توزیع بهینه توان راکتیو با استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری در حضور عدم قطعیت ناشی از توربین‌های بادی

ارسلان نجفی[1]، استادیار، حمید فلقی[2]، دانشیار
۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد سپیدان، دانشگاه آزاد اسلامی، سپیدان، ایران
arsalan.najafi@iausepidan.ac.ir.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند – ایران
falaghi@birjand.ac.ir

چکیده: **توزیع بهینه توان راکتیو با کاهش تلفات در شبکه نقشی اساسی را در بهره‌برداری اقتصادی از شبکه بر عهده دارد. در این مقاله الگوریتم آموزش و یادگیری برای توزیع بهینه توان راکتیو و کنترل ولتاژ در حضور توربین‌های بادی ارائه می‌شود. این الگوریتم از انواع الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر جمعیت بوده که توانایی بالایی در حل مسائل غیرخطی دارد. این مسأله در قالب یک مسأله غیرخطی عدد صحیح آمیخته مدل‌سازی می‌شود و در آن هم متغیرهای پیوسته و هم متغیرهای گسسته مدل می‌شوند. جواب بهینه مسأله شامل مجموعه ولتاژ ژنراتورها، گام تپ چنجرترانسفورماتورها و وضعیت جبران‌سازهای راکتیو جهت کمینه‌سازی میزان تلفات در شبکه است. در روش پیشنهادی، با حضور عدم قطعیت سرعت باد، با بهره‌گیری از اطلاعات واقعی سرعت باد، از پخش بار به روش تخمین دو نقطه‌ای جهت مدل‌سازی عدم قطعیت استفاده می‌شود. روش پیشنهادی در سیستم استاندارد ۵۷ باس IEEE پیاده‌سازی شده است. جهت اثبات کارایی الگوریتم آموزش و یادگیری نیز این الگوریتم با دو الگوریتم تجمع ذرات و تکامل تفاضلی مقایسه شده است. نتایج نشان از کارایی روش پیشنهادی در کاهش تلفات و همچنین ارضای قیود مسأله است.**

واژه‌های کلیدی: الگوریتم آموزش و یادگیری، پخش بار احتمالی تخمین دو نقطه‌ای، توربین‌های بادی.

تاریخ ارسال مقاله:۱۳۹۶/۱۱/۴

تاریخ پذیرش مقاله:۱۳۹۷/۴/۱۳

نام نویسنده مسئول: ارسلان نجفی

نشانی نویسنده مسئول: ایران -فارس – سپیدان، جاده کمربندی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]

۱- مقدمه

توزیع بهینه توان راکتیو[1] (ORPD) و کنترل ولتاژ یکی از مهم‌ترین مسائل در سیستم قدرت است که نقشی اساسی در بهره‌برداری اقتصادی از شبکه دارد. این مسأله بیان کننده مجموعه بهینه ولتاژ ژنراتورها، موقعیت تپ چنجرها و همچنین میزان بهینه جبران‌سازی‌های راکتیو شبکه است به گونه‌ای که میزان تلفات در شبکه به کمترین حد خود برسد [۱]. در حالت عادی و قطعی شبکه، تعیین وضعیت بهینه این المان‌ها برای داشتن جواب بهینه کافی است. اما هنگامی که عدم قطعیت‌ها[2] وارد شبکه می‌شوند، وضعیت عدم قطعیت در جواب نهایی و موقعیت المان‌های شبکه تاثیرگذار هستند تا جایی که این مسأله باید مجدداً و با در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت حل شود. این مسأله دارای ماهیتی غیرخطی و غیرمحدب است. از اینرو روش‌های کلاسیک فراوانی نظیر روش گرادیان [] استفاده شده‌اند. در این مرجع توان اکتیو و راکتیو تفکیک شده و سپس مسأله بهینه‌سازی حل شده است. هم‌چنین برنامه‌ریزی پویا [۳]، تابع لاگرانژ و شرایط کوهن-تاکر [] و برنامه‌ریزی خطی [۵] برای مسأله ORPD ارائه شده است. در [۶] مسأله در قالب یک برنامه‌ریزی آمیخته با عدد صحیح و با استفاده از نرم‌افزار GAMS انجام شده است. همچنین با استفاده از نرم‌افزار فوق مرجع [۷] و [۸] مسأله دو هدفه برنامه‌ریزی توان راکتیو را به هدف افزایش پایداری ولتاژ و کاهش تلفات شبکه و همچنین کاهش تلفات و انحراف ولتاژ انجام داده است. ضمن اینکه عدم قطعیت‌های ناشی از باد و بار نیز در آن در نظر گرفته شده است.

در سال‌های اخیر نیز مقالات زیادی بر پایه الگوریتم‌های تکاملی ارائه شده‌اند. توانایی الگوریتم‌های تکاملی در حل مسائل غیرخطی دلیل اصلی تمایل پژوهشگران به حل مسأله مذکور با این الگوریتم‌ها بوده است. در [۹] از یک الگوریتم تکامل تفاضلی بهبود یافته استفاده شده و در آن متغیرهای گسسته و پیوسته با هدف کاهش تلفات در نظر گرفته شده‌اند. [۱۰] برنامه‌ریزی کنترل توان راکتیو را در شبکه‌های توزیع انجام داده و در آن عدم قطعیت‌های تولید بادی در نظر گرفته شده است. مراجع دیگری نیز از قبیل الگوریتم ژنتیک [۱۱]، الگوریتم تجمع ذرات [۱۳،۱۲] برنامه‌ریزی تکاملی [۱۴]، تکامل تفاضلی [۱۵-۱۷]، بازپخت فلزات [۱۸]، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوگر [۱۹]، الگوریتم پروانه [۲۰]، الگوریتم گرگ خاکستری [۲۱] و الگوریتم آموزش و یادگیری [۲۲] و الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات و امپریالیستی [۲۳] به حل این مسأله پرداخته‌اند که در هیچ یک از مقالات ذکر شده تاثیر عدم قطعیت‌ها بررسی نشده است.

در این مقاله مسأله توزیع بهینه توان راکتیو و کنترل ولتاژ با استفاده از الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO)[3] در شرایطی انجام می‌شود که در آن تاثیر عدم قطعیت ناشی از توربین‌های بادی در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است هنگامی که عدم قطعیت وارد مسأله می‌شود دیگر نمی‌توان از روش‌های پخش بار معمولی استفاده نمود. لذا از برای حل این مسأله از روش پخش بار احتمالی تخمین دو نقطه‌ای[4] استفاده می‌شود. نوآوری این مقاله را می‌توان ورود عدم قطعیت ناشی از توربین‌های بادی به مسأله ORPD با استفاده از الگوریتم TLBO و استفاده از پخش بار احتمالی تخمین دو نقطه‌ای دانست. قابل ذکر است در مراجع [۶]، [۷] و [۸] اثر عدم قطعیت دیده شده است ولی در مراجع ذکر شده از روش‌های ریاضی برای حل مسأله استفاده شده و از الگوریتم‌های تکاملی استفاده نشده است. جهت نمایش کارایی الگوریتم پیشنهادی مقایسه‌ای بین این الگوریتم و الگوریتم‌های تجمع ذرات (PSO) و تکامل تفاضلی (DE) انجام شده است.

در ادامه ابتدا فرمول‌بندی مسأله ORPD، سپس الگوریتم‌بهینه‌سازی آموزش و یادگیری ارائه خواهند شد. پس از آن روش پخش بار احتمالی تخمین دو نقطه‌ای و بعد از آن نتایج و در انتها نتیجه‌گیری آمده است.

۲- فرمول‌بندی مسأله

تابع هدف مسأله ORPD کمینه کردن میزان تلفات شبکه است. مسأله نیز به صورت یک مسأله بهینه‌سازی فرمول بندی می‌شود و در آن تابع هدف به صورت زیر بیان می‌شود [۲۴]:

$$\min P_L = \sum_{l=1}^{nl} P_{Loss,l} \qquad (۱)$$

در این رابطه P_L میزان تلفات کل شبکه، $P_{Loss,l}$ میزان تلفات شاخه lام و nl میزان کل تعداد شاخه‌های شبکه است. کمینه‌سازی این تابع هدف به محدودیت‌های متنوعی مقید شده است. قیود زیر روابط معادلات محدودیت‌های مساوی را در شبکه نشان می‌دهند:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]

$$PG_i - PD_i = V_i \sum_{j=1}^{nb} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \quad (۲)$$

$$\text{for } i \in nb-1$$

$$QG_i - QD_i = -V_i \sum_{j=1}^{nb} V_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij} \quad (۳)$$

$$\text{for } i \in npq$$

در این رابطه، PG_i و QG_i به ترتیب میزان توان اکتیو و راکتیو تولید در باس i هستند. همچنین PD_i و QD_i نیز بارهای اکتیو و وراکتیو باس‌ها هستند. V_i بیان کننده میزان ولتاژ باس i و θ_{ij} نیز میزان اختلاف زاویه بین باس i و j ام نشان می‌دهد. $nb-1$ نشان از تمامی‌باس‌ها به غیر از باس اسلک است. G_{ij} و B_{ij} نیز کنداکتانس و سوسپتانس متقابل بین باس i و j هستند.

قیود نامساوی شامل قیود ولتاژ ژنراتورها، تپ ترانسفورماتورها و میزان توان راکتیو تجهیزات جبران‌ساز وار است. این محدودیت‌ها به صورت زیر هستند:

$$QG_i^{\min} \le QG_i \le QG_i^{\max} \quad \text{for } i = 1,2,\ldots,ng \quad (۴)$$

$$VG_i^{\min} \le VG_i \le VG_i^{\max} \quad \text{for } i = 1,2,\ldots,ng \quad (۵)$$

در این رابطه ng نشان دهنده تعداد ژنراتورها، $QG_i^{\min}$ و $QG_i^{\max}$ حداقل و حداکثر خروجی راکتیو باس i، VG_i دامنه ولتاژ باس i، $VG_i^{\min}$ و حداقل و $VG_i^{\max}$ حداکثردامنه ولتاژ مجاز هستند.

تپ ترانسفورماتورها نیز در محدوده حداقل و حداکثر خود به صورت زیر محدود می‌شوند:

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max} \quad \text{for } i = 1,2,\ldots,nt \quad (۶)$$

در این رابطه nt تعداد ترانسفورماتورها، $T_i^{\min}$ و $T_i^{\max}$ نیزحداقل و حداکثر تپ ترانسفورماتورها است.

جبران‌سازهای وار موازی نیز دارای محدودیت‌های زیر هستند:

$$QC_i^{\min} \le QC_i \le QC_i^{\max} \quad \text{for } i = 1,2,\ldots,nc \quad (۷)$$

در این رابطه، nc تعداد جبران‌سازها، QC_i توان راکتیو تولید شده، $QC_i^{\min}$ و $QC_i^{\max}$ نیز حداقل و حداکثر مجاز تولید راکتیو هستند.

در کنار این قیود، محدودیت‌های بهره‌برداری مرتبط با ولتاژ نیز هستند که براساس آن میزان ولتاژ باید در محدوده مجاز $V_i^{\min}$ و $V_i^{\max}$ باشد.

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} \quad \text{for } i = 1,2,\ldots,nb \quad (۸)$$

علاوه بر موارد مذکور، خروجی توربین‌های بادی تابعی از سرعت باد است. این تابع به‌صورت رابطه (۹) بیان می‌شود. سه پارامتر اصلی در این تابع عبارتند از: V_n ,V_{cin} و V_{cout}. زمانی که سرعت باد به‌اندازه V_{cin} می‌رسد، توربین‌های بادی شروع به تولید توان می‌کنند. هنگامی که سرعت باد به‌اندازه V_n می‌رسد توان خروجی به‌اندازه نامی P_n می‌رسد. در صورتی که سرعت باد از اندازه V_{cout} بیش‌تر شود تولید توان متوقف می‌شود. این روابط به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$P_t = \begin{cases} 0 & 0 \le WS_t \le V_{cin} \\ A + B\times WS_t + C\times WS_t^2 & V_{cin} \le WS_t \le V_n \\ P_n & V_n \le WS_t \le V_{cout} \\ 0 & V_{cout} \le WS_t \end{cases} \quad (۹)$$

در این رابطه، P_t توان خروجی توربین‌های بادی در ساعت t است. ضرایب A، B و C نیز با استفاده از V_n، V_{cin} و V_{cou} قابل حصول هستند و روابط آن‌ها در [۲۵] موجود است.

هنگامی که بحث احتمال وارد مسأله می‌شود دیگر نمی‌توان خروجی‌ها را قطعی نامید و به عبارتی تمامی خروجی‌های مسأله به صورت امید ریاضی مطرح می‌شوند. این بدین معنی است که در این مسأله خروجی‌های تلفات و ولتاژ همان امید ریاضی ولتاژ و تلفات هستند که از این به بعد به اختصار همان تلفات و ولتاژ نامیده می‌شوند.

۳- الگوریتم آموزش و یادگیری

الگوریتم آموزش و یادگیری الگوریتمی است که از تأثیر معلم بر دانش‌آموزان الهام گرفته شده است. این الگوریتم بر این اساس است که طی آن انتقال دانش از سوی معلم به سمت دانش آموزان است. این الگوریتم دارای دو فاز انتقال دانش است: فاز اول براساس انتقال دانش از معلم به سمت کلاس و دومی فاز دانش‌آموزان است. در فاز دانش‌آموزان اطلاعات از طریق تبادل دانش بین خود دانش‌آموزان است. طی این فاز دانش از سمت دانش آموزان با دانش بالاتر به سمت هم‌گروه‌های خود است [۲۲، ۲۶].

۳-۱- فاز آموزش معلم

[Downloaded from iejqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]

نخستین قسمت از الگوریتم TLBO آموزش از سمت معلم است. هدف اصلی معلم انتقال دانش و افزایش خروجی مثبت دانش در کلاس است. بازدهی در این قسمت به قابلیت خود معلم برمی‌گردد. به صورت ریاضی، این فاز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{i,new} = P_i + r \cdot (P_{Teacher} - T_F P_{Mean}) \qquad (۱۰)$$

در این رابطه P_i یک جواب (یک دانش‌آموز) از مجموعه جواب‌های مسأله است. $P_{Teacher}$ بهترین جواب مسأله بوده که همان نقش معلم را ایفا می‌کند. P_{Mean} نیز میانگین جواب‌های مسأله است. T_F فاکتور معلم بوده و از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$T_F = \text{round}(1 + r_2) \qquad (۱۱)$$

در این رابطه r_2 عدد تصادفی بین صفر و یک است. با استفاده از round مقدار فاکتور گرد می‌شود.

در فرآیند تولید جواب، در صورتی که جواب‌های تولید شده از جواب قبلی بهتر باشند، جایگزین جواب قبلی می‌شوند.

۳-۲- فاز دانش‌آموز

در این فاز دانش‌آموزان از طریق تبادل اطلاعات دانش خود را بالا می‌برند و در آن هیچ روند ثابتی وجود ندارد و بالطبع هر دانش آموزی با دانش آموز دیگر می‌تواند تبادل دانش داشته باشد. این موارد به صورت ریاضی مطرح می‌شوند. دو جواب تصادفی iام و jام انتخاب می‌شوند. باید دقت شود که دو جواب انتخاب شده یکسان نباشند. سپس با استفاده از روابط زیر فاز دانش آموز انجام می‌شود:

در صورتی که برازش جواب iام از برازش جواب jام بهتر باشد:

$$P_{i,new} = P_i + \vec{r}_3 \cdot (P_i - P_j) \qquad (۱۲)$$

در صورتی که برازش جواب iام از برازش جواب jام بدتر باشد:

$$P_{i,new} = P_i + \vec{r}_3 \cdot (P_j - P_i) \qquad (۱۳)$$

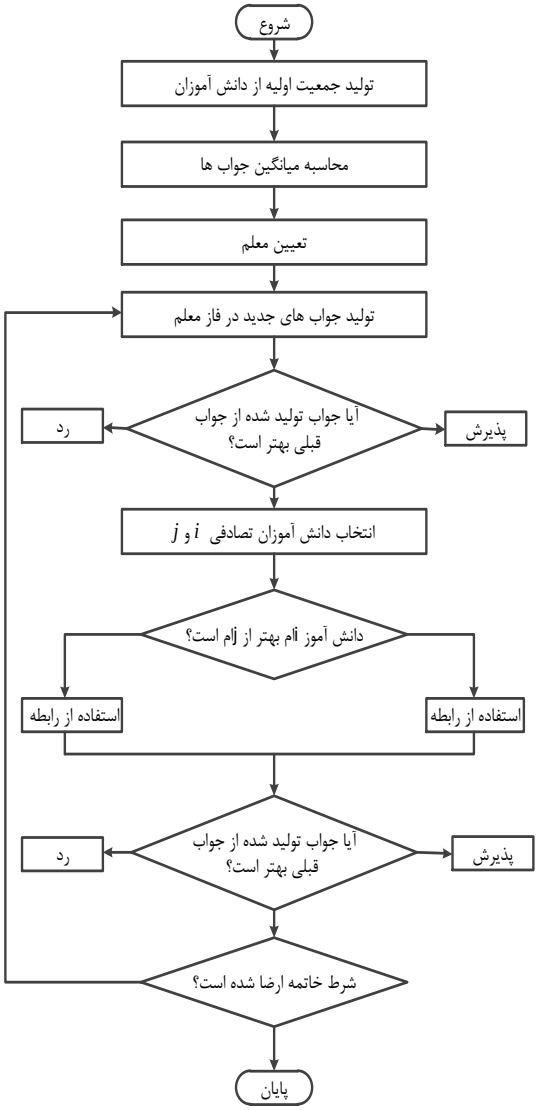
در این رابطه r_3 بردار اعداد تصادفی بین صفر و یک هستند.

بعد از اینکه جواب‌ها تولید شدند در صورتی که جواب تصادفی تولید شده جدید از جواب قبلی دارای برازش بهتری باشد جایگزین جواب قبلی می‌شود.

به صورت خلاصه الگوریتم TLBO را می‌توان در فلوچارت شکل ۱ مشاهده نمود.

۴- پخش بار احتمالی به روش تخمین دو نقطه‌ای

به دلیل ماهیت تصادفی و وجود احتمال در شبکه برای انجام پخش بار باید از یک پخش بار احتمالی استفاده شود. در [۲۸,۲۷] روشی با نام تخمین دو نقطه‌ای برای انجام پخش بار معرفی شده است. این روش ساده بوده و در عین حال دارای دقت قابل قبولی است. روش تخمین دو نقطه‌ای به صورت خلاصه در ادامه آمده است.



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم TLBO

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]

معادلات پخش بار به صورت زیر مدل می‌شود:

$$X = G(p_1, p_2, \dots, p_l, \dots, p_m) \quad (۱۴)$$

در این رابطه X مجموعه بردار متغیرهای حالت و G نیز معادلات پخش بار است. pl نیز lامین متغیر با عدم قطعیت ورودی است. متغیر با عدم قطعیت ورودی این مسأله سرعت باد است است که دارای یک میانگین، یک انحراف معیار است. ابتدا متغیر احتمالی اول انتخاب شده و دو تخمین برای آن مطابق با رابطه زیر زده می‌شود.

$$p_{l,k} = \mu_{p_l} + \zeta_{l,k}\sigma_{p_l} \quad , \quad k = 1,2 \quad (۱۵)$$

در این رابطه μ_{p_l} و σ_{p_l} به ترتیب میانگین و انحراف معیار ورودی pl است. مکان استاندارد $\zeta_{l,k}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\zeta_{l,k} = \lambda_{l,3}/2 + (-1)^{3-k}\sqrt{m + (\lambda_{l,3}/2)^2} \quad (۱۶)$$

در این رابطه m تعداد متغیرهای احتمالی ورودی و $\lambda_{l,3}$ نیز ضریب چولگی است. ضریب چولگی با رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$\lambda_{l,3} = E\left[(p_l - \mu_{p_l})^3\right] / \sigma_{p_l}^3 \quad (۱۷)$$

با محاسبه دو تخمین $p_{l,1}$ و $p_{l,2}$ برای متغیر pl ، دو متغیر خروجی $X_{l,1}$ و $X_{l,2}$ حاصل می‌شود.

$$X_i(l,k) = G(\mu_{p_1}, \mu_{p_2}, \dots, p_{l,k}, \dots, \mu_{p_m}) \ , \ k = 1,2 \quad (۱۸)$$

دو تخمین برای هر ورودی احتمالی زده می‌شود. بنابراین در صورتی که یک مسأله دارای m پارامتر احتمالی باشد آنگاه تعداد $2m$ تخمین وجود خواهد داشت.

در ادامه امید ریاضی jامین مقدار خروجی با رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$E(X_i^j) \cong \sum_{l=1}^{m}\sum_{k=1}^{2} \omega_{l,k}[X_i(l,k)]^j \quad (۱۹)$$

در این رابطه $\omega_{l,k}$ ضریب وزنی متغیر حالت $X_i(l,k)$ است.

$$\omega_{l,k} = \frac{1}{m}(-1)^k \frac{\zeta_{l,3-k}}{\zeta_l} \quad , \quad k = 1,2 \quad (۲۰)$$

در نهایت مقدار میانگین (μ_{X_i}) و انحراف معیار (σ_{X_i}) خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu_{X_i} = E(X_i) \quad (۲۱)$$

$$\sigma_{X_i} = \sqrt{E(X_i^2) - [E(X_i)]^2} \quad (۲۲)$$

۵- نتایج مطالعات عددی

برای دستیابی به کارایی روش پیشنهادی، سیستم ۵۷ باسه و استاندارد IEEE مورد استفاده قرار گرفته است. این سیستم دارای ۷ ژنراتور و ۸۰ خط است که از این بین ۱۷ خط دارای تپ چنجر هستند. همچنین از سه تجهیز جبران‌ساز توان راکتیو نیز که در باس‌های ۱۵، ۲۵ و ۵۳ نصب هستند جهت جبران‌سازی وار استفاده شده است. تلفات اولیه شبکه بدون حضور توربین‌های بادی ۲۸.۴۶۲ مگاوات است. محدوده عملکرد متغیرها در جدول ۱ آمده است [۱۹]. سایر اطلاعات شبکه نیز در [۱۹] آمده است. روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB و در یک سیستم با مشخصات حافظه ۴ گیگابایتی RAM و پردازشگر ۲ گیگاهرتزی پیاده‌سازی شده است. در این مسأله یک مزرعه بادی در باس ۳۸ وجود دارد که ظرفیت نامی این مزرعه بادی ۱۰۰ مگاوات است. برای شبیه‌سازی این مزرعه بادی از اطلاعات سرعت باد سایت دکتای شمالی و منطقه واتفورد استفاده شده است [۲۹]. میانگین سرعت باد در این منطقه ۸/۵ متر برثانیه و انحراف معیار ۵/۵۵ است. میزان فراوانی سرعت باد یکساله در شکل ۲ آمده است. چولگی راست این اطلاعات در این شکل کاملاً مشخص است.

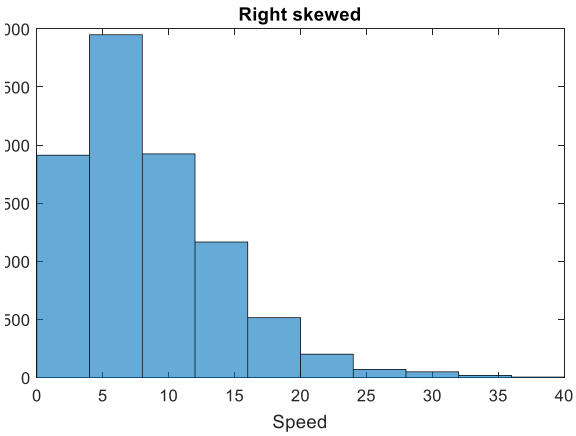
نتایج بدست آمده برای مقادیر متغیرهای کنترلی در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بدست آمده برای تمامی متغیرها در محدوده مجاز قرار دارند. برای کنترل بهتر وضعیت متغیرها نمودار تغییرات تمامی متغیرها شامل ولتاژ ژنراتورها، موقعیت تپ‌چنجرها و تولید تجهیزات کنترل وار همگی در شکل‌های ۳ تا ۸ آورده شده است. نتایج بیان از مجاز بودن موقعیت تمامی متغیرها در طول ۵۰۰ تکرار الگوریتم است. همچنین می‌توان پی‌برد در ابتدا تمامی متغیرها دارای نوسان بالایی هستند اما رفته رفته با افزایش تعداد تکرارها یک همگرایی نسبی در تمام متغیرها حاصل می‌شود. همچنین ولتاژ خروجی تمامی‌باس‌ها در شکل ۹ آمده که نشان از مقادیر مجاز برای ولتاژ خروجی باس‌ها است.

به منظور نمایش توانایی الگوریتم TLBO در حل مسأله ORPD این الگوریتم با دو الگوریتم PSO و DE مقایسه شده و نتایج در

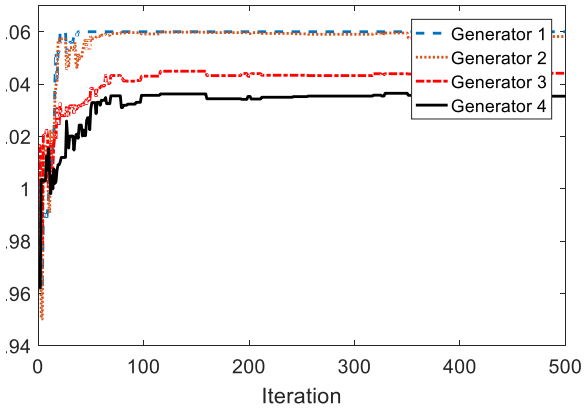
[Downloaded from iejqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]

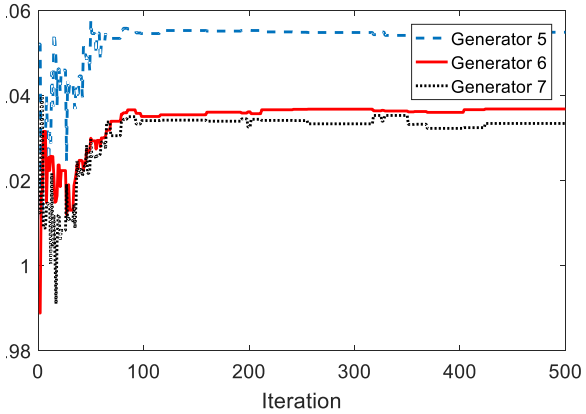
جدول ۳ و ۴ آمده است. قابل ذکر است در حالت بدون در نظر گرفتن توربین مقایسه با مراجع بیشتری انجام شده است اما با در نظر گرفتن اثر توربین‌ها فقط با دو روش ذکر شده مقایسه انجام شده است. این مهم بدین دلیل بوده که امکان مقایسه بیشتر به دلیل نبود شرایط یکسان، فراهم نبوده است. ضمن اینکه در مقایسه با مرجع [۷]، این مرجع در حالت دو هدفه به بررسی مساله پرداخته است و بدیهی است که در حالت تک‌هدفه پتانسیل دستیابی به جواب مناسب‌تری فراهم بوده است. نتایج در هر دو حالت حضور و عدم حضور توربین‌های بادی نشان از برتری الگوریتم پیشنهادی است. در حالتی که مزرعه بادی در مدار قرار ندارد بهترین میزان تلفات ۲۴/۲۲ بوده و در حالتی که مزرعه بادی لحاظ شده نیز بهترین مقدار ۲۰/۲۴ مگاوات است که در هر دو حالت الگوریتم پیشنهادی به جواب بهتری دست یافته است. ضمن اینکه شرایط به صورت یکسان بوده و در همه حالات و برای تمامی الگوریتم‌ها تعداد جمعیت ۱۰۰ و تعداد تکرار ۵۰۰ لحاظ شده است. همچنین مقایسه حضور و عدم حضور توربین بادی نشان از تاثیر مثبت توربین بادی در کاهش تلفات شبکه است.



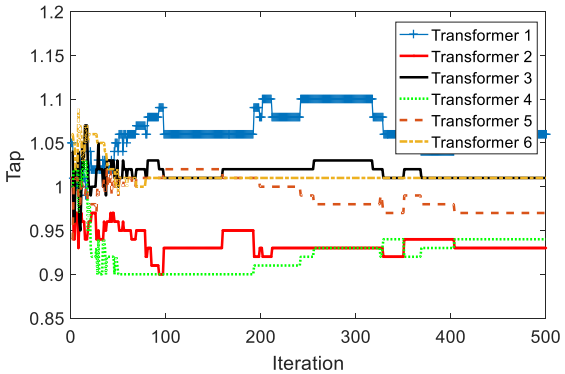
شکل ۲: نمودار فراوانی سرعت باد



شکل ۳: روند تغییرات ولتاژ ژنراتورهای ۱ تا ۴ در طول تکرار الگوریتم



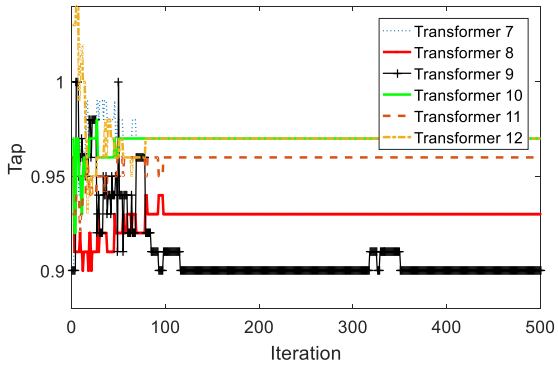
شکل ۴: روند تغییرات ولتاژ ژنراتورهای ۵ تا ۷ در طول تکرار الگوریتم



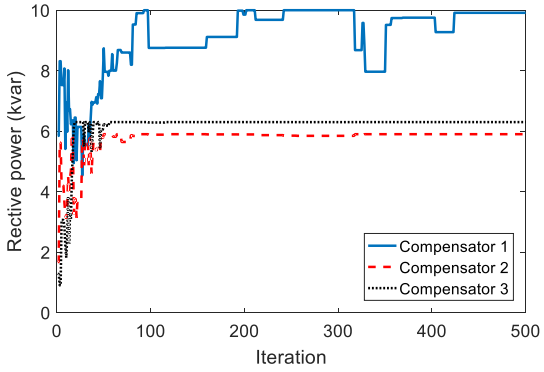
شکل ۵: روند تغییرات تپ ترانسفورماتورهای ۱ تا ۶ در طول تکرار الگوریتم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

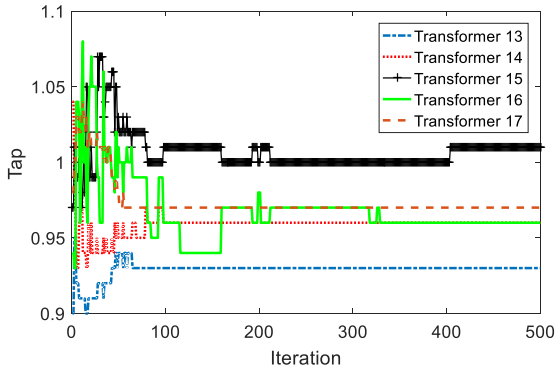
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]



شکل ۶: روند تغییرات تپ ترانسفورماتورهای ۷ تا ۱۲ در طول تکرار الگوریتم



شکل ۸: روند تغییرات وار تجهیزات جبران‌ساز در طول تکرار الگوریتم



شکل ۷: روند تغییرات تپ ترانسفورماتورهای ۱۳ تا ۱۷ در طول تکرار الگوریتم

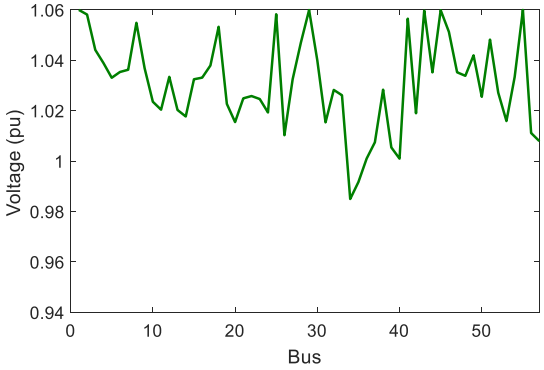
جدول ۱: محدودیت‌های متغیرهای کنترلی در سیستم تحت مطالعه

متغیر	حداقل (pu)	حداکثر (pu)	گام
VG	۰/۹۴	۱/۰۶	---
V	۰/۹۴	۱/۰۶	---
T	۰/۹	۱/۱	۰/۰۱
QC_{18}	۰	۰/۱	---
QC_{25}	۰	۰/۰۵۹	---
QC_{53}	۰	۰/۰۶۳	---

جدول ۲: نتایج بدست آمده برای متغیرهای سیستم تحت مطالعه

$T_{4\text{-}18}$	$T_{4\text{-}18}$	VG_{12}	VG_9	VG_8	VG_6	VG_3	VG_2	VG_1
1.058	1.06	1.033	1.037	1.055	1.035	1.044	1.058	1.06
$T_{14\text{-}46}$	$T_{15\text{-}45}$	$T_{11\text{-}41}$	$T_{34\text{-}32}$	$T_{7\text{-}29}$	$T_{24\text{-}26}$	$T_{24\text{-}25}$	$T_{24\text{-}25}$	$T_{21\text{-}20}$
7	8	1	4	8	12	8	5	12
QC_{53}	QC_{25}	QC_{18}	$T_{9\text{-}55}$	$T_{39\text{-}57}$	$T_{40\text{-}56}$	$T_{11\text{-}43}$	$T_{13\text{-}49}$	$T_{10\text{-}51}$
7	8	1	4	8	12	8	5	12

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]



شکل ۹: پروفیل ولتاژ تمامی باس‌ها

جدول ۳: مقایسه نتایج تلفات با دیگر الگوریتم بدون در نظر گرفتن اثر توربین بادی

روش	PSO	DE	IDE [9]	SMO-ORPD*[7]	**TLBO**
میزان تلفات	۲۴/۸۶	۲۴/۲۵	۲۴/۲۲	۲۵/۰۱	۲۴/۲۲

جدول ۴: مقایسه نتایج تلفات با دیگر الگوریتم با در نظر گرفتن اثر توربین بادی

روش	PSO	DE	**TLBO**
میزان تلفات	۲۰/۴	۲۰/۳۲	۲۰/۲۴

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش جدید را برای حل مسأله توزیع بهینه توان راکتیو و کنترل ولتاژ در حضور توربین‌های بادی ارائه می‌دهد. به منظور حل این مسأله از الگوریتم TLBO به عنوان یکی از الگوریتم‌های نوین در زمینه سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. توانایی روش پیشنهادی برای حل مسأله ORPD با پیاده‌سازی روش در سیستم ۵۷ باسه IEEE نشان داده شده است. نتایج نشان نشان از کاهش میزان تلفات کل شبکه با حضور توربین‌های بادی به نسبت عدم حضور آن‌ها است. همچنین در طی حل مسأله و در پایان الگوریتم تمامی متغیرهای کنترلی در محدوده مجاز خود قرار دارند. مقایسه روش پیشنهادی با الگوریتم‌های PSO و DE نشان از توانایی این الگوریتم است.

مراجع

[1] Subbaraj P., Rajnarayanan, P.N., "*Optimal reactive power dispatch using self-adaptive real coded genetic algorithm*", Electric Power Systems Research, vol. 79, pp. 374-381, 2009.

[2] Lee, K.Y., Park, Y.M., Ortiz, J.L. "*A united approach to optimal real and reactive power dispatch*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 1, pp. 1147–53, 1985.

[3] Lu, F.C., Hsu, Y.Y. "*Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming*", IEE Proceeding on Generation Transmission and Distribution, vol. 142, pp. 639-645, 1995.

[4] Sun, D.I., Ashley, B., Brewar, B., Hughes, A., Tinny, W.F. "*Optimal power flow by Newton approach*", IEEE Transactions on Power Apparatus systems vol. 103, pp. 2864-2880, 1984.

[5] Bakirtzis, AG., Meliopous, AP. "*Incorporation of switching operations in power system corrective control computation*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 2, pp. 669–676, 1987.

[6] Mohseni-Bonab, SM., Rabiee, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Jalilzadeh, S., Nojavan, S., "*A two-point estimate method for uncertainty modeling in multi-objective optimal reactive power dispatch problem",* International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 75, pp. 194-204, 2016.

[7] Mohseni-Bonab, SM., Rabiee, A., Mohammadi-Ivatloo,"*Voltage stability constrained multi-objective optimal reactive power dispatch under load and wind power uncertainties: A stochastic approach."* Renewable Energy, vol. 85, pp. 598-609, 2016.

[8] Mohseni-Bonab, SM., Rabiee, A., Mohammadi-Ivatloo, Nojavan, S., "*Probabilistic multi objective optimal reactive power dispatch considering load uncertainties using Monte Carlo simulations*." Journal of Operation and Automation in Power Engineering, vol. 3, pp. 83-93, 2015.

[9] Falaghi, H. Najafi, A., "*Optimal Reactive Power Dispatch using Improved Differential Evolution Algorithm*", Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 8,pp. 69-78, 2013.

[10] Niknam, T., Zare, M., Aghaei, J., "*Scenario-based multiobjective Volt/Var control in distribution networks including renewable energy sources*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, pp. 2004-2019, 2012.

[11] Bakare GA, Venayagamoorthy GK, Aliyu UO. "*Reactive power and voltage control of the Nigerian grid system using microgenetic algorithm*", IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, vol. 2, pp. 1916–22, 2005.

[12] Yoshida, H., Fukuyama, Y., Kawata, K., Takayama, S., Nakanishi, Y. "*A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 1232–9, 2001.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]

[13] Abido MA. "*Optimal power flow using particle swarm optimization*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 24, pp. 563–571, 2002.

[14] Wu, Q., Ma, JT. "*Power systems optimal reactive power dispatch using evolutionary programming*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, pp. 1243–1249, 1995.

[15] Liang, CH., Chung, CY., Wong, KP., Duan, XZ., Tse, CT. "*Study of differential evolution for optimal reactive power flow*", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, pp. 253–260, 2007.

[16] Varadarajan, M., Swarup, KS. "*Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 30, pp. 435–441, 2008.

[17] Abou, AA. , Ela, E., Abido MA, Spea SR. "*Differential evolution algorithm for optimal reactive power dispatch*", Electric Power System Research, vol. 81, pp. 458-464, 2011.

[18] Hsiao, YT., Liu, CC., Chiang, HD., Chen, YL. "*A new approach for optimal VAR sources planning in large scale electric power systems*", IEEE Transactions on Power Systems, vol.8, pp. 988–996, 1993.

[19] Dai, C., Chen, W., Zhu, Y., Zhang, X. "*Seeker Optimization Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch*", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, pp. 1218-1231, 2009.

[20] Ng Shin Mei, R., Sulaiman, MH., Mustaffa, Z., Daniyal, H. "*Optimal reactive power dispatch solution by loss minimization using moth-flame optimization technique*", Applied Soft Computing, vol. 59, pp. 210-222, 2017.

[21] Nuaekaew, K., Artrit, P., Pholdee, N., Bureerat, S. "*Optimal reactive power dispatch problem using a two-archive multi-objective grey wolf optimizer*", Expert Systems with Applications, vol. 87, pp. 79-89, 2017.

[22] Bhattacharyya, B. Babu, R., "*Teaching Learning Based Optimization algorithm for reactive power planning*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 81, pp. 248-253, 2016.

[23] Mehdinejad, M., Mohammadi-Ivatloo, B., Dadashzadeh-Bonab, R., Zare, K. "*Solution of optimal reactive power dispatch of power systems using hybrid particle swarm optimization and imperialist competitive algorithms*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 83, pp. 104-116, 2016.

[24] Khazali, AH., Kalantar, M. "*Optimal reactive power dispatch based on harmony search algorithm*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, 684–692, 2011.

[25] Giorsetto, P., Utsurogi, KF. "*Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators*," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102, 134–143, no. 1, 1983.

[26] Gautam, GD., Pandey, AK. "*Teaching Learning Algorithm based Optimization of Kerf Deviations in Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Kevlar-29 Composite Laminates*", Infrared Physics & Technology, 2017.

[27] Carpinelli, G., Esposito, T., Varilone, P., Verde, P. "*First-order probabilistic harmonic power flow*", Proceedings of the IEEE International Conference on Generation, Transmission and Distribution, vol. 148, pp. 541-548, 2001.

[28] Romero, AA., Zini, HC., Ratta, G. Dib, R. "*Harmonic load-flow approach based on the possibility theory*", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 5, pp. 393-404, 2011.

[29] North Dakota Agriculture Weather Network. <http://ndawn.ndsu.nodak.edu/wind-speeds.html>.

پانویس

1. Optimal reactive power dispatch
2. Uncertainty
3. Teaching learning based optimization
4. Two points estimate method

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.1.9.3]