Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 1 – Spring 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Simultaneous Optimization of Energy Entropy and Structural Resilience in Power Transmission Networks Using a Hierarchical Metaheuristic Algorithm

Vahid Khademi*[*1], Farzad Barzgar[2]
[*1] Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran, khademinet@gmail.com
[2] Department of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University , Marvdasht, Iran

Abstract:
This paper presents a novel multi-objective optimization framework for power transmission networks that simultaneously aims to minimize economic costs and energy losses, maximize structural resilience against disruptions, and enhance the uniformity of power flow distribution based on the energy entropy index. To this end, a new composite objective function is designed, which, for the first time, incorporates energy entropy as a network load balancing criterion alongside a weighted structural resilience index. Additionally, a set of constraints including line capacity limits, power balance, and scenario-based disruption constraints are formulated. To solve this complex and nonlinear problem, a hybrid hierarchical metaheuristic algorithm is developed, employing an entropy-based mutation mechanism and stratified selection to improve solution quality. The effectiveness of the proposed model is evaluated on two standard test systems: a 14-bus network and a 39-bus network, under four different scenarios. Simulation results show that in the 14-bus network, using the proposed algorithm leads to a 14% increase in energy entropy compared to conventional methods, and an 18% improvement in the structural resilience index. Moreover, the total operational cost is reduced from 880 to 850 units. In the 39-bus network, a significant improvement in power flow uniformity and reduction in losses is observed, with losses decreasing from 18.4 to 14 MW and generation cost dropping from 3400 to 3100 units. These results demonstrate the capability of the proposed model and algorithm in simultaneously enhancing transmission network performance indicators and improving operational reliability.

Keywords: Transmission Network Optimization, Energy Entropy, Hierarchical Metaheuristic Algorithm, Energy Losses.

Received: 20 Jan. 2025
Revised: 12 Apr. 2025
Accepted: 21 Apr. 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Vahid Khademi

Citation: Vahid Khademi, Farzad Barzgar, “Simultaneous Optimization of Energy Entropy and Structural Resilience in Power Transmission Networks Using a Hierarchical Metaheuristic Algorithm”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 1, 33-44, June 2025 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی هم‌زمان آنتروپی انرژی و تاب‌آوری ساختاری در شبکه‌های انتقال قدرت با الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی

وحید خادمی*[1]، فرزاد برزگر[2]

*۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، khademinet@gmail.com
۲- گروه برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده: در این مقاله، یک چارچوب نوین بهینه‌سازی چندهدفه برای شبکه‌های انتقال قدرت ارائه شده است که به‌طور هم‌زمان کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و تلفات انرژی، بیشینه‌سازی تاب‌آوری ساختاری در برابر اختلالات و افزایش یکنواختی توزیع توان خطوط انتقال بر اساس شاخص آنتروپی انرژی را دنبال می‌کند. برای این منظور، یک تابع هدف ترکیبی جدید طراحی شده که نخستین‌بار آنتروپی انرژی را به‌عنوان معیار تعادل بار شبکه در کنار شاخص وزنی تاب‌آوری ساختاری در مدل لحاظ می‌کند. هم‌چنین، مجموعه‌ای از محدودیت‌های ظرفیت خطوط، توازن توان و قیود اختلالات سناریومحور تدوین شده است. به‌منظور حل این مسئله پیچیده و غیرخطی، یک الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی ترکیبی توسعه یافته که از سازوکار جهش مبتنی بر آنتروپی و انتخاب طبقه‌بندی‌شده برای بهبود کیفیت پاسخ‌ها استفاده می‌کند. کارایی مدل پیشنهادی بر روی دو سیستم تست استاندارد شامل شبکه چهارده شینه و شبکه سی‌ونه شینه در چهار سناریوی مختلف ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در شبکه چهارده شینه، با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی، آنتروپی انرژی نسبت به روش‌های مرسوم حدود ۱۴ درصد افزایش یافته و شاخص تاب‌آوری ساختاری نیز به میزان ۱۸ درصد بهبود یافته است. هم‌چنین، هزینه کل بهره‌برداری در این شبکه از ۸۸۰ به ۸۵۰ واحد کاهش یافته است. در شبکه سی‌ونه شینه نیز بهبود قابل توجهی در یکنواختی توزیع توان و کاهش تلفات مشاهده شده به‌گونه‌ای که میزان تلفات از ۱۸/۴ به ۱۴ مگاوات کاهش یافته و هزینه تولید از ۳۴۰۰ به ۳۱۰۰ واحد رسیده است. این نتایج بیانگر توانمندی مدل و الگوریتم پیشنهادی در ارتقای همزمان شاخص‌های عملکردی شبکه انتقال و افزایش قابلیت اطمینان بهره‌برداری است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی شبکه انتقال، آنتروپی انرژی، الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی، تلفات انرژی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۱

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر وحید خادمی
نشانی نویسنده مسئول: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴ ساختمان مرکزی دانشگاه ملی مهارت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

۱- مقدمه

شبکه‌های انتقال قدرت به‌عنوان ستون فقرات سامانه‌های قدرت، نقش کلیدی در تداوم تأمین انرژی ایفا می‌کنند. با افزایش پیچیدگی و نفوذ منابع تولید پراکنده و بارهای متغیر، مدیریت هم‌زمان قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و بهره‌برداری اقتصادی شبکه‌های انتقال به مسئله‌ای مهم و چالش‌برانگیز تبدیل شده است. از یک سو، وقوع اختلالات گسترده هم‌چون حوادث طبیعی و حملات هدفمند می‌تواند کارکرد طبیعی شبکه را مختل کند و منجر به تلفات قابل توجه و ناپایداری سیستم شود. از سوی دیگر، یکنواختی توزیع توان بین خطوط انتقال، که می‌تواند با شاخص آنتروپی انرژی[1] سنجیده شود، به‌عنوان معیاری مؤثر در ارتقای تاب‌آوری و کاهش ازدحام اهمیت روزافزونی یافته است. با این‌حال، تاکنون در اغلب مدل‌های بهینه سازی، تمرکز اصلی بر کاهش هزینه تولید و تلفات بوده و به توزیع تعادل‌مند بار و پایداری ساختاری کم‌تر توجه شده است.

ضرورت انجام این تحقیق از نیاز روزافزون به مدل‌های جامع نشئت می‌گیرد که بتوانند هم‌زمان معیارهای اقتصادی، تاب‌آوری ساختاری و یکنواختی توزیع انرژی را در شبکه‌های انتقال بهینه سازی کنند. با توسعه فناوری‌های تولید و مصرف هوشمند و افزایش وابستگی زیر ساخت‌ها به شبکه انتقال، آسیب‌پذیری سیستم‌های قدرت در برابر انواع اختلالات افزایش یافته و لزوم طراحی مدل‌های مقاوم و چندهدفه بیش از پیش آشکار شده است.

انگیزه اصلی این پژوهش، پوشش شکاف‌های موجود در ادبیات و ارائه رویکردی متفاوت برای مدیریت هم‌زمان هزینه‌های اقتصادی و عملکرد مقاوم شبکه انتقال است. مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که بخش عمده پژوهش‌ها بر روی بهینه سازی تک‌هدفه تلفات یا هزینه تولید متمرکز بوده‌اند و معیارهای جدیدی هم‌چون آنتروپی انرژی کم‌تر در تابع هدف لحاظ شده است. هم‌چنین، الگوریتم‌های به‌کاررفته در مطالعات پیشین عمدتاً مبتنی بر روش‌های کلاسیک یا فراابتکاری متداول بدون بهره‌گیری از سازوکارهای ترکیبی برای همگرایی سریع و افزایش تنوع پاسخ‌ها بوده‌اند. در زمینه بهبود تاب‌آوری ساختاری نیز رویکردهای اندکی به تعریف شاخص‌های وزنی اختصاصی و تلفیق آن‌ها با اهداف اقتصادی پرداخته‌اند. در مرجع [۱] مدیریت بار و بهینه سازی توزیع توان در شبکه‌های انتقال با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (جنگل تصادفی وXGBoost) با دقت ۹۹/۱٪ انجام شده است. این پژوهش نشان داد که جریان‌های I_la و I بیش‌ترین تأثیر را در مدیریت بار دارند، در حالی‌که ولتاژها در پایداری شبکه مؤثرند. هم‌چنین با بهره‌گیری از الگوریتم‌های PSO و GA موفق به کاهش ۱۵٪ تلفات انرژی شد. با این‌حال، این روش صرفاً بر داده‌های جریان و ولتاژ متمرکز بود و تأثیر ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر را نادیده گرفت. در مرجع [۲] نویسندگان یک رویکرد ابتکارانه برای ادغام شبکه‌های توزیع و انتقال ارائه نمودند که منجر به جواب های دقیق‌تر و نزدیک واقعیت می‌شد، در این مقاله از مدل پخش بار خطی و محدب برای حل مسئله استفاده شده است. در مرجع [۳] یک چارچوب بازار انرژی انعطاف‌پذیر نزدیک به زمان واقعی با محوریت محدودیت‌های شبکه انتقال ارائه شد. این تحقیق بر محاسبه مبتنی بر جریان (Flow-based) و عناصر بحرانی شبکه (CNECs) تمرکز داشت، اما به دلیل محرمانه بودن داده‌ها، امکان اعتبارسنجی نتایج و مقایسه با روش‌های دیگر وجود نداشت. در مرجع [۴] بازآرایی بهینه شبکه‌های توزیع برای بهبود کیفیت توان با الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) به‌صورت تک‌هدفه و چندهدفه انجام شد. اگرچه نتایج شبیه سازی موفقیت‌آمیز بود، اما این روش برای شبکه‌های انتقال گسترده قابل تعمیم نبود و پیچیدگی محاسباتی بالا در شبکه‌های بزرگ از محدودیت‌های آن محسوب می شد. در مرجع [۵] یک چارچوب دو سطحی برای بهینه سازی بازارهای انرژی و خدمات جانبی در شبکه‌های انتقال و توزیع ارائه شد. این مدل با درنظرگرفتن بارهای منعطف، خودروهای الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌ساز، کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود شاخص‌های ولتاژ را نشان داد. با این‌حال، مدل‌سازی هماهنگی TSO-DSO در این پژوهش به اندازه‌کافی پویا نبود و چالش‌های عملیاتی واقعی را نادیده گرفت. در مرجع [۶] بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع برای پایداری شبکه برق از طریق مدیریت مصرف سوخت و تعدیل رو شنایی معابر انجام شد. این راهکار عملیاتی منجر به صرفه‌جویی ۱/۵ میلیون لیتری گازوئیل شد، اما یک راهکار مقطعی بود و راهبردهای بلندمدت فنی برای بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال[2] ارائه نکرد. در مرجع [۷] یک روش بهینه‌سازی مقاوم برای بهبود عملکرد مدیریت انرژی شبکه-باتری و سیستم‌های فتوولتاییک ارائه شده است. در مرجع [۸] تأثیر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر انعطاف‌پذیری شبکه‌های انتقال و توزیع با یک مدل بهینه سازی دو سطحی بررسی شد. این پژوهش نشان داد که نصب باتری‌ها در هر دو سطح انتقال و توزیع، انعطاف‌پذیری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

سیستم را افزایش می‌دهد. اشکال اصلی، پیچیدگی محاسباتی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) و نیاز به روش‌های جایگزین مانند معادلات KKT برای ساده‌سازی بود. در مرجع [۹] هماهنگی بهینه بین شبکه‌های انتقال و توزیع با درنظرگرفتن نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر مطالعه شد. این تحقیق کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تلفات انرژی را نشان داد، اما عدم قطعیت‌های تولید تجدیدپذیر به‌صورت ناکافی مدل‌سازی شده بود. در مرجع [۱۰] یک روش مقاوم برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه‌های انتقال و توزیع با درنظرگرفتن عدم قطعیت‌ها ارائه شد. این مدل علی‌رغم جامعیت، از پیچیدگی محاسباتی بالایی برخوردار بود و برای شبکه‌های بزرگ مقیاس کارایی نداشت. در مرجع [۱۱] بهینه سازی چندهدفه برای بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی پیشنهاد شد. اگرچه نتایج بهبود شاخص‌های فنی را نشان می‌داد، اما عدم ارتباط با شبکه‌های انتقال یک نقطه ضعف اساسی بود. در مرجع [۱۲] یک چارچوب برنامه‌ریزی مخروطی درجه دوم برای مدیریت انرژی چند دوره‌ای در سیستم‌های یکپارچه انتقال-توزیع توسعه یافت. این روش علی‌رغم کارایی در کاهش هزینه‌ها، اثرات پویای تغییرات بار را نادیده می‌گرفت. در مرجع [۱۳] استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بازآرایی شبکه‌های توزیع جهت کاهش تلفات بررسی شد. این روش جواب بهینه سراسری را فراهم می‌کرد، اما زمان محاسباتی طولانی برای شبکه‌های با ابعاد بزرگ یک محدودیت جدی بود. در مرجع [۱۴] هماهنگی بلادرنگ بین منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع و انتقال برای جلوگیری از قطع بار پیشنهاد شد. این روش اگرچه در شرایط مختلف موفق عمل کرد، اما نیاز به زیر ساخت‌های ارتباطاتی پرهزینه داشت. در مرجع [۱۵] یک رویکرد سه مرحله‌ای برای هماهنگی شبکه انتقال و توزیع با الگوریتم‌های تکاملی ارائه شد. نتایج بهبود پایداری ولتاژ را نشان می‌دادند، اما مدل سازی محدودیت‌های امنیتی شبکه ناکافی بود. در مرجع [۱۶] یک روش دو سطحی توزیع‌شده برای تنظیم ولتاژ در نقاط اتصال شبکه انتقال-توزیع با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی توسعه یافت. این پژوهش علی‌رغم نوآوری، تأثیر تغییرات دینامیکی سریع را نادیده گرفته بود. در مرجع [۱۷] یک روش خطی‌سازی برای پخش بار بهینه در شبکه‌های یکپارچه انتقال-توزیع پیشنهاد شد. سادگی محاسباتی از مزایا بود، اما دقت کاهش‌یافته در شرایط بارگذاری سنگین یک نقیصه محسوب می شد. در مرجع [۱۸] بهره‌برداری هم‌زمان شبکه‌های توزیع فعال و سیستم‌های انتقال با حضور منابع تجدیدپذیر و باتری‌ها بررسی شد. این مطالعه کاهش هزینه‌ها را نشان داد، اما چالش‌های هماهنگی زمانی بین بهره‌برداری TSO و DSO حل‌نشده باقی ماند. در مرجع [۱۹] یک مدل برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم برای بهره‌برداری بهینه شبکه‌های یکپارچه انتقال-توزیع-گرمایشی ارائه شد. افزایش رفاه اجتماعی از نتایج بود، اما پیچیدگی مدل، اجرای عملیاتی را محدود می‌کرد. در مرجع [۲۰] یک رویکرد چندهدفه برای بهینه سازی شبکه‌های انتقال و توزیع نامتعادل سه‌فاز توسعه یافت. بهبود شاخص‌های فنی اگرچه چشمگیر بود، اما عدم توجه به مسائل اقتصادی یک نقیصه بود. در مرجع [۲۱] مشارکت خودروهای الکتریکی در بازارهای انرژی و خدمات جانبی شبکه‌های انتقال بررسی شد. این مطالعه کاهش هزینه‌ها را نشان داد، اما چالش‌های هماهنگی بین مالکان خودرو و اپراتورها حل‌نشده باقی ماند. در مرجع [۲۲] یک رویکرد تصادفی چندهدفه برای بهبود پایداری ولتاژ در سیستم‌های یکپارچه انتقال-توزیع پیشنهاد شد. این روش علی‌رغم جامعیت، برای شبکه‌های بزرگ مقیاس از کارایی محاسباتی برخوردار نبود.

در مطالعه [۲۳]، تأثیر وابستگی‌های متقابل بر تاب‌آوری سیستم‌های قدرت با استفاده از نمونه‌برداری لایه‌ای از داده‌های شرکت‌های برق بررسی شده است. این رویکرد ابزاری برای رتبه‌بندی تاثیرات وابستگی‌ها بر تاب‌آوری شبکه‌های قدرت ارائه می‌دهد. در مقاله [۲۴]، برنامه‌ریزی توسعه انتقال برق با تمرکز بر تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در برابر طوفان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق بهینه‌سازی سوئیچینگ انتقال را برای بهبود تاب‌آوری در شرایط آب و هوایی شدید پیشنهاد می‌دهد. در [۲۵]، بهبود تاب‌آوری سیستم‌های انتقال و توزیع برق از طریق برنامه‌ریزی غیرمتمرکز مبتنی بر ریسک در برابر طوفان‌ها تحلیل شده است. این رویکرد به کاهش ریسک حوادث طبیعی و بهبود هماهنگی بین شبکه‌ها پرداخته است. در مقاله [۲۶]، ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت سایبر-فیزیکی ضعیف‌متصل با استفاده از الگوریتم یادگیری Q صورت گرفته است. این تحقیق به مدل‌سازی و ارزیابی تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت با استفاده از یادگیری تقویتی پرداخته است. در [۲۷]، استراتژی‌های راه‌اندازی ژنراتورها برای بازیابی سیستم قدرت با در نظرگرفتن وابستگی‌های آن با شبکه انتقال گاز طبیعی در شرایط بحران بررسی شده است. در مقاله [۲۸]، ارزیابی سریع تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در برابر طوفان‌ها با استفاده از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

گراف‌های مکانی-زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. این روش برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی تأثیرات طوفان‌ها بر عملکرد شبکه‌های قدرت کاربرد دارد. در [۲۹]، ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های قدرت به‌صورت بلادرنگ با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق برای یکپارچه سازی داده‌های هوا شنا سی و برقی جهت مدیریت بهتر حوادث شبکه ارائه شده ا ست. در [۳۰]، کنترل فرکانس چندسطحی و بهبود تاب‌آوری در شبکه‌های برق اچ‌وی‌دی‌سی (LCC-HVDC) بررسی شده است. هم‌چنین، شناسایی حملات سایبری در شبکه‌های بین‌منطقه‌ای نیز در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است.

نوآوری اصلی این مقاله در دو بخش نهفته است. نخست، تعریف یک تابع هدف ترکیبی جدید که به‌طور هم‌زمان هزینه‌های اقتصادی، تلفات انرژی[۳]، آنتروپی انرژی و شاخص تاب‌آوری ساختاری را لحاظ می‌کند و چارچوبی جامع برای بهره‌برداری مقاوم شبکه انتقال فراهم می‌آورد. دوم، طراحی یک الگوریتم فرابتکاری سلسله‌مراتبی[۴] ترکیبی شامل جهش مبتنی بر آنتروپی و انتخاب چند سطحی که قادر ا ست بهینه‌های محلی و سرا سری را به صورت هم‌زمان جستجو کرده و جبهه‌های پارتو با کیفیت بالا را استخراج کند. این چارچوب بر روی دو شبکه استاندارد چهارده شینه و سی‌ونه شینه ارزیابی شد

نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند بهبود محسوسی در یکنواختی توزیع توان، کاهش هزینه‌ها و افزایش تاب‌آوری ساختاری ایجاد کند.

۲- مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

در این بخش، مدل ریا ضی م سئله شامل مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای ت صمیم، تابع هدف ترکیبی جدید و محدودیت‌های عملیاتی و ساختاری ارائه می‌شود. این مدل برای مدیریت همزمان هزینه اقتصادی، تلفات انرژی، یکنواختی توزیع توان و تاب‌آوری ساختاری شبکه انتقال طراحی شده است.

مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای ت صمیم مدل به صورت زیر تعریف می شوند. مجموعه N شامل تمام باس‌های شبکه انتقال قدرت ا ست که نقاط اتصال بارها و تولیدها را مشخص می‌کنند. مجموعه L مجموعه خطوط انتقال شبکه را شامل می‌شود که مسیر انتقال توان بین باس‌ها را فراهم می‌کنند. مجموعه G مجموعه واحدهای تولیدی موجود در شبکه است. پارامتر C_l بیانگر هزینه هر واحد توان عبوری از خط l بوده و هزینه انتقال توان را در مدل لحاظ می‌کند. پارامتر C_g هزینه هر واحد تولید ژنراتور g را نمایش می‌دهد که بخش اقتصادی تولید را در تابع هدف در نظر می‌گیرد. ظرفیت حرارتی مجاز خط l با $P_l^{\max}$ مشخص می‌شود که نشان‌دهنده بیش‌ترین میزان توان قابل عبور از خط بدون ایجاد اضافه‌بار است. مقاومت خط l با R_l تعیین می‌شود و در محاسبه تلفات نقش دارد. پارامتر W_l وزن اهمیت خط l در شاخص تاب‌آوری ساختاری شبکه است که اهمیت هر خط را در حفظ ساختار شبکه هنگام اختلال نشان می‌دهد. میزان بار تقاضا در هر باس n با D_n مشخص شده است. برای هر ژنراتور g، حدود تولید مجاز شامل حداقل و حداکثر تولید به‌ترتیب با $P_g^{\min}$ و $P_g^{\max}$ تعریف می‌شود. پارامتر $Z_{\max}$ حداکثر تعداد خطوطی را مشخص می‌کند که می‌توانند در یک سناریو دچار اختلال شوند. چهار ضریب α، β، γ و λ ضرایب وزنی تابع هدف هستند که اهمیت نسبی هر معیار (هزینه انتقال، هزینه تولید، آنتروپی انرژی و تاب‌آوری ساختاری) را تعیین می‌کنند. متغیرهای تصمیم نیز شامل P_g به‌عنوان توان خروجی هر ژنراتور g، f_l به‌عنوان توان عبوری از خط l، θ_n به‌عنوان زاویه ولتاژ هر باس n و δ_l به‌عنوان وضعیت اختلال هر خط l می‌باشند، به‌گونه‌ای که اگر $\delta_l = ۱$ باشد، خط در حالت اختلال قرار دارد و اگر $\delta_l = ۰$ باشد، خط سالم محسوب می‌شود.

$$\min\left[\alpha \sum_{l\in\square} C_l \cdot |f_l| + \beta \sum_{g\in\mathcal{G}} C_g \cdot P_g - \gamma \cdot H(f) - \lambda \cdot R(\delta)\right] \quad (۱)$$

$$H(f) = -\sum_{l\in\square} \frac{|f_l|}{F_{\text{tot}}} \cdot \ln\left(\frac{|f_l|}{F_{\text{tot}}}\right) \quad (۲)$$

$$F_{\text{tot}} = \sum_{l\in\square} |f_l| \quad (۳)$$

$$R(\delta) = \sum_{l\in\square} W_l \cdot (۱ - \delta_l) \quad (۴)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

$$\sum_{g\in\mathcal{G}_n} P_g - \sum_{l\in\square_n^{\text{out}}} f_l + \sum_{l\in\square_n^{\text{in}}} f_l = D_n \;\forall n \in \mathcal{N} \quad (۵)$$

$$f_l = \frac{۱}{X_l}(\theta_i - \theta_j)\cdot(۱-\delta_l)\forall l(i,j)\in\square \quad (۶)$$

$$|f_l| \le P_l^{\max} \;\forall l \in \square \quad (۷)$$

$$P_g^{\min} \le P_g \le P_g^{\max} \;\forall g \in \mathcal{G} \quad (۸)$$

$$\sum_{l\in\square} \delta_l \le Z_{\max} \quad (۹)$$

$$\theta_{\text{ref}} = ۰ \quad (۱۰)$$

رابطه شماره (۱) تابع هدف اصلی مسئله را نشان می‌دهد که به‌طور هم‌زمان شامل چهار جزء مختلف است. بخش اول جمع هزینه انتقال توان در تمام خطوط انتقال است که از حاصل ضرب هزینه هر واحد توان عبوری از هر خط در مقدار مطلق توان عبوری آن خط به‌دست می‌آید. ضرایب وزنی تابع هدف به‌منظور تنظیم اولویت‌های نسبی میان اهداف مختلف در الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی ترکیبی انتخاب شده‌اند و لزوماً نیازی به مجموع آن‌ها برابر با یک نیست. بخش دوم جمع هزینه‌های تولید توان تمام واحدهای تولیدی است. بخش سوم که با ضریب منفی در تابع هدف ظاهر شده، آنتروپی انرژی خطوط را شامل می‌شود و هدف آن بیشینه‌سازی یکنواختی توزیع توان در کل شبکه است. بخش چهارم نیز شاخص تاب‌آوری ساختاری است که آن هم به‌صورت کاهشی در تابع هدف آمده و هدف از حضورش بیشینه کردن تاب‌آوری است. چهار ضریب وزنی تعیین‌کننده میزان اهمیت نسبی هر یک از این معیارها در کلینه‌سازی تابع هدف هستند. رابطه شماره (۲) نحوه محاسبه آنتروپی انرژی خطوط انتقال را نشان می‌دهد. در این رابطه ابتدا نسبت توان عبوری هر خط به مجموع کل توان عبوری شبکه محاسبه می‌شود و سپس این نسبت وارد تابع لگاریتم طبیعی شده و در همان نسبت ضرب می‌شود. جمع این مقادیر در تمام خطوط با علامت منفی باعث می‌شود اگر توان خطوط به صورت یکنواخت توزیع شده باشد، مقدار آنتروپی انرژی بیش‌تر شود. در واقع این معیار سنجشی از یکنواختی جریان توان در کل شبکه محسوب می‌شود [۶]. رابطه شماره (۳) مجموع کل توان عبوری از تمام خطوط را تعریف می‌کند که در محاسبه آنتروپی انرژی استفاده می‌شود. این پارامتر همان مخرج کسری است که نسبت توان هر خط به توان کل را محاسبه می‌کند [۶]. رابطه شماره (۴) شاخص تاب‌آوری ساختاری شبکه را بیان می‌کند. در این رابطه، برای هر خط ضریب اهمیتی که از قبل مشخص شده در مدل تعریف شده است و ضرب این ضریب در یک منهای وضعیت اختلال خط می‌شود. اگر خط سالم باشد مقدار یک منهای وضعیت اختلال برابر یک است و سهم خط به‌طور کامل لحاظ می‌شود، و اگر خط دچار اختلال باشد این سهم صفر خواهد شد. جمع این مقادیر برای تمام خطوط بیانگر سطح تاب‌آوری کلی ساختار شبکه در سناریوی انتخاب شده اختلالات خواهد بود. رابطه شماره (۵) قید توازن توان هر باس شبکه است [۲]. این رابطه تضمین می‌کند مجموع توان تولیدی باس به‌علاوه توان ورودی به باس از طریق خطوط ورودی منهای توان خروجی از باس از طریق خطوط خروجی دقیقاً برابر با تقاضای بار همان باس باشد. این قید برای تمام باس‌های شبکه باید برقرار باشد. رابطه شماره (۶) رابطه بین توان عبوری از هر خط و اختلاف زاویه ولتاژ دو سر آن خط را بیان می‌کند [۲]. در این قید مقدار توان عبوری خط تابعی از اختلاف زاویه دو باس متصل به خط است که ضریب آن وارون راکتانس خط می‌باشد. هم‌چنین در صورت بروز اختلال در خط، مقدار توان عبوری آن صفر خواهد شد زیرا ضرب در یک منهای وضعیت اختلال انجام می‌شود و مقدار توان عبوری حذف می‌شود. این قید برای همه خطوط تعریف می‌شود. رابطه شماره (۷) محدودیت ظرفیت حرارتی هر خط را مشخص می‌کند. طبق این قید، توان عبوری از هیچ خطی نمی‌تواند از حد مجاز حرارتی آن تجاوز کند [۲]. رابطه شماره (۸) محدوده مجاز توان تولیدی هر واحد تولیدی را تعریف می‌کند. هر ژنراتور تنها می‌تواند در بازه‌ای که حداقل و حداکثر تولید مجازش تعیین شده، تولید داشته باشد [۲]. رابطه شماره (۹) محدودیت تعداد خطوط دچار اختلال را مشخص می‌کند. در هر سناریوی اختلال، مجموع تعداد خطوطی که وضعیت اختلال آن‌ها برابر یک باشد نباید بیش‌تر از حداکثر تعداد مجاز اختلالات باشد [۳-۲]. رابطه شماره (۱۰) قید مرجع زاویه ولتاژ را تعیین می‌کند که طبق آن زاویه ولتاژ باس مرجع باید

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

برابر صفر باشد تا مقدار سایر زوایا نسبت به این مرجع قابل محاسبه و یکتا شود. این معادلات در کنار هم چارچوب جامع بهینه سازی پیشنهادی را تشکیل می‌دهند که هدف آن مدیریت هم‌زمان هزینه‌های اقتصادی، یکنواختی توزیع توان، تاب‌آوری ساختاری و قیود عملیاتی شبکه انتقال است [۲].

۳- روش حل پیشنهادی

برای حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه شبکه انتقال قدرت، از یک الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی ترکیبی استفاده شده است. این الگوریتم مبتنی بر NSGA-II است و از سه مولفه کلیدی تشکیل شده است: انتخاب سلسله‌مراتبی چندسطحی، جهش هدفمند مبتنی بر آنتروپی، و جهش تصادفی وضعیت اختلال خطوط. در این الگوریتم، انتخاب والدین به‌صورت سلسله‌مراتبی از گروه‌های برتر انجام می‌شود و بخش‌هایی از انتخاب‌ها از گروه‌های پایین‌تر به‌منظور حفظ تنوع جمعیت اختصاص می‌یابد. هم‌چنین، برای بهبود یکنواختی توزیع توان در شبکه، جهش هدفمند مبتنی بر آنتروپی و تغییرات تصادفی وضعیت اختلالات خطوط اعمال می‌شود. این روش به‌طور مؤثری قادر به یافتن مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه و مقاوم است که به‌طور هم‌زمان اهداف اقتصادی، تاب‌آوری ساختاری و یکنواختی توزیع توان را بهبود می‌بخشد.

الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی ترکیبی طراحی شده از سه مولفه کلیدی تشکیل شده است: انتخاب سلسله‌مراتبی چندسطحی، جهش هدفمند مبتنی بر آنتروپی و جهش تصادفی وضعیت اختلال خطوط. این الگوریتم با حفظ تنوع و همگرایی سریع، قادر به یافتن مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه و مقاوم می‌باشد. در ابتدا، جمعیتی متشکل از پاسخ‌های تصادفی تولید می شود به‌گونه‌ای که کلیه محدودیت‌های ظرفیت خطوط و تولید ژنراتورها رعایت شوند. هر پاسخ شامل مقادیر توان تولیدی هر ژنراتور، توان عبوری از خطوط، وضعیت اختلال خطوط (متغیرهای دودویی) و زاویه ولتاژ هر باس است.

برای هر پاسخ، تابع هدف ترکیبی طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. مقادیر هزینه انتقال، هزینه تولید، آنتروپی انرژی (رابطه ۲ و ۳) و شاخص تاب‌آوری (رابطه ۴) استخراج شده و مقدار کلی تابع هدف تعیین می‌گردد. هم‌چنین، صحت رعایت قیود مدل (رابطه‌های ۵ تا ۱۰) بررسی می‌شود.

پاسخ‌های جمعیت بر اساس تطابق با قیود و مقدار تابع هدف به چند گروه کیفی تقسیم می‌شوند. انتخاب والدین به‌صورت سلسله‌مراتبی از گروه‌های برتر صورت می‌گیرد اما بخشی از انتخاب به پاسخ‌های گروه‌های پایین‌تر اختصاص می‌یابد تا تنوع جمعیت حفظ شود.

برای هر پاسخ انتخاب شده جهت جهش، توان عبوری خطوط به‌صورت زیر به‌روزرسانی می‌شود: ابتدا سهم نسبی توان عبوری هر خط نسبت به کل توان شبکه محاسبه می‌شود:

$$p_l = \frac{|f_l|}{F_{tot}} \qquad (۱۱)$$

سپس با اعمال یک تغییر کوچک تصادفی Δp_l به سهم خطوط به‌گونه‌ای که به صورت (۱۲) باشد:

$$p_l' = p_l + \Delta p_l, \sum_l p_l' = ۱, p_l' \geq ۰ \qquad (۱۲)$$

این تغییر به نحوی تنظیم می‌شود که آنتروپی انرژی افزایش یابد (یعنی توزیع توان به سمت یکنواخت‌تر شدن حرکت کند). سپس توان جدید خطوط به صورت (۱۳) محاسبه شده و جایگزین مقادیر قبلی می‌شود.

$$f_l' = p_l' \times F_{tot} \times \text{sign}(f_l) \qquad (۱۳)$$

وضعیت خطوط به صورت دودویی است و برای افزایش تنوع پاسخ‌ها، در هر تکرار بخشی از متغیرهای δ_l با احتمال کم تغییر داده می شوند (۰ به ۱ یا ۱ به ۰ تغییر می‌کنند) به شرطی که محدودیت تعداد خطوط اختلال $Z_{\max}$ رعایت شود. برای تولید نسل جدید، دو والد انتخاب شده و مقادیر متغیرهای پیوسته مانند توان ژنراتورها و زوایای ولتاژ به‌صورت میانگین وزنی ترکیب می‌شوند:

$$x_{\text{فرزند}} = w \times x_{\text{والد}_۱} + (۱ - w) \times x_{\text{والد}_۲} \qquad (۱۴)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

که w عددی تصادفی در بازه [۰, ۱] است. متغیرهای دودویی وضعیت اختلال نیز با مکانیزم تقاطع تک‌نقطه‌ای یا چندنقطه‌ای ترکیب می‌شوند. جمعیت قدیمی با نسل جدید جایگزین شده و بهترین پاسخ‌های به‌دست آمده تاکنون ذخیره می‌شوند. الگوریتم تا رسیدن به معیار توقف مانند تعداد حداکثر تکرار یا عدم بهبود در بازه زمانی مشخص ادامه می‌یابد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج کاربرد الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی پیشنهادی برای حل مسئله بهینه سازی چندهدفه شبکه‌های انتقال، بر روی دو سیستم نمونه مختلف ارائه می شود. هدف از این شبیه سازی‌ها، ارزیابی عملکرد الگوریتم در شرایط گوناگون شبکه‌ای و در مواجهه با اختلالات مختلف است تا اثربخشی مدل در بهبود همزمان معیارهای اقتصادی، یکنواختی توزیع توان و تاب‌آوری ساختاری مورد بررسی قرار گیرد.

شبیه سازی‌های انجام شده در این مقاله با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB انجام شده است. در این نرم‌افزار، مدل ریاضی مسئله شامل تابع هدف ترکیبی و قیود مختلف شبکه انتقال به‌صورت کد پیاده‌سازی شده است. تمامی روابط مرتبط با هزینه‌های تولید و انتقال، آنتروپی انرژی و شاخص تاب‌آوری ساختاری در کد لحاظ گردیده‌اند.

۴-۱- سیستم‌های مورد مطالعه و پارامترهای مدل

سیستم اول، یک شبکه ساده ۶ باسه شامل ۸ خط انتقال و ۳ واحد تولیدی است که به‌منظور آزمون اولیه مدل و الگوریتم در شرایط کنترل شده طراحی شده است. داده‌های خط، شامل مقاومت خطوط، ظرفیت حرارتی مجاز، هزینه عبور توان، و وزن اهمیت خطوط در شاخص تاب‌آوری، از منابع استاندارد استخراج شده‌اند. واحدهای تولیدی با محدودیت‌های حداقل و حداکثر تولید مشخص و هزینه‌های تولید مختلف تعریف شده‌اند. بار تقاضا در باس‌ها نیز به صورت ثابت و متوازن تعیین شده است. سیستم دوم، یک شبکه ۱۴ باسه با ۲۰ خط انتقال و ۵ واحد تولیدی است که پیچیدگی بالاتر و شباهت بیش‌تری به شبکه‌های واقعی انتقال برق دارد. پارامترهای خطوط، واحدهای تولید و بار مصرف در این شبکه بر اساس داده‌های مرجع و مطالعات پیشین تنظیم شده‌اند تا شرایط عملیاتی واقعی‌تر شبیه‌سازی شود. ضرایب وزنی تابع هدف در هر دو سیستم به‌صورت α=۰,۴, β=0.3، γ=0.2 و λ=0.1 تعیین شدند تا اولویت بیش‌تری به کاهش هزینه‌ها داده شود، ولی یکنواختی توزیع توان و تاب‌آوری نیز به‌طور قابل توجهی در بهینه‌سازی دخیل باشند.

۴-۲- رویکردهای شبیه‌سازی

برای سنجش عملکرد الگوریتم در شرایط مختلف شبکه، چندین رویکردهای اختلال مختلف تعریف شد. رویکردها شامل موارد زیر است:

- رویکرد پایه: بدون اختلال در خطوط (حالت مرجع).
- رویکرد یک اختلال: یک خط از شبکه دچار قطعی یا اختلال می‌شود.
- رویکرد دو اختلال: دو خط به‌صورت همزمان دچار اختلال می‌شوند.
- رویکرد سه اختلال: حداکثر تعداد خطوط اختلالی در نظر گرفته شده برابر سه است که محدودیت $Z_{max}=3$ در مدل لحاظ شده است.

این رویکردها امکان ارزیابی رفتار شبکه و الگوریتم در شرایط مختلف از سالم بودن کامل تا فشارهای جدی شبکه را فراهم می‌کند.

۴-۳- نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶ باس

جدول (۱) نتایج کلیدی به‌دست آمده از الگوریتم پیشنهادی برای شبکه ۶ باسه را نمایش می‌دهد. ستون‌های جدول شامل مجموع هزینه‌های تولید و انتقال (بر حسب واحد پولی)، مقدار آنتروپی انرژی شبکه (معیاری از یکنواختی توزیع توان)، شاخص

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

تاب‌آوری ساختاری (مجموع وزن خطوط سالم) و زمان اجرای الگوریتم (بر حسب ثانیه) است. مشاهده می‌شود که در سناریوی بدون اختلال، هزینه کل پایین‌ترین مقدار را دارد و توزیع توان بیشترین یکنواختی را نشان می‌دهد. با اضافه شدن خطوط اختلالی، هزینه‌ها به دلیل نیاز به جبران تولید و تغییر مسیرهای توان افزایش می‌یابند. هم‌چنین، شاخص تاب‌آوری ساختاری به‌صورت طبیعی کاهش می‌یابد. اما الگوریتم موفق شده است تعادل مناسبی بین افزایش هزینه و حفظ تاب‌آوری برقرار کند، به گونه‌ای که شاخص تاب‌آوری حتی در سناریوی سه اختلال قابل قبول باقی می‌ماند. هم‌چنین زمان اجرای الگوریتم برای این شبکه کم و در حدود چند ثانیه است که نشان‌دهنده کارایی روش است.

Table (1): The 6-bus results

جدول (۱): نتایج شبکه ۶ باس

رویکرد	هزینه کل (واحد پول)	آنتروپی انرژی	شاخص تاب‌آوری	زمان اجرا (ثانیه)
بدون اختلال	۱۱۵۰۰	۱/۸۵	۷/۸	۱۲/۳
یک خط اختلال	۱۲۳۵۰	۱/۷۶	۶/۹	۱۳/۵
دو خط اختلال	۱۳۲۰۰	۱/۶۸	۶/۱	۱۴/۲
سه خط اختلال	۱۴۱۵۰	۱/۵۹	۵/۵	۱۴/۸

۴-۴- نتایج شبیه‌سازی شبکه ۱۴ باس

جدول (۲) نتایج مشابه برای شبکه بزرگ‌تر ۱۴ باسه را نشان می‌دهد. به‌دلیل پیچیدگی بیش‌تر شبکه و تعداد خطوط بالاتر، افزایش هزینه‌ها در سناریوهای اختلال محسوس‌تر است. مقدار آنتروپی انرژی نشان‌دهنده حفظ نسبتاً خوب یکنواختی توزیع توان حتی در شرایط اختلال است که از عملکرد مطلوب الگوریتم حکایت دارد. شاخص تاب‌آوری ساختاری نیز در سطح قابل قبولی حفظ شده است.

Table (2): The 14-bus results

جدول (۲): نتایج شبکه ۱۴ باس

رویکرد	هزینه کل (واحد پول)	آنتروپی انرژی	شاخص تاب‌آوری	زمان اجرا (ثانیه)
بدون اختلال	۲۵۶۰۰	۳/۲۵	۱۵/۶	۳۸/۷
یک خط اختلال	۲۷۰۵۰	۳/۱۰	۱۴/۱	۴۰/۲
دو خط اختلال	۲۸۵۰۰	۲/۹۵	۱۲/۸	۴۲/۱
سه خط اختلال	۳۰۱۰۰	۲/۸۰	۱۱/۷	۴۳/۶

۴-۵- مقایسه با روش‌های دیگر

برای ارزیابی کیفیت الگوریتم پیشنهادی، نتایج آن با یک الگوریتم فراابتکاری کلاسیک (مانند الگوریتم ژنتیک استاندارد) نیز مقایسه شده است. جدول (۳) مقایسه‌ای از معیارهای کلیدی شامل هزینه کل، آنتروپی انرژی، شاخص تاب‌آوری و زمان اجرا را برای شبکه ۱۴ باسه در سناریوی دو اختلال نشان می‌دهد.

Table (3): Comparison of Key Metrics

جدول (۳): مقایسه معیارهای کلیدی

روش	هزینه کل (واحد پول)	آنتروپی انرژی	شاخص تاب‌آوری	زمان اجرا (ثانیه)
الگوریتم پیشنهادی	۲۸۵۰۰	۲/۹۵	۱۲/۸	۴۲/۱
الگوریتم ژنتیک استاندارد	۲۹۵۵۰	۲/۷۰	۱۱/۳	۶۰/۴

مشاهده می‌شود که الگوریتم پیشنهادی ضمن کاهش قابل توجه هزینه کل، توانسته است سطح بالاتری از یکنواختی و تاب‌آوری را نیز حفظ کند و زمان اجرای آن نیز به مراتب کم‌تر بوده است. این نتایج نشان‌دهنده بهبود کیفیت و کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم‌های متداول است. با توجه به نتایج فوق، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم فراابتکاری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

سلسله‌مراتبی توسعه یافته، در مدیریت بهینه توان تولیدی و عبوری از خطوط انتقال و هم‌چنین انتخاب بهینه وضعیت اختلال‌ها، عملکرد قابل قبولی دارد. این الگوریتم ضمن کاهش هزینه‌ها، توانسته است توزیع توان را یکنواخت‌تر کرده و تاب‌آوری ساختاری شبکه را در شرایط مختلف اختلال حفظ نماید. هم‌چنین سرعت اجرای مناسب این روش آن را برای استفاده در کاربردهای عملیاتی و تصمیم‌گیری در زمان واقعی مناسب می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل نوآورانه چندهدفه برای بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال برق معرفی شد که به‌صورت هم‌زمان معیارهای اقتصادی، یکنواختی توزیع توان خطوط و تاب‌آوری ساختاری را در نظر می‌گیرد. مدل ارائه شده با استفاده از تابع هدف ترکیبی شامل هزینه‌های انتقال و تولید، شاخص آنتروپی انرژی و شاخص تاب‌آوری طراحی گردید که هر یک نقش مهمی در بهبود عملکرد و پایداری شبکه ایفا می‌کنند. به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی پیچیده ناشی از این مدل، یک الگوریتم فراابتکاری سلسله‌مراتبی ترکیبی مبتنی بر انتخاب چندسطحی، جهش هدفمند بر اساس آنتروپی و جهش تصادفی وضعیت اختلال خطوط توسعه داده شد. نتایج شبیه‌سازی بر روی دو شبکه نمونه ۶ باسه و ۱۴ باسه نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر است ضمن کاهش هزینه‌های تولید و انتقال، یکنواختی توزیع توان را بهبود بخشد و تاب‌آوری ساختاری شبکه را در مواجهه با سناریوهای مختلف اختلال حفظ نماید. هم‌چنین مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک بیانگر کارایی بهتر، کیفیت بالاتر پاسخ‌ها و زمان اجرای کوتاه‌تر روش پیشنهادی بود. این ویژگی‌ها، الگوریتم و مدل مطرح شده را به ابزاری مناسب برای مدیریت بهینه و پایدار شبکه‌های انتقال در شرایط واقعی تبدیل می‌کند. برای توسعه‌های آینده، پیشنهاد می‌شود مدل شامل سایر پارامترهای پایداری دینامیکی و اقتصادی مانند محدودیت‌های ولتاژ، پایداری گذرا و هزینه‌های نگهداری نیز گردد تا کاربردپذیری آن در محیط‌های عملیاتی بیش‌تر شود. هم‌چنین بررسی تلفیق الگوریتم پیشنهادی با روش‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی بهتر شرایط اختلال و بهبود سرعت همگرایی الگوریتم از جمله زمینه‌های تحقیقاتی جذاب محسوب می‌گردد. در نهایت، به‌کارگیری این روش در شبکه‌های بزرگ‌تر و با داده‌های واقعی، می‌تواند اثربخشی آن را در مقیاس عملیاتی به‌صورت جامع‌تر نشان دهد.

References

مراجع

[1] M. Nadaali, M. R. Hassani Ahangar, and R. Dalir, "Load management and power distribution optimization in transmission networks using machine learning methods", in Proc. Int. Conf. Electr. Eng. (ICEE), Tehran, Iran, 2025, Art. no. UTCONF09_095.

[2] H. Haghighat, H. Karimianfard and B. Zeng, "Integrating Energy Management of Autonomous Smart Grids in Electricity Market Operation", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 5, pp. 4044-4055, Sept. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2992570.

[3] A. Müller et al., "Determination of optimal transmission network constraints for novel close-to-real-time flexible energy market", Energy Rep., vol. 12, pp. 1014–1024, Jun. 2024.

[4] S. Mohammadi et al., "Optimal reconfiguration of power distribution networks for power quality improvement using multi-objective particle swarm optimization", J. Electr. Eng. Technol., vol. 18, no. 3, pp. 2145–2158, 2024.

[5] A. Arzoo Araqi et al., "Optimization of energy and ancillary service markets in transmission-distribution networks via a bilevel framework", J. Power Syst. Res., vol. 2, no. 4, pp. 38–64, 2023.

[6] C. Li et al., "Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 2, no. 2, pp. 173-180, June 2014.

[7] H. Karimianfard, "A robust optimization framework for smart home energy management: Integrating photovoltaic storage, electric vehicle charging, and demand response", Journal of Energy Storage, Volume 110, 115259, 2025.

[8] M. Khani et al., "Impact of energy storage systems on flexibility of transmission and distribution networks", IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 15, no. 1, pp. 512–525, Jan. 2024.

[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[9] A. Hermann et al., "A complementarity model for electric power transmission-distribution coordination under uncertainty", Eur. J. Oper. Res., vol. 299, no. 1, pp. 313–329, 2022.
[10] J. Liu et al., "Distributed adaptive expansion for transmission-distribution networks incorporating source-contingency-load uncertainties", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 136, Art. no. 107711, Jul. 2022.
[11] S. I. Vagropoulos et al., "Market-based TSO-DSO coordination for enhanced flexibility services provision", Electr. Power Syst. Res., vol. 208, Art. no. 107883, May 2022.
[12] M. A. El-Meligy et al., "Coordinated transmission-distribution expansion planning: A tri-level approach", Electr. Power Syst. Res., vol. 196, Art. no. 107274, Jul. 2021.
[13] M. Baran and F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989.
[14] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of distribution networks for resistive line losses reduction", IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1492–1498, Apr. 1989.
[15] T. Jiang et al., "Flexibility clearing in joint energy and flexibility markets considering TSO-DSO coordination", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 14, no. 2, pp. 1376–1387, Mar. 2023.
[16] M. Rossi et al., "TSO-DSO coordination to acquire services from distribution grids: Regulatory conclusions from SmartNet project", Electr. Power Syst. Res., vol. 189, Art. no. 106700, Dec. 2020.
[17] A. Papalexopoulos et al., "Organized nodal local energy markets and TSO-DSO coordination framework", Electr. Power Syst. Res., vol. 189, Art. no. 106810, Dec. 2020.
[18] A. Abdolahi et al., "Chance-constrained CAES scheduling to maximize wind power harvesting in congested systems", Sustain. Cities Soc., vol. 51, Art. no. 101792, Oct. 2019.
[19] E. Dehnavi et al., "Congestion management via distributed generations and energy storage", Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 30, no. 9, Art. no. e12485, Sep. 2020.
[20] S. A. Mansouri and M. S. Javadi, "Robust optimization framework for composite generation-transmission expansion planning", J. Exp. Theor. Artif. Intell., vol. 29, no. 4, pp. 717–730, 2017.
[21] M. Habibi et al., "Privacy-preserving day-ahead TSO-DSO coordinated stochastic scheduling", IET Gener. Transm. Distrib., vol. 16, no. 1, pp. 163–180, Jan. 2022.
[22] M. Khani et al., "Energy storage in transmission-distribution networks: Flexibility enhancement analysis", J. Renew. Sustain. Energy, vol. 15, no. 2, Art. no. 024302, Mar. 2023.
[23] M. R. Kelly-Gorham, P. D. H. Hines and I. Dobson, "Ranking the Impact of Interdependencies on Power System Resilience Using Stratified Sampling of Utility Data", in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 39, no. 1, pp. 1251-1262, Jan. 2024.
[24] Y. Yuan, H. Zhang, H. Cheng and Z. Wang, "Resilience-oriented Transmission Expansion Planning with Optimal Transmission Switching Under Typhoon Weather", in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 10, no. 1, pp. 129-138, January 2024.
[25] Z. Yuan et al., "Resilience Enhancement of Coordinated Transmission and Distribution System via Risk-Based Decentralized Planning Against Typhoons", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 61, no. 4, pp. 5780-5796, July-Aug. 2025.
[26] S. Wang, X. Yang, X. Huang, J. Zhang and S. Luan, "Q-Learning-Based Resilience Assessment of Weakly Coupled Cyber-Physical Power Systems", in IEEE Transactions on Reliability, vol. 74, no. 2, pp. 2968-2982, June 2025.
[27] C. Zhang, Y. Xu, Y. Wang, J. Kan and Y. Chen, "Generator Start-Up Strategy for Power System Restoration Considering Interdependency With Natural Gas Transmission Network", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 15, no. 4, pp. 3499-3513, July 2024.
[28] Y. Zhu, Y. Zhou, Y. Sun and W. Li, "Fast Resilience Assessment for Power Systems Under Typhoons Based on Spatial Temporal Graphs", in IEEE Systems Journal, vol. 19, no. 1, pp. 8-19, March 2025.
[29] Z. Hu et al., "Meteorological-Electrical Integrated Real-Time Resilience Assessment for Power Systems Based on Deep Learning Methods", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 16, no. 5, pp. 3700-3713, Sept. 2025.
[30] H. Faraji, A. Khorsandi and S. Hossein Hosseinian, "Multi-Level Frequency Control, Resilience Enhancement and Cyber-Attack Identification in Multi-Area LCC-HVDC Interconnected Networks", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 16, no. 2, pp. 1719-1731, March 2025.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

زیرنویس‌ها:

[1] Energy Entropy
[2] Transmission Network Optimization
[3] Energy Losses
[4] Hierarchical Metaheuristic Algorithm

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.1.538]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025