Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 46-55

Vol. 12/ No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Reactive power pricing to improve technical performance and operation of distribution networks

Mahdi Bagheri[1], Master's Student, Reza Eslami[2], Associate Professor

Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
eslami@ut.ac.ir

Abstract:

Reactive power has countless benefits for power systems, called reactive power sub-services. One of these services is voltage control. The main goals of this research are finding a suitable price for reactive power and setting the voltage of the buses in the allowed range while considering the suitable amount of reactive power in the generation buses as a reserve for technical and voltage support in the power system. The gray wolf optimization algorithm is used and a 33-bus radial distribution system is considered to optimize the objectives functions. It is assumed that the load of the power system changes during 24 hours and that the generators are placed in some buses in this distribution network. The simulation results show that in addition to minimizing the cost of reactive power, a suitable amount of reactive power is also stored in the generation buses, and the voltage deviations of the buses are minimized.

Keywords: Reactive power market, reserve reactive power, optimization, voltage regulation, gray wolf optimization algorithm

Date of sending the article:
Acceptance date of the article:

Corresponding Author: Reza Eslami
Corresponding Author's Address: Electrical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
eslami@sut.ac.ir

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۵۵-۴۶

Vol. 12 / No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

قیمت‌گذاری توان راکتیو به جهت بهبود عملکرد فنی و بهره‌برداری از شبکه توزیع

نوع مطالعه: پژوهشی

مهدی باقری[۱]، رضا اسلامی*[۲]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز- تبریز- ایران
m-bagheri99@sut.ac.ir
۲- دانشیار دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز- تبریز- ایران
eslami@sut.ac.ir

چکیده: توان راکتیو مزایای بی‌شماری برای سیستم‌های قدرت دارد که به این مزایا، سرویس‌های فرعی توان راکتیو گفته می‌شود. یکی از این سرویس‌ها کنترل ولتاژ شینه‌ها می‌باشد. هدف اصلی این مقاله یافتن قیمت مناسب برای توان راکتیو و قراردادن ولتاژ شینه‌ها در محدوده موردنظر و درنظرگرفتن مقدار مناسبی از توان راکتیو در شینه‌های تولید به‌عنوان رزرو برای پشتیبانی‌های فنی و ولتاژی در سیستم قدرت، به صورت هم‌زمان می‌باشد تا عملکرد سیستم قدرت در زمان های حساس و ضروری مثل ورود و خروج بار ها و در زمان های کارکرد عادی سیستم، همواره ایمن بماند. بهینه سازی مد نظر بر روی یک سیستم توزیع شعاعی ۳۳ شینه پیاده‌سازی شده و جهت انجام بهینه‌سازی توابع هدف، از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری استفاده شده است. همچنین فرض شده است که میزان بارگذاری سیستم قدرت در طول ۲۴ ساعت تغییر می‌کند و در برخی از شینه های این شبکه توزیع ژنراتور قرار داده شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این هست که با اعمال روش پیشنهادی و انجام بهینه سازی مد نظر، نه تنها هزینه توان راکتیو کمینه می‌گردد، بلکه مقدار مناسبی از توان راکتیو نیز در شینه‌های تولید ذخیره می‌شود و انحرافات ولتاژ شینه‌ها نیز کمینه می‌گردد و کارکرد سیستم قدرت مورد نظر در شرایط مختلف ایمن خواهد ماند.

واژه‌های کلیدی: بازار توان راکتیو، توان راکتیو رزرو، بهینه‌سازی، تنظیم ولتاژ، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول : رضا اسلامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند تبریز- تبریز- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

شبکه‌های الکتریکی روزبه‌روزهوشمند تر می‌شوند و در همین راستا، باتوجه‌به رقابتی که بین شرکت‌های تولیدکننده برق وجود دارد، خرده‌فروشان و مشترکینی که توانایی تنظیم میزان مصرف خود باتوجه‌به قیمت‌های لحظه‌ای برق را دارند، نقش مهمی را در جهت بهبود عملکرد روزانه سیستم قدرت ایفا می‌کنند و همچنین عملکرد روزانه سیستم قدرت به‌وسیله بهره‌بردارهای مستقل سیستم (ISO) نظارت می‌گردد. قیمت‌گذاری لحظه‌ای توان اکتیو و راکتیو، چه در سطح خرده‌فروشی‌ها و چه در سطح عمده‌فروشی‌ها می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر در پخش بهینه توان در جهت عملکرد ایمن سیستم قدرت در نظر گرفته شود. زمانی که سرویس‌های فرعی توان راکتیو توسط بازار برق قیمت‌گذاری می‌گردد، شرکت‌های خصوصی تولید برق، نقش اصلی را در قراردادن قیود سیستم در محدوده موردنظر ایفا می‌کنند. شکل گیری بازار لحظه‌ای سرویس‌های فرعی مربوط به توان راکتیو، میزان تغییرات ولتاژ باس‌ها و همچنین میزان توان راکتیو ذخیره شده در سیستم قدرت را تغییر می‌دهد. ازاین‌رو بازار سرویس‌های فرعی توان راکتیو، نقش حیاتی را در جهت عملکرد امن و مطمئن سیستم قدرت ایفا می‌کند. امروزه بحث مهم دیگری که مطرح هست، بهبود پروفیل ولتاژ سیستم در شبکه‌های توزیع هست. زیرا عدم‌قطعیت‌های بار و به طبع آن انحرافات ولتاژ سیستم قدرت به مسئله‌ای چالش‌برانگیز تبدیل شده است. یکی از مزایای اصلی سرویس‌های فرعی توان راکتیو، پشتیبانی از ولتاژ شینه های سیستم قدرت هست که این امر با پخش بهینه توان راکتیو و تأمین توان راکتیو رزرو کافی در سیستم قدرت قابل حصول هست. هدف از انجام پژوهش حال حاضر ایجاد هماهنگی بین قیمت توان راکتیو و میزان توان راکتیو رزرو و مقداری از توان راکتیو برای حمایت‌های ولتاژی شینه های سیستم قدرت و توان راکتیو خروجی ژنراتورهای اینورتر دار، هست و در واقع‌بین متغیرهای مذکور نوعی هماهنگی برقرار هست تا انحرافات ولتاژ شینه‌ها مینیمم گردد و از محدوده مجاز خارج نشود و درعین‌حال قیمت توان راکتیو در کمترین حالت خود قرار گیرد و میزان مناسبی از توان راکتیو نیز برای کنترل ولتاژ شینه‌ها و برای استفاده در مواقع اضطراری، ذخیره گردد. تحولات بازارهای برق به سمت تأمین با کیفیت تر سرویس‌های فرعی توان راکتیو و بهینه‌سازی پخش توان راکتیو موردنیاز سیستم قدرت پیش می‌رود موضوع مهم، تنظیم و کنترل قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو هست. (Zhongming et al., 2020) ابتدا در ۳ مرحله قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو را در نظر گرفته‌اند و سپس قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو در حالت بهره‌برداری پس فاز و پیش فاز را انجام داده‌اند و در نهایت مدل بهینه‌سازی قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو در بازار برق را پیاده‌سازی کرده‌اند. به کارگیری منابع تولیدات پراکنده به شبکه‌های توزیع روزبه‌روز در حال گسترش هست این منابع دارای پتانسیل بالایی برای تولید انرژی در شبکه‌های توزیع هستند و علاوه‌برآن برای مباحث اقتصادی و امنیت سیستم قدرت نیز مفید هستند. (Stekli et al., 2021) یک مدل جدید برای قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو و قیمت‌گذاری توان راکتیو در شبکه‌های توزیع و بر اساس قیمت حاشیه‌ای محلی در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته‌اند. ابتدا مدلی از بازار که پخش توان اکتیو و راکتیو از منابع تولیدات پراکنده را بهینه می‌کند، در نظر گرفته می‌شود سپس مدل قیمت‌گذاری با درنظرگرفتن سرویس‌ها فرعی توان راکتیو و توان راکتیو پیاده‌سازی می‌شود و مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. جهت یافتن مکان مناسب تجهیزات تولید انرژی برق و ماکزیمم‌سازی منافع مالی و اجتماعی و همچنین توسعه صنایع الکتریکی، اصلاحات بازارهای برق اجتناب‌ناپذیر هست. (Yang et al., 2022) به بهینه‌سازی شبکه توزیع با درنظرگرفتن تغییرات بازار برق پرداخته‌اند. در این مرجع پخش بهینه توان در شبکه توزیع با بررسی بازار برق در ۳ حوزه انجام می‌پذیرد: سهام‌داران بازار برق، قیمت سرویس‌های فرعی توان راکتیو و بررسی تغییرات در بازار برق در حالت پخش بهینه توان در حالت سنتی و قدیمی. سپس با درنظرگرفتن سرویس‌های فرعی توان راکتیو یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی برای شبکه‌های توزیع در نظر گرفته می‌شود. سطح اول این مدل برای بهینه‌سازی توان اکتیو و سطح دوم این مدل برای بهینه‌سازی توان راکتیو در نظر گرفته شده است. این مدل در یک شبکه توزیع ۳۳ شینه اصلاح شده پیاده‌سازی شده است. (Edmonds et al., 2020) به بررسی نحوه قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توان راکتیو در شبکه‌های توزیع سه‌فاز پرداخته‌اند. یک شبکه توزیع نامتعادل ۶۹ شینه در نظر گرفته شده است و قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توان اکتیو و راکتیو بر روی این شبکه پیاده‌سازی شده است .سیستم‌های قدرت روزبه‌روز در حال تغییرات اساسی هستند و همچنین به کارگیری منابع تولیدات پراکنده به سیستم قدرت همچنان در حال افزایش هست. وجود بازار سرویس‌های فرعی توان راکتیو نشانگر اهمیت تشویق تولیدکنندگان خصوصی انرژی برق مانند نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های تولید برق با استفاده از انرژی تجدیدپذیر برای تأمین امنیت ولتاژی سیستم هست. به علت این که نیاز به توان راکتیو وابسته به میزان بارگذاری سیستم قدرت در مناطق مختلف هست، یک موضوع مهم و شناخته شده این هست که ممکن هست شرکت‌کنندگان انحصاری در بازار برق اعمال‌نفوذ گسترده‌ای در بازار برق داشته باشند و بنابراین قیمت سرویس‌های فرعی توان راکتیو در مناطق مختلف را تحت‌تأثیر قرار دهند. جهت دستیابی به بهره‌وری اقتصادی، (Jiang et al., 2021) یک مدل قیمت‌گذاری روزانه سرویس‌های فرعی توان راکتیو را در نظر گرفته‌اند، در این مدل قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو، قیمت‌های به‌دست‌آمده مختص نیروگاه‌های حرارتی و منابع انرژی تجدیدپذی هست؛ بنابراین تولیدکنندگان انرژی برق مجبور هستند که قیمت درستشان را اعلام

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

کنند و تعهداتشان را نیز به عهده بگیرند و همچنین یک معیار به نام قیمت کمیاب در نظر گرفته شده است و مختص تولیدکنندگان توان راکتیو در حالت‌های اضطراری هست. (Wang et al., 2022) باتوجه‌به درنظرگرفتن قیمت‌های تشویقی، مدل روزانه بازار برق برای شبکه‌های توزیع با درنظرگیری دو نوع بازار برای ساختمان‌های تجاری و نیروگاه‌های خصوصی را در نظر گرفته‌اند و تأثیر مقدار خالص توان‌های اکتیو و راکتیو بار بر روی بهره‌برداری از سیستم قدرت در نظر گرفته شده است و قیمت‌های حاشیه‌ای محلی برق در شبکه‌های توزیع به ۵ نوع تقسیم شده است: قیمت توان اکتیو، قیمت توان راکتیو، قیمت توان راکتیو موردنیاز برای رفع تراکم بار از خطوط برق، قیمت توان راکتیو موردنیاز برای پشتیبانی‌های ولتاژی، قیمت توان راکتیو موردنیاز برای کاهش تلفات خطوط. هر دو نوع بازار برق تشویق شده‌اند تا حالت بهره‌برداری از سیستم خود را بر اساس بهبود عملکرد کلی سیستم قدرت به‌وسیله ارسال سیگنال‌های قیمت مناسب برای بهره‌بردار مستقل سیستم، انجام دهند. در سیستم‌های مقررات‌زدایی شده، بازار سرویس‌های فرعی توان راکتیو به مکان نیروگاه‌های خصوصی که در قراردادن ولتاژ شینه‌ها در محدوده موردنظر شرکت می‌کنند، بستگی دارد. (Jay et al., 2020) بازار سرویس‌های فرعی توان راکتیو را بر اساس مدل استکلبرگ را در نظر گرفته‌اند. در این مدل بهره‌بردارهای مستقل سیستم به‌عنوان راهبر در نظر گرفته می‌شوند و تولیدکنندگان برق به‌عنوان پیرو بهره‌برداران مستقل سیستم در نظر گرفته می‌شود و هدف اصلی ایجاد حمایت‌های ولتاژی مطلوب در سیستم قدرت است و به‌وسیله این مدل، قیمت‌گذاری سرویس‌های فرعی توان راکتیو انجام می‌پذیرد. قیمت‌های حاشیه‌ای محلی توان در شبکه‌های توزیع نمایانگر میزان بهره‌وری شبکه‌های توزیع هست. هدف کم‌کردن ریسک‌پذیری منابع انرژی تجدیدپذیر و محدودکردن تلرانس این ریسک است و این هدف با درنظرگرفتن موضوع دوگانگی مخروطی (conic duality) در پخش بار امکان‌پذیر هست. (Mieth et al., 2019) نشان‌داده‌اند که قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توان موجب کم‌شدن تلفات سیستم قدرت و بهبود ولتاژ شینه‌های سیستم قدرت شده است. افزایش استفاده از DG ها در شبکه توزیع با چالش‌های ولتاژی زیادی مواجه هست افزایش تولید برق توسط DG ها می‌تواند منجر به افزایش ولتاژشینه‌ها و برعکس شدن جهت عبور توان در خطوط شبکه توزیع شود جهت حل این مشکل، مناسب‌ترین راه استفاده از DG های اینورتر دار هست تا بتوان مشکلات مربوط به DG هارا حل کرد و علت این موضوع به دلیل نزدیک بودن DG به مشترکین نیست؛ بلکه علت این موضوع پاسخ سریع اینورتر در مقایسه با تجهیزات کنترل ولتاژ مکانیکی هست امروزه صاحبان DG فقط از طریق تولید توان اکتیو کسب درآمد می‌کنند؛ زیرا هیچ تشویق برای تزریق یا جذب توان راکتیو وجود ندارد و این موضوع نشان‌دهنده اهمیت به‌روزرسانی ساختار بازار برق با به کار گیری DG های اینورتر دار جهت کنترل بهتر ولتاژ در شبکه توزیع هست. (Afandi et al., 2020) یک تشویق مالی جهت استفاده از تمام ظرفیت پانل‌های خورشیدی به همراه اینورتر در شبکه توزیع در نظر گرفته‌اند و بر اساس اصلاحات بازار برق این پانل‌های خورشیدی اینورتر دار نباید در ضریب توان یک کار کنند تا کنترل ولتاژ شبکه توزیع بهبود یابد. اهمیت قیمت‌گذاری توان راکتیو در سیستم قدرت بیش‌ازپیش مهم است؛ زیرا در بحث ادغام منابع انرژی تجدید با شبکه‌های توزیع و کنترل ولتاژ شینه‌ها و تأمین توان راکتیو موردنیاز بارگذاری در سیستم قدرت، مباحث چالش برانگیزی وجود دارد. (Yu et al., 2019) یک مدل پیشنهادی برای قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو با در نظر گفتن تلفات خطوط در نظر گرفته‌اند. ابتدا پخش بار در سیستم قدرت با درنظرگرفتن حضور منابع تولید برق شیفت فاز دهنده، انجام می‌گیرد و سپس با بهینه‌سازی مدل مذکور قیمت‌های حاشیه‌ای محلی توان اکتیو و راکتیو به دست می‌آید. به‌طورکلی، رویکردهای بهینه‌سازی مبتنی مشتقات هستند. ولی بسیاری از روش‌های مدرن بهینه‌سازی، ترفندهای بدون درنظرگرفتن مشتقات هستند که از بین آنها روش‌های مبتنی بر جمعیت محبوبیت زیادی دارند. این روش‌ها شامل الگوریتم شناخته شده ژنتیک هستند که از فرایند تکامل در طبیعت (Holland et al., 1992)، تکامل دیفرانسیل (Storn et al., 1997) تشکیل شده است، یکی از مهمترین نوع از سرویس های فرعی توان راکتیو، VCAS هست که مینیمم سازی هزینه مربوط به این سرویس در مرجع توضیح ۱۳ داده شده است و همچنین نحوه تقویت توان راکتیو و با استفاده از DSTATCOM جهت مینیمم سازی هزینه سویس های فرعی توان راکتیو در این مرجع توضیح داده شده است (Saxena et al., 2022). (Phisuthsaingam et al., 2022) ثابت کرده‌اند که DG های مبتنی بر اینورتر پتانسیل خوبی برای تامین توان راکتیو دارند و همچنین هزینه سرویس های فرعی توان راکتیو را نسبت به DG های مرسوم بسیار کاهش می دهند و نشان داده شده است که توان راکتیو خروجی DG ها به وسیله تنظیم میزان ضریب توان DG های مبتنی بر اینورتر قابل تغییر است. روش‌های جمعیت عموماً بردارهای کاندید راه‌حل اولیه را تولید کرده و با استفاده از عملگرهایی مانند تقاطع، جهش، بردارهای کاندید راه‌حل بهتر و جدیدتر را شکل می‌دهند. (Mirjalili et al., 2014) از رویکرد اخیراً توسعه داده شده از فرایند شکار گرگ‌های خاکستری الهام گرفته‌اند. در این رویکرد، نتایج عددی چندین تابع شاخص بهینه‌سازی که در واقع ترکیبی از توابع تک حالته، چندحالته، چندحالته با بعد ثابت، و توابع مرکب هستند، مقایسه شده‌اند و همچنین مسائل بهینه‌سازی مهندسی کلاسیک مانند طراحی فنر، بررسی تنش/فشردگی، طراحی مخزن تحت‌فشار، طراحی پرتو جوش، با سایر روش‌های اکتشافی مقایسه گشته‌اند. بر اساس نتایج عددی، این رویکرد اخیر بهتر از سایر روش‌های اکتشافی مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، تکامل دیفرانسیل و الگوریتم ژنتیک در بسیاری از روش‌های کلاسیک عمل می‌کند و با همه آنها رقابت دارد. این روش مقادیر تابع هدف بهتری برای همه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک دارد و مسئله در دنیای واقعی نیز کاربرد دارد. (Emary et al., 2016) نسخه باینری الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) برای مسائل جستجو باهدف انتخاب مطلوب را پیشنهاد داده‌اند. بررسی دقیق روش‌های بهینه‌سازی بدون درنظرگرفتن اعمال ریاضی دیفرانسیلی را در کار (Rios et al., 2013) می‌توان یافت. مرجع ۱۸ به مدل بهینه سازی توان راکتیو متغیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و بهینه سازی زمان، پرداخته است و در نهایت نشان داده شده است که میزان تلفات توان در خطوط نیز کاهش می یابد (Zhang et al., 2023). به‌طورکلی رویکردهای بهینه سازی یا مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی هستند یا از ضرایب حساسیت سیستم استفاده نموده و مسئله بهینه‌سازی را حل می‌کنند. به‌طورکلی، کاربرد روش‌های مبتنی بر جمعیت برای سیستم‌های توزیع بسیار زیاد است. روش GWO که به طور موفقیت‌آمیز برای ردیابی نقطه بیشینه توان در سیستم‌های PV مورداستفاده قرار می‌گیرد، در کار (Mohanty et al., 2015) تشریح شده است. (Sharma et al., 2016) اندازه بهینه تجهیزات ذخیره‌سازی در شبکه باهدف به حداقل رسانی هزینه‌های عملیاتی را تشریح کرده‌اند. به طور کلی در باب نوآوری های این مقاله می توان گفت که این پژوهش به دنبال یافتن مقدار مناسبی از توان راکتیو ذخیره شده در شینه های سیستم قدرت و کمینه سازی قیمت توان راکتیو و قرار دادن ولتاژ شینه های سیستم قدرت در محدوده موردنظر با در نظر گرفتن عدم قطعیت های بار و تغییرات قیمت های ارسالی از نیروگاه های تولید برق به بهره بردار مستقل سیستم می باشد. این پژوهش به بخش‌های زیر تقسیم شده است در قسمت ۳، فرمول‌بندی تابع قیمت‌گذاری توان راکتیو و طراحی بازار توان راکتیو شرح داده شده است و در قسمت ۴ نیز نتایج شبیه‌سازی معرفی می‌گردد و در قسمت ۵ نیز به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی تابع هدف مقالهسیستم قدرت زمانی قابلیت اطمینان دارد که توان راکتیو کافی رزرو شده و تولید شده جهت کنترل ولتاژ را داشته باشد. مدیریت بهینه میزان توان راکتیو، فقط زمانی که بارها تأمین می‌شوند ایجاد نمی‌شود؛ بلکه باید مقداری ذخیره کافی از توان راکتیو هم در سیستم قدرت وجود داشته باشد، بنابراین مقداری توان راکتیو جهت ایجاد پایداری ولتاژ باید ذخیره گردد. به جهت ذخیره‌سازی و درنظرگرفتن این میزان از توان راکتیو، باید ارزش توان راکتیو در ناحیه کاری سیستم قدرت، تخمین زده شود. مقدار توان راکتیو در ناحیه A شامل دو قسمت توان راکتیو ذخیره شده و توان راکتیو تولید شده است (Bhattacharya et al., 2001):

$$Q^A = Q_g^A + Q_{rees}^A \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، Q^A مقدار توان راکتیو ذخیره شده در ناحیه A است . توان راکتیو در ناحیه‌ها برای تأمین بارها نیاز هست اما زمانی که مقدار بار صفر هست ژنراتورها باید میزانی توان راکتیو را به جهت ماهیت اندوکتانسی خطوط جذب کنند تا ولتاژ شین‌ها در مقدار مطلوب باقی بماند ازآنجایی‌که فرض شد توان راکتیو تولید شده توسط jامین genco مطابق رابطه (۲) شامل دو قسمت هست:

$$Q_{gi} = Q_{li} + Q_{mwi} \qquad (۲)$$

توان راکتیو رزرو شده برابر با:

$$Q_{res}(i) = Q_{gi}^{\max} - Q_{gi} \qquad (۳)$$

رابطه (۳)، مقدار توان راکتیو ذخیره شده را در باسi ام را نشان می‌دهد $Q_{gi}^{\max}$ ماکزیمم توان راکتیو دریافتی از شبکه بالادست در شینه i ام هست و Q_{gi} توان راکتیو دریافتی از شبکه بالادست در شینه i ام هست، به جهت کاهش هزینه پرداختی مشترکین و مدیریت بهینه توان راکتیو، هزینه تولید توان راکتیو باید کمینه شود ازاین‌رو جهت تشویق genco ها جهت حفظ پایداری ولتاژ سیستم قدرت، باید هزینه تولید توان رزرو بیشینه گردد. شرکت‌های تولید برق جهت شرکت در بازار برق باید مقدار ۱- هزینه تولید ۲- هزینه فرصت ازدست‌رفته، را برای بهره‌بردارهای مستقل سیستم ارسال کنند. در حال حاضر مشترکین سیستم قدرت فقط هزینه مربوط به میزان بارگذاری خود را پرداخت می‌کنند اما هزینه فرصت ازدست‌رفته مربوط به تولید مقدار اضافی از توان راکتیو جهت قراردادن ولتاژ باس‌ها در مقدار مطلوب هست. باتوجه‌به اینکه مطابق تابع پرداخت برای نیروگاه‌ها هزینه‌ای جهت مسائل پایداری ولتاژ در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین تابع پرداخت به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$cQ_i = m_{1i}(Q_{gi} - Q_{mwi}) \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، m_{1i} هزینه بهره برداری ارسالی از سوی i امین نیروگاه هست و Q_{mwi} میزان توان راکتیو مورد نیاز برای پایدار ماندن ولتاژ شینه ها هست که باید در خطوط جاری گردد. اگرچه مطابق تابع پرداخت بالا نیروگاه‌ها تمایل دارند تا تولید توان راکتیوشان را افزایش دهند بنابراین برای افزایش توجه نیروگاه‌های به ذخیره‌سازی توان راکتیو، تابع پرداخت با اعمال هزینه فرصت ازدست‌رفته مطابق زیر اصلاح می‌گردد:

$$cQ_{li} = m_{1i}(Q_{gi} - Q_{mwi}) + m_{2i}(Q_{gi}^2) \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، m_{2i} هزینه فرصت از دست رفته ارسالی از سمت نیروگاه ها می باشد. بنابراین بیشترین پرداخت مشترکین سیستم قدرت در رابطه با تأمین بار و حفظ پایداری ولتاژ مطابق رابطه (۶) هست:

$$CQ_l^A = \sum_{i \in A} cQ_{li} \qquad (۶)$$

که C_{Ql}^A برابر بیشینه هزینه تولید توان راکتیو در ناحیه A هست. نیروگاه‌های خصوصی نیز در بازارهای حقیقی شرکت می‌کنند و ضروری هست که توان راکتیو نیز توسط نیروگاه‌های خصوصی ذخیره گردد که در این صورت این‌ها متحمل هزینه‌ای معادل هزینه فرصت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

ازدست‌رفته نیز می‌شوند، هزینه‌ای که با نگهداری تـوان راکتیـو رزرو و مرتبط با هزینه فرصت از دست رفته هسـت مطـابق رابطـه (۷) برابـر است با:

$$cQ_{resi} = m_{2i}(Q_{res}(i)^2) \quad (۷)$$

بنابراین، هزینه بیشینه مربوط به نگهداری توان راکتیـو رزرو در ناحیـه A برابر است با:

$$C^A_{Qres} = \sum_{i\in A} CQ_{resi} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، C^A_{Qres} مربوط به هزینه ذخیره توان راکتیو در ناحیـه A است با درنظرگرفتن عوامل مذکور، تابع قیمت‌گـذاری تـوان راکتیـو در ناحیه A، مطابق رابطه (۹) برابر است با:

$$V_Q = C^A_{Ql} - C^A_{Qres} \quad (۹)$$

۱-۲- فرمول‌بندی ریاضی بازار توان راکتیو

درنظرگرفتن ناحیه کنترل ولتاژ A در سیستم منجر به ایجاد بازار توان راکتیو محلی شده می‌گردد. تعداد باس‌ها در ناحیه A برابـر a هسـت. (Bhattacharya et al., 2001) تابع قیمت‌گـذاری تـوان راکتیـو کـه اولین تابع هدف هست مطابق رابطه (۱۰) تعریف کرده‌اند:

$$v_Q = C^A_{Ql} - C^A_{Qres} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، v_Q هزینه ای هست که مشترکین از بابت توان راکتیـو مصرفی شان باید بپردازند.

۱-۱-۲- محدودیت‌های فنی سیستم قدرت:

$$\begin{aligned} P_{gi} - P_{di} &= \sum_{j=1}^{n} V_i V_j X_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \\ Q_{gi} - Q_{di} &= \sum_{j=1}^{n} V_i V_j X_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \end{aligned} \quad (۱۱)$$

$$Q_{res}(i) = Q^{\max}_{gi} - Q_{gi} \quad (۱۲)$$

$$\frac{|V_i - V_{ref}|}{V_{ref}} \le 0.04 \quad (۱۳)$$

$$Q_{\min}(i) = \sum_{j\in N} \frac{X_{ij}(P_{ij})^2}{V_j^2} \quad (۱۴)$$

$$Q_{\min}(i) \le Q_{mwi} \le [V^2_{ref} - V_i^2 + 1] \sum_{j\in N} \frac{1}{X_{ij}} \quad (۱۵)$$

$$P^{\min}_{gi} \le P_{gi} \le P^{\max}_{gi} \quad (۱۶)$$

$$Q^{\min}_{gi} \le Q_{gi} \le Q^{\max}_{gi} \quad (۱۷)$$

$$C^A_{Ql} = \sum_{i\in A} m_{1i}(Q_{gi} - Q_{mwi}) + m_{2i}(Q^2_{gi}) \forall i \in A \quad (۱۸)$$

$$C^A_{Qres} = \sum_{i\in A} m_{2i}(Q^2_{res}(i)) \forall i \in A \quad (۱۹)$$

در رابطه (۱۱)، P_{gi} میزان توان اکتیو دریافتی از شبکه بالادست در شینه iام و P_{di} میزان بارگذاری سیستم قدرت در شینه i ام هست و Q_{gi} میزان توان راکتیو دریافتی از شبکه بالادست در شینه i ام و Q_{di} میزان بارگذاری سیستم قدرت در شینه i ام هست و δ_i زاویه ولتاژ در شینه i ام و δ_j زاویه ولتاژ در شینه j ام هست و θ_{ij} زاویه امپدانس خط مابین شینه i ام و شینه j ام هست. و در رابطه (۱۲)، $Q_{res}(i)$ میزان توان راکتیو رزرو مورد نیاز در شینه i ام هست و در رابطه (۱۳)، V_i مقدار ولتاژ شینه i ام هست و V_{ref} میزان ولتاژ مرجع و معیاری برای جلوگیری از انحرافات ولتاژ شینه ها است و در رابطه (۱۴)، $Q_{\min}(i)$ میزان توان راکتیو مورد نیاز برای جاری شدن توان اکتیو در خطوط هست و P_{ij} میزان توان اکتیو عبوری از شینه i ام به سمت شینه j ام هست و X_{ij} راکتانس خط مابین شینه i ام و شینه j ام هست و در رابطه (۱۵)، Q_{mwi} میزان توان راکتیو مورد نیاز برای پایدار ماندن ولتاژ شینه ها هست که باید در خطوط جاری گردد و در رابطه (۱۶)، P_{gi} مربوط به میزان توان اکتیو دریافتی از شبکه بالادست توسط شینه i ام هست و در رابطه (۱۷) Q_{gi} میزان توان راکتیو دریافتی از شبکه بالادست توسط شینه i ام هست و در رابطه (۱۸)، C^A_{Ql} میزان هزینه مربوط به تامین توان راکتیو بارگذاری سیستم قدرت در ناحیه A هست و در رابطه (۱۹)، C^A_{Qres} میزان هزینه مربوط به تامین توان راکتیو رزرو در شینه های تولید هست که مشترکین باید بپردازند.

تابع هدف دوم نیز مطابق روابط (۲۰ و ۲۱) تعریف می‌گردد:

$$\min \sum_{i=0}^{n} |v_i - 1| \quad (۲۰)$$

$$subject 0.95 \le v_i \le 1.05 \quad (۲۱)$$

در روابط ۲۰ و ۲۱، v_i ولتاژ شـینه i ام هسـت و در واقـع هـدف ایـن هست که انحرافات ولتاژ باس‌ها از محدوده موردنظر خارج گردد.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

GWO از رفتار گرگ‌های خاکستری تقلید می‌کنـد. ایـن الگـوریتم بـر فراینـد شـکار و سلسـله‌مراتب اجتمـاعی آنهـا متکـی اسـت. از لحـاظ اجتماعی، گرگ‌های خاکستری به شکل گروهی و با اعضای ۱۲-۵ نفـر زندگی می‌کنند. آنها سلسله‌مراتب اجتمـاعی بـین هـم داشـته و رتبـه بالاترین اعضای این اجتماع آلفا (α) است که در مـورد شـکار، مکـان خواب و غیره تصمیم‌گیری می‌کند. در سلسله‌مراتب، رتبـه بتاهـا (β) در سطح دوم است. بتاها کاندیدای تبدیل‌شدن به آلفا هنگام مرگ آنها یا پیر شدنشان هستند. بتاها به آلفاها در تصمیم‌گیری کمـک نمـوده و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

به گرگ‌های سطح پایین‌تر یعنی دلتاها(δ) دستور می‌دهند. دلتاها، نگهبانان، ریش‌سفیدان و سرپرستان هستند. پایین‌ترین سطح سلسله‌مراتب اجتماعی گرگ‌ها امگاها (ω) هستند. این الگوریتم بهترین راه‌حل‌ها را پیدا کرده و آنها را با ω و α و β در هر تکرار برچسب‌گذاری می‌کنند؛ بنابراین فرایند جستجوی راه‌حل متشکل از محاصره، شکار، حمله و جستجو است. اولین مرحله، محاصره طعمه است که در روابط (۲۲ و ۲۳) از کار (Mirjalili et al., 2014) نشان‌داده‌شده است:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (۲۲)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A}\vec{D} \quad (۲۳)$$

که در آن t نمایانگر تکرار فعلی، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردار های ضرایب، $\vec{X}_P$ و $\vec{X}$ نشان دهنده بردارهای موقعیت طعمه و گرگ خاکستری هستند. بردارهای ضرایب $\vec{A}$ و $\vec{C}$ مطابق روابط (۲۴ و ۲۵) محاسبه می‌گردند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (۲۴)$$

$$\vec{c} = 2\vec{r}_2 \quad (۲۵)$$

که در آن $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ بردارهای تصادفی هستند که مقادیر بین ۰ و ۱ را می گیرند و مقادیر عددی $\vec{a}$ به شکل خطی از ۲ به ۰ در طول تکرارها کاهش می یابد.

گام دوم شکار است که در هر تکرار، موقعیت طعمه با استفاده از اطلاعات فاصله α، β و δ با طعمه پیش‌بینی می‌شود. سپس موقعیت سایر عناصر بر اساس سه موقعیت بهتر به‌روز می‌شوند. این مرحله به صورت روابط (۲۶-۳۲) نشان داده می‌شود.

$$\vec{D}_a = \left| \vec{C}_1 \vec{X}_a - \vec{X} \right| \quad (۲۶)$$

$$\vec{D}_b = \left| \vec{C}_2 \vec{X}_b - \vec{X} \right| \quad (۲۷)$$

$$\vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X} \right| \quad (۲۸)$$

$$X_1 = X_a - A_1 D_a \quad (۲۹)$$

$$X_2 = X_b - A_1 D_b \quad (۳۰)$$

$$X_3 = X_\delta - A_1 D_\delta \quad (۳۱)$$

$$X_{t+1} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (۳۲)$$

مرحله بعد، حمله به طعمه است که در آن $\vec{a}$ کاهش می یابد؛ بنابراین، محدوده $\vec{A}$ نیز کاهش می یابد. زمانی که محدوده $\vec{A}$ بین ۱- و ۱ باشد، گرگ ها حمله می کنند. موقعیت بعدی عامل جستجو بین موقعیت فعلی و موقعیت طعمه است. محدوده $\vec{A}$ برای اهداف جستجوی سراسری با مقادیر تصادفی بزرگتر از ۱ و کمتر از ۱- بکار می روند.

۳-۲- مقداردهی اولیه

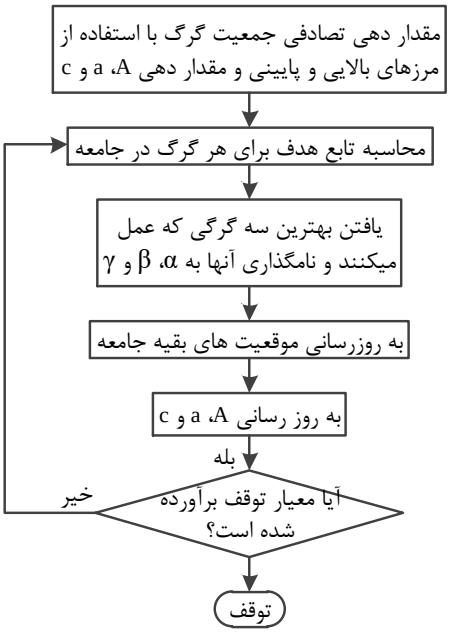
در این مرحله اندازه جمعیت، بیشینه تعداد تکرارها، مقادیر اولیه عامل‌های A، a و c با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) تنظیم می‌شوند و عناصر جمعیت گرگ برای توان اکتیو خروجی ژنراتورها و توان راکتیو خروجی ژنراتورها و توان رزرو باس‌های تولید و توان موردنیاز برای پایدار ماندن ولتاژ سیستم قدرت، مقداردهی اولیه می‌شوند. بعد از مقداردهی، نمونه منحصربه‌فرد به‌صورت رابطه (۳۳) است.

$$\begin{aligned} individual_i = [&Q_{gn1}.....Q_{gn16} \\ &,P_{gn1}.....P_{gn16} \\ &,Q_{reserve1}.....Q_{reserv16} \\ &,Q_{mw1}.....Q_{w16}] \end{aligned} \quad (۳۳)$$

۳- نتایج شبیه سازی

به جهت بررسی کارایی مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی، سیستم ۳۳ باسه IEEE به‌کاررفته است. اطلاعات مربوط به پیشنهاد قیمت ارسالی از نیروگاه‌ها نیز در جدول (۱) آورده شده است. تابع قیمت‌گذاری توان راکتیو و قراردادن ولتاژ شین‌ها در محدوده مجاز به شکل هم‌زمان توسط الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، کمینه شده است.

شکل (۱) فلوچارت کلی الگوریتم گرگ خاکستری را نشان می‌دهد.

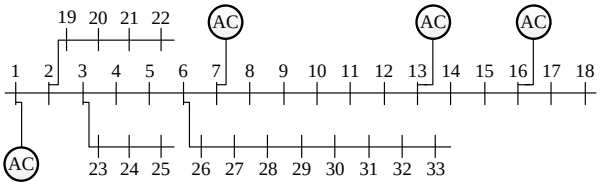


شکل (۱): فلوچارت الگوریتم GWO

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

برای به‌کارگیری الگوریتم گرگ خاکستری و انجام بهینه‌سازی تابع هدف ابتدا باید تعداد گرگ‌ها و تعداد تکرارها مشخص گردد و سپس باید محدوده تغییرات مجاز متغیرها برای الگوریتم تعریف گردد بعد از انجام فرایند مذکور بر اساس تعداد تکرارهای تعریف شده برای الگوریتم و باتوجه‌به محدوده تغییرات تعریف شده برای متغیرها، الگوریتم گرگ خاکستری باتوجه‌به منطقی که دارد مقداری از متغیرها را که در محدوده مجاز قرار دارد انتخاب می‌کند و سپس تابع هدف محاسبه می‌گردد، این عملیات بر اساس تعداد تکرارهای تعریف شده برای الگوریتم بهینه‌سازی پیاده‌سازی می‌شود و در نهایت مناسب‌ترین مقدار برای تابع هدف که عموماً کمترین مقدار می‌باشد به دست می‌آید و در نهایت آن مقادیری از متغیرها که به‌ازای آن مقادیر تابع هدف بهینه شده است انتخاب می‌گردد.

شکل (۲) سیستم ۳۳ شینه موردمطالعه را نشان می‌دهد همان گونه که از شکل (۲) مشخص هست شینه‌های ۱ و ۷ و ۱۳ و ۱۶ شینه‌های تولید هستند.



شکل (۲): سیستم ۳۳ باسه IEEE

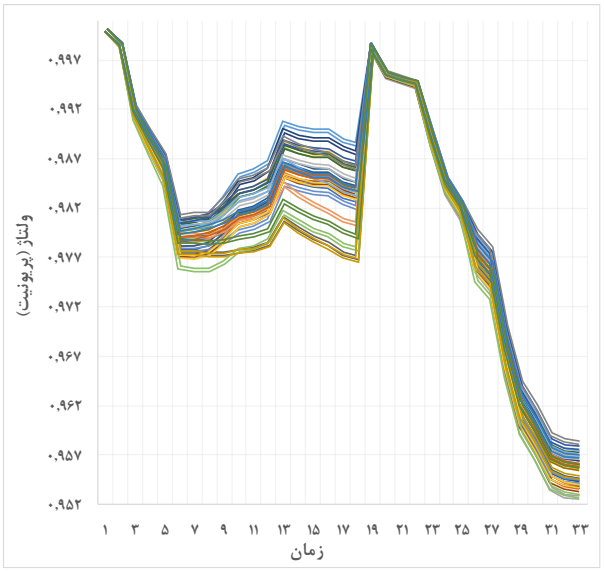
جدول (۱) نشان‌دهنده قیمت‌های پیشنهادی ارسال شده از سمت تولیدکنندگان برق می‌باشد که این هزینه شامل دو هزینه با اسامی هزینه بهره‌برداری و هزینه فرصت ازدست‌رفته هست منظور از هزینه بهره‌برداری همان هزینه‌ای است که برای تولید انرژی برق بکار گرفته می‌شود و منظور از هزینه فرصت ازدست‌رفته هزینه‌ای است که برای تولید توان راکتیو به جهت کنترل ولتاژ شینه‌ها در نظر گرفته می‌شود و علت نام‌گذاری این نوع هزینه این هست که توانی که بیشترین اهمیت برای تولید را دارد توان اکتیو هست و زمانی برای تولید توان راکتیو انرژی مصرف می‌شود در واقع همین انرژی می‌توانست برای تولید توان اکتیو بکار گرفته شود؛ اما این انرژی صرف تولید توان راکتیو شده است، بنابراین به‌نوعی فرصتی که برای تولید توان اکتیو بود، ازدست‌رفته است.

جدول (۱): قیمت‌های پیشنهادی ارسالی نیروگاه‌ها برای هزینه فرصت ازدست‌رفته و هزینه تولید فروش توان

شماره باس ژنراتور	هزینه بهره‌برداری m_{1i}	هزینه فرصت ازدست‌رفته m_{2i}
۱	۰/۸۶	۰//۴۶
۷	۰/۷۵	۰/۴۳
۱۳	۰/۶۰	۰/۵۰
۱۶	۰/۵۰	۰/۳۰

داده‌های مربوط به بارگذاری سیستم از کتاب (National Grid Load Profiles et al., 2016) استخراج شده است. در شکل (۳) انحرافات ولتاژ باس‌های سیستم رسم شده است.

همان گونه که از شکل (۳) مشاهده می‌گردد، انحرافات ولتاژ باس‌ها کمینه گردیده و علاوه‌برآن در محدوده مجاز (۹۵. تا ۱،۰۵ پریونیت) قرار گرفته‌اند. مشاهده می‌گردد که ولتاژ شینه‌ها از شینه ۱ تا ۷ تغییرات چندانی نسبت به یکدیگر ندارند و علت این موضوع این هست که شبکه توزیع مورد بررسی از طریق شینه ۷ به شبکه بالادست متصل شده است و همین موضوع راجع به شینه‌های ۱۳ تا ۱۶ نیز صادق هست؛ زیرا شبکه ما از طریق شینه‌های ۱۳ و ۱۶ نیز به شبکه بالادست متصل هست و این موضوع به‌نوعی تضمین‌کننده پایداری ولتاژ در این شینه‌ها است. سیستم قدرت مورد نظر طی ۲۴ ساعت مورد بررسی قرار گرفته است و در هر ساعت از این ۲۴ ساعت بارگذاری سیستم قدرت تغییر می کند بنابراین در شکل ۳، ۲۴ خط رنگی وجود دارد که هر کدام از این خطوط مربوط به یک ساعت از روز هست و بنابراین ولتاژ شینه ها در هرکدام از این خطوط به دلیل تغییر بارگذاری سیستم قدرت در هرساعت ، نسبت به خطوط دیگر متفاوت هست.

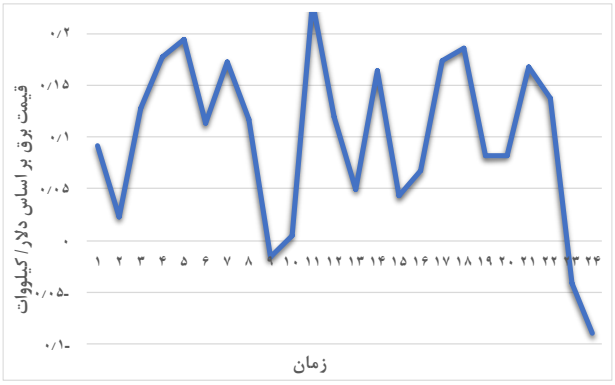


شکل (۳): انحرافات ولتاژ باس‌ها در سیستم ۳۳ باسه IEEE

با توجه به شکل (۴) که تغییرات قیمت توان راکتیو سیستم را در طی ۲۴ ساعت نشان می‌دهد، مشخص می‌گردد که در بعضی از ساعات روز قیمت توان منفی می‌گردد و این به این معنی خواهد بود که برای پایدار ماندن ولتاژ باس‌های سیستم و عملکرد مطمئن آن لازم هست تا برنامه‌های مختلف پاسخ‌گویی بار صورت پذیرد تا مشترکین مورد تشویق مالی از سمت شبکه قرار گیرند و مشترکین توان مورد تقاضایشان را بیشتر در محدوده زمان‌هایی مثل ساعت ۱۷ تا ۲۴ قرار دهند تا پایداری ولتاژ شینه‌های سیستم قدرت حفظ گردد و از طرفی مشترکین باید در ساعاتی مثل ساعت‌های بین ۱۰ تا ۱۵ که تولید برق

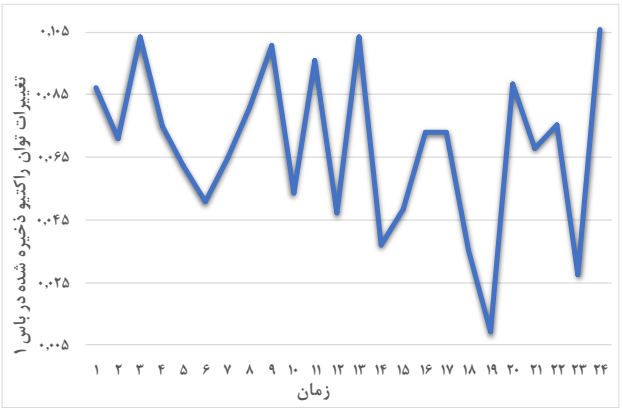
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

باتوجه‌به شرایط جوی و تلفات خطوط، سخت هست مصرف برقشان را پایین آورند.

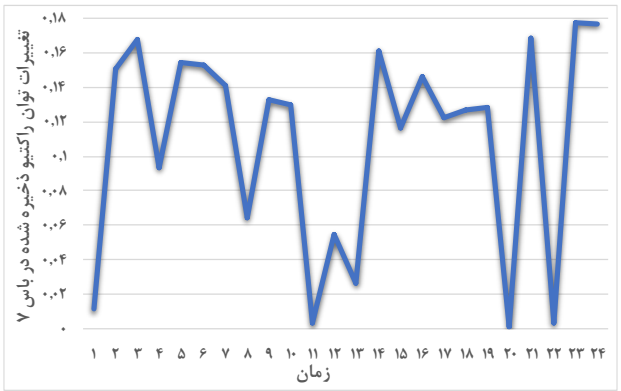


شکل (۴): تغییرات قیمت توان راکتیو در طی ۲۴ ساعت

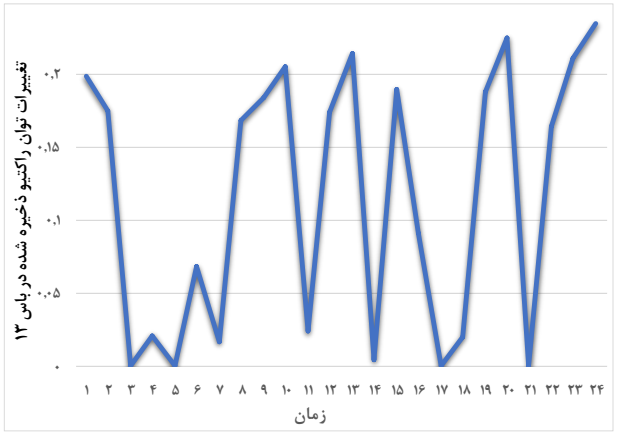
شکل‌های (۵) الی (۸)، میزان تغییرات توان راکتیو ذخیره شده در شینه‌های تولید و شکل (۹)، توان راکتیو خروجی شینه‌های تولید (شینه ۷ به نمایندگی از همه شینه‌های تولید) را طی ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. همان گونه که از شکل (۴) مشخص هست، با توجه به عدم‌قطعیت‌های بار و به طبع آن تغییر میزان بارگذاری سیستم طی ۲۴ ساعت، میزان توان راکتیو ذخیره شده موردنیاز در شینه‌ها و توان راکتیو خروجی ژنراتورها مدام در حال تغییر هست.



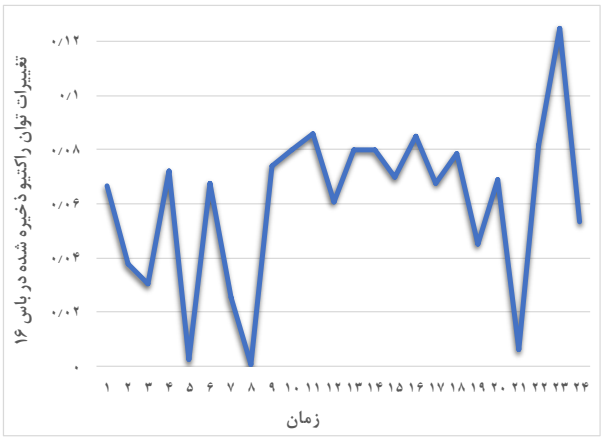
شکل (۵): تغییرات توان راکتیو ذخیره شده در باس ۱



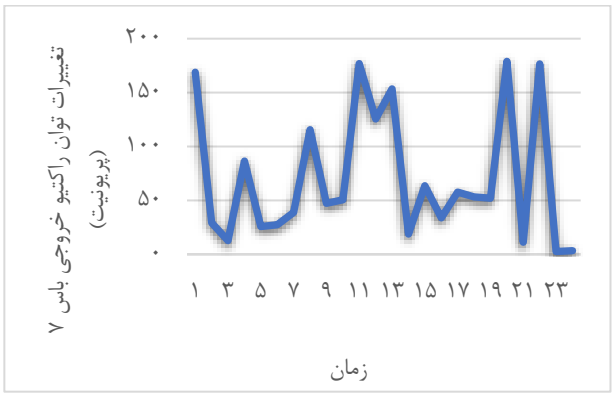
شکل (۶): تغییرات توان راکتیو ذخیره شده در باس ۷



شکل (۷): تغییرات توان راکتیو ذخیره شده در باس ۱۳



شکل (۸): تغییرات توان راکتیو ذخیره شده در باس ۱۶

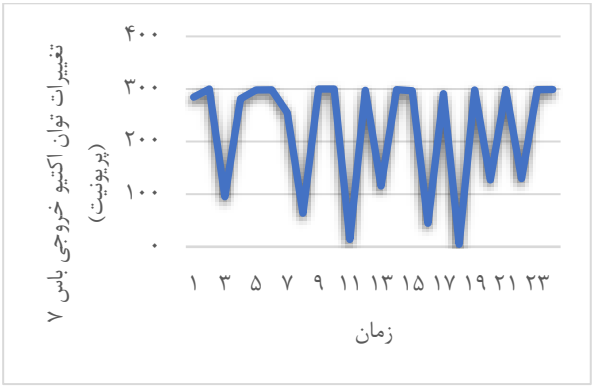


شکل (۹): تغییرات توان راکتیو خروجی شینه ۷

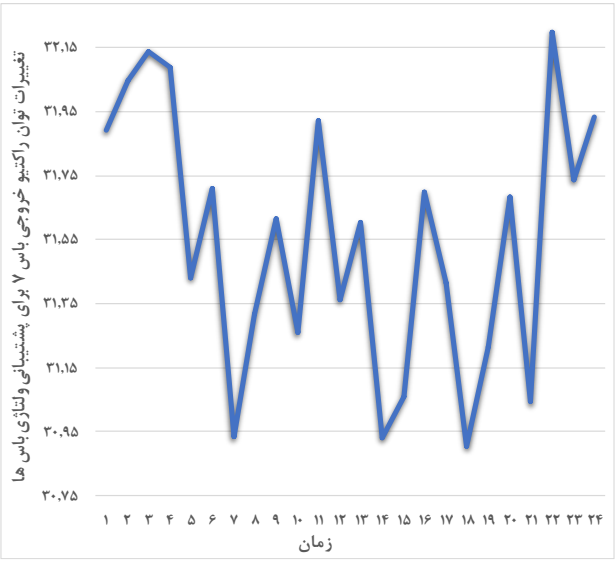
شکل (۱۰) الف، تغییرات توان اکتیو خروجی شینه های تولید و شکل (۱۰) ب، تغییرات توان راکتیو شینه های تولید، موردنیاز برای قراردادن ولتاژ شینه ها در محدوده موردنظر، برای شینه‌های تولید را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه عدم قطعیت بارگذاری در سیستم در نظر گرفته شده است؛ بنابراین توان راکتیو خروجی شینه‌های تولید دائماً در حال تغییر هست و باتوجه‌به بارگذاری خاصی که در سیستم وجود دارد باید میزانی از توان راکتیو جهت حفظ پایداری ولتاژ شینه‌ها توسط شینه‌های متصل به شبکه بالادست به شبکه تزریق گردد که

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

تغییرات این بخش از توان راکتیو نیز در شکل (۱۰) نشان‌داده‌شده است.



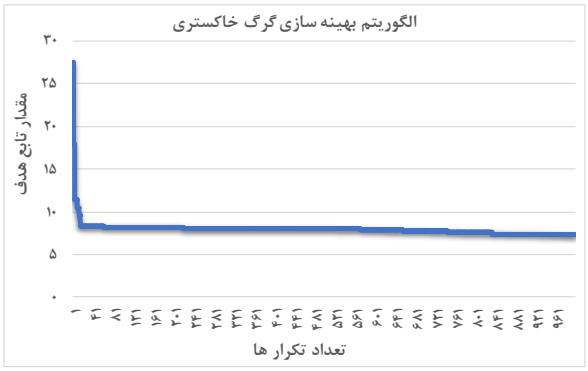
الف



ب

شکل (۱۰): الف) توان اکتیو خروجی شینه ۷. ب) تغییرات توان راکتیو خروجی شینه ۷ برای حمایت های ولتاژی شینه ها

شکل (۱۱) نیز نحوه همگرا شدن تابع هدف را نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که تابع هدف بعد از ۱۰۰۰ تکرار همگرا شده است و مقداری که برای تابع هدف بعد از همگرا شدن توسط الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به دست می‌آید حدود ۷.۵ هست.



شکل (۱۱): همگرا شدن تعداد تکرارهای الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری

۴- نتیجه‌گیری

قیمت‌گذاری لحظه‌ای توان راکتیو و ایجاد بازار لحظه‌ای توان راکتیو باتوجه‌به ماهیت محلی شده توان راکتیو و کاربرد مستقیم آن در کنترل ولتاژ سیستم، تبدیل به مسئله مهمی شده است. همچنین تغییرات قیمت توان راکتیو و پراکندگی قیمت‌های پیشنهادی نیروگاه‌ها حائز اهمیت هست. قیمت توان راکتیو وابسته به شرایط عملکردی سیستم از قبیل میزان احتیاج به توان راکتیو ذخیره شده و انحرافات ولتاژ باس‌های سیستم قدرت، هست که این عوامل در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند و میزان توان راکتیو موردنیاز در سیستم فرمول‌بندی شده است. ۴ شین تولید برای تولید و ذخیره توان در نظر گرفته شده است. قیمت توان راکتیو موردنیاز برای سیستم که شامل ۳ قیمت: توان راکتیو موردنیاز بار و توان راکتیو موردنیاز برای حفظ ولتاژ در مقدار مطلوب و توان راکتیو رزرو در باس‌های تولید می‌شود، فرمول‌بندی شده است. با به‌کارگیری مدل قیمت‌گذاری پیشنهادی، هزینه تولید توان کمینه شده است و همچنین مدیریت بهینه توان راکتیو با درنظرگرفتن توان راکتیو رزرو در شین‌ها و قراردادن ولتاژ شین‌ها در محدوده موردنظر با درنظرگیری عدم‌قطعیت‌های بار در نظر گرفته شده است. مسئله بهینه‌سازی نیز به‌وسیله الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، باتوجه‌به محدودیت‌های سیستم، کمینه شده است. مکانیزم بازار توان پیشنهادی بر روی سیستم شعاعی ۳۳ باسه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشانگر این هست که الگوریتم قیمت‌گذاری بکار گرفته شده به شکل مؤثری هزینه تولید توان راکتیو را برای بارها با درنظرگرفتن مقدار کافی از ذخیره توان راکتیو و قراردادن ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز، کمینه می‌کند.

مراجع

Zhongming, X.; Bolong, S.; Chang, W.; Yongsheng, X.; Zhen, L.; Suirong, L, (2020). Multi-objective reactive power optimization model based on ancillary services pricing,

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

Mirjalili, S.; Mirjalili, SM.; Lewis, A, (2014). Grey Wolf Optimizer, Adv. Eng. Softw, 69, 46–61.

Emary, E.; Zawbaa, HM.; Hassanien, AE, (2016). Binary grey wolf optimization approaches for feature selection, Neurocomputing, 2016, 172, 371-381.

Rios, LM.; Sahinidis, NV, (2013). Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations, J Glob Optim, 56, 1247-1293.

Zhang, R.; Xiao, S.; Rao, Y.; Tao, P.; Guo, W, (2023). Dynamic reactive power optimization considering load uncertainty and period optimization, IEEE 6th Information Technology,Networking,Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chongqing, China, 1710-1714.

Mohanty, S.; Subudhi B.; Ray PK, (2015). A new MPPT design using grey wolf optimization technique for photovoltaic system under partial shading conditions, IEEE Trans Sustain Energy, 7, 181-188.

Sharma, S.; Bhattacharjee, S.; Bhattacharya A, (2016). Grey wolf optimisation for optimal sizing of battery energy storage device to minimise operation cost of microgrid, IET Gener. Transm. Distrib, 10, 625-637.

Bhattacharya, K.; Zhong J, (2001). Reactive power as an ancillary service, IEEE Trans. Power. Syst, 16, 294-300.

Jay, D.; Swarup, KS, (2019). Value-Based Real Time Reactive Power Pricing Model Considering Voltage Security and Reserve Requirement, Modern Electric Power Systems (MEPS), 1-6.

National Grid Load Profiles, (2016). Available at: https://www9.nationalgridus.com/niagaramohawk/business/rates/5_load_profile.asp.

International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), 1-5.

Stekli, J.; Bai, L.; Cali, U, (2021). Pricing for reactive power and ancillary services in distribution electricity markets, IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 1-5.

Yang, Q.; Junqiang, W.; Leiyang, S, (2022). Optimal scheduling of distribution network considering reactive power auxiliary service in market environment, 18th International Conference on AC and DC Power Transmission, 1381-1387.

Edmonds, L.; Faqiry, MN.; Wu, H.; Palani, A, (2020). Three-phase distribution locational marginal pricing to manage unbalanced variable renewable energy, IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5.

Jiang, M.; Guo, Q.; Sun, H.; Ge, H, (2021). Leverage reactive power ancillary service under high penetration of renewable energies: An incentive-compatible obligation-based market mechanism, IEEE Trans. Power. Syst, 37, 2919-2933.

Wang, J.; Xu, J.; Ke, D.; Wang, J.; Liu, D.; Liu, N, (2022). Market Control Based for Congestion Management and Voltage Support in Distribution Network, 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), 563-568.

Jay, D.; Swarup, KS, (2020). Game theoretical approach to novel reactive power ancillary service market mechanism, IEEE Trans. Power. Syst, 36, 1298-1308.

Mieth, R.; Dvorkin, Y, (2019). Distribution electricity pricing under uncertainty, IEEE Trans. Power. Syst, 35, 2325-2338.

Afandi I.; Agalgaonkar, A.; Perera, S. "Market Structure for enabling volt/var control in australian distribution networks: A practical perspective"; 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2020, 1-6.

Yu, Y.; Hou, Q.; Ge, Y.; Liu, G.; Zhang, N, (2019). A linear LMP model for active and reactive power with power loss, IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 1699-1704.

Holland, H, (1992). Genetic algorithms, Sci. Am, 267, 66–72.

Storn, R.; Price K, (1997). Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, J. Glob. Optim, 11, 341-359.

Saxena, N. K.; Mekhilef, S.; Kumar, A.; Gao, D, (2022). Marginal Cost-Based Reactive Power Reinforcement Using Dynamic and Static Compensators, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10, 4001-4013.

Phisuthsaingam.; Larbwisuthisaroj, P. S.; Chaitusaney, S, (2022). An Analysis of Potentials and Economic Benefits of Distributed Generations as Reactive Power Providers in Thailand, *19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 1-4.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]