

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

Maryam Bahramgiri<sup>1</sup>, *Ph.D. Student*, Mehdi Ehsan<sup>2</sup>, *Professor*, Babak Mozafari<sup>1</sup>, *Associate Professor*

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran  
maryam.bahramgiri@srbiau.ac.ir, mozafari@srbiau.ac.ir

<sup>2</sup> 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 data-driven 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 single-objective 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<sub>R</sub>), 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. 1-21, July 2025 (in Persian)

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

مریم بهرامگیری<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، مهدی احسان<sup>۲</sup>، استاد، سید بابک مظفری<sup>۱</sup>، 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) شده است. وقوع این پدیده منجر به ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت شده و گاهی نیز به فروپاشی ولتاژ می‌انجامد. برای مقابله با این رویداد، جبران‌سازهای موازی مانند SVC و STATCOM می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، یک روش ترکیبی داده‌محور براساس جایابی منابع ولت-آمپر راکتیو (VAR) برای کاهش رویداد FIDVR پیشنهاد شده است. این روش از شاخص جدید و کارآمدی برای ارزیابی ولتاژ پس از خطا استفاده کرده و با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و فنی، محل و اندازه بهینه منابع VAR را تعیین می‌کند. شبکه عصبی چند لایه پرسپترون (MLP) برای حل مسئله نگاشت چند بعدی با در نظر گرفتن توان‌های راکتیو تزیق شده به باس‌ها استفاده شده است. سپس، بهینه‌سازی چند هدفه برای شناسایی اندازه بهینه منابع برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت و نیز جلوگیری از رویدادهای FIDVR با روش‌های بهینه‌سازی هوشمند پیشنهاد شده است. ابتدا بهینه‌سازی برای تابع تک‌هدفه با وزن‌های تعیین شده توسط الگوریتم PSO انجام شده و سپس نتایج با الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)، الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای حوزه‌های پیوسته (ACOR) و الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) مقایسه شده است. همچنین این مقاله به شناسایی یک جبهه پارتو از راه‌حل‌های نامغلوب با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) می‌پردازد. روش پیشنهاد شده بر روی سیستم ۳۹ باس IEEE با مدل بار تجمیع شده دینامیکی موتورهای سیستم تهویه مطبوع آزمایش شده است. نتایج نشان می‌دهند که این روش در حل مسائل بهینه‌سازی توان راکتیو و کاهش اثرات FIDVR بسیار موثر است.

**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 مصرف‌کنندگان طراحی شده است. با این حال، از اختلالاتی که یکی از آنها پدیده بازیابی و لتاژ تاخیری ناشی از خطا<sup>۱</sup> (FIDVR) است، موصوفه می‌شود. FIDVR پدیده‌ای است که به دلیل نفوذ گسترده سیستم‌های تهویه مطبوع خانگی<sup>۲</sup> (RACs) در سیستم‌های قدرت به وقوع می‌پیوندد. این سیستم‌ها دارای موتورهای القایی تکفاز هستند که اینرسی پایین و گشتاور ثابت دارند و در اثر افت ولتاژ ناشی از وقوع خطا در شبکه ممکن است متوقف<sup>۳</sup> شوند. پس از رفع خطا، موتورهای متوقف شده توان راکتیو بالا و همچنین جریان ناشی در حدود ۵ تا ۶ برابر جریان نامی از شبکه درخواست می‌کنند که منجر به تداوم افت ولتاژ شده و فرآیند بازیابی و لتاژ را به تاخیر می‌اندازد. این تاخیر باعث افت ولتاژ بلند مدت شده و گاهی سبب بیش‌تحریرکی نیروگاه‌های مجاور و خروج آن‌ها از شبکه می‌شود. لازم به ذکر است پس از گذشت مدتی، ادوات حفاظت گرمایی موتورها عمل کرده و میزان قابل توجهی از بارها را از شبکه جدا می‌کند. این کار باعث افزایش ولتاژ شبکه به دلیل دینامیک تپ‌چنجرها و جبران‌سازهای توان راکتیو می‌شود. در صورتی که کنترل و نظارتی بر پدیده FIDVR وجود نداشته باشد، به دلیل خروج زنجیره‌ای تجهیزات شبکه ممکن است این پدیده به خاموشی گسترده و فروپاشی ولتاژ بیانجامد [۲، ۱]. بنابراین بررسی و شبیه‌سازی FIDVR، ارائه راهکارهایی برای مقابله با آن و همچنین تثبیت پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت<sup>۴</sup> (STVS) ضروری به نظر می‌رسد.

برای شبیه‌سازی FIDVR و ارزیابی STVS، یک مدل جدید مبتنی بر شبکه‌های عصبی گراف<sup>۵</sup> (GNN) در [۳] پیشنهاد شده است. این مدل شاخص‌های پایداری چند متغیره را برای هر باس تعریف کرده و از یک شبکه عمیق توجه‌گرا<sup>۶</sup> (GADN) برای شناسایی FIDVR و فروپاشی سریع ولتاژ<sup>۷</sup> (FVCs) استفاده می‌کند. در [۴] یک الگوریتم جدید برای تشخیص FIDVR در سیستم توزیع پیشنهاد شده است. این الگوریتم به‌گونه‌ای طراحی شده که از شکل موج جریان در رله‌های تغذیه‌کننده خروجی<sup>۸</sup> (OFR) و رله‌های جانبی<sup>۹</sup> (LR) برای مسدود کردن آن‌ها در مدت زمان مشخصی استفاده می‌کند.

برای مقابله با پدیده FIDVR و کاهش آن دو رویکرد عمده وجود دارد: رویکرد اصلاح در سمت بار و اصلاح در سمت شبکه. کاهش بار<sup>۱۰</sup> (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 زمان عملیاتی برای بهبود FIDVR استفاده شود. این روش تعادل بین توان راکتیو تولید شده و مصرفی را در شرایط خطا حفظ می‌کند. در روش‌های مرسوم کاهش بار، ولتاژ باس‌ها به صورت دوره‌ای بررسی می‌شوند و اگر مقدار آن‌ها کمتر از آستانه قابل قبول باشد، مقدار بار روی باس‌ها تنظیم می‌شود [۵]. در [۶] از کنترل فازی برای کاهش بار اساس بهبود معیار بازیابی ولتاژ کوتاه مدت<sup>۱۱</sup> (STVRC) و همچنین از بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱۲</sup> (PSO) برای رسیدن به متغیرهای کنترل‌کننده بهینه و به حداقل رساندن میزان کاهش بار استفاده شده است. روش پیشنهادی در [۶] می‌تواند مکان، زمان و مقدار کاهش بار را در زمان واقعی بر اساس تغییرات ولتاژ تعیین کند. یک رویکرد داده‌محور برای پیش‌بینی و کنترل برخط کاهش بار در حین وقوع پدیده FIDVR در [۷] پیشنهاد شده است. علاوه بر این، [۸] یک الگوریتم یادگیری تقویت عمیق<sup>۱۳</sup> (DRL) را برای کنترل اضطراری سیستم‌های قدرت ارائه می‌دهد که ترمز دینامیکی ژنراتور و کاهش بار تحت ولتاژ<sup>۱۴</sup> (UVLS) را به کار می‌برد. 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 شده است. این طرح هم مبتنی بر پاسخ و هم مبتنی بر رویداد است و میزان کاهش بار را برای هر باس بر اساس مقادیر ولتاژ و فرکانس بهینه می‌کند. یک فرآیند پخش بار اصلاح شده گاو-سایدل که از مدل موتور القایی مرتبه سه استفاده می‌کند، برای تسهیل تخمین برخط ولتاژ در [۱۰] ارائه شده است. برای تمایز بین بارهای پایدار و ناپایدار موتوری، یک الگوریتم کاهش بار بر اساس شاخص لغزش نسبی در [۱۱] پیشنهاد شده است. همچنین یک مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۱۵</sup> (MILP) برای کاهش بار در شبکه‌های هوشمند در [۱۲] و یک رویکرد کاهش بار متمرکز برای تصمیم‌گیری بلادرنگ در [۱۳] ارائه شده است. در [۱۴] دو رویکرد برای کاهش بار در جلوگیری از رویدادهای شدید FIDVR پیشنهاد شده است. علاوه بر این، یک فرآیند کاهش بار مبتنی بر پاسخ ولتاژ برای کنترل سریع این رویداد 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<sup>۱۶</sup> (DG) و سیستم‌های ذخیره انرژی برای تعادل تولید و مصرف توان راکتیو استفاده می‌شود. همچنین استقرار منابع تجدیدپذیر مبتنی بر اینورتر در سیستم‌های توزیع در سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است 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 شده است. در [۱۹]، یک مطالعه گسترده برای بررسی تأثیر بار دینامیکی و منابع تجدیدپذیر بر پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در سیستم‌های قدرت انجام شده است. یک کنترل فازی جدید مبتنی بر جبران‌کننده سنکرون استاتیکی برای پایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت در [۲۰] ارائه شده است. 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 محدود کردن جریان خطاهای نامتعادل ارائه شده است. 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، به سرعت شناسایی کرده و اینورترهای نیروگاه را به حالت گذر از خطا برمی‌گرداند. 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 عملیاتی مختلف مانند حالت پایدار و ناپایدار بررسی می‌شود. تعیین اندازه منابع دینامیکی توان راکتیو به طور معمول به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی و غیرمحدب فرمول‌بندی می‌شود [۲۴]. الگوریتم PSO در [۲۵] برای بهینه‌سازی تخصیص منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است، 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 ورونوی<sup>۱۷</sup> به همراه برنامه‌ریزی خطی برای کمینه‌کردن تابع هزینه در به کارگیری منابع توان راکتیو برای مقابله به FIDVR استفاده شده است.

با بررسی جامع مقالات مختلف، مشخص می‌شود که روش کاهش بار یکی از روش‌های رایج برای مقابله با پدیده FIDVR است. با این حال، استفاده از این روش می‌تواند 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 می‌رسد که روش‌های سمت شبکه برای مقابله با FIDVR راهکار موثرتری نسبت به روش‌های سمت بار ارائه می‌دهند. علاوه بر این، جبران‌کننده‌ها به خصوص در کاهش اثرات ناشی از ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت مفید هستند، زیرا قابلیت کنترل توان راکتیو شبکه را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند.

در این مقاله، یک روش نوآورانه ترکیبی براساس برنامه‌ریزی ولت-آمپر راکتیو<sup>۱۸</sup> (VAR) برای کاهش رویداد FIDVR ارائه شده است. این روش با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و فنی، از شاخص کارآمدی برای حساسیت ولتاژ در تعیین محل و اندازه بهینه منابع VAR استفاده می‌کند. این شاخص برای ارزیابی کمی این پدیده به کار می‌رود. شبکه عصبی چند لایه پرسپترون<sup>۱۹</sup> (MLP) برای حل مسئله نگاشت چند بعدی با در نظر گرفتن توان‌های راکتیو تزریق‌شده به باس‌ها استفاده شده است. یک رویکرد برنامه‌نویسی دوهدفه به منظور کاهش هزینه‌ها و به حداکثر رساندن عملکرد سیستم برای موارد خطای احتمالی معرفی شده که از شاخص کاربردی حساسیت ولتاژ و همچنین بهینه‌سازی هوشمند برای تعیین اندازه‌های بهینه برای SVC و STATCOM استفاده می‌کند. مسئله بهینه‌سازی دو هدفه تعادل بهینه‌ای بین ارزیابی STVS و دقت مدل‌سازی شده برقرار می‌کند. ابتدا بهینه‌سازی برای تابع تک‌هدفه با وزن‌های تعیین‌شده توسط الگوریتم PSO انجام شده و سپس نتایج با الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی<sup>۲۰</sup> (ABC) و الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای حوزه‌های پیوسته<sup>۲۱</sup> (ACOR) و الگوریتم تکامل تفاضلی<sup>۲۲</sup> (DE) مقایسه شده است. همچنین این مقاله به شناسایی یک جبهه پارتو از راه‌حل‌های نامغلوب با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه<sup>۲۳</sup> (MOPSO) می‌پردازد. در کاربردهای عملی، روش پیشنهادی را می‌توان برای تشخیص

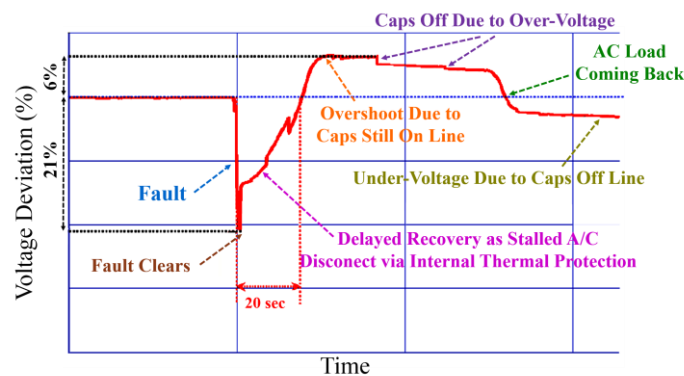
ولتاژ غیرقابل قبول پس از یک اختلال بزرگ مورد استفاده قرار داد. این امر به طور قابل توجهی آگاهی موقعیتی سیستم قدرت را افزایش می‌دهد و خطر خاموشی ناشی از ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ را کاهش می‌دهد. نوآوری کلیدی در رویکرد ترکیبی نهفته است که برنامه‌نویسی ولت/آمپر راکتیو، شبکه‌های عصبی و بهینه‌سازی چند هدفه 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 می‌گیرد.

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، نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

## ۲- شرح مسئله

### ۲-۱- رویدادهای FIDVR

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 به‌کاررفته 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 می‌گویند [۲۹]. شکل (۱) نمونه‌ای از تغییرات ولتاژ حین رویداد FIDVR را نشان می‌دهد [۳۰]. پس از گذشت زمانی بین ۱ تا ۲۰ ثانیه، سوئیچ‌های حفاظت گرمایی موتورها<sup>۲۴</sup> (TOPS) عمل کرده و موتورها را از شبکه جدا می‌کنند. این کار منجر به از دست دادن بار و فعال شدن جبران‌سازهای شبکه شده که به افزایش ولتاژ می‌انجامد. اگر جبران‌سازها به دلیل تغییرات بار در حین یا پس از خطا به درستی عمل نکنند، این پدیده می‌تواند منجر به خاموشی‌های گسترده و یا فروپاشی ولتاژ شود. واحدهای اندازه‌گیری فازور توزیع<sup>۲۵</sup> (D-PMU) می‌توانند رویدادهای FIDVR را به صورت زمان واقعی ثبت و پیگیری کنند [۳۱]. تعدادی از رویدادهای قابل توجه FIDVR در سراسر جهان در [۳۲] ارائه شده است.

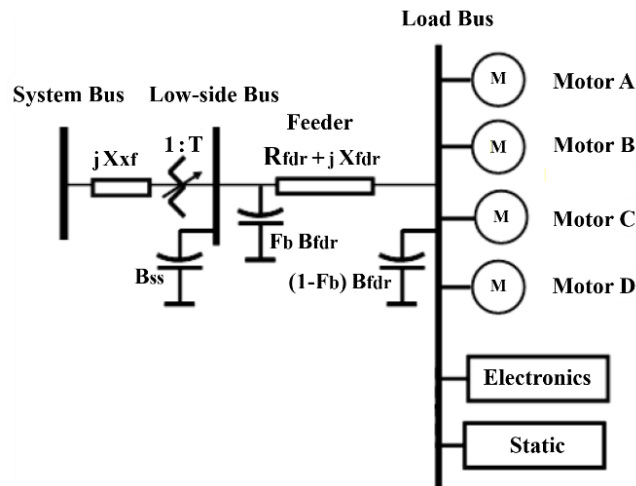


شکل (۱): نمونه‌ای از تغییرات ولتاژ حین رویداد FIDVR [۳۰]

Figure (1): Typical pattern for FIDVR [30]

### ۲-۲- مدل بار مرکب برای سیستم‌های مطبوع خانگی

این بخش به مدل بار مرکب<sup>۲۶</sup> (CLM) دینامیکی برای سیستم‌های تهویه مطبوع خانگی می‌پردازد. یک رویکرد برای ترکیب مدل‌های بار و فیدر، با استفاده از اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان لحظه‌ای، در [۳۳] ارائه شده است. این مدل برای سیستم‌های توزیع در شرایط خطا طراحی شده و شامل بارهای تک‌فاز، سه‌فاز، بارهای امپدانس، ترانسفورماتورهای توزیع و خطوط توزیع است. متغیرهای به‌کاررفته در این مدل با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات غیرخطی یکپارچه با تحلیل الکترومغناطیسی گذرا تعیین شده‌اند. مدل بار مرکب دینامیکی ارائه‌شده توسط شورای هماهنگی برق در غرب آمریکا<sup>۲۷</sup> (WECC) که به صورت خاص در تحلیل رویداد FIDVR به‌کار می‌رود، در شکل (۲) نشان داده شده است. این مدل شامل موتورهای القایی سه‌فاز، موتورهای القایی تک‌فاز، بارهای الکترونیکی، بارهای استاتیکی، ترانسفورماتور بار و فیدر توزیع است. موتورهای A، B و C انواع مختلفی از موتورهای سه‌فاز هستند، در حالی که موتور D یک موتور القایی تک‌فاز است [۳۴].



شکل (۲): ساختار مدل بار مرکب WECC [۳۴]

Figure (2): WECC composite load model structure [34]

مدار معادل ساده شده در حالت پایدار موتور القایی تکفاز در شکل (۳-الف) نشان داده شده که در آن  $R_{eq}$  و  $X_{eq}$  مقاومت و راکتانس معادل هستند که بر مبنای مقاومت و راکتانس موتور محاسبه می‌شوند و از روابط  $X_{eq}=X_s+X_r$  و  $R_{eq}=R_r$  حاصل می‌شوند. همچنین راکتانس مغناطیس شونده  $X_m$  و لغزش موتور  $s$  بر اساس این مدل، جریان، گشتاور الکتریکی و توان راکتیو موتور با توجه به (۱) تا (۳) حاصل می‌شوند:

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

$$T_e = \frac{P}{\omega_s} = \frac{V^2}{\omega_s} \frac{R_{eq}s}{R_{eq}^2 + (sX_{eq})^2} \quad (2)$$

$$Q = \frac{V^2}{X_m} + I^2 X_{eq} = \frac{V^2}{X_m} + \frac{V^2 X_{eq} s^2}{R_{eq}^2 + (sX_{eq})^2} \quad (3)$$

لغزش بحرانی با مشتق‌گیری گشتاور نسبت به لغزش حاصل می‌شود. این لغزش برابر با  $s_c = R_{eq}/X_{eq}$  است و مرز بین عملکرد حالت پایدار و توقف در موتور است. در شکل (۳-ب) منحنی گشتاور-لغزش در ولتاژهای 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 مصرفی اکتیو و راکتیو در موتورهای القایی تک‌فاز به صورت تابعی از ولتاژ در سه ناحیه مطابق شکل (۳-ج) فرمول‌بندی می‌شود.

- ناحیه اول که ولتاژ کمتر از ولتاژ توقف است:

$$P = \frac{R_{stall}}{R_{stall}^2 + X_{stall}^2} V^2 \quad (4)$$

$$Q = \frac{X_{stall}}{R_{stall}^2 + X_{stall}^2} V^2 \quad (5)$$

- ناحیه دوم که ولتاژ مابین ولتاژ توقف و ولتاژ شکست است:

$$P = k_{p2}(V_{brk} - V)^{N_{p2}} + P_{brk} \quad (6)$$

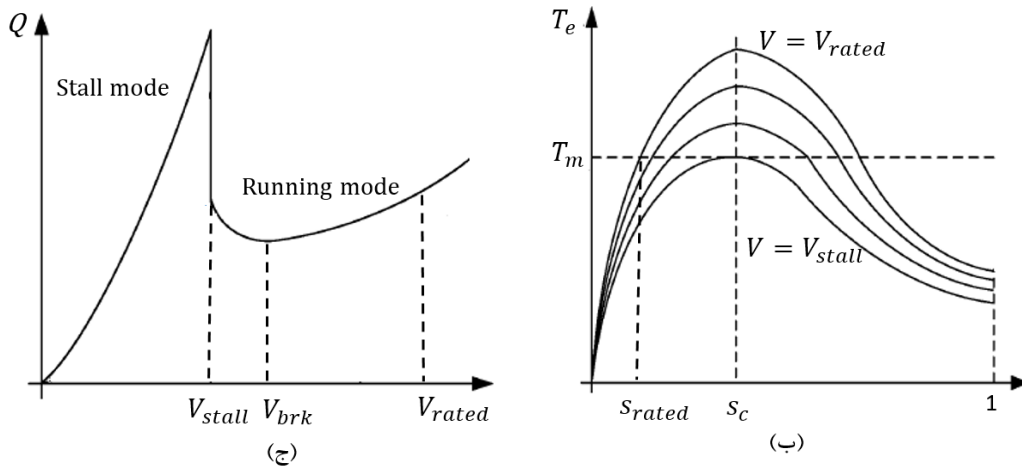
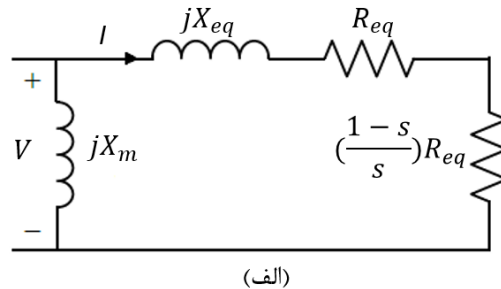
$$Q = k_{q2}(V_{brk} - V)^{N_{q2}} + Q_{brk} \quad (7)$$

- ناحیه سوم که ولتاژ بیشتر از ولتاژ شکست است:

$$P = k_{p1}(V - V_{brk})^{N_{p1}} + P_{brk} \quad (8)$$

$$Q = k_{q1}(V - V_{brk})^{N_{q1}} + Q_{brk} \quad (9)$$

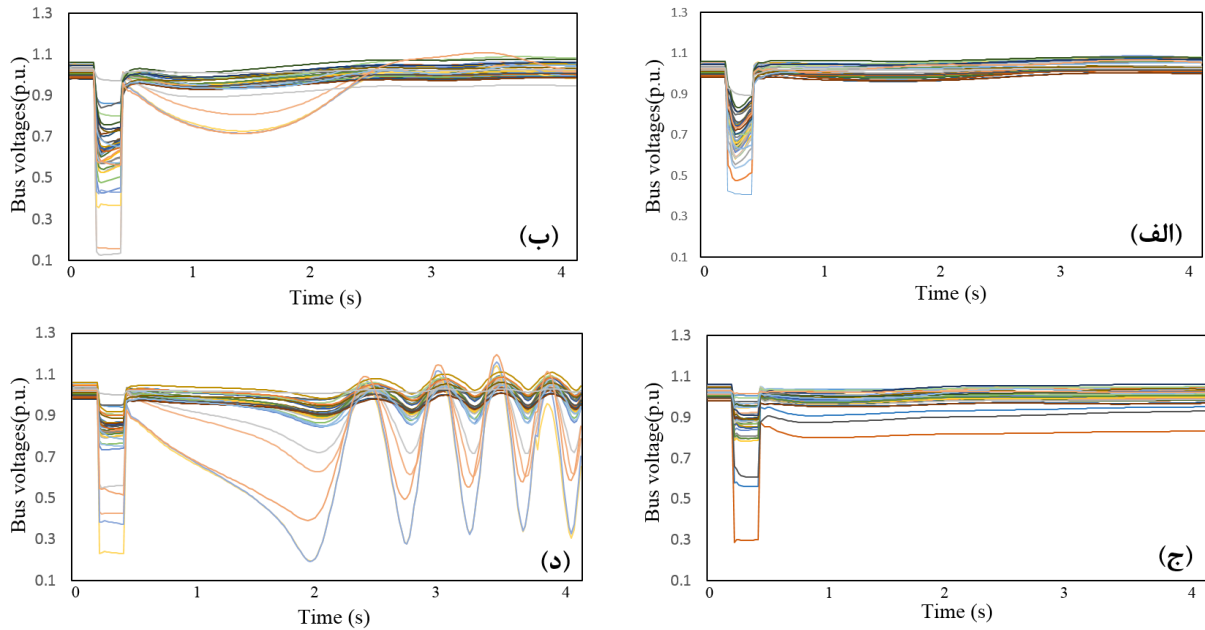
در این روابط  $X_{stall}$  و  $R_{stall}$  مقاومت و راکتانس موتور در حالت توقف هستند. همچنین  $P_{brk}$  و  $Q_{brk}$  توان اکتیو و راکتیو موتور در حالت توقف هستند. مقادیر  $k_{p1}$ ،  $k_{p2}$ ،  $k_{q1}$ ،  $k_{q2}$ ،  $N_{p1}$ ،  $N_{p2}$ ،  $N_{q1}$  و  $N_{q2}$  اعداد ثابتی هستند که از برازش منحنی ها در دو ناحیه به دست می آیند [۳۶]. این مدل در نرم افزار DigSILENT PowerFactory پیاده سازی شده است.



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

### ۳-۲- ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت

به طور کلی مسئله ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت را می توان به چهار سناریو تقسیم بندی کرد که در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۴-الف) ولتاژ پس از وقوع خطا به سرعت به مقدار اولیه خود باز می گردد که این سناریو پایدار و رضایت بخش است. 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 پدیده FIDVR رخ داده ولیکن پدیده به حالت پایدار بازگشته 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 بهبود 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 شکل موج 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- فرمول‌بندی مسئله

#### ۳-۱- 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 پیشنهاد شده است. در [۳۷] شاخصی تعریف شده که اگر تنها یک باس ولتاژ تاخیری داشته و ولتاژ در مابقی باس‌ها سریع به یافته شد به سختی می‌تواند وقوع این تاخیر و همچنین محل باس موردنظر را شناسایی کند. همچنین در [۳۸] برای ارزیابی عملکرد بازیابی ولتاژ در هر باس، یک شاخص شدت کاهش ولتاژ پیشنهاد می‌کند، اما فاقد ارزیابی نظام‌مند برای شناسایی پدیده FIDVR است. در این مقاله شاخص شدت کاهش ولتاژ بر مبنای مجذور میانگین مربعات<sup>۲۸</sup> (RVSI) برای ارزیابی شدت این پدیده استفاده شده است [۳۹]. برای تعریف این شاخص ابتدا شاخص انحراف ولتاژ<sup>۲۹</sup> (DVI) و شاخص شدت ولتاژ<sup>۳۰</sup> (VSI) در روابط (۱۰) و (۱۱) معرفی می‌شوند.

$$DVI_{i,t} = \begin{cases} \frac{V_{i,0} - V_{i,t}}{V_{i,0}} & , V_{i,t} \leq 0.9 V_{i,0} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

$$VSI = \int_{t_{el}}^T DVI_{i,t} dt \quad (11)$$

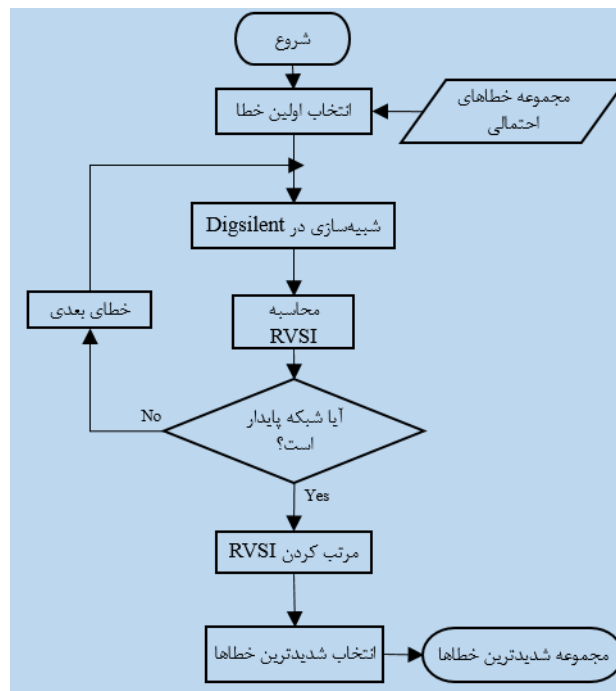
که در آن  $V_{i,0}$  ولتاژ قبل از وقوع خطا و  $V_{i,t}$  ولتاژ در زمان پس از خطا در باس  $i$  است. بازه زمانی گذرای پس از رفع خطا با  $T$  نشان داده می‌شود و  $t_{el}$  زمان رفع خطا است. RVSI مطابق (۱۲) تعریف می‌شود.

$$RVSI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_b} VSI^2}{N_b}} \quad (12)$$

که در آن  $N_b$  تعداد باس‌های شبکه را نشان می‌دهد. RVSI میانگین مربعی مقادیر VSI در تمام باس‌ها را محاسبه می‌کند. در میانگین مربعی، برخلاف میانگین حسابی، باس‌هایی که مقدار VSI بالاتری دارند، یعنی بازیابی ولتاژ در آن‌ها کندتر است، 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 می‌شود. در این تحقیق فرض می‌شود احتمال وقوع تمام خطاها در شبکه یکسان است. با تعیین RVSI برای همه موارد خطای احتمالی خطوط، مجموعه‌ای از خطاها با بالاترین مقادیر RVSI انتخاب می‌شود. نمودار نحوه انتخاب شدیدترین خطاهای احتمالی در شکل (۵) ارائه شده‌است. خطاهایی که منجر به ناپایداری ولتاژ می‌شوند در این مطالعه در نظر گرفته نشده‌اند.



شکل (۵): نمودار نحوه انتخاب شدیدترین خطاهای احتمالی

Figure (5): Flowchart of contingency selection

### ۳-۲- شاخص حساسیت

شاخص حساسیت شاخصی است که عموماً تأثیر تغییرات کوچک یک متغیر را بر سایر متغیرها نشان می‌دهد و به خوبی می‌تواند 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 می‌توان متغیرهای کنترلی شبکه را بهینه کرد تا پاسخ شبکه مورد نظر را به دست آورد. شاخص حساسیت<sup>۳۱</sup> (SI) که برای متغیر RVSI تعریف شده، در (۱۳) شرح داده شده است.

$$SI = \frac{RVSI(Q + \Delta Q) - RVSI(Q)}{\Delta Q} \quad (13)$$

در این رابطه  $\Delta Q$  توان راکتیو کوچکی است که به ترتیب در هر باس توسط یک منبع توان راکتیو تزریق می‌شود و مقدار آن ۱۰ مگاوار در نظر گرفته می‌شود. در هر مرحله شاخص حساسیت محاسبه شده و در نهایت شاخص حساسیت کل<sup>۳۲</sup> (TSI) نسبت به تزریق  $\Delta Q$  به باس  $j$  با (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$TSI_j = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_b} SI_{i,j}^k RVSI^k \quad (14)$$

شاخص حساسیت کل یا همان  $TSI_j$  شاخص حساسیت در باس  $j$  نسبت به تزریق بار راکتیو  $\Delta Q$  به باس  $j$  تحت خطای  $k$  است. باس‌هایی با بالاترین مقادیر شاخص حساسیت برای تزریق توان راکتیو و نصب جبران‌سازها انتخاب می‌شوند.

### ۳-۳- فرمول‌بندی ریاضی برای تعیین ظرفیت توان راکتیو

پس از تعیین محل نصب جبران‌سازها در شبکه، باید ظرفیت توان راکتیو در محل نصب تعیین شود. در این بخش یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی دوهدفه پیشنهاد شده است. این بهینه‌سازی با معادلات جبری-دیفرانسیلی شبکه موردنظر که در نرم‌افزار سیستم‌های قدرت شبیه‌سازی شده، همراه است. رویداد FIDVR حین وقوع خطا در شبکه در نرم‌افزار DigSILENT PowerFactory مدل‌سازی شده است. در این برنامه بارهای شبکه با بارهای تجمیع‌شده دینامیکی جایگزین شده‌اند. مدل عملکردی این بارها در زبان برنامه‌نویسی محیط نرم‌افزار<sup>۳۳</sup> (DSL) پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها از نقطه‌نظر فنی و اقتصادی بررسی شده و در بهینه‌سازی لحاظ می‌شوند. در این مسئله تابع هدف اول، مقدار شاخص RVSI مربوط به عملکرد ولتاژ گذرا تحت مجموعه‌ای از خطاهای ایجاد شده در خطوط شبکه است. هدف دوم، هزینه کل سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری جبران‌سازهای دینامیکی است که دو هدف در روابط (۱۵) و (۱۶) ارائه شده است.

$$f_1 = RVSI \quad (15)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_b} b_i C_i(t_i, s_i) \quad (16)$$

در (۱۰) اگر باس  $i$  دارای منبع توان راکتیو باشد، آن‌گاه  $b_i$  برابر ۱ و در غیر این صورت برابر ۰ خواهد بود. تابع  $C_i(t_i, s_i)$  هزینه در باس  $i$  است که تابعی از دو متغیر مستقل  $t_i$  و  $s_i$  است. متغیر اول مربوط به نوع جبران‌ساز توان راکتیو است و دوم ظرفیت نصب را نشان می‌دهد. از این دو تابع هدف برای شناسایی یک جبهه پارتو از راه‌حل‌های نامغلوب توسط MOPSO می‌توان بهره برد. همچنین برای کمینه کردن هزینه‌ها و بهبود عملکرد سیستم برای خطاهای احتمالی، یک تابع هدف در (۱۷) تعریف شده است که از دو جمله تشکیل شده است و برای شناسایی یک راه‌حل بهینه منفرد بر اساس وزن‌های از پیش تعریف‌شده به کار می‌رود.

$$\min J = w_1 RVSI + w_2 \left( \sum_{i=1}^{N_b} b_i C_i(t_i, s_i) \right) \quad (17)$$

که در آن  $w_1$  و  $w_2$  فاکتورهای وزنی هستند که به ترتیب مربوط به جریمه نقض ولتاژ و هزینه نصب جبران‌سازهای توان راکتیو هستند [۲۸]. برای دستیابی به اهداف بیان‌شده، قیود چندگانه مربوط به رویدادهای حالت پایدار و دینامیکی باید در نظر گرفته شوند. قیود حالت پایدار با هدف اطمینان از تعادل جریان قدرت، تضمین بهبود ولتاژ و مقداردهی اولیه مقادیر دینامیکی در حالت پیش از خطا تعیین می‌شوند [۳۸]. روابط (۱۸) و (۱۹) تعادل بین توان اکتیو و راکتیو در باس‌ها را نشان می‌دهند که در این روابط بردارهای  $V$ ،  $\theta$ ،  $P$  و  $Q$  به ترتیب ولتاژ باس، زاویه فاز، توان اکتیو و توان راکتیو هستند.

$$P_G - P_L - P(V, \theta) = 0 \quad (18)$$

$$Q_G - Q_L - Q(V, \theta) = 0 \quad (19)$$

محدودیت‌های عملکرد در حالت پایدار در شبکه قدرت در معادلات (۲۰)–(۲۴) نشان داده شده که شامل محدودیت‌های مجاز برای توان اکتیو و توان راکتیو، ولتاژ باس‌ها و همچنین محدوده مجاز برای RVSI است.

$$P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \quad (20)$$

$$P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \quad (21)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_G \leq Q_G^{\max} \quad (22)$$

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \quad (23)$$

$$RVSI \leq RVSI_{th} \quad (24)$$

قیود دینامیکی شبکه همان معادلات جبری-دیفرانسیلی هستند که توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز شبکه اجرا می‌شود و در روابط (۲۵) و (۲۶) ارائه شده است.

$$\dot{x} = f(x, y, u, Q) \quad (25)$$

$$0 = g(x, y, u, Q) \quad (26)$$

که در آن  $x$ ،  $y$  و  $u$  به ترتیب متغیرهای حالت، جبری و کنترلی شبکه هستند. در این مقاله، از شبکه عصبی چند لایه پرسپترون برای حل مسئله نگاشت چند بعدی با در نظر گرفتن توان های راکت یو تزریق شده به باسها به عنوان ورودی و شاخص RVSI به عنوان خروجی استفاده شده است. پس از آن تابع هدف که در (8) بیان شده، با استفاده از الگوریتم PSO به منظور یافتن ظرفیت های بهینه منابع توان راکتیو در پاسخ به خطاهای احتمالی بهینه شده و پاسخ آن با الگوریتم های ABC، ACO<sub>R</sub> 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 دهد. MOPSO یک الگوریتم سودمند برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه است و انعطاف پذیری زیادی در تنظیم پارامترها دارد و آن را قادر می سازد تا با نیازهای مختلف بهینه سازی سازگار شود.

#### ۴-۳- شبکه عصبی MLP

در شبکه عصبی چند لایه پرسپترون، نورون ها در لایه ها قرار دارند و خروجی هر نورون با اعمال یک تابع انتقال به مجموع وزنی ورودی ها به دست می آید. الگوریتم های آموزشی همچون الگوریتم پس انتشار و الگوریتم لونیگ-مارکوارت (LM)، وزن ها را تعیین می کند. الگوریتم LM ترکیبی از دو الگوریتم گرادیان نزولی و گاوس-نیوتن است. این الگوریتم از گاوس-نیوتن قوی تر است و می تواند در بسیاری از موارد به خوبی همگرا شود. البته لازم به ذکر است این همگرایی با سرعت پایین تر رخ می دهد. در این مقاله یک شبکه عصبی پیش خور سه لایه، با نورون های خروجی با توابع خطی و نورون های پنهان با توابع سیگموئید و با استفاده از الگوریتم LM طراحی شده است. این شبکه ظرفیت توان راکتیو تزریق شده به باس های تعیین شده را به عنوان ورودی می گیرد و مقدار RVSI را به عنوان خروجی تولید می کند.

#### ۴-۳-۵ الگوریتم MOPSO

روش PSO یک روش محاسباتی مبتنی بر جمعیت است که شبیه سازی از یک سیستم اجتماعی ساده شده است. این روش در حل مسائل خطی و غیر خطی بسیار قوی است و می تواند راه حل های با کیفیت بالا را در زمان محاسبه کمی ایجاد کند و همگرایی پایدارتری نسبت به سایر روش های تصادفی دارد. هر ذره با یک بردار  $X_i$  نشان داده می شود که موقعیت ذره  $i$  را در فضای جستجوی  $n$  بعدی نشان می دهد و دارای بردار سرعت  $V_i$  است. این ذره مسیر حرکت خود را با توجه به تجربه حرکت خود و همچنین تجربه حرکات ذرات دیگر تنظیم می کند. هر ذره مختصات خود را در فضای مسئله به گونه ای به روز می کند که با بهترین راه حل که تاکنون به دست آمده است مرتبط است. بهترین تجربه شخصی هر ذره  $P_{best}$  و بهترین تجربه ای که تاکنون توسط ذره ای در همسایگی آن ذره به دست آمده،  $G_{best}$  نامیده می شود. حرکت هر ذره به سمت مکان های  $P_{best}$  و  $G_{best}$  با یک شتاب وزنی تصادفی در هر مرحله زمانی انجام می گیرد [41, 40]. MOPSO تعمیمی از الگوریتم PSO است و یک الگوریتم بهینه سازی چند هدفه است که در فضای جستجوی چند بعدی و با توجه به چندین هدف، می تواند جبهه پارتو بهینه را بیابد و به همین دلیل در بسیاری از مسائل علمی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. این الگوریتم سرعت بالایی دارد و نیز دارای قابلیت تطبیق با مسائل مختلف است. همچنین با تغییر پارامترهای مختلف در این الگوریتم، می توان عملکرد آن را بهبود داد. قابلیت انطباق با محیط های دینامیکی از جمله مزایای الگوریتم MOPSO است که آن را قادر می سازد به سرعت به جواب جدید تطبیق پیدا کند. مراحل پیاده سازی روش MOPSO در الگوریتم (1) نشان داده شده است.

#### 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 شبیه سازی می شود. بارهای شبکه با مدل بار تجمیع شده دینامیکی که شامل سیستم های تهویه مطبوع یا همان کولرهای گازی هستند، جایگزین می شوند. موتورهای تک فاز به کار گرفته در سیستم های الگوریتم (1): الگوریتم MOPSO

Algorithm 1. MOPSO Algorithm

**Initialization:**

**For**  $i=1 : N$

Create and randomly initialize the position in the rank

[ $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ]

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.

**Search:**

**For**  $it = 1 : \text{maximum iteration}$

**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**

Evaluate dominance and update archive.

**End**

تهویه مطبوع دارای مدل‌های متفاوت در سه حالت عملکردی عادی، توقف و خروج از شبکه دارند. بارهای شبکه با بارهای تجمیع‌شده دینامیکی جایگزین شده‌اند. مدل عملکردی این بارها در زبان برنامه‌نویسی محیط نرم‌افزار DigSilent Power Factory پیاده‌سازی شده است. شبکه ۳۹ باس IEEE همراه با بارهای دینامیکی در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و تحت خطاهایی که در خطوط رخ داده است، اجرا شده و نتایج حاصل شده است. لازم به ذکر است در این شبیه‌سازی 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 توجه به روابط (۱۰) تا (۱۲) شاخص RVSI برای تمام خطاهای بررسی شده، به دست آمده است. سپس از بین خطاهای هشت مورد از شدیدترین آن‌ها از بین مواردی که به تأخیر ولتاژ در باس‌ها می‌انجامند، 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 تریق  $\Delta Q$  برابر ۱۰ مگاوار در باس‌های مختلف تحت خطاهای انتخاب شده محاسبه می‌شود. سپس سه باس که حساسیت بالاتری دارند، برای قرار دادن منابع VAR انتخاب می‌شوند. 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.

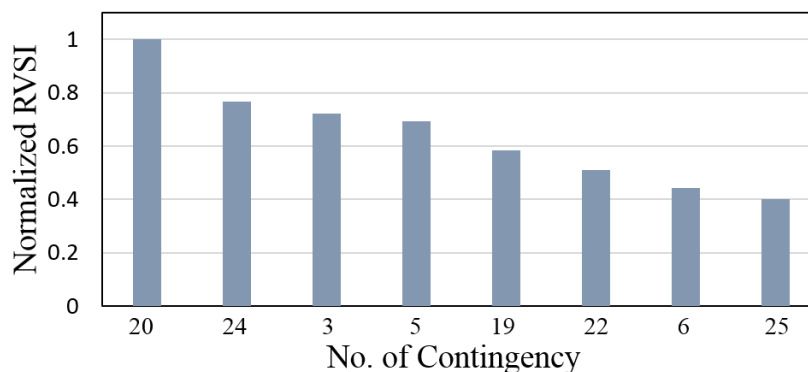
- مرحله چهارم: یک شبکه عصبی MLP سه لایه، دارای نورون‌های خروجی با تابع خطی و نورون‌های پنهان با تابع سیگموئید، برای برازش چندبعدی داده‌ها طراحی شده است. این شبکه عصبی ظرفیت تزریق توان راکتیو سه باس تعیین شده را به عنوان ورودی می‌گیرد و شاخص RVSI را به عنوان خروجی تولید می‌کند. برای این کار ۱۴۰ مجموعه داده برای آموزش، ۳۰ مجموعه برای اعتبار سنجی و ۳۰ مجموعه برای آزمایش اختصاص داده شده است. تعداد نورون‌های مورد استفاده در لایه پنهان 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 پارتو از راه‌حل‌های نامغلوب شناسایی شده است. همچنین یک تابع دوفه مطابق (۱۷) تعریف شده و برای انتخاب یک راه‌حل بهینه و محدود با اختصاص وزن‌های از پیش تعریف شده، الگوریتم PSO پیاده‌سازی شده و پاسخ آن با الگوریتم‌های ABC، ACOR، و DE مقایسه شده است.

در این مقاله، شبکه ۳۹ باس IEEE شامل ۱۰ ژنراتور، ۳۹ باس، ۱۲ ترانسفورماتور و ۱۹ بار که ۳۰ درصد آن‌ها سیستم‌های تهویه مطبوع یا همان کولرهای گازی هستند، شبیه‌سازی شده است. برای پیش‌بینی دقیق شدت رویدادهای FIDVR در شبکه قدرت، این شبکه تحت خطاهای احتمالی قرار گرفته و برای تمام موارد شاخص‌های RVSI چ RVSIs را به‌خود اختصاص داده‌اند و به تاخیر ولتاژ در باس‌ها می‌انجامند، به عنوان شدیدترین موارد خطای احتمالی انتخاب شده‌اند. در شکل (۶) شاخص‌های RVSIs نرمال‌شده و شکل (۷) ولتاژ باس‌ها پس از خطا ناشی از خطای شماره ۲۰ که در خط ۱۵-۱۶ رخ داده، نشان داده شده است.

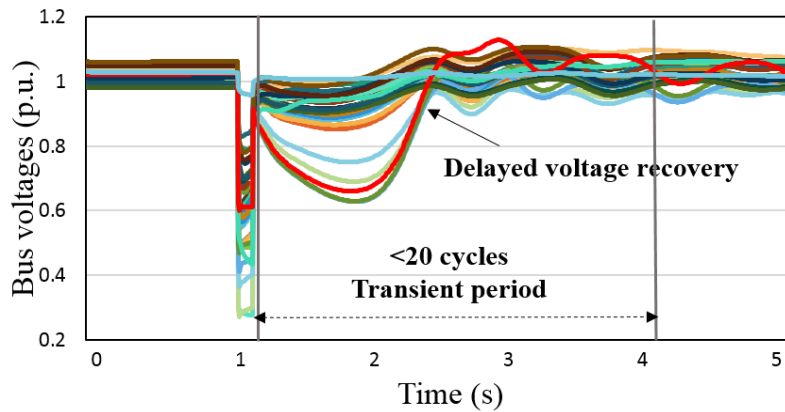
Table (1): Sorted RVSIs for line contingencies  
جدول (۱): شاخص‌های مرتب شده برای خطاهای احتمالی خطوط

شماره خطا	محل خطا	شاخص RVSI
۲۰	خط ۱۵-۱۶	۰/۳۷۵۱
۲۴	خط ۱۶-۲۴	۰/۳۱۳۴
۳	خط ۲-۳	۰/۲۹۲۲
۵	خط ۳-۴	۰/۲۶۲۱
۱۹	خط ۱۴-۱۵	۰/۲۴۹۵
۲۲	خط ۱۶-۱۹	۰/۲۳۰۳
۲۵	خط ۱۷-۱۸	۰/۲۲۷۹
۶	خط ۳-۱۸	۰/۲۲۴۸
۸	خط ۴-۱۴	۰/۱۸۲۰
۷	خط ۴-۵	۰/۱۷۰۸
۲۶	خط ۱۷-۲۷	۰/۱۶۲۳
...	...	...



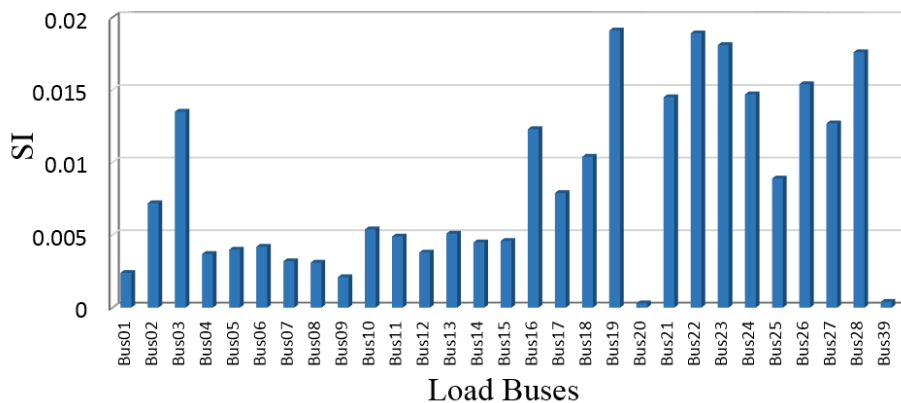
شکل (۶): شاخص‌های نرمال‌شده RVSIs برای هشت مورد از شدیدترین خطاها

Figure (6): Normalized RVSI for eight severe contingencies

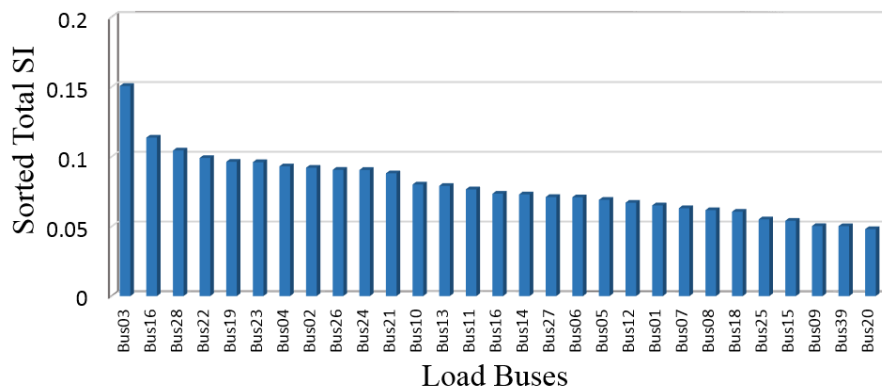


شکل (۷): ولتاژ خطوط پس از خطای شماره ۲۰ بدون جبران‌ساز توان راکتیو  
Figure (7): Post-fault bus voltages due to line contingency#20 without compensators

در مرحله بعد، مکان‌های نصب منابع توان راکتیو مشخص می‌شود. برای انجام این کار، هر بار یک منبع توان راکتیو کوچک ( $\Delta Q = 10 \text{ MVar}$ ) 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 حساسیت بالاتر برای نصب منابع توان راکتیو 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.

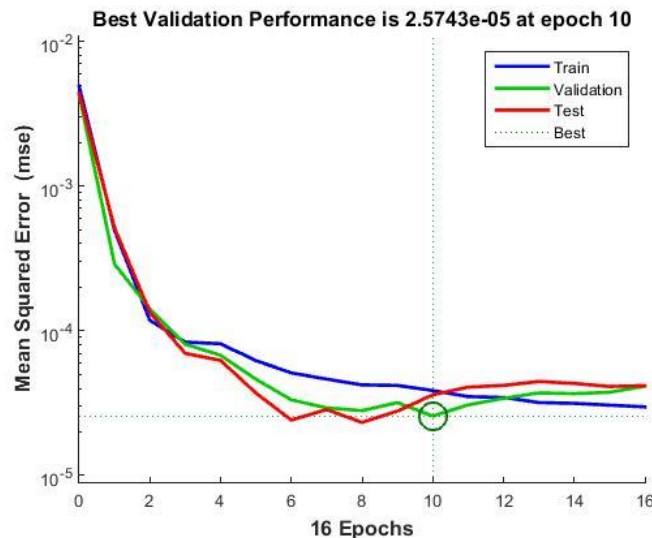


شکل (۸): شاخص حساسیت باس‌ها برای خطای شماره ۲۰  
Figure (8): Sensitivity index for Contingency #20



شکل (۹): شاخص مرتب شده حساسیت کل برای تمام باس‌ها  
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 منابع توان راکت یوانته خجاب شده‌اند. شدیدترین خطای احتمالی طبق نتایج حاصل شده، خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در خط ۱۵-۱۶ است. برای ایجاد مجموعه داده‌ها به عنوان ورودی‌های شبکه عصبی، هر بار که یک منبع توان راکت یوانته در یکی از باس‌های انته خجاب شده نصب می‌شود. در این مطالعه حداکثر ظرفیت این منابع ۴۰۰ مگاوار در نظر گرفته شده است. به منظور ثبت دقیق رفتار حالت ورودی سیستم، اندازه این منابع به عنوان یک دنباله با شروع از ۱۰ مگاوار و با حداکثر ظرفیت ۴۰۰ مگاوار انته خجاب می‌شود و نتایج حاصل به صورت مجموع داده‌ها برای آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش شبکه عصبی به کار می‌روند. یک شبکه عصبی MLP سه لایه، دارای نورون‌های خروجی با تابع خطی و نورون‌های پنهان با تابع سیگموئید، برای برآزش داده‌ها 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 عنوان خروجی ایجاد می‌کند. ۱۴۰ مجموعه داده برای آموزش، ۳۰ مجموعه داده برای اعتبارسنجی و ۳۰ مجموعه داده برای آزمایش اختصاص داده شده است. تعداد نورون‌های لایه پنهان شبکه پیشخور ۵ عدد است. نمودارهای رگرسیون نشان‌دهنده نتایج آموزش شبکه عصبی در ۱۴۰ نقطه در شکل (۱۰) نشان 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 می‌یابد.



شکل (۱۰): نتایج آموزش شبکه عصبی MLP  
Figure (10): Results of training MLP neural network

در گام بعد، برای تعیین ظرفیت منابع توان راکتیو، دو سناریو جهت بهبود پایداری ولتاژ پس از خطا و کاهش پدیده FIDVR در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، از SVC برای جبران‌سازی توان راکتیو در باس‌های ۳، ۱۶ و ۱۲۸ استفاده شده، در حالی که در سناریوی دوم، سه STATCOM در همان باس‌ها قرار می‌گیرند. برای تعیین ظرفیت بهینه منابع توان راکتیو، تابع یک‌هدفه در (۱۷) تعریف شده و متغیرهای مربوط به آن در جدول (۲) ارائه شده است [۳۸، ۲۸]. این تابع توسط الگوریتم PSO بهینه‌سازی می‌شود. این الگوریتم برای رسیدن به ظرفیت‌های بهینه منابع توان راکتیو در برابر شدیدترین خطاهای احتمالی اجرا می‌شود. این الگوریتم قابلیت تطبیق‌پذیری برای طیف وسیعی از مسائل بهینه‌سازی، از جمله مواردی که دارای اهداف متعدد و غیرخطی هستند را داراست. از طرفی پیاده‌سازی آن آسان است و به پارامترهای کمتری نیاز دارد و می‌تواند راه حل بهینه را سریعتر پیدا کند [۴۳]. پارامترهای الگوریتم PSO در جدول (۳) و نتایج بهینه‌سازی در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج حاصل شده از الگوریتم PSO با الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده ABC، ACO<sub>R</sub> و DE مقایسه شده و نتایج آن در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. پارامترهای این سه الگوریتم در جدول پیوسته ارائه شده است. ملاحظه می‌شود الگوریتم PSO نسبت به سایر الگوریتم‌های ذکر شده عملکرد سریع‌تر و بهتری دارد. شکل (۱۳) ولتاژ باس ۱۶ را در سه حالت بدون

هیچ جبران‌کننده، با سه SVC و با سه STATCOM نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۴) ولتاژ ترمینال باس‌ها پس از خطای رخ داده در خط ۱۵-۱۶ زمانی که از سه STATCOM استفاده شده‌است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج حاصل می‌شود، سناریوی دوم از نظر ظرفیت به کار رفته منبع توان راکتیو و نیز تابع هدف نسبت به سناریوی اول بهتر است. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از STATCOM نسبت به SVC به عملکرد بهتر سیستم منجر می‌شود. لازم به ذکر است که STATCOM می‌تواند محدوده کنترل واکنشی وسیعی از سطوح ولتاژ را ارائه دهد و کیفیت توان را بهبود بخشد. این تجهیز با پشتیبانی سریع و آنی توان راکتیو به ویژه در سیستم‌های قدرت با نفوذ زیاد بارهای دینامیکی، در مقایسه با SVC پاسخ بهتری ارائه می‌دهد.

Table (2): Parameters of the objective function

جدول (۲): متغیرهای تابع هدف

نام متغیر	مقدار در سناریوی اول	مقدار در سناریوی دوم
ضریب وزنی ( $W_1$ )	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۴۵
ضریب وزنی ( $W_2$ )	۱	۱
$RVSI_{th}$	۰/۲۶	۰/۲۶

Table (3): PSO parameters

جدول (۳): متغیرهای PSO

نام متغیر	مقدار
تعداد ذرات	۱۰۰
ماکزیمم تکرار	۱۰۰
ضریب یادگیری شخصی	۱/۵
ضریب یادگیری کلی	۲
وزن اینرسی	۱

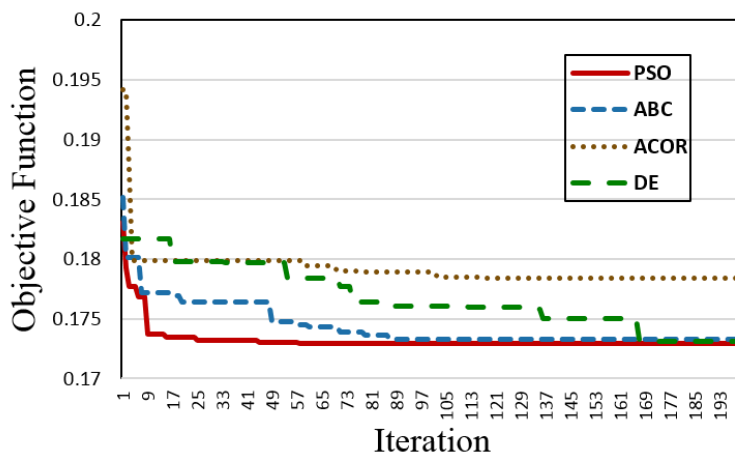
Table (4): Optimization result by PSO

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی با PSO

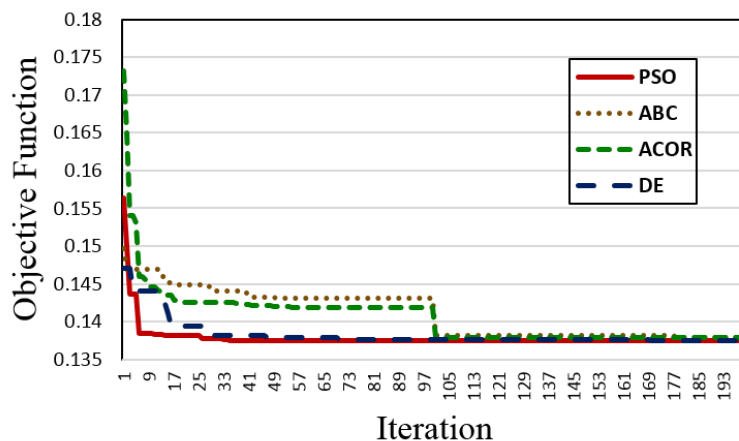
تابع هدف	مجموعه بهینه		نوع جبران‌ساز	سناریو
	ظرفیت (مگاوار)	شماره باس		
۰/۱۷۸۴	۱۴۰	۳	SVC	سناریو شماره ۱
	۱۰۰	۱۶		
	۲۷۵	۲۸		
۰/۱۳۷۵	۱۱۵	۳	STATCOM	سناریو شماره ۲
	۲۷۵	۱۶		
	۲۵	۲۸		

در مرحله بعد با انتخاب سناریوی دوم و برای دستیابی به مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها، دو تابع که در روابط (۱۵) و (۱۶) تعریف شده‌اند، با الگوریتم MOPSO بهینه‌سازی می‌شود. این الگوریتم با جمعیتی از راه‌حل‌های تصادفی مقداردهی اولیه می‌شود و سپس با در نظر گرفتن هر دو هدف، راه‌حل‌ها را به‌طور مکرر به‌روز می‌کند. الگوریتم زمانی همگرا می‌شود که راه‌حل‌ها نامغلوب نباشند، یعنی هیچ راه‌حلی وجود ندارد که در همه اهداف بهتر از دیگری باشد. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی قادر به یافتن مجموعه‌ای از راه‌حل‌هاست که در جبهه پارتو قرار می‌گیرند و پاسخ حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه نیز نزدیک به یکی از این پاسخ‌هاست. شکل (۱۵) جبهه پارتو را نشان می‌دهد که توسط الگوریتم MOPSO بدست آمده است. راه‌حل‌های موجود در جبهه پارتو راه‌حل‌های بهینه‌اند و عملکرد سیستم می‌تواند بر اساس ترجیحات خود مناسب‌ترین راه‌حل را انتخاب کند. پارامترهای الگوریتم MOPSO در جدول (۵) ارائه شده است.

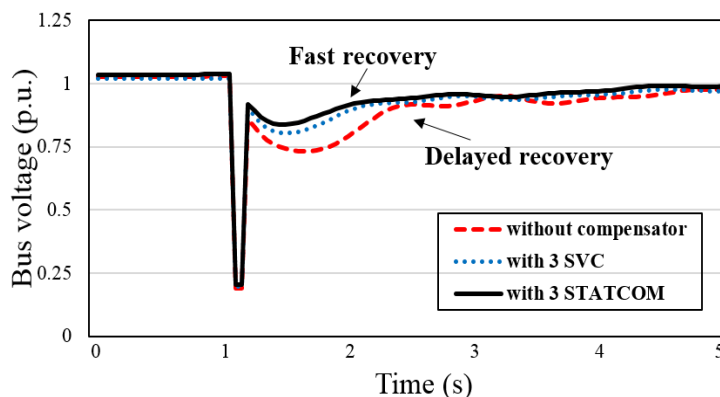




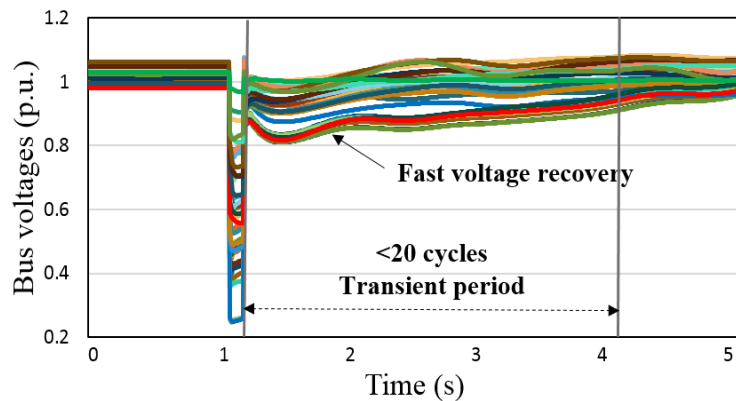
شکل (۱۱): مقایسه عملکرد الگوریتم PSO با الگوریتم‌های ABC، ACOR، و DE در سناریوی اول  
Figure (11): Iteration performance of the PSO algorithm compared to ABC, ACOR and DE for scenario #1



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

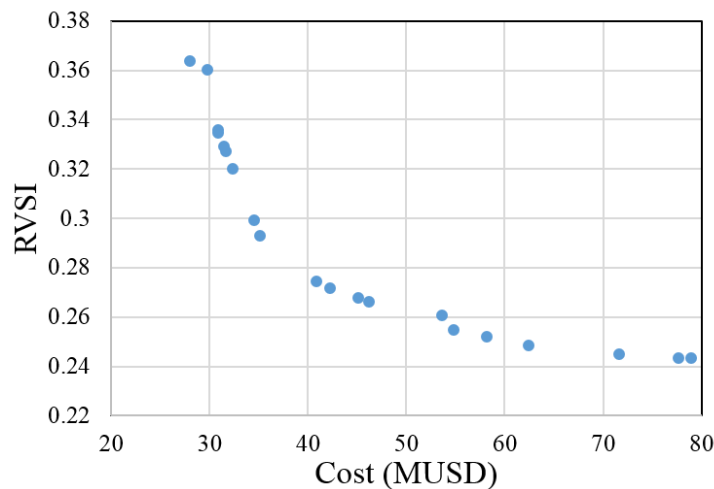


شکل (۱۳): ولتاژ باس ۱۶ در سه حالت بدون جبران‌کننده، با سه SVC و با سه STATCOM  
Figure (13): The voltage of bus 16 in three states; without a compensator, with three SVCs, and with three STATCOMs



شکل (۱۴): ولتاژ تمام باس‌ها حین وقوع خطای شماره ۲۰ در سناریوی دوم

Figure (14): Post-fault bus voltages due to line contingency #20 for scenario #2



شکل (۱۵): راه‌حل‌های بهینه پارتو حاصل از الگوریتم MOPSO

Figure (15): Pareto optimal solutions obtained by MOPSO

Table (5): Parameters of MOPSO algorithm

جدول (۵): متغیرهای الگوریتم MOPSO

مقدار	متغیر	مقدار	متغیر
۱ و ۲	ضریب یادگیری شخصی و عمومی	۵۰	ماکزیمم تکرار
۷	تعداد شبکه‌ها در هر بعد	۵۰	تعداد ذرات
۰/۱	نرخ تورم	۲۰	اندازه مخزن
۲	فشار انتخاب رهبر	۰/۵	وزن اینرسی
۰/۱	نرخ جهش	۰/۹۹	نرخ میرایی وزن اینرسی

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که رویکرد چندهدفه پیشنهادی برای جایابی منابع توان راکتیو در کاهش پدیده‌های 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 دستیابی به عملکرد قوی‌تر و قابل‌اطمینان‌تر سیستم قدرت است.

## ۵- نتیجه‌گیری

با بررسی کامل مراجع موجود، مشخص شد که روش کاهش بار یکی از روش‌های متداول برای کاهش پدیده FIDVR در شبکه‌های قدرت است. لیکن استفاده از این روش می‌تواند 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. استفاده از منابع توان راکتو یو مانند SVC و STATCOM می‌تواند به طور موثر مشکلات مرتبط با رویداد FIDVR را کاهش دهد. در این مقاله، یک رویکرد ترکیبی برای جایابی منابع توان راکتو جهت مقابله با این رویداد ارائه شد. یک شبکه عصبی MLP سه لایه، دارای نورون های خروجی با تابع خطی و نورون های پنهان با تابع سیگموئید، برای برازش چندبعدی داده‌ها طراحی شد که ظرفیت تزریق توان راکتو سه باس تعیین شده را به عنوان ورودی گرفته و شاخص RVSI را به عنوان خروجی ایجاد می‌کند. همچنین یک رویکرد برنامه‌نویسی چند هدفه برای شناسایی ظرفیت بهینه منابع برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت با استفاده از شاخص‌های حساسیت ولتاژ و براساس روش‌های بهینه‌سازی هوشمند ارائه شد. الگوریتم PSO برای دستیابی به ظرفیت های بهینه منابع توان راکتو در برابر شدیدترین موارد خطا پیاده‌سازی شد و نتایج نشان داد که این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم های بهینه‌سازی دیگر نظیر ABC، ACO<sub>R</sub> و DE که در این مقاله اجرا شده است، نتایج بهتری داشته و شاخص RVSI در آن کمتر است. همچنین از الگوریتم MOPSO برای حل مسئله بهینه‌سازی دودهدفه، استفاده شد و مجموعه‌ای از نتایج نامغلوب حاصل شد به این معنی که هیچ راه‌حلی در هر دو هدف برتر از سایر راه‌حل‌ها نباشد. نتایج نشان داد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند به طور موثر رویدادهای FIDVR را کاهش دهد. روش پیشنهادی عملکرد دینامیکی و گذرای بارهای سیستم تهویه مطبوع را در شبیه‌سازی‌ها نظر گرفته‌است که برای بررسی دقیق پایداری ولتاژ در طول رویدادهای FIDVR بسیار مهم است. نشان داده شد که تصمیم‌گیری درست و دقیق در تعیین نوع جبران‌ساز و تعیین صحیح ظرفیت آن به طور قابل توجهی پایداری ولتاژ را در سیستم بهبود می‌بخشد. ملاحظه می‌شود تابع هدف برای دو سناریو که یکی استفاده از SVC و دیگری استفاده از STATCOM برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت ناشی از پدیده FIDVR بوده به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. راه حل موثر و کارآمد ارائه شده را می‌توان برای سایر سیستم‌های قدرت با ساختارهای مختلف اعمال کرد و همچنین می‌توان آن را با اعمال تغییرات بار و نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر گسترش داد.

## ضمایم

جدول: پارامترهای الگوریتم‌های ABC، ACO<sub>R</sub> و DE

الگوریتم	نام متغیر	مقدار
ABC	تعداد ذرات	۱۰۰
	ماکزیمم تکرار	۲۰۰
	تعداد زنبورهای ناظر	۱۰۰
	ضریب شتاب کران بالایی	۱
ACO <sub>R</sub>	تعداد ذرات	۱۰
	ماکزیمم تکرار	۲۰۰
	اندازه نمونه	۴۰
	ضریب تشدید	۰/۵
	نسبت انحراف-فاصله	۱
DE	تعداد ذرات	۵۰
	ماکزیمم تکرار	۲۰۰
	حد پایین ضریب مقیاس	۰/۲
	حد بالای ضریب مقیاس	۰/۸
	احتمال تقاطع	۰/۲

## References

## مراجع

- [1] 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 fault-induced 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.epr.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) (doi: 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 intelligent 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) (doi: 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. Ajarapu, 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 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 programming", *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/iet-gtd.2019.1025).
- [33] S. Nekkallappu, 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. Ajarapu, "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%20Specifications%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.egy.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-composite-load-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).

زیر نویس‌ها:

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