

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology Vol. 16/ No. 62/ Summer 2025 P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://sanad.iau.ir/journal/jipet

Doi: 10.71666/jipet.2024.998788

A Hybrid Method for Optimal Allocation of Shunt Compensators to Mitigate Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR)

Maryam Bahramgiri¹, *Ph.D. Student*, Mehdi Ehsan², *Professor*, Babak Mozafari¹, *Associate Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran maryam.bahramgiri@srbiau.ac.ir, mozafari@srbiau.ac.ir
² Department of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran ehsan@sharif.edu

Abstract

The widespread use of residential air conditioning (RAC) systems in modern power systems has resulted in an increase in the phenomenon of fault-induced delayed voltage recovery (FIDVR). This phenomenon leads to short-term voltage instability and sometimes even voltage collapse. To address this issue, parallel FACTS devices such as SVC and STATCOM can be used. In this paper, a datadriven hybrid approach based on volt-ampere reactive (VAR) placement is proposed to reduce FIDVR events. This approach uses a new and efficient index for voltage evaluation after faults and determines the optimal location and size of VAR resources considering economic and technical constraints. A multi-layer perceptron (MLP) neural network is used to solve the multi-dimensional mapping problem considering reactive power injections into buses. Then, a multi-objective optimization is proposed to identify the optimal size of VAR resources to address short-term voltage instability and prevent FIDVR events using intelligent optimization methods. First, optimization is performed for the singleobjective function with predefined weights by the PSO algorithm, and then the results are compared with the artificial bee colony (ABC) algorithm, ant colony optimization for continuous domains (ACO_R) , and differential evolution (DE) algorithms. Additionally, this paper focuses on identifying a Pareto front of non-dominated solutions using multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). The proposed approach is tested on the 39-bus IEEE system considering a time-varying dynamic model for residential air conditioning loads. The results show that this approach is highly effective in solving reactive power optimization problems and reducing FIDVR effects.

Keywords: Composite load model, fault-induced delayed voltage recovery, multi-objective particle swarm optimization, residential air conditioners, volt/ampere reactive.

Received: 2 February 2024 Revised: 25 May 2024 Accepted: 28 May 2024

Corresponding Author: Dr. Mehdi Ehsan

Citation: M. Bahramgiri, M. Ehsan, B. Mozaffari, "A Hybrid Method for Optimal Allocation of Shunt Compensators to Mitigate Fault Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR)", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 62, pp. 201-221, June 2025 (in Persian)

Doi: 10.71666/jipet.2024.998788

مقاله پژوهشی

یک روش ترکیبی برای جایابی بهینه جبرانسازهای شنت برای کاهش پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا (FIDVR)

مریم بهرامگیری'، دانشجوی دکتری، مهدی احسان۲، استاد، سید بابک مظفری'، دانشیار

۱ - دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر-واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،تهران، ایران maryam.bahramgiri@srbiau.ac.ir, mozafari@srbiau.ac.ir ۲-دانشکده مهندسی برق-دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران ehsan@sharif.edu

چکیده: استفاده گسترده از سیستمهای تهویه مطبوع خانگی (RAC) در سیستمهای قدرت مدرن باعث افزایش پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا (FIDVR) شدهاست. وقوع این پدیده منجر به ناپایداری ولتاژ کوتاهمدت شده و گاهی نیز به فروپاشی ولتاژ می انجامد. برای مقابله با این رویداد، جبران سازهای موازی مانند SVC و STATCOM می توانند مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، یک روش ترکیبی دادهمحور بر اساس جایابی منابع ولت-آمپر راکتیو (VAR) برای کاهش رویداد در نظر گرفتن محدودیتهای این روش از شاخص جدید و کارآمدی برای ارزیابی ولتاژ پس از خطا استفاده کرده و با پر سپترون (MLP) پیشنهاد شده است. این روش از شاخص جدید و کارآمدی برای ارزیابی ولتاژ پس از خطا استفاده کرده و با پر سپترون (MLP) برای حل مسئله نگاشت چند بعدی با در نظر گرفتن توانهای راکتیو تزریق شده به باسها استفاده شده است. سپس، بهینه سازی چند هدفه برای شناسایی اندازه بهینه منابع برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاهمدت و نیز جلوگیری از پر سپترون (MLP) برای حل مسئله نگاشت چند بعدی با در نظر گرفتن توانهای راکتیو تزریق شده به باسها استفاده شده است. سپس، بهینه سازی چند هدفه برای شناسایی اندازه بهینه منابع برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاهمدت و نیز جلوگیری از رویدادهای FIDVR با روشهای بهینه سازی هوشمند پیشنهاد شده است. ابتدا بهینه سازی برای تابع تکهدفه با وزنهای رویدادهای برای حوزههای پیوسته (ACO) و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) مقابسه شده است. همچنین این مقاله به شناسایی تعیین شده بر روی سیستم (MOPS) می ای فرای تجمیع شده دینامیکی موتورهای سیستم تهویه مطبوع آزمایش شده است. نایز شنه بر روی سیستم ۹۳ باس IEEE با استفاده از بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه (OPO) می پردازد. روش پیشنهاد شده بر روی سیستم ۹۳ باس IEEE با مدل بار تجمیع شده دینامیکی موتورهای سیستم تهویه مطبوع آزمایش شده است. نازی برای تاین شده سی نتایج

کلمات کلیدی: الگوریتم بهینهسازی ازدحام ذرات چندهدفه، بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا، سیستمهای تهویه مطبوع خانگی، مدل بار مرکب، ولت/آمپر راکتیو.

> تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

نام نویسندهی مسئول: دکتر مهدی احسان **نشانی نویسندهی مسئول**: تهران- خیابان آزادی- دانشگاه صنعتی شریف- دانشکده مهندسی برق- گروه قدرت

۱– مقدمه

شبکه برق مدرن یک سیستم پیچیده و پویا است که برای ارائه توان قابل اطمینان و کارآمد به مصرف کنندگان طرا حی شده است. با این حال، از اختلالاتی که یکی از آنها پدیده بازیابی ول تاژ تاخیری نا شی از خطا⁽ (FIDVR) است، مصون نیست. FIDVR پدیده ای است که به دلیل نفوذ گسترده سیستمهای تهویه مطبوع خانگی⁷ (RACs) در سیستمهای قدرت بهوقوع می پیوندد. این سیستمها دارای موتورهای القایی تکفاز هستند که اینرسی پایین و گشتاور ثابت دارند و در اثر افت ول تاژ نا شی می پیوندد. این سیستمها دارای موتورهای القایی تکفاز هستند که اینرسی پایین و گشتاور ثابت دارند و در اثر افت ول تاژ نا شی می پیوندد. این سیستمها دارای موتورهای القایی تکفاز هستند که اینرسی پایین و گشتاور ثابت دارند و در اثر افت ول تاژ نا شی از وقوع خطا در شبکه ممکن است متوقف ۳ شوند. پس از رفع خطا، موتورهای متوقف شده توان راکتیو بالا و همچنین جر یانی در حدود ۵ تا ۶ برابر جریان نامی از شبکه درخواست می کنند که منجر به تداوم افت ولتاژ شده و فرآی ند باز یابی ولتاژ را به تاخیر می اندازد. این تاخیر باعث افت ولتاژ بلند مدت شده و گاهی سبب بیش تحریکی نیروگاه های مجاور و خروج آن ها از شبکه می شده می دند که میجر به تداوم افت ولتاژ شده و فرآی ند باز یابی ولتاژ را به شبکه می می دارن می از گذشت مدت ، ادوات حفاظت گرمایی موتورها عمل کرده و میزان قابل توجهی از بار ها را از شبکه می می ولتاژ شبکه به دلیل دینامیک تپ چنجرها و جبران سازهای توان راکتی و می شود. را از شبکه جدا می کندرل و نظارتی بر پدیده FIDVR وجود نداشته باشد، به دلیل خروج زنجیرهای توان راکتی و می شود. در صورتی که کنترل و نظارتی بر پدیده FIDVR وجود نداشته باشد، به دلیل خروج زنجیرهای تجهیزات شبکه ممکن است این در صورتی گستره و فرویشی ولتاژ بیانجامد [۲۱]. بنابراین بر سی و شبیه سازی FIDVR ارا نه راهکار هایی برای در مورد برای از شرکه برای را برا می توان ما و برا از با ها می برای را و می مود. می مودن این بر سی و شبیه سازی تربی می و شریه می رسد.

برای شبیه سازی FIDVR و ارزیابی STVS، یک مدل جدید مبتنی بر شبکه های عصبی گراف⁶ (GNN) در [۳] پی شنهاد شده است. این مدل شاخص های پایداری چند متغیره را برای هر باس تعریف کرده و از یک شبکه عمیق تو جه گرا فی^۶ (GADN) برای شناسایی FIDVR و فروپاشی سریع ولتاژ^۷ (FVCs) استفاده می کند. در [۴] یک الگوریتم جدید برای تشخیص FIDVR در سیستم توزیع پیشنهاد شده است. این الگوریتم به گونه ای طراحی شده که از شکل موج جریان در ر لمهای تغذیه کند نده خروجی^۸ (OFR) و رله های جانبی^۹ (LR) برای مسدودکردن آن ها در مدت زمان مشخصی استفاده می کند.

برای مقابله با پدیده FIDVR و کاهش آن دو رویکرد عمده وجود دارد: رویکرد اصلاح در سمت بار و ا صلاح در سمت شبکه. کاهش بار · (LS) از جمله رویکردهای اصلاح در سمت بار است که با توجه به تبعات آن در کاهش قابلیت اطمینان شبکه، اختلال در تامین مداوم برق، ضررهای اقتصادی و نگرانیهای ایمنی باید به عنوان آخرین راهحل در طول ز مان عمل اتی برای بهبود FIDVR استفاده شود. این روش تعادل بین توان راکت یو تولید شده و مصرفی را در شرایط خطاح فظ می کند. در روشهای مرسوم کاهش بار، ولتاژ باسها به صورت دورهای بررسی میشوند و اگر مقدار آنها کمتر از آستانه قابل ق جول با شد، مقدار بار روی باسها تنظیم میشود [۵]. در [۶] از کنترل فازی برای کاهش بار براساس بهبود معیار بازیابی ولتاژ کوتاه مدت (STVRC) و همچنین از بهینهسازی ازدحام ذرات^{۱۲} (PSO) برای رسیدن به متغیرهای کنترل کننده بهینه و به حداقل رساندن میزان کاهش بار استفاده شدهاست. روش پیشنهادی در [۶] میتواند مکان، زمان و مقدار کاهش بار را در زمان واقعی برا ساس تغییرات ولتاژ تعیین کند. یک رویکرد دادهمحور برای پیشبینی و کنترل برخط کاهش بار در حین و قوع پد یده FIDVR در [۷] پیشنهاد شدهاست. علاوه بر این، [۸] یک الگوریتم یادگیری تقویت عمیق^{۱۳} (DRL) را برای کنترل اضطراری سی ستمهای قدرت ارائه میدهد که ترمز دینامیکی ژنرا تور و کاهش بار تحت ولتان^{۱۴} (UVLS) را به کار می برد. در [۹]، یک طرح سلسلهمراتبی کاهش بار شامل منطقهسازی برای بهبود ولتاژ و فرکانس (v&f) در ریزشبکههایی که در معرض حوادث نامطلوب هستند، پیشنهاد شدهاست. این طرح هم مبتنی بر پاسخ و هم مبتنی بر رویداد ا ست و میزان کاهش بار را برای هر باس براساس مقادیر ولتاژ و فرکانس بهینه میکند. یک فرآیند پخشبار اصلاح شده گاوس-سایدل که از مدل موتور القایی مرتبه سه استفاده می کند، برای تسهیل تخمین برخط ولتاژ در [۱۰] ارائه شدهاست. برای تمایز بین بارهای پایدار و ناپایدار موتوری، یک الگوریتم کاهش بار بر اساس شاخص لغزش نسبی در [۱۱] پیشنهاد شدهاست. همچ نین یک م سئله بهینه سازی مبت نی بر برنامهریزی خطی عدد صحیح مختلط^{۱۵} (MILP) برای کاهش بار در شبکههای هو شمند در [۱۲] و یک رویکرد کاهش بار متمرکز برای تصمیم گیری بلادرنگ در [۱۳] ارائه شده است. در [۱۴] دو رویکرد برای کاهش بار در ج لوگیری از رو یدادهای شديد FIDVR پيشنهاد شده است. علاوه براين، يک فرآيند کاهش بار مبتني بر پاسخ ولتاژ براي کنترل سريع ا ين رو يداد در [۱۵] و یک طرح کاهش بار مبتنی بر امپدانس برای جلوگیری از ناپایداری کوتاهمدت ولتاژ در [۱۶] ارائه شده است.

رویکرد دیگر برای مقابله به پدیده FIDVR، رویکرد اصلاح در سمت شبکه است. در این رویکرد از منابع توان راکتیو مانند SVC و STATCOM، تولیدات پراکنده^{۱۶} (DG) و سیستمهای ذخیره انرژی برای تعادل تولید و مصرف توان راکتیو استفاده می شود. همچنین استقرار منابع تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر در سیستمهای توزیع در سالهای اخیر به شدت افزایش یافتهاست که میتواند به بهبود پایداری ولتاژ در حین وقوع خطا در شبکه کمک کند. در [۱۷]، الگوریتمی برای فعال کردن عملکرد تمامی منابع تولید پراکنده با اینورترهای هوشمند در شبکههای محلی در هنگام وقوع خطا پیشنهاد شده است. مدلی برای بهینهسازی تخصیص و رتبهبندی فیلترهای فعال به منظور کاهش رویدادهای FIDVR در ریزشبکهها با منابع انرژی تجدیدپذیر در [۱۸] ارائه شدهاست. در [۱۹]، یک مطالعه گسترده برای بررسی تأثیر بار دینامیکی و منابع تجدیدپذیر بر پایداری ولتاژ کوتاهمدت در سیستمهای قدرت انجام شدهاست. یک کنترل فازی جدید مبتنی بر جبران کننده سنکرون استاتیکی برای پایداری ولتاژ در شبکههای قدرت در ۲۰ ارائه شدهاست. این سیستم ولتاژ دینامیکی نیروگاه خورشیدی را در عملکردهای مختلف آن به عنوان STATCOM و یا تولید کننده توان اکتیو کنترل میکند. با توجه به این که تولیدات پراکنده رشد بالایی داشتهاند، بنابراین مبدلهای متصل به شبکه باید علاوه بر تزریق توان به شبکه، پایداری آن را نیز حفظ کنند. در [۲۱] روشی برای کنترل انرژی با محدودکردن جریان خطاهای نامتعادل ارائه شدهاست. یک طرح گذر از خطا برای نیروگاههای خورشیدی در [۲۲] پیادهسازی شده که رویدادهایی را که باعث کاهش ولتاژ به زیر ۹۰٪ از مقدار نامی میشوند، بهسرعت شناسایی کرده و اینورترهای نیروگاه را به حالت گذر از خطا برمی گرداند. وجود یک واحد شناسایی رویداد سریع و دقیق برای پیادهسازی موفق ضروری است. در [۲۳] قابلیت تولید بهینه توان راکتیو برای منابع تولیدکننده این نوع توان تحت شرایط عملياتي مختلف مانند حالت پايدار و ناپايدار بررسي مي شود. تعيين اندازه منابع ديناميكي توان راكتيو به طور معمول به عنوان یک مسئله بهینه سازی غیر خطی و غیر محدب فرمول بندی می شود [۲۴]. الگوریتم PSO در [۲۵] برای بهینه سازی تخصیص منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شدهاست، در حالی که [۲۶] یک الگوریتم برای بهینهسازی مکان و اندازه منابع تجدیدپذیر برای کاهش کلی تلفات و بهبود رفتار ولتاژ ارائه میدهد. رویکردی برای بهبود قابلیت کنترل ولتاژ در حین پدیده FIDVR با استفاده از کوواریانس کنترل تجربی در [۲۷] ارائه شده و در [۲۸] دیاگرام ورونویی^{۱۷} به همراه برنامهریزی خطی برای کمینه کردن تابع هزینه در به کار گیری منابع توان راکتیو برای مقابله به FIDVR استفاده شده است.

با بررسی جامع مقالات مختلف، مشخص می شود که روش کاهش بار یکی از روش های رایج برای مقابله با پدیده FIDVR است. با این حال، استفاده از این روش می تواند تبعات نامطلوبی از جمله کاهش قابلیت اطمینان شبکه، افزایش هزینه برق، اختلال در کسب و کارها و آسیب به وسایل الکتریکی را به دنبال داشته باشد. بنابراین، به نظر می رسد که روشهای سمت شبکه برای مقابله با FIDVR راهکار موثرتری نسبت به روشهای سمت بار ارائه می دهند. علاوه بر این، جبران کننده ها به خصوص در کاهش اثرات ناشی از ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت مفید هستند، زیرا قابلیت کنترل توان راکتیو شبکه را به طور قابل توجهی افزایش می دهند.

 ولتاژ غیرقابل قبول پس از یک اختلال بزرگ مورد استفاده قرار داد .این امر به طور قابل توجهی آگاهی موقعیتی سیستم قدرت را افزایش میدهد و خطر خاموشی ناشی از ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ را کاهش میدهد. نوآوری کلیدی در رویکرد ترکیبی نهفته است که برنامهنویسی ولت/آمپر راکتیو، شبکههای عصبی و بهینهسازی چند هدفه را با هم ترکیب میکند تا به مشکل رویدادهای FIDVR در سیستمهای قدرت رسیدگی کند، در حالی که عوامل اقتصادی و فنی را در نظر می گیرد.

ادامه این مقاله به این شرح است: در بخش ۲، مسئله تشریح شده و رویداد FIDVR و مدل بار مرکب برای سیستمهای تهویه مطبوع خانگی توضیح داده شدهاست. بخش ۳ شاخصهای ولتاژ و تابع هدف را معرفی میکند. بخش ۴ روش پیشنهاد شده، نتایج و بحثهای مربوط به مطالعه موردی را بررسی میکند و در بخش ۵، نتیجه گیری مقاله ارائه شده است.

۲- شرح مسئله

FIDVR رویدادهای

در مناطقی با کاربری بالای سیستمهای تهویه مطبوع خانگی، پس از وقوع خطا و کاهش ولتاژ در شبکه، درصد بالایی از موتورهای تکفاز القایی که در این سیستمها به کاررفته اند، متوقف میشوند. بعد از رفع خطا، موتورهای متوقف شده مقدار قابل توجهی توان اکتیو و راکتیو را از سیستم جذب میکنند که مانع بازیابی ولتاژ به مقدار پیش از خطا میشود. به این پدیده، بازیابی تاخیری ولتاژ ناشی از خطا می گویند [۲۹]. شکل (۱) نمونهای از تغییرات ولتاژ حین رویداد TDVR را نشان می دهد را از شبکه بازیابی ولتاژ به مقدار پیش از خطا می شود. به این پدیده، بازیابی تاخیری ولتاژ ناشی از خطا می گویند [۲۹]. شکل (۱) نمونهای از تغییرات ولتاژ حین رویداد TDVR را نشان می دهد [۳۰]. سرا از شبکه بازیابی موتورها^{۳۲} (TOPS) عمل کرده و موتورها را از شبکه جدا می کنند. این کار منجر به از دست دادن بار و فعال شدن جبرانسازهای شبکه شده که به افزایش ولتاژ می انجامد. اگر جبران سازهای شبکه شده که به افزایش ولتاژ می انجامد. اگر جبران سازهای شبکه شده که به افزایش ولتاژ می موتورها را از شبکه جدا می کنند. این کار منجر به از دست دادن بار و فعال شدن جبران سازهای شبکه شده که به افزایش ولتاژ می انجامد. اگر جبران سازهای شبکه شده می مواند منجر به خاموشیهای جبران سازها به دلیل تغییرات بار در حین یا پس از خطا به درستی عمل نکنند، این پدیده می تواند منجر به خاموشیهای گسترده و یا فروپاشی ولتاژ شود. واحدهای اندازه گیری فازور توزیع^{۲۵} (D-PMU) می توانند رویدادهای RTDV را به صورت رامان واقعی ثبت و پیگیری کنند [۳۳]. تعدادی از رویدادهای قابل توجه RTDV در سراسر جهان در [۳۳] ارائه شده است.



[۳۰] FIDVR شکل (۱): نمونهای از تغییرات ولتاژ حین رویداد Figure (1): Typical pattern for FIDVR [30]

۲-۲- مدل بار مرکب برای سیستمهای مطبوع خانگی

این بخش به مدل بار مرکب^{۲۶} (CLM) دینامیکی برای سیستمهای تهویه مطبوع خانگی می پردازد. یک روی کرد برای تر ک یب مدلهای بار و فیدر، با استفاده از اندازه گیریهای ولتاژ و جریان لحظهای، در [۳۳] ارائه شده است. این مدل برای سی ستمهای توزیع در شرایط خطا طراحی شده و شامل بارهای تکفاز، سهفاز، بارهای امپدانسی، ترانسفورماتورهای توزیع و خطوط توز یع است. متغیرهای به کار رفته در این مدل با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات غیرخطی یکپار چه با تحل یل الکترومغناطی سی گذرا تعیین شدهاند. مدل بار مرکب دینامیکی ارائه شده توسط شورای هماهنگی برق در غرب آمریکا^{۲۷} (WECC) که به صورت خاص در تحلیل رویداد FIDVR به کار می رود، در شکل (۲) نشان داده شده است. این مدل شامل موتور های ال قایی سهفاز، موتورهای القایی تکفاز، بارهای الکترونیکی، بارهای استاتیکی، ترانسفورماتور بار و فیدر توزیع است. موتورهای R، B و C انواع مختلفی از موتورهای سهفاز، هماز هستند، در حالی که موتور D یک موتور القایی تکفاز است [۳۴]



[۳۴] WECC شکل (۲): ساختار مدل بار مرکب) Figure (2): WECC composite load model structure [34]

مدار معادل ساده شده در حالت پایدار موتور القایی تکفاز در شکل (۳–۱ لف) ن شان داده شده که در آن R_{eq} و R_{eq} مقاو مت و راکتانس معادل هستند که بر مبنای مقاومت و راک تانس مو تور محا سبه می شوند و از روا بط R_{eq}=R_r و X_{eq}=X_s+X حا صل می شوند. همچنین X_m راکتانس مغناطیس شوندگی و s لغزش موتور است. بر اساس این مدل، جریان، گشتاور الکتریکی و توان راکتیو موتور با توجه به (۱) تا (۳) حاصل می شوند:

$$I^{2} = \frac{V^{2}}{X_{eq}^{2} + (R_{eq}/2)^{2}}$$
(1)

$$T_{e} = \frac{P}{\omega_{s}} = \frac{V^{2}}{\omega_{s}} \frac{R_{eq}s}{R_{eq}^{2} + (sX_{eq})^{2}}$$
(Y)

$$Q = \frac{V^2}{X_m} + I^2 X_{eq} = \frac{V^2}{X_m} + \frac{V^2 X_{eq} s^2}{R_{eq}^2 + (sX_{eq})^2}$$
(7)

لغزش بحرانی با مشتق گیری گشتاور نسبت به لغزش حاصل می شود. این لغزش برابر با s_c=R_{eq}/X_{eq} است و مرز بین عمل کرد حالت پایدار و توقف در موتور است. در شکل (۳–ب) منحنی گشتاور -لغزش در ولتاژ های مختلف و در شکل (۳–ج) منحنی توان راکتیو-ولتاژ نشان داده شده است [۳۵،۳۲].

در مدل بار مرکب دینامیکی ارائهشده توسط موسسه WECC، توان م صرفی اکت یو و راکت یو در موتور های الا قایی تک فاز به صورت تابعی از ولتاژ در سه ناحیه مطابق شکل (۳-ج) فرمول بندی می شود.

- ناحيه اول كه ولتاژ كمتر از ولتاژ توقف است:

$$P = \frac{R_{stall}}{R_{stall}^2 + X_{stall}^2} V^2$$

$$Q = \frac{X_{stall}}{R_{stall}^2 + X_{stall}^2} V^2$$
(۵)

$$P = k_{p2} (V_{brk} - V)^{N_{p2}} + P_{brk}$$

$$Q = k_{q2} (V_{brk} - V)^{N_{q2}} + Q_{brk}$$
(Y)
$$- i l = k_{q2} (P_{brk} - V)^{N_{q2}} + Q_{brk}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{k}_{p1} (\mathbf{V} - \mathbf{V}_{brk})^{N_{p1}} + \mathbf{P}_{brk}$$
(A)

 $Q = k_{q1} (V - V_{brk})^{N_{q1}} + Q_{brk}$ (۹) در این روابط R_{stall} و R_{brk} مقاومت و راکتانس موتور در حالت توقف هستند. همچنین P_{brk} و R_{brk} توان اکتیو و راکتیو موتور در حالت توقف هستند. مقادیر R_{stall} مقاومت و راکتانس موتور در حالت توقف هستند. همچنین P_{brk} و R_{stall} و راکتیو موتور در حالت توقف هستند. مقادیر R_{q1} k_{p2} k_{q1} k_{p2} k_{p1} k_{p2} k_{p1} منحنی ها در دو ناح یه بهدست میآیند [۳۶]. این مدل در نرمافزار DIgSILENT PowerFactory پیادهسازی شده است.





(۳۶) شكل (۳): (الف) مدار معادل ساده شده در حالت پايدار، (ب) منحنى T-s و(ج) منحنى Q-V موتور القايى (۳۶) شكل (۳): (الف) مدار معادل ساده شده در حالت پايدار، (ب) منحنى Figure (3): (a) Simplified steady-state model, (b) T-s and (c) Q-V characteristics of the induction motor[36]

۲-۲- ناپایداری ولتاژ کوتاهمدت

بهطورکلی مسئله ناپایداری ولتاژ کوتاهمدت را میتوان به چهار سناریو تقسیم بندی کرد که در شکل (۴) نشان داده شده ا ست. در شکل (۴–الف) ولتاژ پس از وقوع خطا به سرعت به مقدار اولیه خود باز می گردد که این سناریو پا یدار و ر ضایت بخش ا ست. در شکل (۴–ب) همان گونه که ملاحظه می شود، ولتاژ پس از اندکی تاخیر به مقدار اولیه خود باز می گردد. در این حالت پد یده FIDVR رخ داده ولیکن پدیده به حالت پایدار باز گشته است. شکل (۴–ج) نشان می دهد که ولتاژ پس از وقوع خطا در بعضی از باس ها پایین مانده و پس از گذشت زمان نیز به بود نمی یابد که این سناریو ناپایدار در نظر گرفته می شود. سناریوی چهارم در شکل (۴–د) نیز ناپایدار است و به فروپاشی سریع ولتاژ منجر شده است.



شکل (۴): چهار سناریو از شکلموج ولتاژ پس از خطا، (الف) بازیابی سریع ولتاژ، (ب) بازیابی ولتاژ با تاخیر یا FIDVR ، (ج) ولتاژ پایین باسها بدون بازیابی، و (د) فروپاشی ولتاژ

Figure (4): Four scenarios of post-fault voltage trajectories (a) fast voltage recovery, (b) delayed voltage recovery or FIDVR, (c) low voltage without recovery, and (d) voltage collapse

۳- فرمول بندی مسئله

1-۳-شاخص شدت کاهش ولتاژ بر مبنای مجذور میانگین مربعات

با توجه به منحنی تغییرات ولتاژ پس از خطا، شاخصهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد سیستم پی شنهاد شدها ست. در [۳۷] شاخصی تعریف شده که اگر تنها یک باس ولتاژ تاخیری داشته و ولتاژ در مابقی باس ها سریع به بود یاف ته با شد به سختی می تواند وقوع این تاخیر و همچنین محل باس موردنظر را شناسایی کند. همچنین در [۳۸] برای ارزیابی عملکرد بازیابی ول تاژ در هر باس، یک شاخص شدت کاهش ولتاژ پیشنهاد می کند، اما فاقد ارزیابی نظام مند برای شناسایی پد یده محمد این تاخیر و همچنین محل باس موردنظر را شناسایی کند. همچنین در [۳۸] برای ارزیابی عملکرد بازیابی ول تاژ در هر باس، یک شاخص شدت کاهش ولتاژ پیشنهاد می کند، اما فاقد ارزیابی نظام مند برای شناسایی پد یده IFIDVR ست. در این مقاله شاخص شدت کاهش ولتاژ بیشنهاد می کند، اما فاقد ارزیابی نظام مند برای شناسایی پد یده این در این این در این مقاله شاخص شدت کاهش ولتاژ بر مبنای مجذور میانگین مربعات^{۲۸} (IRVSI) برای ارزیابی شدت این پدیده ا ستفاده شده این مقاله شاخص شدت کاهش ولتاژ از مبنای مجذور میانگین مربعات^{۲۸} (INSI) برای ارزیابی شدت این پدیده ا ستفاده شده است [۳۹]. برای تعریف این شاخص این اسخص این از منای این مقاله شاخص شدت ولتاژ^{۳۰} (INSI) و شاخص شدت ولتاژ^{۳۰} (INSI) و شاخص شدت ولتاژ^{۳۰} (INSI) و می و می و می این معربی این ماند و این شاخص این شاخص این ماند می می می می مدت ولتاژ^{۳۰} (INSI) و شاخص شدت ولتاژ^{۳۰} (INSI) در روا بط (۱۰) و (۱۱) معرفی می شوند.

$$DVI_{i,t} = \begin{cases} \frac{V_{i,0} - V_{i,t}}{V_{i,0}} & , V_{i,t} \le 0.9 \ V_{i,0} \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases}$$
(1.)

(۱۱)
 VSI = ∫_{ta}^T DVI_{i,t} dt
 T که در آن V_i,0 ولتاژ قبل از وقوع خطا و V_i,t ولتاژ در زمان پس از خطا در باس i است. بازه زمانی گذرای پس از رفع خطا با T
 نشان داده می شود.

$$RVSI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{b}} VSI^{2}}{N_{b}}}$$
(17)

که در آن N₅ تعداد باسهای شبکه را نشان میدهد. RVSI میانگین مربعی مقادیر VSI در تمام باسها را محاسبه میک ند. در میانگین مربعی، برخلاف میانگین حسابی، باسهایی که مقدار VSI بالاتری دارند، یعنی بازیابی ولتاژ در آن ها ک ندتر ا ست، در فرآیند میانگینگیری با تاثیر بیشتری وارد میشوند. در نتیجه اگر ولتاژ در بیشتر باسها به سرعت بازیابی شود و تنها یک یا دو باس بازیابی کند ولتاژ را تجربه کنند، تاثیر این پدیده همچنان در مقدار RVSI به خوبی نمایان می شود. در این تحقیق فرض می شود احتمال وقوع تمام خطاها در شبکه یک سان است. با تعیین RVSI برای همه موارد خطا های احتمالی خطوط، مجموعهای از خطاها با بالاترین مقادیر RVSI انتخاب می شود. نمودار نحوه انتخاب شدیدترین خطاهای احتمالی در شکل (۵) ارائه شده است. خطاهایی که منجر به ناپایداری ولتاژ می شوند در این مطالعه در نظر گرفته نشده اند.



شکل (۵): نمودار نحوه انتخاب شدیدترین خطاهای احتمالی Figure (5): Flowchart of contingency selection

۲-۳- شاخص حساسیت

شاخص حساسیت شاخصی است که عموما تأثیر تغییرات کوچک یک متغ یر را بر سایر متغیر ها نشان مید هد و بهخوبی می تواند رفتار دینامیکی سیستم را مدل کند. در این مقاله از این متغیر برای بررسی اثر توان راکتیو تزریق شده به هر باس بر روی تغییرات ولتاژ حین رویداد FIDVR استفاده شده است. به کمک این شاخص می توان متغیرهای کنتر لی شبکه را بهی نه کرد تا پاسخ شبکه مورد نظر را به دست آورد. شاخص حساسیت^{۳۱} (SI) که برای متغیر RVSI تعریف شده، در (۱۳) شرح داده شده است.

$$SI = \frac{RVSI(Q + \Delta Q) - RVSI(Q)}{\Delta Q}$$
(17)

(17)

c, line (18)

c, line (18)

در این رابطه ΔQ توان را کتیو کوچکی است که به ترتیب در هر باس توسط یک منبع توان را کتیو تزریق می شود و مقدار آن ۱۰ مگاوار در نظر گرفته می شود. در هر مرحله شاخص حساسیت محاسبه شده و در نهایت شاخص حساسیت کل TSI نسبت به تزریق ΔQ به باس j با (۱۴) محاسبه می شود:

۳–۳- فرمول بندی ریاضی برای تعیین ظرفیت توان راکتیو
پس از تعیین محل نصب جبران سازها در شبکه، باید ظرفیت توان راکتیو در محل نصب تعیین شود. در این بخش یک مسئله برنامه ریزی غیرخطی دوهدفه پیشنهاد شده است. این بهینه سازی با معادلات جبری-دیفرانسیلی شبکه مور دنظر که در نرمافزار سیستمهای قدرت شبیه سازی شده، همراه است. رویداد RIDVR حین وقوع خطا در شبکه در نرمافزار که در نرمافزار سیستمهای قدرت شبیه سازی شده، همراه است. رویداد RIDVR حین وقوع خطا در شبکه مور دنظر که در نرمافزار سیستمهای قدرت شبیه سازی شده، محراه است. رویداد RIDVR حین وقوع خطا در شبکه در نرمافزار یا معادلات جبری-دیفرانسیلی شبکه مور دنظر که در نرمافزار سیستمهای قدرت شبیه سازی شده، همراه است. رویداد RIDVR حین وقوع خطا در شبکه در نرمافزار یا معادلات جبری معیشده دینامیکی مور دنظر که در نرمافزار سیستمهای قدرت شبیه سازی شده سیم محیط نرمافزار ^{۳۳} (IDSL) پیاده سازی شده سیمان در جامع از معیک معیشده دینامیکی شبکه با بازهای تجمیع شده دینامیکی شبیه سازی شده اند. مدل عملکردی این بارها در زبان برنامه نویسی محیط نرمافزار^{۳۳} (IDSL) پیاده سازی شده سیمان از معدان از شیم سیم محیط نرمافزار^{۳۳} (IDSL) پیاده سازی شده است. نتایج حاصل از شیه سیمازی ها از نقطه نظر فنی و اقتصادی بررسی شده و در بهینه سازی لحاظ می شوند. در این مسئله تابع هدف اول، مقدار شبیه سازی ها از نقطه نظر فنی و اقتصادی بررسی شده و در بهینه سازی لحاظ می شوند. در این مسئله تابع هدف اول، مقدار شریه سیمازی ها از نقطه نظر فنی و اقتصادی بررسی شده و در بهینه سازی لحاظ می شوند. در این مسئله تابع هدف اول، مقدار شریه شاخص RVSI مربوط به عملکرد ولتاژ گذرا تحت مجموعه ای از خطاهای ایجاد شده در خطوط شبکه است. هدف دوم، هزینه شاخص RVSI مربوط به عملکرد ولتاژ گذرا تحت مجموعه ای از خطاهای ایجاد شده در روان (۱۵) ارائه شده است.

$$\mathbf{f}_2 = \sum_{i=1}^{N_b} \mathbf{b}_i \mathbf{C}_i(\mathbf{r}_i, \mathbf{s}_i) \tag{19}$$

در (۱۰) اگر باس i دارای منبع توان راکتیو باشد، آن گاه ن¹ برابر ۱ و در غیر این صورت برا بر صفر خوا هد بود. (۲۰،۶۵) Ci(ri,si هزینه در باس i دارای منبع توان راکتیو باشد، آن گاه is و si است. متغیر اول مربوط به نوع جبرانساز توان راکتیو است و دو می ظرفیت نصب را نشان می دهد. از این دو تابع هدف برای شناسایی یک جب هه چارتو از راه حل های خامغلوب تو سط MOPSO می توان بهره برد. همچنین برای کمینه کردن هزینه ها و بهبود عملکرد سیستم برای خطا های احت مالی، یک تابع هدف در (۱۰) تابع هدف در می توان بهره برد. (۱۰) تابع هدف از این دو تابع هدف برای شناسایی یک جب هه چارتو از راه حل های خامغلوب تو سط MOPSO می توان بهره برد. همچنین برای کمینه کردن هزینه ها و بهبود عملکرد سیستم برای خطا های احت مالی، یک تابع هدف در (۱۷) تعریف شده است که از دو جمله تشکیل شده است و برای شناسایی یک راه حل بهینه من فرد برا ساس وزن های از چیش تعریف شده به کار می رود.

$$\min \mathbf{J} = \mathbf{w}_1 \mathbf{R} \mathbf{V} \mathbf{S} \mathbf{I} + \mathbf{w}_2 \left(\sum_{i=1}^{N_b} \mathbf{b}_i \mathbf{C}_i(\mathbf{r}_i, \mathbf{s}_i) \right)$$
(1Y)

که در آن w1 و w2 فاکتورهای وزنی هستند که بهترتیب مربوط به جریمه نقض ولتاژ و هزینه نصب جبرانسازهای توان راکت یو هستند [۲۸]. برای دستیابی به اهداف بیانشده، قیود چندگانه مربوط به رو یدادهای حالت پا یدار و دینامیکی با ید در نظر گرفتهشوند. قیود حالت پایدار با هدف اطمینان از تعادل جریان قدرت، تضمین بهبود ولتاژ و مقداردهی اولیه مقادیر دینامیکی در حالت پیش از خطا تعیین می شوند [۳۸]. روابط (۱۸) و (۱۹) تعادل بین توان اکتیو و راکتیو در باسها را نشان می دهند که در این روابط بردارهای ۰۲، ۵، ۲ و Q بهترتیب ولتاژ باس، زاویه فاز، توان اکتیو و توان راکتیو هستند.

$$\mathbf{P}_{\mathrm{G}} - \mathbf{P}_{\mathrm{L}} - \mathbf{P}(\mathbf{V}, \theta) = \mathbf{0} \tag{1}$$

$$Q_{\rm G} - Q_{\rm L} - Q(V,\theta) = 0 \tag{19}$$

محدودیتهای عملکرد در حالت پایدار در شبکه قدرت در معادلات (۲۰)-(۲۴) نشان دادهشده که شامل م حدودیتهای م جاز برای توان اکتیو و توان راکتیو، ولتاژ باسها و همچنین محدوده مجاز برای RVSI است.

$$\begin{split} P_{G}^{\min} &\leq P_{G} \leq P_{G}^{\max} & (f \cdot) \\ P_{G}^{\min} &\leq P_{G} \leq P_{G}^{\max} & (f \cdot) \\ Q_{G}^{\min} &\leq Q_{G} \leq Q_{G}^{\max} & (f \cdot) \\ V^{\min} &\leq V \leq V^{\max} & (f \cdot) \\ V^{\min} &\leq V \leq V^{\max} & (f \cdot) \\ RVSI &\leq RVSI_{th} & (f \cdot) \\ RVSI &\leq RVSI_{th} & (f \cdot) \\ (f \cdot) &(f \cdot$$

0 = g(x, y, u, Q)

که در آن y ،x و u به ترتیب متغیرهای حالت، جبری و کنترلی شبکه هستند.

در این مقاله، از شبکه عصبی چند لایه پرسپترون برای حل م سئله نگا شت چ ند بعدی با درنظر گرفتن توان های راکة یو تزریق شده به باس ها بهعنوان ورودی و شاخص RVSI به عنوان خروجی استفاده شده است. پس از آن تابع هدف که در (۸) بیان شده، با استفاده از الگوریتم PSO به منظور یافتن ظرفیت های بهینه منابع توان راکتیو در پاسخ به خطاهای احتمالی بهی نه شده و پاسخ آن با الگوریتم های ACO_R ، ABC و DE مقایسه می شود. سپس با کمک الگوریتم MOPSO مسئله به عنوان یک مسئله بهینه سازی چند هدفه تحلیل شده و مجموعه ای از راه حل های بهینه به دست می آید که جبهه پارتو را تشکیل می ده ند. MOPSO یک الگوریتم سودمند برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه است و انعطاف پذیری زیادی در تنظیم پارامتر ها دارد و آن را قادر می سازد تا با نیازهای مختلف بهینه سازی سازگار شود.

MLP-۳-۴ شبکه عصبی

(79)

در شبکه عصبی چند لایه پرسپترون، نورونها در لایهها قرار دارند و خروجی هر نورون با اعمال یک تابع انتقال به مجموع وزنی ورودیها بهدست میآید. الگوریتمهای آموزشی همچون الگوریتم پسانتشار و الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (LM)، وزنها را تعیین میکند. الگوریتم LM ترکیبی از دو الگوریتم گرادیان نزولی و گاوس-نیوتن است. این الگوریتم از گاوس-نیوتن قویتر است و میتواند در بسیاری از موارد به خوبی همگرا شود. البته لازم به ذکر است این همگرایی با سرعت پایین تر رخ میدهد. در این مقاله یک شبکه عصبی پیشخور سهلایه، با نورونهای خروجی با توابع خطی و نورونهای پنهان با توابع سیگموئید و با استفاده از الگوریتم LM طراحی شدهاست. این شبکه ظرفیت توان راکتیو تزریق شده به باسهای تعیینشده را به عنوان ورودی می گیرد و و مقدار RVSI را به عنوان خروجی تولید میکند.

MOPSO الگوريتم

روش PSO یک روش محاسباتی مبتنی بر جمعیت است که شبیهسازی از یک سیستم اجتماعی ساده شده است. این روش در حل مسائل خطی و غیرخطی بسیار قوی است و میتواند راهحلهای با کیفیت بالا را در زمان محاسبه کمی ایجاد کند و همگرایی پایدارتری نسبت به سایر روشهای تصادفی دارد. هر ذره با یک بردار xi نشان داده میشود که موقعیت ذره i را در فضای جستجوی n بعدی نشان میدهد و دارای بردار سرعت vi است. این ذره مسیر حرکت خود را با توجه به تجربه حرکت خود و همچنین تجربه حرکات ذرات دیگر تنظیم میکند. هر ذره مختصات خود را در فضای مسئله بهگونهای بهروز میکند که با بهترین راهحل که تاکنون بهدست آمده است مرتبط است. بهترین تجربه شخصی هر ذره با عمی مسئله بهگونهای بهروز میکند که توسط ذرهای در همسایگی آن ذره بهدست آمده، Bobd نامیده میشود. حرکت هر ذره به سمت مکانهای که تاکنون یک شتاب وزنی تصادفی در هر مرحله زمانی انجام میگیرد [۴۱،۴۰]. MOPSO تعمیمی از الگوریتم MSO است و یک الگوریتم بهینهسازی چندهدفه است که در فضای جستجوی چندبعدی و با توجه به چندین هدف، میتواند جبهه پارتو بهینه را بیابد و بههمین دلیل در بسیاری از مسائل علمی و صنعتی مورد استفاده قرار میگیرد. این الگوریتم سرعت بالایی دارد و نیز دارای قابلیت تطبیق با مسائل مختلف است. همچنین با تغییر پارامترهای مختلف در این الگوریتم، میتوان عملکرد آن را بهبود دارای قابلیت انطباق با محیطهای دینامیکی از جمله مزایای الگوریتم MOPSO است که آن را بهبود جدید تطبیق پیدا کند. مراحل پیادهسازی روش OMPSO در الگوریتم MOPSO است که آن را قادر میسیاد به سرعت بالایی دارد و نیز

۴- روش پیشنهادی برای جایابی منابع توان راکتیو

در این مقاله یک روش ترکیبی برای جایابی منابع توان راکتیو دینامیکی برای مقابله با پدیده FIDVR پیشنهاد شده که دارای این مراحل است:

- مرحله اول: یک شبکه برای مطالعه انتخاب شده و شبیهسازی می شود. بارهای شبکه با مدل بار تجمیع شده دی خامیکی که شامل سیستمهای تهویه مطبوع یا همان کولرهای گازی هستند، جایگزین می شوند. موتورهای تکفاز به کاررفته در سی ستمهای الگوریتم (۱): الگوریتم MOPSO

Algorithm 1	. MOPSO	Algorithm
-------------	---------	-----------

Initialization:

For i=1 : N

Create and randomly initialize the position in the rank [Xmin, Xmax] velocity(i) equal to zero. Evaluate functional(i). Best_position(i) equal to position(i). Best_functional(i) equal to functional(i). End Evaluate dominance and update archive. For i = 1 : N Select global best from archive. Calculate velocity(i) Calculate position(i) Evaluate functional(i) If position dominates Best_position(i), then Best_position(i) = position(i) End

Search:

For it = 1 : maximum iteration

Evaluate dominance and update archive.

End

تهویه مطبوع دارای مدل های متفاوت در سه حالت عملکردی عادی، توقف و خروج از شبکه دار ند. بار های شبکه با بار های تجمیع شده دینامیکی جایگزین شدهاند. مدل عملکردی این بار ها در ز بان برنامهنویسی محیط نرما فزار DigSilent Power Factory پیادهسازی شده است. شبکه ۳۹ باس IEEE همراه با بارهای دینامیکی در نرمافزار مدل سازی شده و تحت خطا هایی که در خطوط رخ داده است، اجرا شده و نتایج حاصل شده است. لازم به ذکر است در این شبیه سازی ۳۰ درصد از بارها، کولر گازی در نظر گرفته شده است [۴۲].

- مرحله دوم: در این مرحله بر روی نتایج حاصل از مرحله اول تحلیل انجام شده و با تو جه به روا بط (۱۰) تا (۱۲) شاخص RVSI برای تمام خطاهای بررسی شده، بهدست آمدهاست. سیس از بین خطاها هشت مورد از شدیدترین آنها از بین مواردی که به تاخیر ولتاژ در باس ها می انجامند، انتخاب شدند تا در مرحله بعد مورد استفاده قرار گیرند.

- مرحله سوم: با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) شاخص حساسیت هر باس و همچنین شاخص حساسیت کل نسبت به تزریق ΔQ برابر ۱۰ مگاوار در باس های مختلف تحت خطاهای انتخاب شده محاسبه می شود. سیس سه باس که حسا سیت بالاتری دارند، برای قرار دادن منابع VAR انتخاب می شوند. در این مرحله برای هر باس مقادیر پایه برای بار راکتیو به صورت ۱۰، ۲۵، ۱۰۰، ۱۷۵، ۲۵۰، ۳۲۵ و ۴۰۰ مگاوار در نظر گرفته شده است.

- مرحله چهارم: یک شبکه عصبی MLP سه لایه، دارای نورونهای خروجی با تابع خطی و نورونهای پنهان با تابع سیگموئید، برای برازش چندبعدی دادهها طراحی شدهاست. این شبکه عصبی ظرفیت تزریق توان راکتیو سه باس تعیین شده را به ع خوان ورودی می گیرد و شاخص RVSI را به عنوان خروجی تولید می کند. برای این کار ۱۴۰ مجموعه داده برای آ موزش، ۳۰ مجموعه برای اعتبار سنجی و ۳۰ مجموعه برای آزمایش اختصاص داده شده ا ست. تعداد نورون های مورد ا ستفاده در لا یه ینهان شبکه پیشخور ۵ است.

- مرحله پنجم: به منظور کاهش هزینهها و به حداکثر رساندن عملکرد سیستم برای موارد خطای احتمالی، دو تابع هدف تعریف شده و با کمک الگوریتم MOPSO یک جبهه یارتو از راه حل های نامغلوب شنا سایی شده است. همچ نین یک تابع دوهد فه مطابق (۱۷) تعریف شده و برای انتخاب یک راه حل بهینه وا حد با اختر صاص وزن های از پیش تعریف شده، ال گوریتم PSO ییادهسازی شده و یاسخ آن با الگوریتمهای ACO_R ،ABC، و DE مقایسه شده است. در این مقاله، شبکه ۳۹ باس IEEE شامل ۱۰ ژنراتور، ۳۹ باس، ۱۲ ترانسفورماتور و ۱۹ بار که ۳۰ در صد آن ها سیا ستمهای تهویه مطبوع یا همان کولرهای گازی هستند، شبیه سازی شده است. برای پیش بینی دقیق شدت رویدادهای FIDVR در شبکه قدرت، این شبکه تحت خطاهای احتمالی قرار گرفته و برای تمام موارد شاخصهای RVSI چ RVSI را به خود اختصاص داده اند و به تاخیر ولتاژ در باس ها می انجامند، به عنوان شدیدترین موارد خطای احتمالی انت خاب شده اند. در شکل (۶) شاخصهای RVSI نرمال شده و شکل (۷) ولتاژ باس ها پس از خطا ناشی از خطای شماره ۲۰ که در خط ۱۵–۱۶ رخ داده، نشان داده شده است.

شاخص RVSI	محل خطا	شماره خطا
۰/۳۷۵۱	خط ۱۵–۱۶	۲.
۰/۳۱۳۴	خط ۲۶–۲۴	٢۴
•/٢٩٢٢	خط ۳-۲	٣
•/٢۶٢١	خط ۴–۳	۵
۰/۲۴۹۵	خط ۱۵–۱۴	١٩
۰ / ۳۲ ۰ ۳	خط ۱۹–۱۶	٢٢
٠/٢٢٧٩	خط ۱۷-۱۷	٢۵
۰/۲۲۴۸	خط ۱۸–۳	۶
•/١٨٢•	خط ۴-۱۴	٨
۰/۱۷۰۸	خط ۵-۴	٧
۰/۱۶۲۳	خط ۲۷–۱۷	78

Table (1): Sorted RVSIs for line contingencies جدول (۱): شاخصهای مرتب شده برای خطاهای احتمالی خطوط





شکل (۲): ولتاژ خطوط پس از خطای شماره ۲۰ بدون جبرانساز توان راکتیو Figure (7): Post-fault bus voltages due to line contingency#20 without compensators

در مرحله بعد، مکانهای نصب منابع توان راکتیو مشخص میشود. برای انجام این کار، هر بار یک مذبع توان راکت یو کو چک (ΔQ = 10 MVar) به یکی از باسها تزریق شده و سپس شاخص حساسیت کل برای همه باسها برای شدیدترین موارد خطای احتمالی با استفاده از (۵) محاسبه میشود. پس از آن باسهایی با شاخص حسا سیت بالاتر برای نصب منابع توان راکت یو انتخاب میشوند. شکل (۸) شاخص حساسیت باسها برای خطای شماره ۲۰ را نشان میدهد، در حالی که شکل (۹) شاخص حساسیت کل مرتب شده را برای باسها نشان میدهد.



۲۰ شکل (۸): شاخص حساسیت باسها برای خطای شماره Figure (8): Sensitivity index for Contingency #20



Figure (9): Sorted total sensitivity index for Load Buses

در این مقاله سه باس با شاخص حساسیت کل بالاتر یعنی باس ۳، باس ۱۶ و باس ۲۸ برای نصب م نابع توان راکت یو انت خاب شدهاند. شدیدترین خطای احتمالی طبق نتایج حاصل شده، خطای اتصال کوتاه سهفاز به زمین در خط ۱۵–۱۶ است. برای ایجاد مجموعه دادهها به عنوان ورودیهای شبکه عصبی، هر بار که یک منبع توان راکت یو در یکی از باس های انت خاب شده نصب می شود. در این مطالعه حداکثر ظرفیت این منابع ۴۰۰ مگاوار در نظر گرفته شدهاست. به منظور ثبت دق یق رف تار حالت ورودی سیستم، اندازه این منابع به عنوان یک دنباله با شروع از ۱۰ مگاوار و با حداکثر ظرف یت ۴۰۰ مگاوار انت خاب می شود و نتایج حاصل به صورت مجموع دادهها برای آموزش، اعتبار سنجی و آزمایش شبکه عصبی به کار می روند.

یک شبکه عصبی MLP سه لایه، دارای نورون های خروجی با تابع خطی و نورون های پنهان با تابع سیگموئید، برای برازش داده ها در نظر گرفته شده است. این شبکه ظرفیت منابع توان راکتیو تزریقی به سه باس تعیین شده را به عنوان ورودی در نظر گرفته و شاخص RVSI را به ع خوان خرو جی ای جاد می کند. ۱۴۰ مجمو عه داده برای آ موزش، ۳۰ مجمو عه داده برای اعتبار سنجی و ۳۰ مجموعه داده برای آ موزش، ۳۰ مجموعه داده برای اعتبار سنجی و ۳۰ مجموعه داده برای آزمایش اختصاص داده شده است. تعداد نورون های لایه پنهان شبکه پیشخور ۵ عدد است. این شبکه پیشخور ۵ عدد است. تعداد نورون های را به عنوان فرودی در نظر می مجموعه داده برای آ موزش، ۳۰ مجموعه داده برای آ موزش، ۳۰ مجموعه داده برای آ موزش، ۳۰ مجموعه داده برای اعتبار سنجی و ۳۰ مجموعه داده برای آزمایش اختصاص داده شده است. تعداد نورون های لایه پنهان شبکه پیشخور ۵ عدد است. معروار های رگر سیون نشان دهنده نتایج آموزش شبکه عصبی در ۱۴۰ نقطه در شکل (۱۰) ن شان داده شده است. پس از ۱۰ تکرار، میزان خطا و اختلاف بین شبکه عصبی و نتایج واقعی به طور قابل توجهی کاهش یافته و اجرا خاتمه می یابد.



Figure (10): Results of training MLP neural network

هیچ جبران کننده، با سه SVC و با سه STATCOM نشان میدهد. همچنین شکل (۱۴) ول تاژ تهام باس ها پس از خطای رخداده در خط ۱۰-۱۶ زمانی که از سه STATCOM استفاده شده است را نشان میدهد. همان گونه که از نتایج حاصل می شود، سناریوی دوم از نظر ظرفیت به کار رفته منبع توان راکتیو و نیز تابع هدف نسبت به سناریوی اول بهتر است. بنابراین به نظر می رسد استفاده از نشان می دوم از نظر ظرفیت به کار رفته منبع توان راکتیو و نیز تابع هدف نسبت به سناریوی اول بهتر است. بنابراین به نظر می رست را نشان می دوم از نظر ظرفیت به کار رفته منبع توان راکتیو و نیز تابع هدف نسبت به سناریوی اول بهتر است. بنابراین به نظر می رسد استفاده از نظر نظر فرفیت به کار رفته منبع توان راکتیو و نیز تابع هدف نسبت به سناریوی اول بهتر است. بنابراین به نظر می رسد می مود است می می رست می می رست می می می رست و آن را به بود بخ می رست که STATCOM می می می رست می رست می می رست و آن را بهبود بخشد. این تجهیز با پشتیبانی سریع و آنی توان راکتیو به ویژه در سیستم های قدرت با نفوذ زیاد بارهای دینامیکی، در مقایسه با SVC پاسخ بهتری ارائه می دهد.

مقدار در سناریوی دوم	مقدار در سناریوی اول	نام متغير
•/•••۴۵	•/•••٣٣	ضریب وزنی (W)
١	١	ضریب وزنی (W)
•/٢۶	۰/۲۶	RVSI _{th}

Table (2): Parameters of the objective function جدول (۲): متغبرهای تابع هدف

جدول (۱): معیرهای ۲۵۰		
مقدار	نام متغير	
)	تعداد ذرات	
)	ماگزيمم تكرار	
١/۵	ضریب یادگیری شخصی	
۲	ضریب یادگیری کلی	
١	وزن اينرسى	

Table (3): PSO parameters جدول (۳): متغیرهای PSO

Table (4): Optimization result by PSO **PSO جدول** (۴): نتایج بهینهسازی با

تابع حدف	مجموعه بهينه			
ەبع ھدى	ظرفیت (مگاوار)	شماره باس	لوع جبران سار	ساريو
	14.	٣	SVC	سناريو شماره ۱
•/١٧٨۴	۱۰۰	18		
	۲۷۵	۲۸		
	110	٣		
۰/۱۳۷۵	۲۷۵	18	STATCOM	سناریو شماره ۲
	۲۵	۲۸		

در مرحله بعد با انتخاب سناریوی دوم و برای د ستیابی به مجمو عهای از رامحل ها، دو تابع که در روابط (۱۵) و (۱۶) تعریف شدهاند، با الگوریتم MOPSO بهینه سازی می شود. این ال گوریتم با جمعیتی از رامحل های تصادفی م قداردهی اولیه می شود و سپس با درنظر گرفتن هر دو هدف، رامحلها را به طور مکرر به روز می کند .الگوریتم زمانی همگرا می شود که رامحلها نامغلوب نباشند، یعنی هیچ رامحلی وجود ندارد که در همه ا هداف به تر از دیگری با شد. نتایج نشان می دهد که روی کرد یا نامغلوب نباشند، یعنی هیچ رامحلی وجود ندارد که در همه ا هداف به تر از دیگری با شد. نتایج نشان می د هد که روی کرد پیشنهادی قادر به یافتن مجموعه ای از رامحلها است که در جبهه پارتو قرار می گیرند و پاسخ حاصل از بهینه سازی تک هد فه پیشنهادی قادر به یکی از این پاسخهاست. شکل (۱۵) جبهه پارتو را نشان می د هد که تو سط ال گوریتم MOPSO به دست آ مده نیز نزدیک به یکی از این پاسخهاست. شکل (۱۵) جبهه پارتو را نشان می د هد که تو سط ال گوریتم MOPSO به دست آ مده است. رامحلهای موجود در جبهه پارتو را نشان می د هد که تو سط ال گوریتم کامل از بهینه سازی تک هد فه است. رامحل ها است که در جبهه پارتو قرار می گیرند و پاسخ حاصل از بهینه سازی تک هد فه نیز نزدیک به یکی از این پاسخهاست. شکل (۱۵) جبهه پارتو را نشان می د هد که تو سط ال گوریتم MOPSO به دست آ مده است. رامحلهای موجود در جبهه پارتو را نشان می د هد که تو سط ال گوریتم MOPSO به دست آ مده را حرل می انترا می موجود در جبهه پارتو رامحلهای بهینه دو میگر سیستم میتواند برا ساس ترجی حات خود منا سبترین رامحل را انتخاب کند. پارامترهای الگوریتم MOPSO در جدول (۵) ارائه شده است.



شكل (۱۱): مقايسه عملكرد الگوريتم **PSO با الگوريتمهای ACO_R ،ABC و DE و ACO و E** در سناريوی اول Figure (11): Iteration performance of the PSO algorithm compared to ABC, ACO_R and DE for scenario #1



شکل (۱۲): مقایسه عملکرد الگوریتم **PSO با الگوریتمهای ACO_R ،ABC و DE و DE در سناریوی دوم** Figure (12): Iteration performance of the PSO algorithm compared to ABC, ACO_R and DE for scenario #2



STATCOM شکل (۱۳): ولتاژ باس ۱۶ در سه حالت بدون جبران کننده، با سه SVC و با سه Figure (13): The voltage of bus 16 in three states; without a compensator, with three SVCs, and with three STATCOMs









Table (5): Parameters of MOPSO algorithm
جدول (۵): متغیرهای الگوریتم MOPSO

مقدار	متغير	مقدار	متغير
۱ و ۲	ضریب یادگیری شخصی و عمومی	۵۰	ماگزيمم تكرار
Y	تعداد شبکه ها در هر بعد	۵۰	تعداد ذرات
• / \	نرخ تورم	۲۰	اندازه مخزن
٢	فشار انتخاب رهبر	• / Δ	وزن اينرسي
• / \	نرخ جهش	•/٩٩	نرخ میرایی وزن اینرسی

علاوه بر این، نتایج نشان میدهد که رویکرد چندهدفه پیشنهادی برای جایابی منابع توان راکتیو در کاهش پیا مدهای FIDVR مؤثر است. الگوریتم MOPSO قادر به کشف مجموعهای از راهحلهای نامغلوب است، بنابراین انتخابهای متنوعی را در اختیار عملگر شبکه قرار میدهد. نتایج نشاندهنده اهمیت در نظر گرفتن اهداف چندگانه در جایابی منابع توان راکتیو برای د ستیابی به عملکرد قوی تر و قابل اطمینان تر سیستم قدرت است.

۵- نتیجهگیری

با بررسی کامل مراجع موجود، مشخص شد که روش کاهش بار یکی از روش های متداول برای کاهش پدیده FIDVR در شبکههای قدرت است. لیکن استفاده از این روش می تواند تبعات نامطلوبی از جمله کاهش قابلیت اطمینان شبکه، ا فزایش هزينه برق، اختلال در كسب و كارها و آسيب به وسايل الكتريكي را به دنبال داشته باشد. استفاده از منابع توان راكتيو مانند SVC و STATCOM می تواند به طور موثر مشکلات مرتبط با رو یداد FIDVR را کاهش د هد. در این مقاله، یک رویکرد ترکیبی برای جایابی منابع توان راکتیو جهت مقابله با این رویداد ارائه شد. یک شبکه عصبی MLP سه لا یه، دارای نورون های خروجی با تابع خطی و نورونهای پنهان با تابع سیگموئید، برای برازش چندبعدی دادهها طراحی شد که ظرفیت تزریق توان راکتیو سه باس تعیین شده را به عنوان ورودی گرفته و شاخص RVSI را به عنوان خروجی ایجاد می کند. همچنین یک رویکرد برنامهنویسی چند هدفه برای شناسایی ظرفیت بهینه منابع برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاهمدت با ا ستفاده از شاخصهای حساسیت ولتاژ و براساس روشهای بهینهسازی هوشمند ارائه شد. الگوریتم PSO برای دستیابی به ظرفیت های بهی نه م نابع توان راکتیو در برابر شدیدترین موارد خطا پیادهسازی شد و نتایج نشان داد که این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم های بهینهسازی دیگر نظیر ACO_R ،ABC و DE که در این مقاله اجرا شده است، نتایج بهتری داشته و شاخص RVSI در آن کم تر است. همچنین از الگوریتم MOPSO برای حل مسئله بهینه سازی دوهدفه، استفاده شد و مجموعهای از نتایج نامغلوب حا صل شد به این معنی که هیچ راهحلی در هر دو هدف برتر از سایر راهحل ها نباشد. نتایج نشان داد که رویکرد پیشنهادی میتواند به طور موثر رویدادهای FIDVR را کاهش دهد. روش پیشنهادی عملکرد دینامیکی و گذرای بارهای سیستم تهو یه مط بوع را در شبیه سازی ها نظر گرفته است که برای بررسی دقیق پایداری ولتاژ در طول رویدادهای FIDVR بسیار مهم است. نشان داده شد که تصمیم گیری درست و دقیق در تعیین نوع جبرانساز و تعیین صحیح ظرفیت آن به طور قا بل توجهی پا یداری ول تاژ را در سیستم به بود می بخ شد. ملاح ظه می شود تابع هدف برای دو سناریو که یکی ا ستفاده از SVC و دیگری ا ستفاده از STATCOM براى مقابله با ناپدارى ولتاژ كوتاه مدت ناشى از پديده FIDVR بوده بهطور قابل توجهى بهبود يافته است. راه حل موثر و کارآمد ارائه شده را میتوان برای سایر سیستمهای قدرت با ساختارهای مختلف اعمال کرد و همچنین می توان آنرا با اعمال تغییرات بار و نفوذ انرژیهای تجدیدپذیر گسترش داد.

ضمايم

مقدار	نام متغير	الگوريتم		
۱	تعداد ذرات			
۲۰۰	ماگزیمم تکرار			
۱۰۰	تعداد زنبورهای ناظر	ABC		
١	ضريب شتاب كران بالايي			
١.	تعداد ذرات			
۲۰۰	ماگزیمم تکرار			
۴.	اندازه نمونه	ACO _R		
•/۵	ضريب تشديد			
١	نسبت انحراف-فاصله			
۵۰	تعداد ذرات			
۲۰۰	ماگزیمم تکرار			
• /٢	حد پايين ضريب مقياس	DE		
•/٨	حد بالای ضریب مقیاس			
• /٢	احتمال تقاطع			

جدول: پارامترهای الگوریتمهای ACO_R ،ABC و DE

References

مراجع

- K. Zhang, H. Zhu, S. Guo, "Dependency analysis and improved parameter estimation for dynamic composite load modeling", IEEE Transaction on Power System, vol. 32, no. 4, pp. 3287–3297, July 2017 (doi: 10.1109/PESGM.2017.8273973).
- [2] E. Hajipour, H. Saber, N. Farzin, M. R. Karimi, S.M. Hashemi, A. Agheli, H. Ayoubzadeh, M. Ehsan, "An improved aggregated model of residential air conditioners for FIDVR studies", IEEE Transaction on Power System, vol. 35, no. 2, pp. 909-919, March 2020 (doi: 10.1109/TPWRS.2019.2940596).
- [3] Z. Zhong, L. Guan, Y. Su, J. Yu, J. Huang, M. Guo, "A method of multivariate short-term voltage stability assessment based on heterogeneous graph attention deep network", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 136, p. 107648, March 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107648).
- [4] R. Bekhradian, M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, "Current-based blocking scheme to stabilize distribution network relays against FIDVR", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 132, p. 107205, Nov. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107205).
- [5] S. Sundarajoo, D. M. Soomro, "Under voltage load shedding and penetration of renewable energy sources in distribution systems: a review", International Journal of Modelling and Simulation, vol. 42, no. 4, pp. 653-679, Nov. 2022 (doi: 10.1080/02286203.2022.2143191).
- [6] H. Yang, N. Li, Z. Sun, D. Huang, D. Yang, G. Cai, C. Liu, T. Zhang, W. Zhang, "Real-Time Adaptive UVLS by Optimized Fuzzy Controllers for Short-Term Voltage Stability Control", IEEE Transaction on Power System, vol. 37, no. 2, pp. 1449-1460, March 2022 (doi: 10.1109/TPWRS.2021.3105090).
- [7] Q. Li, Y. Xu, C.Ren, "A hierarchical data-driven method for event-based load shedding against faultinduced delayed voltage recovery in power systems", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 1, pp. 699-709, Jan. 2021 (doi: 10.1109/TII.2020.2993807).
- [8] Q. Huang, R. Huang, W. Hao, J. Tan, R. Fan, Z. Huang, "Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning", IEEE Transaction on Smart Grid, vol. 11, no. 2, pp. 1171-1182, March 2020 (doi: 10.1109/TSG.2019.2933191).
- [9] S. Nourollah, F. Aminifar, G. B. Gharehpetian, "A hierarchical regionalization-based load shedding plan to recover frequency and voltage in microgrid", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 4, pp. 3818-3827, July 2019 (doi: 10.1109/TSG.2018.2837160).
- [10] M. Ghotbi-Maleki, R. Mohammadi-Chabanloo, H. Javadi, "Load shedding strategy using online voltage estimation process for mitigating fault-induced delayed voltage recovery in smart networks", Electric Power Systems Research, vol. 214, p. 108899, Jan. 2023 (doi: 10.1016/j.epsr.2022.108899).
- [11] A. Haji-Mohammadi, M. Abedini, M. Sanaye-Pasand, "Novel relative slip based under-voltage load shedding protection scheme to mitigate FIDVR", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 1, pp. 277-286, Feb. 2023 (doi: 10.1109/TPWRD.2022.3184356).
- [12] M. Ghotbi-Maleki, R. Mohammadi-Chabanloo, H. Javadi, "MILP-based load shedding strategy for mitigating FIDVR phenomenon in smart networks", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 146, pp. 108736, March 2023 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108736).
- [13] M. Taheri, M. Abedini, F. Aminifar, "A novel centralized load shedding approach to assess short-term voltage stability: a model-free using time series forecasting", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 5, Oct. 2023 (doi: 10.1109/TPWRD.2023.3266265).
- [14] M. Ghotbi-Maleki, R. Mohammadi, H. Javadi, "Load shedding method aimed fast voltage recovery to prevent interference of FIDVR with UV relays", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 17, no. 11, pp. 2667-2686, June 2023 (doi: 10.1049/gtd2.12846).
- [15] Q. Li; Y. Xu; C. Ren; R. Zhang, "A probabilistic data-driven method for response- based load shedding against fault-induced delayed voltage recovery in power system", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, no. 4, pp. 3491-3503, July 2023 (doi: 10.1109/TPWRS.2022.3206839).
- [16] S.M. Hashemi, M. Sanaye-Pasand, M. Abedini, "Under-impedance load shedding a new preventive action against voltage instability", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 13, no. 2, pp. 201-208, Jan. 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5851).
- [17] A. Gargoom, M. Elmusrati, A. Gaouda, "Enhancing the operation of smart inverters with PMU and data concentrators", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 140, p. 108077, Sep. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108077).
- [18] M. Ahmed, N. Al-Masood, T. Aziz, "Optimal selection of single tuned passive filters to enhance post-fault voltage", IET Renewable Power Generation, vol. 17, no. 7, p. 1747-1767, May 2023 (doi: 10.1049/rpg2.12710).

- [19] A. Boricic, J.L.R. Torres, M. Popov, "Fundamental study on the influence of dynamic load and distributed energy resources on power system short-term voltage stability", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 131, p. 107141, Oct. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107141).
- [20] A. Dalirian, A. Solat, S.M.J. Rastegar-Fatemi, "Smart control of photovoltaic static compensator system based on fuzzy logic control to improve voltage stability", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 49, pp. 119-134, March 2023 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1403.15.60.7.2).
- [21] M. Abbasi, M Nafar, M Simab, "Management and control of microgrids connected to three-phase network with the approach of activating current limitation under unbalanced errors using fuzzy iIntelligent method with the presence of battery, wind, photovoltaic and diesel sources", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 60, pp. 55-66, June 2021 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.49.4.3).
- [22] H.A. Villarroel-Gutierrez, J. Morales, M. Molina, "A novel methodology for dynamic voltage support with adaptive schemes in photovoltaic generators", Electrical Engineering, vol. 104, pp. 4103-4123, July 2022 (doi: 10.1007/s00202-022-01600-w).
- [23] A. Alzahrani, R. Shah, N. Mithulananthan, "Examination of effective VAr with respect to dynamic voltage stability in renewable rich power grids", IEEE Access, vol. 9, pp. 75494-75508, May 2021 (doi: 10.1109/ACCESS.2021.3079292).
- [24] H. Sun, Q. Guo, J. Qi, V. Ajjarapu, R. Bravo, J. Chow, Z. Li, R. Moghe, E. Nasr-Azadani, U. Tamrakar, G.N. Taranto, R. Tonkoski, G. Valverde, Q. Wu, G.Yang, "Review of challenges and research opportunities for voltage control in smart grids", IEEE IEEE Transactions on Power Systems, vol. 34, no. 4, pp. 2790-2801, July 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2019.2897948).
- [25] S.R. Ghatak, S. Sannigrahi, P. Acharjee, "Comparative performance analysis of DG and DSTATCOM using improved PSO based on success rate for deregulated environment", IEEE Systems Journal, vol. 12, no. 3, pp. 2791-2802, Sep. 2018 (doi: 10.1109/JSYST.2017.2691759).
- [26] S. Devi, M. Geethanjali, "Optimal location and sizing determination of distributed generation and DSTATCOM using particle swarm optimization algorithm", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 62, pp. 562–570, Nov. 2014 (doi: 10.1016/j.ijepes.2014.05.015).
- [27] J. Qi, W. Huang, K. Sun, W. Kang, "Optimal placement of dynamic var sources by using empirical controllability covariance", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 1, p. 240-249, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2016.2552481).
- [28] W. Huang, K. Sun, J. Qi, J. Ning, "Optimal allocation of dynamic var sources using the voronoi diagram method integrating linear programing", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 6, pp.4644-4655, Nov. 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2681459).
- [29] W. Wang, M.D. Aguilo, K.B. Mak F.D. Leon, D. Czarkowski, Member, R. E. Uosef, "Time series power flow framework for the analysis of FIDVR using linear regression", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 6, pp. 2946-2955, Dec. 2018 (doi: 10.1109/TPWRD.2018.2832852).
- [30] R. Bravo, Y. Xu, D. P. Chassin, "Fault induced delayed voltage recovery (FIDVR) model validation", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Dallas, TX, USA, May 2016 (doi: 10.1109/TDC.2016.7520045).
- [31] Y. Liu, L. Wu, J. Li, "D-PMU based applications for emerging active distribution systems: A review", Electric Power Systems Research, vol. 179, p. 106063, Feb. 2020 (doi: 10.1016/j.epsr.2019.106063).
- [32] H. Saber, M. R. Karimi, E. Hajipour, N. Farzin, S. M. Hashemi, A. Agheli, H. Ayoubzadeh, M. Ehsan, "Investigating the effect of ambient temperature on fault-induced delayed voltage recovery events", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 14, no. 9, p. 1781-1790, May 2020 (doi: 10.1049/ietgtd.2019.1025).
- [33] S. Nekkalappu, V. Vittal, J. Undrill, B. Keel, B. Gong, K. Brown, "Synthesis of load and feeder models using point on wave measurement data", IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 8, pp. 198-210, May 2021 (doi: 10.1109/OAJPE.2021.3079724).
- [34] WECC dynamic composite load model (CMPLDW) specifications, Western Electricity Coordination Council, Jan. 2015.
- [35] H. Bai, V. Ajjarapu, "A novel online load shedding strategy for mitigating fault-induced delayed voltage recovery", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 294-304, Feb. 2011 (doi: 10.1109/TPWRS.2010.2047279).
- [36] 'WECC dynamic composite load model (CMPLDW) specifications', https://home.engineering.iastate.edu/~jdm/ee554/WECC%20Composite%20Load%20Model%20Specificati ons%2001-27-2015.pdf, accessed 11 June 2019.

- [37] Y. Xu, Z. Y. Dong, K. Meng, W. F. Yao, R. Zhang, K. P. Wong, "Multi-objective dynamic VAR planning against short-term voltage instability using a decomposition based evolutionary algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 29, no. 6, pp. 2813-2822, Nov. 2014 (doi: 10.1109/TPWRS.2014.2310733).
- [38] Y. Dong, X. Xie, B. Zhou, W. Shi, and Q. Jiang, "An integrated high side var-voltage control strategy to improve short-term voltage stability of receiving-end power systems", IEEE Trans. on Power System, vol. 31, no. 3, pp. 2105-2115, May 2016 (doi: 10.1109/PESGM.2016.7741250).
- [39] Y. Zhang, Y. Xu, Z. Y. Dong, R. Zhang, "A hierarchical self-adaptive data-Analytics method for real-time power system short-term voltage stability assessment", IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 15, no. 1, pp. 74-84, Jan. 2019 (doi: 10.1109/TII.2018.2829818).
- [40] R. Sellami, F. Sher, R. Neji, "An improved MOPSO algorithm for optimal sizing & placement of distributed generation: A case study of the Tunisian offshore distribution network (ASHTART)", Energy Reports, vol. 8, pp. 6960-6975, Nov. 2022 (doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.049).
- [41] C. Mokhtara, B. Negrou, N. Settou, B. Settou, M. MahmoudSamy, "Design optimization of off-grid hybrid renewable energy systems considering the effects of building energy performance and climate change: Case study of Algeria", Energy, vol. 219, p. 119605, March 2021 (doi: 10.1016/j.energy.2020.119605).
- [42] D. Kosterev, "Composite load model development and implementation", NERC-DOE FIDVR Conference, Alexandria, VA, USA, pp.121-128, 2015, https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/3-compositeload-model-development.pdf.
- [43] A. G. Gad, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: a systematic review", Arch. Comput. Methods Eng., vol. 29, p. 2531–2561, Apr. 2022 (doi: 0.1007/s11831-021-09694-4).

زيرنويسها:

- 1. Fault-induced delayed voltage recovery
- 2. Residential air conditioners
- 3. Stall
- 4. Short-term voltage stability
- 5. Graph neural networks
- 6. Graph attention deep network
- 7. Fast voltage collapses
- 8. Output feeder relays
- 9. Side relays
- 10. Load shedding
- 11. Short-term voltage recovery criterion
- 12. Particle swarm optimization
- 13. Deep reinforcement learning
- 14. Under-voltage load shedding
- 15. Mixed integer linear programming
- 16. Distributed generators
- 17. Voronoi diagram
- 18. Volt/ampere reactive
- 19. Multilayer perceptron
- 20. Artificial bee colony
- 21. Ant Colony Optimization for Continuous Domains
- 22. Differential Evolution
- 23. Multi-objective particle swarm optimization
- 24. Thermal overload protection switches
- 25. Distribution phasor measurement units
- 26. Composite load model
- 27. Western Electricity Coordinating Company
- 28. Root-mean-squared voltage-dip severity index
- 29. Voltage-dip severity index
- 30. Deviation voltage index
- 31. Sensitivity index
- 32. Total sensitivity index
- 33. DIgSILENT Simulation Language