

Vol. 11/ No. 44/Summer 2022

Optimal Load Shedding to Prevent Voltage Collapse Considering the Priority of Feeders and Buses

Somayeh Abdollahi, MSc ¹ | Reza Ebrahimi, Assistant Professor ² | Ahmad Ahmadi, Assistant Professor ³

¹Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran, s.abdollahi@gorganiau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, r.ebrahimi@gorganiau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran, ahmadi@iaus.ac.ir

Correspondence

Reza Ebrahimi, Assistant Professor of Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Email: r.ebrahimi@gorganiau.ac.ir

Received: 14 February 2022

Revised: 4 March 2022

Accepted: 9 April 2022

Abstract

Today, power systems are operated close to their stability limits for economic reasons. On the other hand, with the occurrence of outage, the stability of the system has a problem that there are various solutions to compensate. The last and safest way to control and maintain system stability is load shedding. In this paper, under voltage load shedding is presented considering voltage dependent feeders load and also using the improved discrete particle swarm optimization algorithm (IDPSO). Since the load model is particular importance in the real load analysis, the decisions will be applied by considering voltage dependent load modeling. To ensure proper operation, the proposed method has been implemented using MATLAB software on the IEEE 30-bus test system by considering related constraints. For this purpose, two critical loads for the test system are considered and the results are examined. The results show that the proposed method provides the best location and amount of load shedding and indicates its effectiveness.

Keywords: Optimal Load Shedding, Voltage Collapse, Priority of Feeders, Under Voltage Load Shedding, Voltage Stability.

Highlights

- Considering the effect of load dependence on voltage to make the problem more real
- Consider four different load models for four cost levels
- Using the IDPSO algorithm in order to achieve more accurate results

بارزدایی بهینه جهت جلوگیری از فروپاشی ولتاژ با در نظر گرفتن ارزش گذاری فیدرها و باسها

سمیه عبدالهی کاکرودی^۱ | رضا ابراهیمی^{۲*} | احمد احمدی^۳

چکیده:

امروزه، سیستم‌های قدرت با توجه به دلایل اقتصادی، در نزدیکی مرزهای پایداری بهره‌برداری می‌شوند. از طرفی دیگر، با وقوع خطا، حد پایداری شبکه دچار مشکل شده که برای جبران آن راهکارهای مختلفی وجود دارد. آخرین و مطمئن‌ترین راهکار برای کنترل و حفظ پایداری شبکه، بارزدایی است. در این مقاله، بارزدایی تحت ولتاژ با در نظر گرفتن وابستگی بار فیدرها به ولتاژ و همچنین استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات گسسته بهبودیافته (IDPSO) ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل بار در تحلیل بار واقعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، اعمال تصمیمات با در نظر گرفتن وابستگی بارها به ولتاژ انجام خواهد شد. برای اطمینان از عملکرد صحیح، روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB بر روی شبکه نمونه ۳۰ باس IEEE با در نظر گرفتن قیود مربوطه اجرا شده است. برای این منظور، دو بار حیاتی برای سیستم نمونه لحاظ شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، بهترین پاسخ جهت مکان و مقدار بارزدایی را ارائه داده و نشان‌دهنده عملکرد مؤثر روش پیشنهادی است.

کلید واژه‌ها: بارزدایی بهینه، فروپاشی ولتاژ، ارزش گذاری فیدرها، بارزدایی تحت ولتاژ، پایداری ولتاژ

^۱ گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران، s.abdollahi@gorganiau.ac.ir

^۲ گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران، r.ebrahimi@gorganiau.ac.ir

^۳ گروه مهندسی برق، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران، ahmadi@iaus.ac.ir

نویسنده مسئول

* رضا ابراهیمی، استادیار، گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران، s.abdollahi@gorganiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۵ بهمن ۱۴۰۰

تاریخ بازنگری: ۱۳ اسفند ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۱

۱- مقدمه

در طی سال‌های گذشته، پایداری به‌عنوان یک پیش‌شرط مهم برای عملکرد ایمن و پایدار سیستم قدرت مطرح شده است [۱]. همان‌طور که سیستم قدرت در طول زمان به یک سیستم پیچیده و پراسترس تبدیل می‌شود، مسئله پایداری ولتاژ نیز حیاتی‌تر می‌گردد [۲]. به دلیل عمده خرابی‌های سیستم ناشی از ناپایداری ولتاژ که معمولاً در اثر قطع برق یا افزایش ناگهانی بار ایجاد می‌شود، پایداری ولتاژ در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است. دو اقدام متداول دفاعی شامل اقدامات پیشگیرانه و اقدامات اصلاحی برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ وجود دارد. اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع خطا برای بهبود حاشیه امنیت ولتاژ انجام می‌شود، در حالی که اقدامات اصلاحی معمولاً بعد از وقوع خطا برای بازگرداندن ثبات سیستم صورت می‌گیرد [۳].

بازگشت ولتاژ سیستم به حد پایداری از اهداف اصلی سیستم بوده و تحقیقات مختلفی برای اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی جهت جلوگیری از ناپایداری ولتاژ انجام شده است. از بین اقدامات اصلاحی مختلف جهت جلوگیری از ناپایداری ولتاژ، بارزدایی به عنوان آخرین راهکار انتخاب می‌شود و به دو دسته بارزدایی تحت فرکانس (UFLS)^۱ و بارزدایی تحت ولتاژ (UVLS)^۲ طبقه‌بندی شده که آن‌ها به ترتیب مربوط به تعادل توان اکتیو و راکتیو هستند [۴]. UVLS به عنوان یک اقدام اصلاحی ارزان و قابل اعتماد است بنابراین، زمانی که هیچ جایگزین دیگری برای جلوگیری از احتمال فروپاشی ولتاژ در دسترس نباشد، بارزدایی تحت ولتاژ آخرین دفاع اصلاحی مورد قبول است [۵]. در زمان اختلالات عمده سیستم، UVLS نقش مهمی در کنترل و پایداری سیستم قدرت ایفا می‌کند. فلسفه UVLS این است که با رخداد خطا و کاهش ولتاژ به یک سطح از پیش تعیین شده در یک دوره معین، مقدار بار از پیش تعیین شده‌ای از سیستم خارج می‌شود [۶]. روش‌های متعددی برای طراحی طرح‌های مؤثر UVLS استفاده شده که اغلب از تحلیل پایداری استاتیکی استفاده شده و سعی می‌شود در ادامه، مروری بر روش‌های UVLS موجود ارائه گردد.

روش چندمرحله‌ای برای تصمیم‌گیری مکان و حداقل مقدار بارزدایی در مرجع [۷] ارائه شده است. در مرجع [۸]، برای بارزدایی از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر یادگیری (TLBO)^۳ استفاده شده و مکان بارزدایی نیز به وسیله شاخص حساسیت ولتاژ تعیین شده است. طرح UVLS مبتنی بر پخش بار بهینه برای تعیین مقدار، مکان، درجه و زمان بارزدایی برای حفظ حاشیه پایداری ولتاژ در مرجع [۹] پیشنهاد شده است. همچنین، بهینه‌سازی خطی مبتنی بر پخش بار بهینه (LP-OPF)^۴ برای بارزدایی در مرجع [۱۰] ارائه شده است. در مرجع [۱۱]، تکنیکی برای تعیین مکان بارزدایی با در نظر گرفتن چند خطا با استفاده از منطق فازی اصلاح شده ارائه گردیده و شاخص پایداری برای محاسبه مقدار بارزدایی پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۱۲]، الگوریتم ترکیبی GA-PSO^۵ برای بهینه‌سازی UVLS استفاده شده که علاوه بر بهبود پروفیل ولتاژ، زمان همگرایی نیز بهتر شده است. در مرجع [۱۳]، یک طرح بارزدایی با استفاده از مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین برای تعیین مکان بارزدایی ارائه گردیده و برای محاسبه مقدار بارزدایی از الگوریتم ژنتیک (GA)^۶ و شبکه عصبی (NN)^۷ استفاده شده است. در [۱۴]، بارزدایی آنلاین در سیستم قدرت با استفاده از شبکه عصبی انجام شده که با هدف مینیمم‌سازی هزینه و به صورت مدل پیوسته در نظر گرفته شده است. یک روش بارزدایی تطبیقی و متمرکز جدید برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت در مرجع [۱۵] پیشنهاد شده و چالش‌های مربوط به UVLS متمرکز بررسی شده است. در مرجع [۱۶]، یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی شامل PSO^۸ و Modal analysis روی یک شبکه واقعی در ایران استفاده شده که به کاهش مقدار بارزدایی کمک کرده و با شبکه سازگار است. در مرجع [۱۷]، یک روش جدید بارزدایی بهینه تحت ولتاژ برای حفظ پایداری ولتاژ یک سیستم جهت چند ریز شبکه ارائه شده است. بر این اساس، حاشیه پایداری ولتاژ، حداقل مقدار بارزدایی و حداقل هزینه عملیاتی سیستم در تابع هدف به طور همزمان در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، برنامه‌های پاسخگویی و اولویت‌های بار در این روش پیشنهادی مورد توجه قرار گرفته و از الگوریتم بازار تبدیل پیوسته گسسته هیبریدی (HDCEMA)^۹ استفاده شده است. در مرجع [۱۸]، یک طرح بارزدایی تحت ولتاژ بر اساس حساسیت توان اکتیو ولتاژ دینامیکی برای کاهش فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت با استرس بالا معرفی شده است. این روش توسعه یافته می‌تواند در تعیین حداقل مقدار و مکان مناسب برای بارزدایی با در نظر گرفتن دینامیک سیستم قدرت از جمله مدل بار دینامیکی استفاده شود.

با توجه به آنچه گفته شد، مقالات ذکر شده مسئله بارزدایی را به صورت پیوسته در نظر گرفته و متغیر تصمیم‌گیری، مقدار توان اکتیو بارزدایی است. این در حالی است که در عمل، بارهای الکتریکی از طریق فیدها به شین‌های شبکه متصل شده و هرگونه کاهش در بار شین به خاطر وجود فیدهای بار، به صورت پیوسته انجام نمی‌شود. یکی دیگر از مشکلات روش مدل‌سازی

¹ Under frequency load shedding

² Under voltage load shedding

³ Teaching learning based optimization

⁴ Linear optimization-based optimal power flow

⁵ Genetic Algorithm - Particle swarm optimization

⁶ Genetic Algorithm

⁷ Neural Network

⁸ Particle swarm optimization

⁹ Hybrid discrete continuous exchange market algorithm

پیوسته در بارزدایی، ادغام دو تابع هدف مجزا بوده که با یکدیگر تضاد داشته و باید به صورت جداگانه بررسی شوند. این دو تابع هدف شامل هزینه قطع بار و تعداد کل باس‌های شرکت‌کننده است. اگر از ضریب حساسیت صرف نظر شود، کمترین مقدار هزینه قطع تنها هدف انجام بارزدایی است. از آنجایی که در این روش از هیچ ضریب حساسیتی برای انتخاب شین‌های مؤثرتر استفاده نشده، در راه حل بدست آمده تعداد باس‌های بیشتری در بارزدایی مشارکت داشته ولی مقدار هزینه قطع به صورت مینیمم حاصل شده است. اکنون با نادیده گرفتن مقدار هزینه قطع و در نظر گرفتن ضریب حساسیت، تعداد باس‌های شرکت‌کننده در بارزدایی مینیمم می‌شود زیرا باس‌های با ضریب حساسیت بالاتر به منظور بارزدایی انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد، می‌توان تابع هدف ادغام‌شده را در نظر گرفته گرفت. از آنجایی که هیچ کدام از این اهداف بر دیگری اولویت ندارد، باعث ایجاد مشکل شده که این موضوع باید به دو مسئله جداگانه تقسیم شوند. این مشکلات به طور قابل توجهی کارایی روش بارزدایی پیوسته را در عمل کاهش می‌دهد. برای غلبه بر این مشکلات، از روش بارزدایی گسسته برای مسئله بارزدایی تحت ولتاژ استفاده می‌شود.

در این مقاله، از UVLS توسعه یافته بر اساس مدل سازی مقدار صحیح و به صورت گسسته با توجه به مرجع [۱۹] لحاظ شده است. در عمل، فیدرها به باس‌های شبکه متصل بوده و قطع/وصل فیدرهای متصل به هر باس باعث کاهش/افزایش بار کل باس می‌شود. در بارزدایی، تعدادی از فیدرهای متصل به باس‌ها قطع شده و بار کل باس به صورت غیر پیوسته تغییر می‌کند. بنابراین در عمل، به دست آوردن هر مقدار دلخواه برای بارزدایی در هر باس امکان پذیر نبوده که در این مقاله این مشکل مرتفع خواهد شد. همچنین، فاکتور جریمه قطع برای فیدرها و فاکتور جریمه مشارکت در بارزدایی برای باس‌ها برای کاهش مقدار بارزدایی جهت واقعی تر شدن مسئله در نظر گرفته شده است. از طرفی دیگر، زمانی که سیستم قدرت در معرض تغییرات ناگهانی یا تدریجی در شرایط عملیاتی قرار می‌گیرد، مدل‌های بار در تعیین وضعیت سیستم مهم هستند. در عمل، بارهای شبکه تحت تغییرات ولتاژ بر پایداری ولتاژ تأثیر داشته و تاکنون تحقیقات اندکی به مدل‌های بار برای مطالعات پایداری اختصاص داده شده است. لازم به ذکر است که مرجع [۱۹] نیز به این مسئله مهم توجه نکرده و از الگوریتم HDPSO^{۱۰} استفاده نموده است. مدل بار تحت ولتاژ در تصمیم‌گیری و بارزدایی نیز مؤثر بوده که در این مقاله اثر وابستگی بار به ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، مسئله بارزدایی به صورت گسسته در نظر گرفته شده و اولویت بارها نیز در آن اعمال شده که با استفاده از الگوریتم باینری IDPSO^{۱۱} مورد بررسی قرار گرفته است. انتظار این است که استفاده از روش پیشنهادی در این مقاله، به نتایج دقیق تر و عملی تر در بارزدایی منجر گردد. نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- در نظر گرفتن اثر وابستگی بار به ولتاژ جهت واقعی تر شدن مسئله
- در نظر گرفتن چهار مدل متفاوت بار برای چهار سطح هزینه
- بکار بردن الگوریتم IDPSO به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر

ادامه این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است:

مدل سازی سیستم شامل تابع هدف و قیود مربوطه در بخش دوم بیان شده و روش پیشنهادی حل مسئله در بخش سوم ارائه شده است. نتایج عددی حاصل از شبیه سازی بر روی سیستم نمونه در بخش چهارم بیان گردیده و در نهایت بخش پنجم شامل نتیجه گیری مقاله است.

۲- مدل سازی سیستم

همان‌طور که گفته شد، یکی از مهم‌ترین راهکارها برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در شبکه، بارزدایی است. بر این اساس، در مسئله بارزدایی، محدودیت‌ها و تابع هدف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده که به ترتیب در بخش‌های ۲-۱ و ۲-۲ ارائه شده است.

¹⁰ Hybrid Discrete Particle swarm optimization

¹¹ Improved Discrete Particle swarm optimization

۱-۲ محدودیت‌ها

در این مقاله، بارزدایی با خروج بعضی فیدرها از مدار، به گونه‌ای انتخاب می‌شوند تا قیود شبکه تأمین گردد. بر این اساس، قیودهای مختلفی در مسئله بارزدایی تحت ولتاژ به کار گرفته می‌شود که در ادامه بررسی شده است [۲۰].

۱- قیود پخش بار: قیود پخش بار یا تعادل توان تولیدی و مصرفی از مهم‌ترین محدودیت‌ها بوده که طبق روابط (۱) و (۲) ارائه می‌شوند.

$$P_{Gi}^{\lambda} - (1 + \lambda_{min}) (P_{Di}^0 - \Delta P_{Di}) = \sum_{j=1}^{N_B} |V_i^{\lambda}| |V_j^{\lambda}| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j^{\lambda} - \delta_i^{\lambda}); i \in N_B \quad (1)$$

$$Q_{Gi}^{\lambda} - (1 + \lambda_{min}) (Q_{Di}^0 - \Delta Q_{Di}) = -\sum_{j=1}^{N_B} |V_i^{\lambda}| |V_j^{\lambda}| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j^{\lambda} - \delta_i^{\lambda}); i \in N_B \quad (2)$$

۲- قیود ولتاژ باس‌ها: در نظر گرفتن محدوده ولتاژ در مسئله بارزدایی بسیار مهم بوده که در رابطه (۳) نشان داده شده است.

$$V_i^{min} \leq V_i^{\lambda} \leq V_i^{max}; i \in N_B \quad (3)$$

۳- قیود ظرفیت شاخه‌ها: توان ماکزیمم در هر شاخه طبق رابطه (۴) مدل‌سازی می‌شود [۲۰].

$$|P_{ij}^{\lambda}| \leq P_{ij}^{max}; \forall ij \in \text{transmission lines} \quad (4)$$

۴- محدودیت توان اکتیو و راکتیو در واحدهای تولیدی: محدوده تولید توان اکتیو و راکتیو در هر ژنراتور در سیستم قدرت به ترتیب طبق رابطه (۵) و (۶) بیان می‌شود.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi}^{\lambda} \leq P_{Gi}^{max}; i \in N_G \quad (5)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi}^{\lambda} \leq Q_{Gi}^{max}; i \in N_G \quad (6)$$

۵- محدودیت‌های پایین/بالا در بارزدایی: مقدار توان اکتیو بارزدایی شده در هر باس نباید از مقدار ماکزیمم مشخص شده در هر باس بیشتر باشد که طبق رابطه (۷) مدل می‌شود.

$$0 \leq \Delta P_{Di} \leq \Delta P_{Di}^{max}; i \in N_B \quad (7)$$

۲-۲ تابع هدف

در این مقاله، از تابع هدف اقتصادی برای مسئله بارزدایی استفاده شده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله، مینیمم سازی هزینه بارزدایی بوده که طبق رابطه (۸) ارائه می‌گردد [۲۱].

$$OF = \min \left(\sum_{i=1}^{N_B} \left(C_{i_B} U_{i_B} + \sum_{j=1}^{N_{F_i}} C_{ij_F} U_{ij_F} \right) \right) \quad (8)$$

طبق رابطه (۸)، به منظور انتخاب باس‌ها و فیدرهای مؤثر در بارزدایی، هزینه قطع فیدرها و همچنین هزینه مشارکت باس‌ها در بارزدایی در نظر گرفته شده است.

۳- روش پیشنهادی

۱-۳ مدل بار وابسته به ولتاژ (VLDL)

بخش‌های مختلف بار وابستگی متفاوتی به ولتاژ داشته و در نتیجه، مدل بار در تحلیل بار واقعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از آنجایی که بارهای شبکه به ولتاژ وابسته‌اند، در نظر گرفتن تغییرات ولتاژ بعد از خطا و اعمال تصمیمات با لحاظ نمودن وابستگی بارها به ولتاژ در مسئله بارزدایی منطقی‌تر خواهد بود. بارهای واقعی ترکیبی از اجزای بار مختلف بوده که محققان به

¹² Voltage dependent load modeling

مدل سازی و استفاده از آن توجه کمتری نموده اند. در این مقاله، یک مدل ZIP برای مدل سازی وابستگی غیر خطی بارها به انحراف ولتاژ استفاده شده و طبق رابطه های (۹) و (۱۰) بیان می شوند [۲۲].

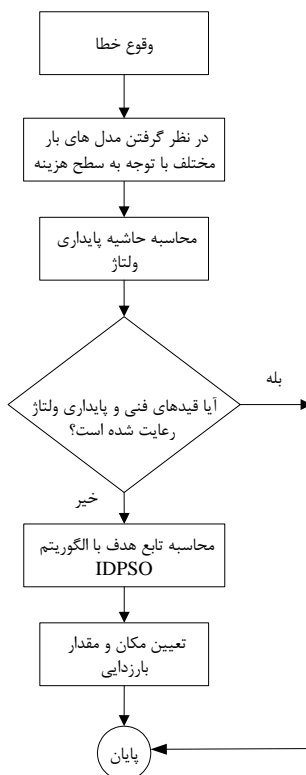
$$\frac{P}{P_0} = P_p + I_p * \left(\frac{V}{V_0}\right) + Z_p * \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{Q}{Q_0} = P_q + I_q * \left(\frac{V}{V_0}\right) + Z_q * \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (10)$$

که P و I، Z به ترتیب امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت هستند. طبق رابطه های (۹) و (۱۰)، در نظر گرفتن مدل بار وابسته به ولتاژ سبب می شود تا توان فیدر با توجه به ارزش خودش، متناسب با ولتاژ تغییر کرده و مقادیر به دست آمده واقعی تر باشد.

۲-۳- الگوریتم IDPSO

الگوریتم PSO برای مسائل بهینه سازی پیوسته و مبتنی بر جمعیت بوده که با انبوهی از ذرات تصادفی سروکار دارد. از طرفی دیگر، در بسیاری از مسائل بهینه سازی از جمله مسئله بارزدایی به کار گرفته شده در این مقاله، متغیرهای تصمیم باینری نیز دخیل هستند. بنابراین، استفاده از یک الگوریتم PSO گسسته بهبود یافته حائز اهمیت بوده تا بر اساس تکنیک های PSO کوانتومی، توانایی های جستجوی محلی و سراسری را افزایش دهد [۲۳]. در این الگوریتم پیشنهادی، بعد از مقداردهی اولیه در الگوریتم، ضرایب قابل تنظیم مانند α و دیگر ضرایب الگوریتم محاسبه می شوند. سپس Pbest و Gbest به روزرسانی شده و بردار کوانتوم (QV^{13}) و موقعیت ذره ها به روزرسانی می شوند. این حلقه تا رسیدن به شرایط خاتمه ادامه پیدا کرده تا بهترین جواب برای مسئله به دست آید. شکل (۱) فلوجارت روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم IDPSO را نشان می دهد.



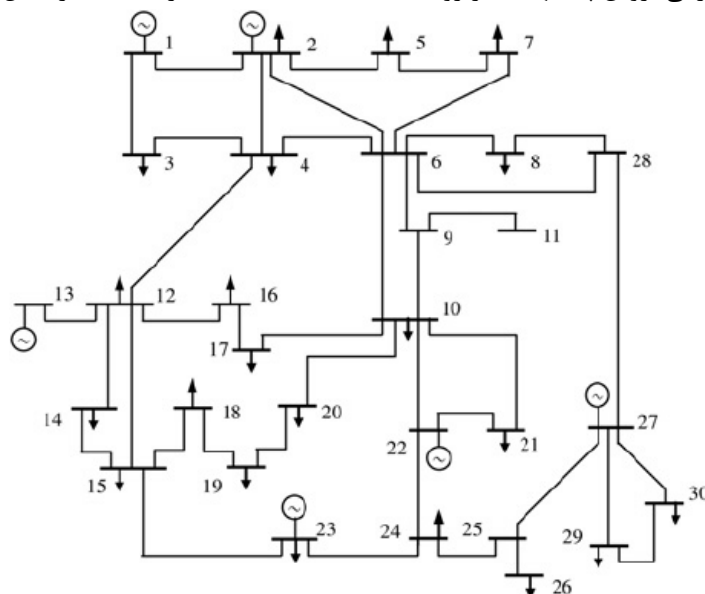
شکل ۱: فلوجارت روش پیشنهادی

¹³ Quantum vector

بر اساس شکل (۱)، با وقوع خطا در سیستم با توجه به سطح هزینه تعریف شده، مدل‌های بار مختلف برای فیدرها مشخص می‌شود. سپس، حاشیه پایداری ولتاژ محاسبه شده و در صورت کمتر بودن نسبت به حداقل حاشیه پایداری با توجه به تابع هدف، بارزدایی انجام شده و مکان/مقدار بارزدایی نیز تعیین می‌گردد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای تأیید کارایی، روش پیشنهادی بر روی شبکه ۳۰ باسه IEEE اجرا شده که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۰ باسه IEEE [۲۴]

بر اساس شکل (۲)، شبکه نمونه شامل ۳۰ باس، ۶ ژنراتور و ۴۱ خط بوده که اطلاعات تجهیزات آن از مرجع [۲۴] اخذ شده است. در حالت نرمال، حاشیه پایداری مناسب بوده و در شرایط غیرعادی حاشیه پایداری ولتاژ به محدوده ناایمن می‌رسد. بنابراین، حاشیه پایداری مناسب از قبل تعیین شده و بارزدایی بر اساس آن انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که حد پایداری مینیمم در رابطه‌های (۱) و (۲) مربوط به قید پخش بار لحاظ شده و در این مقاله ۱۰٪ در نظر گرفته شده است. در مرحله اول، با خارج شدن ژنراتورها و یا خطوط انتقال روی این سیستم، شرایط بارزدایی بررسی شده و نتایج حاصل از آن با در نظر گرفتن تابع هدف ارائه می‌شود. همچنین، بارزدایی بر اساس وابستگی فیدرها به ولتاژ در نظر گرفته شده و عملکرد آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در این مقاله، مدل بار ZIP بر اساس سطوح مختلف هزینه تعریف شده و مقادیر آن با توجه به هزینه فیدرها و باس‌های مربوطه متفاوت است که در جدول (۱) نشان شده است [۱۹].

جدول ۱: سطوح مختلف هزینه قطع فیدرها و هزینه مشارکت باس‌ها در بارزدایی [۱۹]

سطح هزینه	هزینه مشارکت باس در بارزدایی (\$)	هزینه قطع فیدرها (\$)
۱	۸	۵
۲	۱۸	۱۵
۳	۲۵	۲۰
۴	۳۶	۳۰

طبق جدول (۱)، هزینه مشارکت باس‌ها و هزینه قطع فیدرها در بارزدایی به صورت چهار سطح دسته‌بندی شده است. این هزینه‌ها در تعیین مکان و موقعیت بارزدایی مؤثر بوده و منجر به انتخاب فیدر و باس بهینه برای بارزدایی می‌گردد.

همچنین، پارامترهای مدل‌های ZIP برای بارهای مختلف در چهار ناحیه با توجه به سطوح هزینه تعریف شده، در جدول (۲) نشان داده شده که در هر سطح تعدادی از فیدرها را در بر می‌گیرد. به عبارتی دیگر، کل فیدرهای موجود در یکی از این سطوح هزینه با ارزش گذاری مختلف قرار دارند.

جدول ۲: پارامترهای مدل‌های ZIP برای بارهای مختلف در چهار سطح مختلف [۲۵]

ناحیه	توان اکتیو			توان راکتیو		
	Z	I	P	Z	I	P
۱	۰/۳۱	۰/۱۳	۰/۵۶	۱/۶۰	-۳/۵۷	۲/۹۷
۲	۰/۳۷	-۰/۰۳	۰/۶۶	۱/۵۹	-۳/۵۶	۲/۹۷
۳	۰/۳۹	-۰/۰۷	۰/۶۷	۱/۶۴	-۳/۶۸	۳/۰۴
۴	۰/۸۳	-۱/۱۴	۱/۳۱	۱/۶۸	-۳/۸۸	۳/۲۰

مطابق جدول (۲)، پارامترهای مدل ZIP در چهار ناحیه مختلف ارائه شده است. ضرایب وابستگی بار به ولتاژ مطابق این ناحیه‌ها تعریف شده تا فیدرها با ارزش مساوی، رفتار یکسان داشته باشند. یعنی فیدرهایی که در سطح هزینه ناحیه ۱ هستند، رفتار مشابهی داشته و بقیه ناحیه‌ها نیز به این صورت تعریف می‌شوند تا در سطوح مختلف رفتار متفاوتی داشته باشند. در این مقاله، هزینه‌های مربوط به قطع فیدر و مشارکت باس‌ها در بارزدایی در نظر گرفته شده که در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: هزینه قطع فیدر و هزینه مشارکت باس در بارزدایی [۱۹]

هزینه قطع فیدر (\$)													هزینه مشارکت باس (\$)	باس
فیدر ۱	فیدر ۲	فیدر ۳	فیدر ۴	فیدر ۵	فیدر ۶	فیدر ۷	فیدر ۸	فیدر ۹	فیدر ۱۰	فیدر ۱۱	فیدر ۱۲	فیدر ۱۳		
-	-	-	-	۲۰	۵	۲۰	۵	۲۰	۵	۳۰	۵	۳۰	۸	۲
-	۲۰	۳۰	۵	۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵	۲۰	۵	۱۵	۳۰	۲۵	۳
-	۳۰	۱۵	۲۰	۳۰	۳۰	۵	۳۰	۲۰	۳۰	۲۰	۵	۳۰	۲۵	۴
-	-	-	-	-	-	۲۰	۲۰	۲۰	۳۰	۱۵	۱۵	۳۰	۳۶	۷
-	-	-	-	-	-	۵	۱۵	۲۰	۵	۵	۳۰	۳۰	۳۶	۸
-	۵	۵	۲۰	۳۰	۲۰	۱۵	۳۰	۲۰	۵	۳۰	۲۰	۳۰	۳۶	۱۰
-	-	-	-	-	-	۲۰	۵	۲۰	۲۰	۲۰	۵	۳۰	۳۶	۱۲
-	-	-	۵	۲۰	۲۰	۵	۵	۲۰	۵	۵	۲۰	۵	۲۵	۱۴
-	-	-	-	-	-	۵	۱۵	۲۰	۵	۱۵	۵	۳۰	۲۵	۱۵
-	-	-	-	۱۵	۵	۱۵	۱۵	۵	۵	۵	۳۰	۵	۳۶	۱۶
-	-	-	-	-	۱۵	۵	۳۰	۲۰	۱۵	۱۵	۳۰	۲۰	۱۸	۱۷
-	۳۰	۳۰	۱۵	۱۵	۵	۱۵	۲۰	۵	۵	۳۰	۵	۳۰	۸	۱۸
-	-	-	-	۲۰	۱۵	۵	۱۵	۲۰	۲۰	۵	۱۵	۵	۱۸	۱۹
-	-	-	۲۰	۳۰	۱۵	۵	۱۵	۳۰	۱۵	۱۵	۵	۱۵	۲۵	۲۰
-	-	-	-	-	۳۰	۳۰	۲۰	۲۰	۱۵	۱۵	۳۰	۲۰	۱۸	۲۱
-	-	-	-	-	۱۵	۱۵	۳۰	۲۰	۵	۵	۳۰	۳۰	۳۶	۲۳
-	-	۲۰	۱۵	۵	۳۰	۵	۱۵	۳۰	۲۰	۱۵	۵	۲۰	۸	۲۴
-	۵	۲۰	۲۰	۵	۱۵	۵	۵	۵	۵	۱۵	۵	۵	۸	۲۶
-	-	-	-	-	۵	۲۰	۵	۵	۱۵	۵	۳۰	۲۰	۲۵	۲۹
۱۵	۵	۲۰	۱۵	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۱۵	۲۰	۲۰	۲۰	۳۶	۳۰

بر اساس جدول (۳)، برای فیدرها و باس‌ها ارزش‌های مختلفی در نظر گرفته شده که در نتیجه، فیدرها رفتارهای مختلفی جهت بارزدایی از خود نشان داده و توان بارزدایی آن‌ها مشخص می‌شود. از طرفی دیگر، در این مقاله نتایج برای سه سطح بار مختلف شامل سطح بار پیک ($LF^{14}=1$)، سطح بار ۲ ($LF=0.75$) و سطح بار ۱ ($LF=0.5$) محاسبه می‌شود.

۱-۴- صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی

برای صحت‌سنجی روش بهینه‌سازی، خطاهای در نظر گرفته شده در سیستم ۳۰ باس با توجه به مرجع [۱۹] در نظر گرفته شده است. خطاهای در نظر گرفته شده شامل خروج ژنراتور در باس ۲، خروج خط‌های ۶-۹، ۶-۱۰ و ۴-۱۲ هستند. با توجه به این‌که این خطاها به صورت همزمان اتفاق افتاده، نتایج به صورت جدول (۴) ارائه می‌گردد.

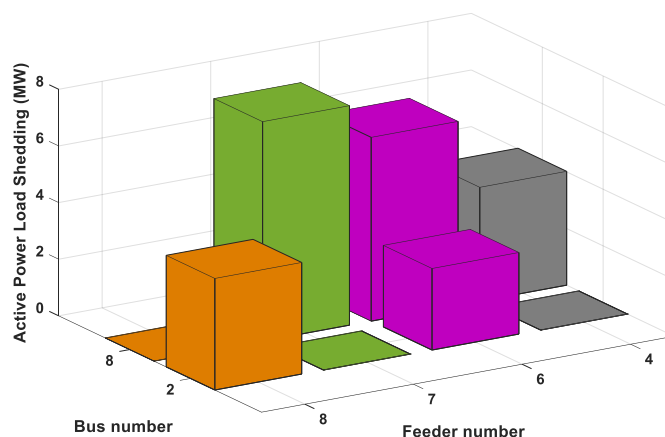
جدول ۴: صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم بهینه‌سازی	حداقل هزینه قطع کل (\$)	مقدار توان بارزدایی شده (MW)
HDPSO [۱۹]	۱۴۴	۲۵/۷۵
IDPSO	۱۳۴	۲۴/۶۶

با توجه به جدول (۴)، با رخداد همزمان خطاهای ذکر شده، هزینه قطع کل و مقدار توان بارزدایی شده به ترتیب به میزان ۶/۹۴ و ۴/۲۳ درصد کاهش یافته است. این نتایج، کارایی و عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی IDPSO را نشان داده و در ادامه می‌توان روش پیشنهادی را در سناریوهای مختلف بررسی نمود.

۲-۴- بارزدایی تحت ولتاژ پیشنهادی

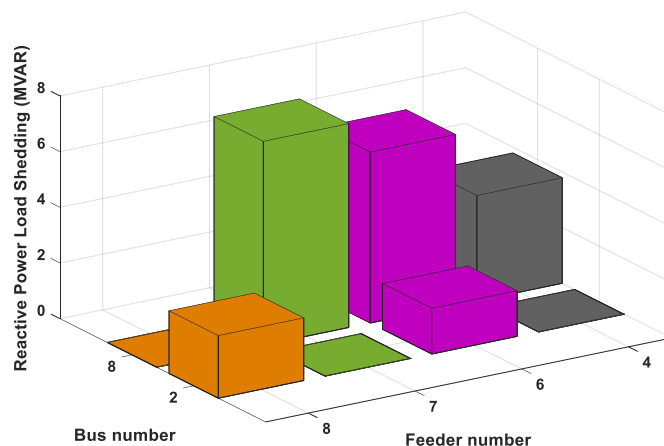
در این بخش، بارزدایی تحت ولتاژ پیشنهادی بر روی سیستم قدرت مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطای در نظر گرفته شده در این بخش، خروج ژنراتور در باس ۲ بوده تا عملکرد روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. در روش پیشنهادی، هر فیدر با توجه به رفتار و ارزش خود، مقدار بارزدایی متفاوتی خواهد داشت. ابتدا، نتایج برای سطح بار پیک که از اهمیت بیشتری برخوردار است ارائه شده و سپس، در دیگر دو سطح بار مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۳) توان اکتیو بارزدایی شده در باس‌های منتخب را نشان می‌دهد.



شکل ۳: توان اکتیو بارزدایی شده در باس‌های منتخب بارزدایی

بر اساس شکل (۳)، دو باس ۲ و ۸ برای بارزدایی انتخاب شدند. در باس ۲، فیدرهای ۶ و ۸، و در باس ۸، فیدرهای ۴، ۶ و ۷ قطع می‌شوند. بیشترین مقدار توان اکتیو بارزدایی در فیدر ۷ متعلق به باس ۸ رخ داده و کمترین مقدار بارزدایی در فیدر ۶ متعلق به باس ۲ ایجاد شده است. به صورت کلی، با خروج ژنراتور در باس ۲، مجموع توان اکتیو بارزدایی به میزان ۲۵/۰۷ مگاوات بوده که از طریق ۵ فیدر حاصل شده تا از فروپاشی ولتاژ جلوگیری نماید. پس از لحاظ نمودن توان اکتیو، می‌توان توان اکتیو بارزدایی شده در باس‌های منتخب را بررسی نمود که در شکل (۴) نشان داده شده است.

¹⁴ Load factor

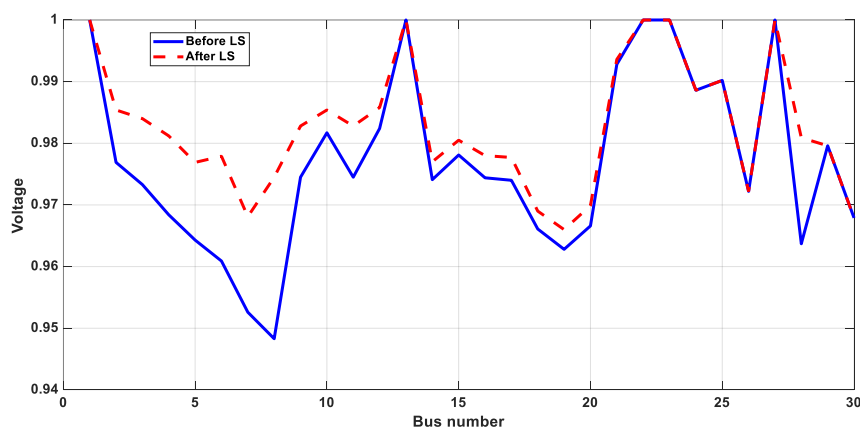


شکل ۴: توان راکتیو بارزدایی شده در باس‌های منتخب بارزدایی

بر اساس شکل (۴)، میزان توان راکتیو بارزدایی شده در باس‌ها و فیدرهای منتخب نشان داده شده که در فیدرهای متعلق به باس ۸ بیشترین مقدار است. به صورت کلی، با خروج ژنراتور در باس ۲، مجموع توان راکتیو بارزدایی به میزان ۲۱/۱۵ مگاوار بوده که از طریق ۵ فیدر حاصل شده تا به پایداری ولتاژ کمک نماید.

همان‌طور که بیان شد، تعداد ۲ باس و مجموع ۵ فیدر در بارزدایی نقش داشته تا پایداری شبکه حاصل گردد. از طرفی دیگر، در نظر گرفتن ارزش گذاری فیدرها و باس‌ها دارای هزینه بوده و بررسی تابع هدف اقتصادی حائز اهمیت است. با خروج ژنراتور در باس ۲، هزینه قطع فیدرها، هزینه مشارکت باس‌ها و هزینه کل جهت بارزدایی به ترتیب به میزان ۳۵، ۴۴ و ۷۹ دلار ایجاد شده است. با توجه به ارزش گذاری فیدرها و باس‌ها در جدول (۳)، مجموع هزینه مشارکت دو باس ۲ و ۸ برابر ۴۴ دلار و مجموع هزینه قطع فیدرها ۳۵ دلار حاصل شده است. از آنجایی که در این مقاله مدل بارزدایی به صورت گسسته در نظر گرفته شده، مقدار توان بارزدایی شده و هزینه به یکدیگر وابسته نبوده و به صورت مجزا محاسبه می‌شوند. علاوه بر این، قیود فنی و اقتصادی نیز جهت بدست آمدن هزینه قطع رعایت شده است.

هزینه‌های ذکر شده جهت جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در شبکه بوده که از طریق بارزدایی انجام شده است. بنابراین، ضروری است نتیجه بارزدایی بر روی پروفیل ولتاژ قبل و بعد از بارزدایی بررسی شود که در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵: پروفیل ولتاژ قبل و بعد از بارزدایی

بر اساس شکل (۵)، کمترین مقدار ولتاژ قبل از بارزدایی متعلق به باس ۸ بوده که بعد از بارزدایی بیش از ۲/۶ درصد بهبود یافته است. از طرفی دیگر، بهبود پروفیل ولتاژ در اغلب باس‌ها مشهود بوده و نشان‌دهنده عملکرد صحیح روش پیشنهادی است. تمامی بررسی‌های انجام شده تاکنون بابت خروج ژنراتور در باس ۲ با سطح بار پیک ($LF=1$) در سیستم بوده است. حال، لازم است که سطح‌های دیگر بار شامل سطح بار ۲ ($LF=0.75$) و سطح بار ۱ ($LF=0.5$) مورد ارزیابی قرار گیرند. بنابراین، با خروج ژنراتور در باس ۲ و با لحاظ نمودن دو سطح بار دیگر، سیستم همچنان پایدار بوده و نیازی به بارزدایی نخواهد داشت.

۳-۴- بار حیاتی

همان طور که گفته شد، برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت و پایداری آن، بارزدایی در باسها و فیدرهای منتخب انجام می‌شود. در این بخش، برای نشان دادن عملکرد صحیح روش پیشنهادی، دو بار حیاتی در نظر گرفته شده تا نتایج برای آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بارزدایی با دو بار حیاتی مختلف در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵: نتایج بارزدایی با در نظر گرفتن بار حیاتی

مکان بارزدایی (فیدر، باس)	توان بارزدایی کل (MW)	هزینه کل (\$)	مکان بار حیاتی
(۸.۷) (۸.۶) (۸.۴) (۸.۳) (۲.۶) (۲.۲)	۲۴/۶۵	۸۴	فیدر ۸ در باس ۲
(۸.۶) (۸.۴) (۸.۳) (۲.۶) (۲.۸) (۲.۹)	۲۴/۵۲	۹۹	فیدر ۷ در باس ۸

بر اساس جدول (۵)، علاوه بر خروج ژنراتور در باس ۲، دو بار حیاتی شامل فیدر ۸ در باس ۲ و همچنین فیدر ۷ در باس ۸ در نظر گرفته شده است. با انتخاب فیدر ۸ در باس ۲ به عنوان بار حیاتی، هزینه کل بارزدایی نسبت به حالت بدون بار حیاتی به میزان ۶/۳۳ درصد بیشتر شده است. اگرچه فیدر ۸ در باس ۲ به عنوان بار حیاتی قطع نشده، اما هزینه کل قطع اندکی افزایش یافته است. از طرفی دیگر، با انتخاب فیدر ۷ در باس ۸ به عنوان بار حیاتی، بیشترین مقدار بارزدایی به میزان ۲۴/۵۲ مگاوات را ایجاد می‌نماید. بنابراین، با در نظر گرفتن این فیدر به عنوان بار مهم و حیاتی، هزینه کل نسبت به حالت بدون بار حیاتی به میزان ۲۵/۳۱ درصد افزایش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش پیشنهادی برای بارزدایی بهینه به منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ شبکه با استفاده از الگوریتم IDPSO ارائه شد. با در نظر گرفتن خطا در شبکه، بارزدایی تحت ولتاژ پیشنهادی بررسی شده که نشان‌دهنده عملکرد خوب الگوریتم بوده است. بکارگیری الگوریتم IDPSO نسبت به HDPSO، هزینه قطع کل و مقدار توان بارزدایی شده را به ترتیب به میزان ۶/۹۴ و ۴/۲۳ درصد کاهش یافت. با خروج ژنراتور در باس ۲ با توجه به روش پیشنهادی، مجموع توان اکتیو و راکتیو بارزدایی به ترتیب به میزان ۲۵/۰۷ مگاوات و ۲۱/۱۵ مگاوار بوده که از طریق ۵ فیدر حاصل شده تا به پایداری ولتاژ کمک نماید. بر این اساس، پروفیل ولتاژ بعد از بارزدایی نسبت به قبل از بارزدایی، بیش از ۲/۶ درصد بهبود یافته است. همچنین، برای اطمینان از عملکرد صحیح روش پیشنهادی، دو بار حیاتی در نظر گرفته شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن بار حیاتی، اگرچه فیدر مورد نظر قطع نشده، اما هزینه کل سیستم اندکی افزایش یافت. بررسی نتایج و روش پیشنهادی نشان داد که مناسب‌ترین جواب برای انتخاب باسها و فیدرها جهت بارزدایی با توجه به تابع هدف اقتصادی ارائه شده است. علاوه بر کاهش هزینه‌ها، از فروپاشی ولتاژ جلوگیری نموده و پایداری را تضمین می‌نماید. بنابراین، دقت این روش برای بارزدایی بهینه و همچنین جلوگیری از فروپاشی ولتاژ تأیید می‌شود.

مراجع

- [1] Z.Y. Dong, P. Zhang, "Emerging Techniques in Power System Analysis", Springer, 2009.
- [2] Z. Shi, W. Yao, Z. Li, L. Zeng, Y. Zhao, R. Zhang, et al., "Artificial intelligence techniques for stability analysis and control in smart grids: Methodologies, applications, challenges and future directions", *Appl. Energy*, vol. 278. 2020, doi:10.1016/j.apenergy.2020.115733.
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994.
- [4] S. Rai, Y. Kumar, G. Agnihotri, "Under voltage load shedding for contingency analysis to optimize power loss and voltage stability margin", *International Journal of Electronic and Electrical Engineering*, vol. 3, pp. 57-64, 2014, doi:10.14810/eiej.2014.3406.
- [5] S.M. Kisengeu, Ch.M. Muriithi, G.N. Nyakoe, "Under voltage load shedding using hybrid ABC-PSO algorithm for voltage stability enhancement", *Heliyon*, vol. 7, no.10, 2021,

- [doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08138](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08138).
- [6] M. Begovic, D. Fulton, M.R. Gonzalez, J. Goossens, E.A. Guro, R.W. Haas, et al., "Summary of "System Protection and Voltage Stability",", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no.2, pp. 631-638, 1995, doi: 10.1109/61.400868.
- [7] Y. Wang, I.R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, E. Vaahedi, "Strategy to minimise the load shedding amount for voltage collapse prevention", *IET Generat. Transm. Distribut.* vol. 5, no.3, pp. 307-313, 2011, doi: [10.1049/iet-gtd.2010.0341](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0341).
- [8] L.D. Arya, A. Koshti, "Anticipatory load shedding for line overload alleviation using Teaching learning based optimization (TLBO)", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 63, pp. 862-877, 2014, doi:[10.1016/j.ijepes.2014.06.066](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.066).
- [9] D. Chattopadhyay, B.B. Chakrabarti, "A preventive/corrective model for voltage stability incorporating dynamic load-shedding", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 25,no.5, pp. 363-376, 2003, doi:[10.1016/S0142-0615\(02\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(02)00094-7).
- [10] X. Fu, X. Wang, "Determination of load shedding to provide voltage stability", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol. 33,no.3, pp. 515-521, 2011, doi:[10.1016/j.ijepes.2010.11.006](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.11.006).
- [11] Z.A. Hamid, I. Musirin, "Optimal Fuzzy Inference System incorporated with stability index tracing: an application for effective load shedding", *Expert Syst. Appl.*, vol. 41,no.4, pp. 1095-1103, 2014, doi:[10.1016/j.eswa.2013.07.105](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.105).
- [12] R.M. Larik, M.W. Mustafa, M.N. Aman, T.A. Jumani, S. Sajid, M.K. Panjwani, "An improved algorithm for optimal load shedding in power systems", *Energies*, vol. 11,no.7, 2018,doi: [10.3390/en11071808](https://doi.org/10.3390/en11071808).
- [13] V. Tamilselvan, T. Jayabarathi, "A hybrid method for optimal load shedding and improving voltage stability", *Ain Shams Eng. J.*, vol. 7,no.1, pp. 223-232, 2016, doi:[10.1016/j.asej.2015.11.003](https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.003).
- [14] Y.Wang, Yong.Wang, Y.Ding, Y.Zhou, Zh.Zhang, "A fast load shedding algorithm for power system based on Artificial Neural Network", *International conference on IC design and technology*, Jun, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICICDT.2019.8790851.
- [15] J. Modarresi, E.Gholipour, A.Khodabakhshian, "New adaptive and centralized undervoltage load shedding to prevent short-term voltage instability", *The institution of engineering and technology*, vol. 12, pp. 2530-2538, 2018, doi:[10.1049/iet-gtd.2017.0783](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0783).
- [16] S. Jalilzadeh, S.H. Hosseini, M. Derafshian-Maram, "Optimal load shedding to prevent voltage instability based on multi-objective optimization using modal analysis and PSO", *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*, pp. 371-376, 2010, doi: 10.1109/ICUMT.2010.5676611.
- [17] P. Pourghasem, H. Seyedi, K. Zare, "A new optimal under-voltage load shedding scheme for voltage collapse prevention in a multi-microgrid system", *Electr. Power Syst. Research*. vol. 203, 2022, doi:[10.1016/j.epsr.2021.107629](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107629).
- [18] A. Arief, M. B. Nappu, Zh.Y.Dong, "Dynamic under-voltage load shedding scheme considering composite load modeling", *Electr. Power Syst. Research*, vol. 202, 2022, doi:[10.1016/j.epsr.2021.107598](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107598).
- [19] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi, "A new integer-value modeling of optimal load shedding to prevent voltage instability", *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, vol.65, pp. 210-219, 2015, doi:[10.1016/j.ijepes.2014.09.021](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.09.021).
- [20] R.M. larik, M.W. Mustafa, M.N. Aman, "A critical review of the stateof-art schemes for under voltage load shedding", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol.29, pp. 1-26, 2019, doi:[10.1002/2050-7038.2828](https://doi.org/10.1002/2050-7038.2828).
- [21] A. Ahmadi, Y. Alinejad. Beromi, H.R. Soleymanpour, "Optimal load shedding by a new binary PSO", *The International Journal for computation and Mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 35, no.3, pp. 898-909, 2016, doi:[10.1108/COMPEL-01-2016-0033](https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2016-0033).
- [22] K. Qian, Ch. Zhou, M. Allan, Y. Yuan, "Effect of load models on assessment of energy losses in distributed generation planning" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33,n o.6, pp. 1243-1250, 2011, doi:[10.1016/j.ijepes.2011.04.003](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.04.003).
- [23] A. Ahmadi, M. Niasati, Y. Alinejad Beromi, "Optimal PMU Placement Considering Measurement loss by an Improved Discrete PSO", *Int. Power Syst. Conference*, vol. 26, 2011.
- [24] <https://matpower.org/docs/ref/matpower5.0/case39.html>

- [25] L.M. Hajagos, B. Danai, " Laboratory Measurements and Models of Modem Loads and Their Effect on Voltage Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.13, no.2, pp.584-592, 1998, doi: 10.1109/59.667386.

پیوست

فهرست علائم

عنوان	علامت اختصاری
<u>اندیس ها و بالانویس ها</u>	
اندیس باس ها	i
اندیس فیدر ها	j
نقطه کار اولیه بعد از وقوع خطا و قبل از بارزدایی	0
نقطه کار بعد از بارزدایی	λ
حد بالای پارامترها	max
حد پایین پارامترها	min
<u>پارامترها</u>	
تعداد باس ها	NB
تعداد باس های تولیدی	NG
دامنه عنصر زام از ماتریس ادمیتانس باس	Y_{ij}
زاویه فاز عنصر زام از ماتریس ادمیتانس باس	θ_{ij}
حاشیه پایداری مطلوب از پیش تعیین شده	λ
پارامتر قابل تنظیم در IDPSO	α
هزینه مشارکت باس i ام در بارزدایی	C_{iB}
تعداد کل فیدر ها در باس i ام	NF_i
هزینه قطع فیدر زام i ام	C_{ijF}
پارامترهای مدل بار	$P_p, I_p, Z_p, P_q, I_q, Z_q$
مقدار نامی توان اکتیو و راکتیو در ولتاژ نامی	P_0, Q_0
<u>متغیرها</u>	
مقدار توان اکتیو بارزدایی شده	ΔP_D
مقدار توان راکتیو بار زدایی شده	ΔQ_D
توان اکتیو تولیدی	P_Q
توان راکتیو تولیدی	Q_Q
مقدار توان اکتیو	P_D
مقدار توان راکتیو	Q_D
دامنه ولتاژ	V_i
زاویه فاز	δ_i
بهترین موقعیت ذره	P_{best}
بهترین موقعیت کل ذرات	G_{best}
<u>متغیرهای باینری</u>	
مشارکت/عدم مشارکت باس i ام	U_{iB}
مشارکت/عدم مشارکت فیدر زام i ام	U_{ijF}