوی با ویژگی رفتاری در حالیکه برخی دیگر دارای اثر و همبستگی ضعیف می‌باشند. بنابراین، به ازای یک مجموعه از متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت {V} ، باتوجه به ویژگی رفتاری مشخصی از سیستم قدرت A^i ، یک زیرمجموعه از متغیرها $\{V^i\}$ که دارای اثر و همبستگی زیادی با A^i می‌باشند به عنوان متغیرهای بهره‌برداری برجسته مرتبط با A^i شناخته می‌شوند. شایان ذکر است که به ازای هر مجموعه از متغیرهای بهره-برداری {V}، باتوجه به ویژگی‌های رفتاری متفاوت، متغیرهای بهره-برداری برجسته مختلفی وجود دارند.

در این مقاله، اطلاعات مجموعه متغیرهای بهره‌برداری {V} قبل از زمان خروج خط درنظر گرفته شده است. پتانسیل خروج خط (#K) برای آغاز و گسترش حوادث پی‌درپی در سیستم قدرت به عنوان Kامین ویژگی رفتاری سیستم قدرت (A_k) شناخته می‌شود. باتوجه به ویژگی رفتاری (A_k)، هدف شناسایی زیرمجموعه متغیرهای بهره‌برداری (V^i) مربوط به ویژگی (A_k) می‌باشد.

به منظور شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته $\{V_k\}$ مرتبط با ویژگی رفتاری A_k از بین متغیرهای بهره‌برداری مجموعه {V}، می‌توان از روش اطلاعات متقابل و آنتروپی به شرح زیر استفاده کرد.

اگر یک متغیر بهره‌برداری در N نقطه‌کار به صورت یک مجموعه $X = \{x1, x2, \ldots\ldots, xN\}$ در نظر گرفته شود بطوریکه xi مقادیری استکه متغیر بهره‌برداری در نقاط کاری مختلف می‌تواند اتخاذ کند، به ازای هر متغیر بهره‌برداری یک متغیر تصادفی xi با احتمال p(xi) درنظر گرفته می‌شود. برای مجموعه داده X، با استفاده از رابطه(۱) یک تابع آنتروپی H(X) حاصل می‌شود که از آن می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد متغیر بهره‌برداری X بدست آورد.

$$H(X) = -\sum_{x\in X} p(x).log_2 p(x) \qquad (۱)$$

تابع آنتروپی H(X) به عنوان تابع همواره مثبت شانون شناخته می شود(Vergara, Estévez 2014). با درنظر گرفتن دو متغیر تصادفی مستقل (X,Y)، تابع آنتروپی دو متغیره بصورت رابطه(۲) ارائه می‌شود.

$$H(X,Y) = -\sum_{x,y} p(x,y).log_2 p(x,y) \qquad (۲)$$

مقدار H(x,y)، میزان اطلاعات نهفته در متغیر x جهت توصیف وضعیت متغیر y را نشان می‌دهد. اگر مقدار H(x,y) برای مقدار مشخصی از Y=yo محاسبه شود، آنتروپی دو متغیره به عنوان آنتروپی شرطی متغیر X به شرط Y=yo شناخته شده و توسط رابطه(۳) بیان می‌شود. این آنتروپی شرطی، مقدار اطلاعات در متغیر X را به ازای مقدار مشخصی از متغیر Y نشان می‌دهد.

$$H(X|y) = -\sum_x p(x|y).log_2 p(x|y)$$
$$= H(X,Y) - H(Y) \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، $H(X|y_o)$ آنتروپی شرطی متغیر X را به شرط yo نشان می‌دهد. با استفاده از روابط (۱و۳)، رابطه (۴) حاصل می‌شود. رابطه (۴) اطلاعات متقابل میان دو متغیر تصادفی X و Y را بیان می-کند. اطلاعات متقابل میان دو متغیر، میزان اطلاعات مشترک بین دو متغیر را نشان می‌دهد.

$$I(X;Y) = H(X) - H(X|Y)$$
$$= \sum_x \sum_y p(x,y).log \frac{p(x,y)}{p(x).p(y)} \qquad (۴)$$

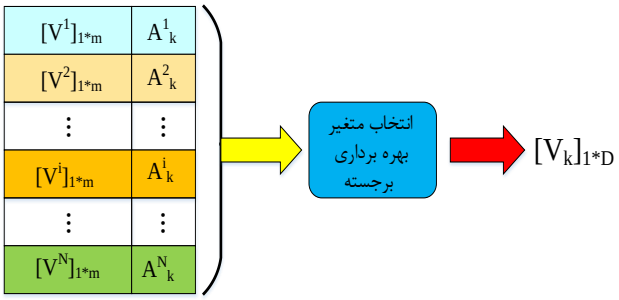
در حقیقت اطلاعات متقابل، میزان اطلاعات موجود در یک متغیر درباره متغیر دیگر را نشان می‌دهد. در این مقاله متغیر X به عنوان یک متغیر بهره‌برداری از مجموعه {V} و متغیر Y به عنوان ویژگی رفتاری سیستم قدرت درنظر گرفته شده است. برای بکارگیری روش تئوری اطلاعات در سیستم قدرت جهت شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته مرتبط با وضعیت بحرانیت هر خط، باید چندین نقطه‌کار در فضای بهره‌برداری سیستم قدرت انتخاب شود. باتوجه به بحرانیت خروج هر خط(#K) تمام نقاط کار به دو دسته بحرانی و غیر بحرانی تقسیم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

می‌شوند. بدین ترتیب، N نقطه‌کار از یک سیستم قدرت و اطلاعات متغیرهای بهره‌برداری مربوطه را با توجه به بحرانیت خروج هر خط می‌توان به ترتیب به دو دسته بحرانی و غیر بحرانی تقسیم‌بندی کرد.

در واقع باتوجه به بحرانیت هر خط(#K)، به ازای هر مجموعه از متغیرهای بهره‌برداری $\{V^i\}$ یک ویژگی رفتاری A_k^i وجود دارد که بیانگر وضعیت بحرانی یا غیر بحرانی خط #K می‌باشد. بنابراین به ازای N نقاط کار، تعداد N مجموعه از متغیرهای بهره‌برداری وجود دارد که یک ماتریس داده بهمراه یک ماتریس شامل N ویژگی رفتاری را تشکیل می‌دهد. مجموعه متغیرهای بهره‌برداری شامل یک ماتریس داده با ابعاد N*m می‌باشد که m، تعداد کل متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت می‌باشد. تعداد N ویژگی رفتاری، یک بردار به ابعاد N*1 را تشکیل می‌دهد. هدف، انتخاب مجموعه متغیرهای بهره‌برداری برجسته $\{V_k\}$ با ابعاد D<<m که دارای همبستگی زیاد با ویژگی رفتاری A_k باشد. شکل (۲) رابطه ساختاری بین مجموعه‌هایی از متغیرهای بهره‌برداری با ویژگی رفتاری مربوطه را به ازای نقاط کاری مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۲): رابطه ساختاری بین مجموعه‌هایی از متغیرهای بهره‌برداری با ویژگی رفتاری مربوطه به ازای نقاط کاری مختلف

به منظور استفاده از روش تئوری اطلاعات جهت شناسایی متغیرهای بهره‌برداری برجسته مرتبط با خروج هر خط، ۸ روش ریاضی شناخته‌شده مبتنی بر تئوری اطلاعات ارائه شده است. نتایج هریک از روش‌ها بررسی و مقایسه می‌شود، روشی که دارای بیشترین دقت در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی می‌باشد انتخاب شده و متغیرهایی که بوسیله روش موردنظر شناسایی‌شده به عنوان متغیرهای بهره‌برداری برجسته انتخاب می‌شوند. در جدول (۱) فرمول ریاضی هر یک از ۸ روش ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، آنتروپی و اطلاعات متقابل میان متغیرهای بهره‌برداری و بردار ویژگی رفتاری به عنوان هسته محاسباتی روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (۱)، S زیر مجموعه‌ای از مجموعه داده X می‌باشد.

هر کدام از روش‌های انتخاب متغیر بهره‌برداری یک مجموعه از متغیرهای بهره‌برداری را انتخاب کرده و متغیرهای انتخاب‌شده جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی در اختیار معادله مرزی قرار می‌گیرند. لزوماً همه روش‌های پیشنهادی انتخاب متغیر، دارای خروجی یکسانی از نظر نوع متغیرهای انتخاب‌شده نمی‌باشند. ولی همواره تعداد متغیرهای انتخاب‌شده بوسیله هر یک از روش‌های انتخاب متغیر، جهت مقایسه نتیجه روش‌ها باهم، یکسان می‌باشد.

پس از بررسی گام اول روش پیشنهادی، ارزیابی بحرانیت برای هر خط (دارای پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط) بصورت برخط و با استفاده از معادله مرزی به عنوان گام دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم، متغیرهای بهره‌برداری شناسایی شده، جهت تشکیل معادله مرزی مربوطه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۳- معادله مرزی

با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده برای هر خط، نقطه‌کار سیستم قدرت قابل توصیف می‌باشد. بنابراین، جهت تشخیص بحرانی بودن نقطه کار همچنین تعیین مرز بحرانیت با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری، به یک معادله مرزی نیاز می‌باشد. با شناسایی مرز بحرانیت بوسیله معادله مرزی برای هر خط از سیستم قدرت و تغییر فضای بهره‌برداری، می‌توان نقطه‌کار سیستم قدرت را همواره در ناحیه غیربحرانی قرار داد و از رخداد حوادث پی‌درپی به ازای خروج خط جلوگیری کرد. معادله مرزی یک معادله ریاضی مبتنی بر متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده و روش LSE می‌باشد.

۱-۲-۳- ایجاد معادله مرزی با استفاده از RBF و تابع گوسی

معادله مرزی یک رابطه مبتنی بر متغیرهای بهره‌برداری می‌باشد که برای هر خط از سیستم قدرت تعریف می‌شود. هنگامیکه متغیرهای بهره‌برداری در رابطه معادله مرزی صدق کنند، نقطه‌کار سیستم قدرت در ناحیه غیربحرانی قرار داد. رابطه(۱۳) به عنوان یک معادله مرزی تعریف می‌شود. در رابطه(۱۳)، $\varphi_i(x)$ یک تابع غیر خطی از متغیرهای بهره‌برداری می‌باشد که به فاصله اقلیدسی وابسته است.

$$y(x) = \sum_{i=1}^{h} w_i \varphi_i(x) \qquad (۱۳)$$

در رابطه(۱۳) هدف اصلی، تقریب $\varphi_i(x)$ با استفاده از توابع پایه‌ای و تخمین ضرایب وزنی w_i می‌باشد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای تقریب یک تابع غیرخطی نظیر $\varphi_i(x)$ استفاده از ترکیب خطی توابع پایه‌ای می‌باشد. در انتخاب نوع این تابع پایه‌ای که به فاصله اقلیدسی هم بستگی دارد, $\varphi_i(x)$=f(|| x-c ||) , توابع مختلفی می‌تواند درنظر گرفته شود. رایج‌ترین تابع جهت تقریب تابع غیرخطی، تابع پایه‌ای گوسی با مرکز c_i و شعاع σ_j و متغیر ورودی x می‌باشد. تابع پایه‌ای گوسی در رابطه(۱۴) ارائه شده است:

$$\varphi_i(x) = exp^{-\left(\frac{\|x-c_j\|}{2\sigma_j}\right)^2} \qquad (۱۴)$$

در رابطه (۱۳)، ضرایب وزنی w_i با استفاده از روش LSE محاسبه می‌شود. روشLSE در برخی مسائل باتوجه به نوع پراکندگی و تفکیک‌پذیری داده‌ها قادر به محاسبه صحیح ضرایب وزنی نمی‌باشد و برای رفع این مسئله باید تفکیک‌پذیری داده‌ها را افزایش داد. به همین جهت با استفاده از ترکیب تابع پایه‌ای شعاعی و گوسی یک پیش‌پردازش روی مجموعه داده‌ها انجام می‌شود تا میزان تفکیک‌پذیری داده‌ها از هم بیشتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

شود. بطوریکه ابتدا از تابع پایه‌ای شعاعی جهت تفکیک هرچه بیشتر اطلاعات متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده در نقاط کاری مختلف استفاده می‌شود سپس نتیجه حاصل از اعمال تابع پایه‌ای شعاعی در اختیار تابع گوسی قرار می‌گیرد. بعداز انجام پیش‌پردازش، ضرایب w_i به کمک روش LSE حاصل می‌شود.

۲-۲-۳- الگوریتم شکل‌گیری RBF

باتوجه به اینکه شناسایی دقیق مرز بحرانیت سیستم قدرت به کمک متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده و با استفاده از روش‌های خطی بسیار دشوار است از RBF مبتنی بر روش LSE جهت تشکیل معادله مرزی استفاده می‌شود[۲۴]. از دیگر دلایل استفاده از RBF می‌توان به نرخ همگرایی مطلوب در دسته‌بندی داده‌ها و شناسایی مرز داده‌ها اشاره کرد. تعداد این توابع و همچنین پارامترهایی نظیر مرکز و شعاع تابع در دقت شناسایی مرز داده‌ها بسیار تاثیرگذار است. تابع پایه‌ای شعاعی به مقدار فاصله‌ی اقلیدسی r در رابطه(۱۵) نیز وابسته می‌باشد.

$$r = \|x - c\|; \qquad x, c \in R^n \qquad (۱۵)$$

c و x به‌ترتیب مرکز تابع و بردار ورودی است و نماد $\|\cdot\|$ بیانگر نُرم اقلیدسی است. برای هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده به ازای همه نقاط کاری بهره‌برداری، توابع RBF برطبق الگوریتم پیشنهادی ایجاد می‌شود. هر تابع RBF دارای یک شعاع و مرکز می‌باشد. بنابراین هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده به ازای همه نقاط کاری را می‌توان با چند تابع RBF دسته‌بندی کرد. برای هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده یک نمودار دوبعدی $x(x_1, x_2)$ شامل مقدار متغیر بهره‌برداری و سطح‌بار مربوطه به ازای همه نقاط‌کار بهره‌برداری ایجاد می‌شود.

فرض بر این است که با توجه N نقطه کار بهره برداری، هر متغیر بهره برداری شناسایی شده x دارای N مقدار در قالب بردار $x=\{x_1, x_2, \ldots, x_r, \ldots, x_N\}$ می‌باشد. تمام نقاط کاری بهره برداری ارائه شده را می توان به دو کلاس تقسیم کرد.

۱- کلاس بحرانی دارای پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی که به عنوان کلاس C با تعداد Nc نقطه کاری مشخص می‌شوند.

۲- کلاس غیربحرانی که دارای پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی نمی‌باشد و به عنوان کلاس NC با تعداد Nnc نقطه کاری مشخص می‌شوند.

برای هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده، روش RBF بصورت مراحل زیر قابل پیاده‌سازی می‌باشد.

۱- باتوجه به N نقطه‌کار بهره‌برداری و هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده $x(x_1, x_2)$، فاصله اقلیدسی متغیر بهره‌برداری x بین هر دو نقطه‌کار x_i و x_j بصورت رابطه(۱۶) محاسبه می‌شود و با ماتریس D نمایش داده می‌شود.

$$D = [D_{ij}]_{N*N} \overset{so}{\Rightarrow} D_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{(x_{1i} - x_{1j})^2 + (x_{2i} - x_{2j})^2}\,, x_i \in N\,, x_j \in N \qquad (۱۶)$$

۲- زیر ماتریس‌هایی از D بصورت رابطه(۱۷) درنظر گرفته می‌شود:

$$R_c = [R_{c_{ij}}]_{N_c*(N_{nc})} \overset{so}{\Rightarrow} R_{c_{ij}} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{(x_{1i} - x_{1j})^2 + (x_{2i} - x_{2j})^2}\,,\ x_i \in Class\ C\,,\ x_j \in Class\ NC$$

$$Q_c = [Q_{c_{ij}}]_{N_c*N_c} \overset{so}{\Rightarrow} Q_{c_{ij}} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{(x_{1i} - x_{1j})^2 + (x_{2i} - x_{2j})^2}\,,\ x_i, x_j \in Class\ C \qquad (۱۷)$$

R_cماتریس فاصله داده‌های کلاس C از کلاس NC می‌باشد. Q_c نیز ماتریس فاصله داده‌های کلاس C از یکدیگر است.

۳- در ابتدا تعداد توابع پایه‌ای شعاعی برابر با صفر درنظر گرفته می‌شود، n=0 .

۴- حداقل فاصله هر متغیر بهره‌برداری x_i که $x_i \in Class\ c$ ، از نقاط کار کلاس NC بوسیله ماتریس r_c محاسبه می‌شود:

$$r_c = [\min R_c]_{N_c*1} = [min\|x_i - x_j\|]_{N_c*1} = \begin{bmatrix} \min R_{1N_{nc}} \\ \vdots \\ \min R_{rN_{nc}} \\ \vdots \\ \min R_{N_cN_{nc}} \end{bmatrix}_{N_c*1}, \quad x_i \in Class\ C\,, x_j \in Class\ NC \qquad (۱۸)$$

۵- n=n+1 .

۶- بزرگترین مولفه بردار r_c را به عنوان شعاع تابع گوسی σ_n و نقطه کار متناظر با آن C_n به عنوان مرکز درنظر گرفته می‌شود:

$$\sigma_n = max_i(r_{ci}) = max_i(min_j\|x_i - x_j\|) = max_i \begin{bmatrix} \min R_{1N_{nc}} \\ \vdots \\ \min R_{rN_{nc}} \\ \vdots \\ \min R_{N_cN_{nc}} \end{bmatrix}_{N_c*1}$$

$$C_n = x_i,\ i = argmax(min_j\|x_i - x_j\|)\,,\ x_i \in Class\ c\,, x_j \in Class\ NC \qquad (۱۹)$$

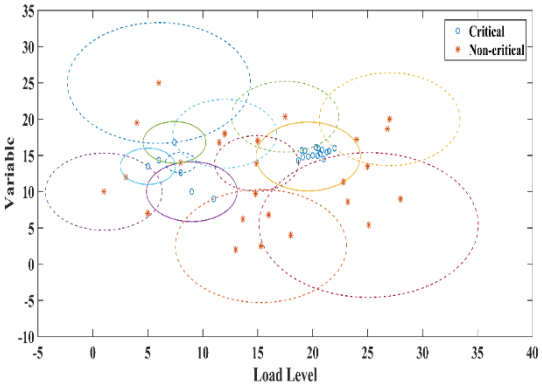
۷- سطر ماتریس Q_c که متناظر با x_i می‌باشد را درنظر گرفته، تمامی نقاط کار کلاس c که فاصله‌هایشان از مرکز کمتر از شعاع σ_n است، از سطر و ستون R_c و Qc حذف می‌شود.

۸- اگر نقاط کاری در بین نقاط کاری کلاس C وجود دارد که هیچ RBF آن‌ها را دربر نگرفته به گام ۵ برگشته. اگر تمام سناریوهای هر دو کلاس از سیستم قدرت پردازش شده‌اند برنامه متوقف شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

شکل(۳) عملکرد الگوریتم پیشنهادی را برای دسته‌بندی تعداد ۴۶ نقطه‌کار از یک متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل(۳) تمامی نقاط کاری تنها توسط ۱۳ تابع پایه‌ای شعاعی، با مراکز و شعاع‌های بدست آمده از الگوریتم در دو کلاس بحرانی و غیربحرانی قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، ۴۶ نقطه‌کار به ۱۳ تابع پایه‌ای شعاعی دسته‌بندی شده که شامل ۴ تابع پایه‌ای شعاعی با نقاط‌کاری غیربحرانی و ۹ تابع پایه‌ای شعاعی با نقاط‌کاری بحرانی می‌باشد. در شکل (۳) دایره‌های آبی نقاط کار بحرانی و ضربدر قرمز نقاط کار غیربحرانی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): دسته‌بندی ۴۶ نقطه‌کار با استفاده از الگوریتم تابع پایه‌ای شعاعی

برطبق الگوریتم پیشنهادی، به ازای تمام نقاط کار هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده، تعدادی تابع پایه‌ای شعاعی تشکیل می‌شوند. هر تابع پایه‌ای شعاعی تشکیل شده باتوجه به نقاط کاری که دربر می‌گیرند به دو دسته بحرانی و غیربحرانی دسته‌بندی می‌شوند.

بعداز دسته‌بندی نقاط کاری به ازای هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده با استفاده از الگوریتم تابع پایه‌ای شعاعی پیشنهادی، برای هر تابع پایه‌ای شعاعی یک مرکز و شعاع بدست می‌آید. توابع پایه‌ای شعاعی ایجادشده به ازای هر متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده بر اساس شعاع از بزرگ به کوچک مرتب شده و در تابع گوسی جایگذاری می‌شوند. بنابراین، تابع گوسی رابطه(۱۴) بصورت رابطه (۲۰) و (۲۱)توسعه می‌یابد. رابطه (۲۰) و (۲۱) به ازای تمام متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده $\{V\}_{1*D}$ ایجاد می‌شود.

$$\varphi_{1,j}^{i} = exp\left(-\left(\frac{\|[Var_1,Var_2,Var_3,\dots,Var_D]_i-[C_{var1},C_{var2},C_{var3},\dots,C_{varD}]_{1,j}\|}{2\times\sigma_j}\right)^2\right) \quad (۲۰)$$

$$\varphi_{2,j}^{i} = exp\left(-\left(\frac{\|[Var_1,Var_2,Var_3,\dots,Var_D]_i-[C_{var1},C_{var2},C_{var3},\dots,C_{varD}]_{2,j}\|}{2\times\sigma_j}\right)^2\right) \quad (۲۱)$$

در رابطه(۲۰) و (۲۱)، var_D مقدار متغیر بهره‌برداری شناسایی‌شده Dام در نقطه‌کار شماره i می‌باشد. $[C_{varD}]_{C,j}$ مرکز تابع پایه‌ای شعاعی jام از متغیر بهره‌برداری Dام می‌باشد که به ازای c=2 تابع پایه‌ای شعاعی متعلق به نقاط کار کلاس بحرانی و به ازای c=1 تابع پایه‌ای شعاعی متعلق به نقاط کار کلاس غیربحرانی می‌باشد. تابع پایه‌ای شعاعی jام، در واقع jامین تابع از میان توابع پایه‌ای شعاعی ایجاد شده برای هر متغیر بهره‌برداری شناسایی شده می‌باشد که براساس شعاع مرتب شده‌اند. σ_j بزرگترین شعاع تابع پایه‌ای شعاعی jام از بین توابع پایه‌ای ایجاد شده برای همه متغیرهای بهره‌برداری شناسایی شده می‌باشد$(\sigma_{j,var1},\sigma_{j,var2},\sigma_{j,var3},\dots,\sigma_{j,varD})$.

مجموعه‌ای از عملیات ریاضی که براساس توابع پایه‌ای شعاعی و گوسی روی متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده پیاده‌سازی شده است، روش پیش‌پردازشی LSE (PLSE)[۴] نامیده می‌شود. بعداز اعمال روش PLSE روی متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده و تقریب تابع $\varphi_i(x)$ ، ضرایب وزنی (w_i) با استفاده از روش LSE برطبق رابطه(۲۲) محاسبه می‌شود:

$$\varphi \times W = Y \overset{then}{\Longrightarrow} W = (\varphi' \times \varphi)^{-1} \times \varphi' \times Y \quad (۲۲)$$

با فرض اینکه تعداد N نقطه‌کار تعریف شده با شد و تعداد M تابع پایه‌ای شعاعی به ازای هر متغیر بهره‌برداری ایجاد شود، تعداد Mnc تابع پایه‌ای شعاعی شامل نقاط کاری غیربحرانی و تعداد Mc تابع پایه‌ای شعاعی شامل نقاط کاری بحرانی می‌با شد بطوریکه Mnc + Mc =M . بنابراین، توابع پایه‌ای شعاعی که شامل نقاط کار غیربحرانی می‌باشند، توابع پایه‌ای شعاعی غیربحرانی نامیده می شوند و توابع پایه‌ای شعاعی که شامل نقاط کار بحرانی می‌باشند، توابع پایه‌ای شعاعی بحرانی نامیده می شوند. باتوجه به N نقطه‌کار، Y یک ماتریس با ابعاد N*1 است که بصورت باینری (0/1) تعریف می شود. بطوریکه، ۱ بیانگر نقطه‌کار بحرانی و صفر بیانگر نقطه‌کار غیر بحرانی می‌باشد. φ یک ماتریس N*M و W ماتریس ضرایب وزنی با ابعاد M*1 می‌باشد. باتوجه به مقادیر بدست‌آمده برای ضرایب وزنی (W) و کمیت‌های مربوط به φ ، شامل شعاع و مرکز توابع پایه‌ای شعاعی که برای هر خط از سیستم قدرت ثابت و منحصر به فرد می‌باشند، یک معادله مرزی بصورت رابطه (۲۳) جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج هر خط حاصل می‌شود.

$$w_1\varphi_{1,1}^{S} + w_2\varphi_{1,2}^{S} + \dots + w_k\varphi_{1,\mathrm{Mnc}}^{S} + w_{(k+1)}\varphi_{2,1}^{S} + w_{(k+2)}\varphi_{2,2}^{S} + \dots + w_m\varphi_{2,\mathrm{Mc}}^{S} = y \quad (۲۳)$$

معادله مرزی رابطه (۲۳) براساس متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده برای هر خط از سیستم قدرت تشکیل می‌شود. در رابطه (۲۳)، $\varphi_{1,j}^{S}$ و $\varphi_{2,j}^{S}$ به ترتیب مقادیر تابع گوسی برطبق رابطه(۲۰) و رابطه (۲۱) می‌باشند که براساس اطلاعات نقاط کار و متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده محاسبه می‌شوند. جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی در هر نقطه‌کار، مقادیر متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده برای هر خط ابتدا به جای $[var_D]$ در روابط (۲۰) و (۲۱) قرار داده شده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

سپس نتایج حاصله، در معادله مرزی خط مربوطه جایگذاری می‌شوند. خروجی معادله مرزی (Y) مرتبط با هر خط بیانگر پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی در هر نقطه‌کار می‌باشد بطوریکه وقتی خروجی معادله مرزی برابر با یک می‌شود بیانگر بحرانی‌بودن نقطه‌کار و خروجی صفر معادله مرزی بیانگر غیر بحرانی بودن نقطه‌کار می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله، روش پیشنهادی روی تعدادی از خطوط سیستم قدرت استاندارد ۳۹ باس و ۱۱۸ باس پیاده‌سازی و نتایج حاصله بررسی می‌شود. شبکه ۳۹ باس دارای ۱۰ژنراتور ،۳۴خط و ۱۹ بار و شبکه ۱۱۸ باس دارای ۱۹ ژنراتور ،۱۷۷خط و ۹۱ بار می‌باشد. روش پیشنهادی جهت تعیین پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی به ازای خروج خط۱۷-۱۸ در شبکه ۳۹ باس و خروج خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۱۱۸ باس در اثر اتصال‌کوتاه سه‌فاز، مورد ارزیابی قرار گرفته است و برای هریک از خطوط، متغیرهای بهره‌برداری برجسته نیز شناسایی شده‌اند.

جدول (۲) انواع متغیرهای پایش‌پذیر سیستم قدرت را نشان می‌دهد. تعداد کل متغیرهای توصیف‌کننده نقطه‌کار و پایش‌پذیر سیستم قدرت ۳۹ باس برابر با ۳۸۳ و برای سیستم قدرت ۱۱۸ باس برابر با ۱۰۷۰ می‌باشد.

جدول (۲): متغیرهای بهره‌برداری قابل پایش سیستم قدرت

نام متغیر	متغیر	نام متغیر	متغیر
ولتاژ باس	B_V	توان اکتیو عبوری از خط	PLine
زاویه ولتاژ باس	θ_V	توان راکتیو عبوری از خط	QLine
زاویه رتور(تخمین زده‌شده)*	δ	بارگذاری خط	Line (%)
توان اکتیو تولیدی ژنراتور	PG	توان اکتیو بار	PLoad
توان راکتیو تولیدی ژنراتور	QG	توان راکتیو بار	QLoad
بارگذاری ژنراتور	Gen.(%)	بارگذاری ترانسفورماتور	Tr (%)

*زاویه باس متصل به ژنراتور

۴-۱- تهیه سناریوها

مدلسازی و شبیه‌سازی حوادث پی‌درپی با روش‌های مختلفی نظیر OPA، فرایند شاخه‌ای و میانی مرکزی و CASCADE انجام می‌شود(Guo, Zheng et al. 2017). در این مقاله، مدلسازی و شبیه‌سازی حوادث پی‌درپی مبتنی بر انجام محاسبات حوزه زمان می‌باشد. همچنین، مدل دینامیکی تجهیزات سیستم قدرت نقش موثری در فرایند شکل‌گیری حوادث پی‌درپی دارند. از اینرو مدلسازی دینامیکی سیستم قدرت جهت شبیه‌سازی حوادث پی‌درپی دارای اهمیت بسزایی می‌باشد. در سیستم قدرت مورد مطالعه، مدلسازی‌های مختلف نظیر مدل ژنراتور مرتبه ۶، مدلسازی محرک اولیه ژنراتورها، سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور، حفاظت O.S، حفاظت دیستانس خطوط، مدلسازی حفاظت فرکانس پایین ژنراتور، مدلسازی تپ‌چنجر ترانسفورماتورهای متصل به بار و رله‌های حذف‌بار فرکانسی و ولتاژی و اضافه‌جریان خطوط انجام شده است. معیار تشخیص رخداد حوادث‌پی‌درپی ناشی از خروج خط K# در نقطه‌کار L، خروج حداقل دو خط بعداز خروج خط K# بهمراه حذف‌بار به اندازه بیش‌از ۵٪ کل سطح بار در نقطه کار L درنظر گرفته می‌شود. نرم‌افزار مورداستفاده به‌منظور مدلسازی گسترده شبکه ۳۹ باسه و ۱۱۸ باسه، نرم‌افزار DIgSILENT Power Factory 15.1 می‌باشد. علاوه بر این، از نرم‌افزار MATLAB جهت پیاده‌سازی روش‌های انتخاب متغیرهای بهره‌برداری و معادله مرزی نیز استفاده می‌شود. بنابراین همواره بین نرم‌افزار DIgSILENT و MATLAB اطلاعات شبکه تبادل می‌شود.

باتوجه به مدلسازی‌های انجام‌شده، در شبکه ۳۹ باس و ۱۱۸ باس به ترتیب تعداد ۴۹۲ و ۴۰۰ نقطه‌کار بهره‌برداری برای ایجاد سناریوهای مختلف و بررسی عملکرد روش‌های پیشنهادی ایجاد شده است. این سناریوها باتوجه به بار پایه ۶۰۰۰مگاوات سیستم قدرت ۳۹ باس و ۵۰۰۰مگاوات سیستم قدرت ۱۱۸ باس، در ۱۱ سطح‌بار (۰.۷-۰.۷۵-۰.۸-۰.۸۵-۰.۹-۰.۹۵-۱-۱.۰۵-۱.۱-۱.۱۵-۱.۲) تشکیل شده است. به گونه‌ای که در هر سطح‌بار تعدادی نقطه‌کاری درنظر گرفته و نقاط کاری به نحوی ایجادشده که در سطوح بار و تولید مختلف به خصوص سطوح باری بالا، ژنراتورها و خطوط و ترانسفورماتورها در بیشترین حد بارگذاری بوده و همواره سیستم قدرت تحت تنش می‌باشد.

۴-۲- ارزیابی بحرانیت خط ۱۷-۱۸ در شبکه ۳۹ باس

تعداد ۴۹۲ نقطه‌کار به ازای خروج خط ۱۷-۱۸ ایجاد شده است و در هر نقطه کار تعداد ۳۸۳ متغیر بهره‌برداری قبل از خروج خط ۱۷-۱۸، نمونه‌برداری شده است. مشخصات نقاط کاری بهره‌برداری جهت استخراج اطلاعات بهره‌برداری در جدول (۳) ارائه شده است.

از بین ۴۹۲ نقطه‌کار بهره‌برداری ایجادشده، تعداد ۳۹۲ نقطه‌کار (۸۰٪ نقاط کار بهره‌برداری) بطور تصادفی به عنوان سناریوهای آموزش انتخاب شده و در اختیار هر یک از ۸ روش شناسایی متغیرهای بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در بین ۳۹۲ نقطه‌کار انتخابی، نسبت سناریوهای منجر به رخداد حوادث پی‌درپی و عدم رخداد حوادث پی‌درپی ۳۰ درصد به ۷۰درصد می‌باشد.

هریک از روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری براساس روابط ریاضی مبتنی بر اطلاعات متقابل و آنتروپی، یک مجموعه از متغیرهای بهره‌برداری را شناسایی و انتخاب می‌کند. سپس الگوریتم PLSE روی هر یک از مجموعه متغیرهای انتخاب‌شده پیاده‌سازی می‌شود. سرانجام، با استفاده از نتایج حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم PLSE یک معادله مرزی به ازای متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده توسط هر روش شناسایی متغیرهای بهره‌برداری ایجاد می‌شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

جدول (۳): مشخصات نقاط کاری متفاوت ایجاد شده به ازای خروج خط ۱۷-۱۸

خط	نوع خطا	تعداد نقاط کار	تعداد نقاط کار		تعداد نقاط کار	
			بحرانی	غیربحرانی	نقاط کار جهت آموزش	نقاط کار جهت تست
۱۷-۱۸	۳ φ	۴۹۲	۱۷۵	۳۱۷	۳۹۲	۱۰۰

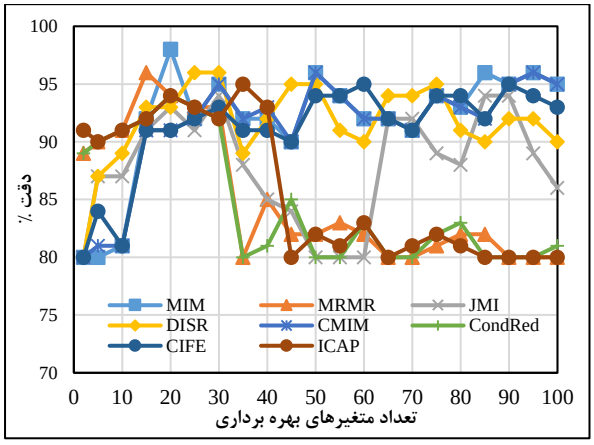
با استفاده از ۱۰۰ سناریوی تست، هر یک از معادله‌های مرزی ایجادشده به ازای متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده بوسیله هر یک از روش‌های انتخاب متغیر بهره‌برداری، مورد ارزیابی قرار گرفته و نهایتاً دقت نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی باهم مقایسه می‌شود. مجموعه متغیرهای بهره‌برداری که به ازای آن، معادله مرزی ایجادشده دارای بیشترین دقت در ارزیابی و اعتبارسنجی باشد به عنوان مجموعه متغیرهای بهره‌برداری برجسته انتخاب می‌شوند. همچنین، معادله مرزی با بیشترین دقت نیز به عنوان معادله تعیین‌کننده پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸ شناسایی می‌شود.

۱-۲-۴- شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته برای خط ۱۷-۱۸ در شبکه ۳۹ باس

روش‌های انتخاب متغیرهای بهره‌برداری مبتنی بر اطلاعات متقابل، همواره ترکیبات مختلفی از متغیرهای بهره‌برداری را در قالب مجموعه متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده در خروجی ارائه می‌دهند. جهت مقایسه بهتر نتایج روش‌های انتخاب متغیرهای بهره‌برداری، تعداد متغیرهای بهره‌برداری در هر ترکیب ارائه شده از بین مجموعه {۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰، ۷۵، ۸۰، ۸۵، ۹۰، ۹۵، ۱۰۰} انتخاب می‌شود و روش‌های پیشنهادی همواره ترکیبی از نوع متغیرهای بهره‌برداری با تعداد مشخصی را تعیین می‌کنند. شکل (۴)، عملکرد معادله‌های مرزی ایجادشده به ازای نتایج هر یک از روش‌های انتخاب متغیرهای بهره‌برداری جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی را نشان می‌دهد.

در شکل (۴)، به ازای هر روش شناسایی متغیرهای بهره‌برداری یک نمودار تغییرات در دقت ارزیابی ارائه شده است. باتوجه به نمودارهای شکل (۴)، در هر روش برای هر تعداد از ترکیب‌های متغیرهای بهره‌برداری یک معادله مرزی ایجاد شده است. درواقع، شکل (۴) نتایج ارزیابی معادلات مرزی که بوسیله مجموعه‌های مختلف از متغیرهای بهره‌برداری ایجادشده را نشان می‌دهد.

معادله مرزی ایجادشده، بوسیله سناریوهای تست مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت ارزیابی تمام معادلات مرزی در قالب شکل (۴) ارائه شده است. براساس شکل (۴) می‌توان معادلات مرزی با بیشترین دقت و کمترین تعداد متغیرهای بهره‌برداری را شناسایی کرد. همچنین روش شناسایی متغیرهای بهره‌برداری را که به ازای آن بیشترین دقت در ارزیابی حاصل‌شده را معرفی کرد. جدول (۴)، بهترین عملکرد معادلات مرزی ایجادشده در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی را نشان می‌دهد. در جدول (۴) به ازای هر روش، نتیجه معادلات مرزی دارای بیشترین دقت ارزیابی و کمترین تعداد متغیرهای بهره‌برداری به تفکیک بیان شده است. اعداد داخل پرانتز تعداد متغیرهای انتخاب‌شده بوسیله روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری می‌باشند.



شکل (۴): ارزیابی معادلات مرزی ایجادشده ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸

جدول (۴): بهترین عملکرد روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸

روش	دقت معادله مرزی
ICap	۹۴٪ (۲۵)
CIFE	۹۰٪ (۴۵)
Condred	۹۳٪ (۳۰)
CMIM	۹۳٪ (۵۰)
DISR	۹۵٪ (۶۰)
JMI	۹۶٪ (۵۰)
MRMR	۹۴٪ (۳۰)
MIM	۹۸٪ (۲۰)

باتوجه به نتایج جدول (۴)، مشاهده می‌شود که اعتبارسنجی بوسیله معادله مرزی که از مجموعه متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده روش MIM استفاده کرده است نسبت به روش‌های دیگر نتیجه بهتری را در خروجی ارائه می‌کند. معادله‌مرزی تشکیل‌شده براساس متغیرهای بهره‌برداری شناسایی شده بوسیله روش MIM با کمترین تعداد متغیر بهره‌برداری و بیشترین مقدار دقت در ارزیابی، بهترین عملکرد را داشته است. متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده بوسیله روش MIM بر طبق جدول (۵) می‌باشد.

بنابراین متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده بوسیله روش MIM و بر طبق جدول (۵) که معادله مرزی ایجادشده بوسیله آن‌ها دارای بیشترین دقت در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی می‌باشند را متغیرهای بهره‌برداری برجسته می‌نامند. باتوجه به نتایج بدست آمده، PSCC قادر خواهد بود تا با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری جدول (۵) و معادله مرزی ایجادشده بوسیله آن‌ها، پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

به ازای خروج خط ۱۷-۱۸ را در هر نقطه‌کار از سیستم با دقت حدود ٪۹۸ تعیین کند.

جدول (۵): متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده بوسیله روش MIM ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸ در شبکه ۳۹ باس

شماره	متغیر بهره‌برداری	شماره	متغیر بهره‌برداری
۱	Qline_19-16	۱۱	Qline_14-13
۲	QG_30	۱۲	Qline_23-22
۳	Qline_26-25	۱۳	QG_37
۴	Qline_3-2	۱۴	QG_32
۵	Qline_13-10	۱۵	Line_3-2 (%)
۶	Qline_24-23	۱۶	Pline_23-22
۷	Qline_11-10	۱۷	Qline_8-7
۸	Qline_5-4	۱۸	Pline_24-16
۹	QG_38	۱۹	QG_31
۱۰	Qline_29-28	۲۰	Pline_27-17

۲-۲-۴- معادله مرزی برای خط ۱۷-۱۸ در شبکه ۳۹ باس

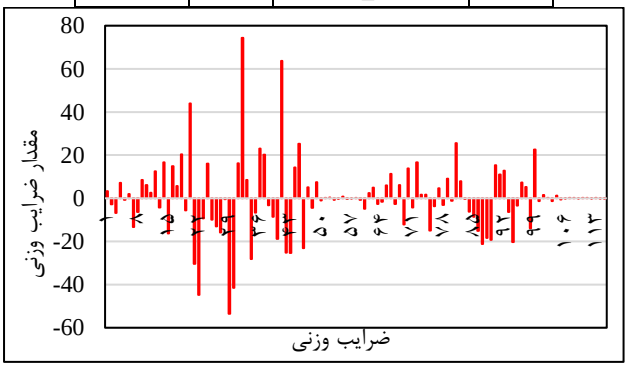
همانطور که پیشتر گفته شد متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده توسط هریک از روش‌های انتخاب متغیرهای بهره‌برداری جهت تشکیل معادله مرزی در اختیار روش PLSE قرار می‌گیرند. با استفاده از الگوریتم تابع پایه‌ای شعاعی که پایه و اساس روش PLSE می‌باشد، نقاط کاری به ازای هر متغیر بهره‌برداری به دو دسته بحرانی و غیربحرانی - شکل (۳) – تقسیم‌بندی می‌شوند. به عبارت دیگر، تمام نقاط کار به ازای هر متغیر بهره‌برداری به تعدادی تابع پایه‌ای شعاعی تقسیم می‌شود. جدول (۶)، تعداد توابع پایه‌ای شعاعی بحرانی و غیربحرانی که برای هر متغیر بهره-برداری برجسته ایجاد شده را ارائه می‌دهد.

باتوجه به جدول (۶)، نقاط کار به ازای هر متغیر بهره‌برداری برجسته به دو دسته تابع پایه‌ای شعاعی تقسیم‌بندی شده است. باتوجه به جدول (۶) از میان ۴۹۲ نقطه‌کار، ۳۱۷ نقطه‌کار غیربحرانی و ۱۷۵ نقطه-کار بحرانی می‌باشد، حداکثر تعداد تابع پایه‌ای شعاعی بحرانی برابر با ۵۷ و حداکثر تعداد تابع پایه‌ای شعاعی غیربحرانی برابر با ۵۶ می‌باشد. در مجموع به ازای متغیرهای بهره‌برداری برجسته، حداکثر تعداد ۱۱۳ تابع پایه‌ای شعاعی حاصل شده است. بنابراین با استفاده از روش PLSE تعداد ۴۹۲ نقطه‌کار به ۱۱۳ کاهش یافته است به عبارتی، نقاط کاری در قالب تعدادی توابع پایه‌ای شعاعی با هم تجمیع شده‌اند.

با استفاده از مرکز و شعاع هر یک از توابع پایه‌ای شعاعی حاصله برای هر متغیر بهره‌برداری برجسته و رابطه (۲۰) و (۲۱)، مقدار توابع گوسی محاسبه می‌شود. سپس ضرایب وزنی معادله مرزی براساس رابطه (۲۳) و با استفاده از مقادیر توابع گوسی محاسبه شده، بدست می‌آید. در شکل (۵) مقدار ضرایب وزنی معادله مرزی ایجادشده برای خط ۱۷-۱۸ ارائه شده است.

جدول (۶): تعداد RBF ایجادشده به ازای هر متغیر بهره‌برداری برجسته ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸ در شبکه ۳۹ باس

شماره	متغیرهای بهره-برداری برجسته	تعداد RBF بحرانی	تعداد RBF غیربحرانی
۱	Qline_19-16	۵۷	۵۰
۲	QG_30	۴۵	۳۸
۳	Qline_26-25	۵۱	۴۱
۴	Qline_3-2	۵۷	۴۷
۵	Qline_13-10	۵۳	۵۲
۶	Qline_24-23	۵۵	۴۹
۷	Qline_11-10	۴۷	۵۶
۸	Qline_5-4	۵۳	۴۳
۹	QG_38	۵۴	۴۴
۱۰	Qline_29-28	۵۰	۴۹
۱۱	Qline_14-13	۵۵	۴۸
۱۲	Qline_23-22	۵۲	۴۹
۱۳	QG_37	۵۸	۵۳
۱۴	QG_32	۵۳	۴۹
۱۵	Line_3-2 (%)	۴۲	۴۱
۱۶	Pline_23-22	۵۸	۵۰
۱۷	Qline_8-7	۵۶	۵۵
۱۸	Pline_24-16	۵۰	۴۷
۱۹	QG_31	۵۳	۵۰
۲۰	Pline_27-17	۴۹	۴۲



شکل (۵): مقدار ضرایب وزنی معادله مرزی ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸

برطبق مقادیر بدست آمده برای ضرایب وزنی w می‌توان معادله‌ای در قالب رابطه(۲۳) برای ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸ ارائه کرد. جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط ۱۷-۱۸ کافیست مقادیر متغیرهای بهره-برداری برجسته در جدول (۵) را برطبق فلوچارت شکل (۱) در هر نقطه-کاری از سیستم قدرت توسط PSCC اخذ شود. سپس با استفاده از روش PLSE و ضرایب وزنی معادله مرزی ایجادشده برای خط ۱۷-۱۸ که در PSCC دردسترس می‌باشد، پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی پیش از خروج خط ۱۷-۱۸، دائماً ارزیابی شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

۳-۴- ارزیابی بحرانیت خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۱۱۸ باس

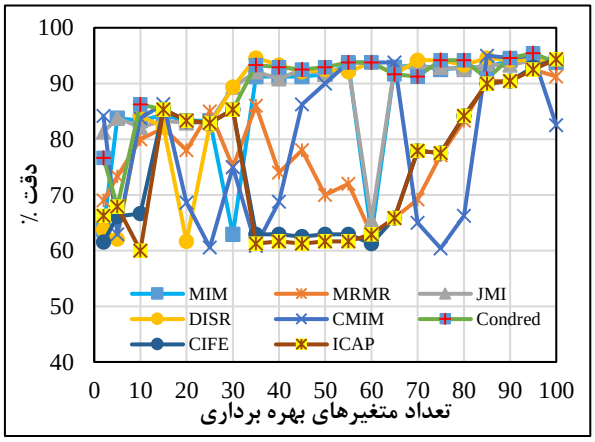
تعداد ۴۰۰ نقطه‌کار به ازای خروج خط ۳۰-۳۸ ایجاد شده است و در هر نقطه کار تعداد ۱۰۷۰ متغیر بهره‌برداری قبل از خروج خط ۳۰-۳۸، نمونه‌برداری شده است. مشخصات نقاط کاری بهره‌برداری جهت استخراج اطلاعات بهره‌برداری در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷) مشخصات نقاط کاری متفاوت ایجاد شده به ازای خروج خط۳۰-۳۸ در شبکه ۳۹ باس

خط	نوع خطا	تعداد نقاط کار	تعداد نقاط کار		تعداد نقاط کار	
			بحرانی	غیربحرانی	نقاط کار جهت آموزش	نقاط کار جهت تست
۳۰-۳۸	۳ φ	۴۰۰	۸۵	۳۱۵	۳۰۰	۱۰۰

۱-۳-۴- شناسایی و انتخاب متغیرهای بهره‌برداری برجسته برای خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۱۱۸ باس

شکل (۶)، عملکرد معادله‌های مرزی ایجادشده به ازای نتایج هر یک از روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی را نشان می‌دهد. باتوجه به نمودارهای شکل (۶)، در هر روش برای هر تعداد ترکیب از متغیرهای بهره‌برداری یک معادله مرزی ایجاد شده است. براساس شکل (۶) می‌توان معادلات مرزی با بیشترین دقت و کمترین تعداد متغیرهای بهره‌برداری را شناسایی کرد. همچنین روش شناسایی متغیرهای بهره‌برداری را که به ازای آن بیشترین دقت در ارزیابی حاصل‌شده را معرفی کرد.



شکل (۶): ارزیابی معادلات مرزی ایجادشده ناشی از خروج خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۳۹ باس

جدول(۸)، بهترین عملکرد معادلات مرزی ایجادشده در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی را نشان می‌دهد. در جدول(۸) به ازای هر روش، نتیجه معادلات مرزی دارای بیشترین دقت ارزیابی و کمترین تعداد متغیرهای بهره‌برداری به تفکیک بیان شده است. اعداد داخل پرانتز تعداد متغیرهای انتخاب‌شده بوسیله روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری می‌باشند.

جدول (۸): بهترین عملکرد روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری ناشی از خروج خط ۳۰-۳۸

روش	دقت معادله مرزی
Icap	(۱۰۰)۹۴٪
CIFE	(۱۰۰)۹۴٪
Condred	(۹۵)۹۵٪
CMIM	(۸۵)۹۵٪
DISR	(۳۵)۹۴٪
JMI	(۱۰۰)۹۴٪
MRMR	(۹۵)۹۲٪
MIM	(۹۰)۹۴٪

باتوجه به نتایج جدول(۸)، مشاهده می‌شود که اعتبارسنجی بوسیله معادله مرزی که از مجموعه متغیرهای بهره‌برداری شناسایی‌شده روش DISR استفاده کرده است نسبت به روش‌های دیگر نتیجه بهتری را در خروجی ارائه می‌کند. باتوجه به نتایج حاصله از جدول(۸)، معادله مرزی تشکیل‌شده براساس متغیرهای بهره‌برداری شناسایی شده بوسیله روش DISR با کمترین تعداد متغیر بهره‌برداری و بیشترین مقدار دقت در ارزیابی، بهترین عملکرد را داشته است. متغیرهای بهره‌برداری انتخاب-شده بوسیله روش DISR بر طبق جدول (۹) می‌باشد.

بنابراین متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده بوسیله روش DISR و بر طبق جدول (۹) که معادله مرزی ایجادشده بوسیله آن‌ها دارای بیشترین دقت در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی می‌باشند را متغیرهای بهره‌برداری برجسته می‌نامند. باتوجه به نتایج بدست آمده، PSCC قادر خواهد بود تا با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری جدول (۹) و معادله مرزی ایجادشده بوسیله آن‌ها، پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی به ازای خروج خط ۳۰-۳۸ را در هر نقطه‌کار از سیستم با دقت حدود ۹۶٪ تعیین کند.

۲-۳-۴- معادله مرزی برای خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۱۱۸ باس

متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده توسط هریک از روش‌های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری جهت تشکیل معادله مرزی در اختیار روش PLSE قرار می‌گیرند. با استفاده از الگوریتم تابع پایه‌ای شعاعی که پایه و اساس روش PLSE می‌باشد، هر متغیر بهره‌برداری به دو دسته تابع شعاعی بحرانی و غیربحرانی – شکل (۳) – تقسیم‌بندی می‌شوند. به عبارت دیگر، تمام نقاط کار به ازای هر متغیر بهره‌برداری به تعدادی تابع پایه‌ای شعاعی دسته‌بندی می‌شود.

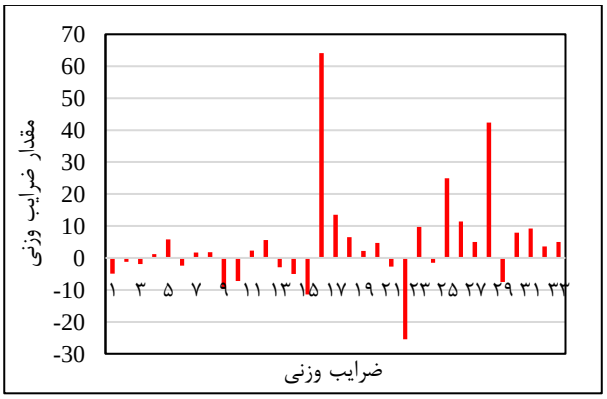
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

جدول (۹): متغیرهای بهره‌برداری انتخاب‌شده بوسیله روش DISR ناشی از خروج خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۱۱۸ باس

شماره	متغیر بهره‌برداری	شماره	متغیر بهره‌برداری
۱	B97_V	۱۹	PG_26
۲	B108_V	۲۰	PG_66
۳	B30_V	۲۱	Line_89-90 (%)
۴	B50_V	۲۲	Gen.G10(%)
۵	PG_59	۲۳	Pline_83-85
۶	B38_V	۲۴	Pline_48-49
۷	B17_V	۲۵	Line_9-10 (%)
۸	PG_61	۲۶	Tr_10-119 (%)
۹	PG_80	۲۷	Tr_111-137 (%)
۱۰	PG_89	۲۸	Tr_66-130 (%)
۱۱	Pline_8-9	۲۹	Pline_110-111
۱۲	Qline_23-32	۳۰	Qline_8-9
۱۳	PG_10	۳۱	Tr_89-134 (%)
۱۴	PG_100	۳۲	PG_65
۱۵	PG_103	۳۳	Gen.89(%)
۱۶	PG_111	۳۴	Line_4-11 (%)
۱۷	PG_12	۳۵	PG_46
۱۸	PG_25		

باتوجه متغیرهای بهره‌برداری برجسته شناسایی‌شده برای خط ۳۰-۳۸ و پیاده‌سازی الگوریتم تابع شعاعی روی آن‌ها، حداکثر تعداد تابع پایه‌ای شعاعی بحرانی برابر با ۱۱ و حداکثر تعداد تابع پایه‌ای شعاعی غیربحرانی برابر با ۲۲ می‌باشد. در مجموع به ازای متغیرهای بهره‌برداری برجسته، حداکثر تعداد ۳۳ تابع پایه‌ای شعاعی حاصل شده است. بنابراین با استفاده از روش PLSE تعداد ۴۰۰ نقطه‌کار به ۳۳ کاهش یافته است به عبارتی، نقاط کاری در قالب تعدادی توابع پایه‌ای شعاعی با هم تجمیع شده‌اند. ضرایب وزنی معادله مرزی براساس رابطه(۲۳) و با استفاده از مقادیر توابع گوسی محاسبه شده، بدست می‌آید. در شکل (۷) مقدار ضرایب وزنی معادله مرزی ایجادشده برای خط ۳۰-۳۸ ارائه شده است.



شکل (۷): مقدار ضرایب وزنی معادله مرزی ناشی از خروج خط ۳۰-۳۸ در شبکه ۱۱۸ باس

برطبق مقادیر بدست آمده برای ضرایب وزنی w می‌توان معادله‌ای در قالب رابطه(۲۳) برای ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی به ازای خروج خط ۳۰-۳۸ ارائه کرد. جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی-درپی ناشی از خروج خط ۳۰-۳۸ کافیست مقادیر متغیرهای بهره‌برداری برجسته در جدول (۹) را برطبق فلوچارت شکل (۱) در هر نقطه‌کاری از سیستم قدرت توسط PSCC اخذ شود. سپس با استفاده از روش PLSE و ضرایب وزنی معادله مرزی ایجادشده برای خط ۳۰-۳۸ که در PSCC دردسترس می‌باشد، پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی پیش‌از خروج خط ۳۰-۳۸ ، دائماً ارزیابی شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رویکردی جدید در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی در اثر خروج خط در سیستم قدرت با استفاده از متغیرهای بهره‌برداری برجسته و معادله مرزی پیشنهاد شده‌است. جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی ناشی از خروج خط از اطلاعات متغیرهای بهره‌برداری برجسته، قبل از خروج خط استفاده می‌شود. با توجه به پایش متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت و تجزیه و تحلیل میزان اطلاعات آن‌ها با استفاده از نظریه اطلاعات متقابل و روش‌های مبتنی بر آن شامل MIM، MRMR ، JMI ، DISR ، CMIM ، Condred ، CIFE ، ICap می‌توان به ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی با تعداد محدودتر و موثرتری از متغیرهای بهره‌برداری سیستم قدرت پرداخت.

در این مقاله، معادله مرزی رخداد حوادث پی‌درپی به ازای نقاط کاری مختلف سیستم قدرت و متغیرهای بهره‌برداری برجسته و توابع پایه‌ای شعاعی و گوسی بدست آمده‌است. معادله مرزی حاصله، تابعی غیر خطی از متغیرهای بهره‌برداری برجسته سیستم قدرت می‌باشد و با توجه به نتایج بدست آمده از قابلیت بالایی در ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی برخوردار است. متغیرهای بهره‌برداری برجسته و معادله‌مرزی مربوط به هر خط جهت ارزیابی پتانسیل رخداد حوادث پی‌درپی در اختیار PSCC قرار می‌گیرد. صدق نمودن متغیرهای بهره‌برداری به ازای هر نقطه کار سیستم قدرت در معادله مرزی بیانگر بهره‌برداری ایمن و بدون رخداد حوادث پی‌درپی در سیستم قدرت می‌باشد. روش ارائه‌شده در مقاله فقط برای تعدادی از خطوط انتقال بررسی شده و قابل تعمیم به تمام خطوط نیز می‌باشد. باتوجه به نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی روی دو شبکه ۳۹ و ۱۱۸ باس، روش پیشنهادی مستقل از توپولوژی و وسعت سیستم قدرت می‌باشد و برای هر شبکه با هر تعداد باس و متغیر بهره‌برداری قابل پیاده‌سازی است.

با توجه به اینکه به ازای خروج هر خط، معادله مرزی مربوط به آن خط بوسیله طرح پیشنهادی قابل استحصال بوده، می‌توان از این رویکرد در اقدامات کنترل پیشگرانه استفاده نمود. در این حالت PSCC در هر نقطه‌کاری با در اختیار داشتن معادله مرزی متناظر با هر خط، می‌تواند نقطه کار شبکه را از وضعیت بحرانی به وضعیت غیربحرانی انتقال دهد تا سیستم قدرت همواره در ناحیه ایمن و بدون رخداد حوادث پی‌درپی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

جدول (۱): معرفی روابط حاکم بر روش های شناسایی متغیرهای بهره‌برداری (Vergara, Estévez 2014)

شماره رابطه	رابطه ریاضی روش	نوع روش
(۵)	$\arg max_{x_k \in X} I(X_k;Y) = H(X_k) + H(Y) - H(X_k,Y)$	MIM[5]
(۶)	$\arg max_{x_k \in X} [I(X_k;Y) - \left(\frac{1}{\lvert S \rvert}\right) \sum_{x_i \in S} I(X_k;X_j)]$	MRMR[6]
(۷)	$J_{jmi}(X_k) = \sum_{x_i \in S} I(X_k,X_j;Y) =$ $I(X_k;Y) - \frac{1}{\lvert S \rvert} \sum_{x_j \in S} [I(X_k;X_j) - I(X_k;X_j \lvert Y)]$	JMI[7]
(۸)	$\arg max\, J_{DISR}(X_k) = \sum_{x_k \in S} \frac{I(X_k,X_j;Y)}{H(X_k,X_j;Y)}$	DISR[8]
(۹)	$\arg max_{x_k \in X} (min_{x_k \in S} \left(I(X_k;Y) - I(X_k;X_j) + I(X_k;X_j \lvert Y)\right))$	CMIM[9]
(۱۰)	$I(X_k;Y \lvert S) = I(X_k;Y) + \sum_{x_i \in S} I(X_k;S \lvert Y)$	CondRed[10]
(۱۱)	$I(X_k;Y \lvert S) = I(X_k;Y) - \sum_{x_i \in S} I(X_k;S) + \sum_{x_i \in S} I(X_k;S \lvert Y)$	CIFE[11]
(۱۲)	$\arg max\ J_{icap}(X_k) = I(X_k;Y) + \sum_{x_i \in S} \min\{0, I(X_k;Y;X_j)\}$	ICap[12]

مراجع

Enhance Convolutional Neural Network.", Springer,**927(2).**

Saunders, C.S., Alamuti, M.M., Pisica, I. et al. (2019)." Feature Extraction-Based Real-Time Transient Stability Analysis." Technol Econ Smart Grids Sustain Energy **4(15).**

Chang, Hsueh-Hsien (2017). "Statistical Feature Extraction for Fault Locations in Nonintrusive Fault Detection of Low Voltage Distribution Systems.", Energies **10(5)**: 611-618.

D.S.Javan , H.R. Mashhadi, A.Armin (2017) " Information extraction from effective descriptor variables in reconstruction of power system security region by considering correlation between loads.", International Transaction Electrical Energy System. John Wiley & Sons **27(11)**:1-23.

H.Liu, J.Sun, L. Liu, H.Zhang (2009). "Feature selection with dynamic mutual information.", Pattern Recognition(Elsevier), **42(7)**: 1330-1339.

B.Remeseiro, V.Bolon-Canedo (2019)." A review of feature selection methods in medical applications.", Computers in Biology and Medicine(Elsevier) **112(3)**:1-9.

Meyer, P. E., Schretter, C., & Bontempi, G. (2008)," Information-theoretic feature selection in microarray data using variable complementarity." IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing **2(3)**: 261–274.

Henry.S, Pompee.J, Devatine.L, Bulot.M, Bell.K (2004)."New TrendsFor The Assessment of Power System Security Under Uncertainty." IEEE Power Systems Conference and Exposition **3**:1380–1385.

Ajendra Dwivedi (2011). "Vulnerability analysis and fault location in power systems using complex network theory," PhD thesis, College of Science, Engineering and Health RMIT University.

Zhou Liun(2013). "Multi-Agent System Based Special Protection and Emergency Control Scheme against Cascading Events in Power System." PhD thesis, The Faculty of Engineering, Science and Medicine, Aalborg University.

H.H Alhelou, and et al (2019). "A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges. "Energies, **12**, 682.

A Abedi, L Gaudard, F Romerio (2019). "Review of major approaches to analyze vulnerability in power system Reliability." Engineering & System Safety, Elsevier, **183:**153-172.

R.Casimir, E.Boutleux, G.Clerc, A.Yahoui (2006). "The use of features selection and nearest neighbors rule for faults diagnostic in induction motors." Engineering Applications of Artificial Intelligence, **19(2)**: 169-177.

Hafiz Muhammad Faisal,Nadeem Javaid et al. (2019). "Prediction of Building Energy Consumption Using

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]

M.Rouhani, D.S. Javan (2016). "Two fast and accurate heuristic RBF learning rules for data classification." Neural Networks (Elsevier) **75(2)**: 150–161.
Vergara, J.R., Estévez, P.A. (2014) "A review of feature selection methods based on mutual information." Neural Computer & Application(Elsevier) **24**: 175–186.
Hengdao Guo, Ciyan Zheng, Herbert Ho-Ching Iu, Tyrone Fernando (2017)" A critical review of cascading failure analysis and modeling of power system." Renewable and Sustainable Energy Reviews **80**: 9-22.

زیرنویس‌ها

[1] Power System Control Center
[2] Radial Basic Function
[3] Least Square Error
[4] Pre-process Least Square Error
[5] Mutual Information Maximization
[6] Maximum Relevance Minimum Redundancy
[7] Joint Mutual Information
[8] Double Input Symmetrical Relevance
[9] Conditional Mutual Information Maximization
[10] Conditional Redundancy
[11] Conditional Infomax Feature Extraction
[12] Interaction Capping

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-02]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1400.10.2.1.8]