

مقاله علمی-ترویجی

تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن حالت‌های کاری منابع مبتنی بر الگوریتم حرکت جمعی ذرات بهبود یافته جهت کاهش تلفات توان و بهبود نمایه ولتاژ

ناصر طاهری*، عضو هیات علمی، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران-ایران

علی صفایی، دانشگاه علوم تحقیقات واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

صادق بهزادی، دانشگاه چمران اهواز، پردیس صنعتی شهدای هویزه، اهواز ، ایران

فرامرز ابراهیمی، گروه مهندسی برق، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران

*نویسنده مسئول

چکیده

با افزایش نفوذ منابع DG در سیستم‌های توزیع، عملکرد این سیستم‌ها از حالت غیرفعال به حالت فعال تغییر کرده و امکان تبادل دو طرفه توان بین شبکه اصلی و شبکه توزیع فراهم شده است. بهره‌برداری از منابع DG در سیستم توزیع در صورتی دارای مزایای اقتصادی-تکنیکی است که موقعیت نصب و ظرفیت تولیدی آنها که تحت تاثیر حالت کاری (قابلیت DG در تبادل هر دو مولفه توان فعال و واکنشی) و استراتژی کنترلی به‌کار گرفته شده در مبدل‌ها است، به‌صورت بهینه انتخاب شود. در این مقاله روشی برای حل مساله جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG (OPSDG) در شبکه‌های توزیع ارائه خواهد شد که در آن از مدل تزریق جریان بار برای مدل‌سازی DG ها استفاده شده و حالت کاری منابع نیز لحاظ می‌گردد. این مدل، تاثیر استراتژی کنترلی مبدل‌ها بر حل مساله را به کمترین مقدار ممکن می‌رساند. در روش مورد بحث این مقاله تابع هدف، ترکیبی وزن‌دار از شاخص‌های نمایه ولتاژ و کاهش تلفات توان است. برای بهینه‌سازی تابع هدف، الگوریتم ترکیبی حرکت ذرات تصحیح شده ارائه می‌شود. تصحیح الگوریتم از طریق بکارگیری عملگرهای ترکیب و جهش دینامیکی برای مجموعه ذرات انجام خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تحت استراتژی ارائه شده این مقاله، نمایه ولتاژ و تلفات توان اکتیو در حالت بهینه قرار خواهند داشت.

کلمات کلیدی: جایابی و تعیین ظرفیت بهینه، تولید پراکنده، الگوریتم حرکت جمعی ذرات تصحیح شده

DG Optimal Allocation and Sizing in Distribution Systems Considering the Working Modes of the Resources Based on the Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm to Reduce Power Losses and Improve the Voltage Profile

Naser Taheri*, Faculty Member, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Ali Safaee,Department of Electrical Engineering, Kermanshah Research University of Sciences, Kermanshah, Iran

Sadegh Behzadi,Department of Electrical Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Faramarz Ebrahimi,Department of Electrical Engineering, Quchan Branch, Islamic Azad University, Quchan

*Corresponding Author

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

Abstract

With the increasing penetration of DG resources in distribution systems, the performance of these systems has changed from passive to active mode and the possibility of two-way power exchange between the main network and the distribution network has been provided. The use of DG resources in the distribution system has economic-technical advantages if their installation location and production capacity, which are influenced by the working mode (the ability of DG to exchange both active and reactive power components) and the control strategy used in the converters, be optimaly selected. In this article, a method will be presented to solve the placement problem and determine the optimal capacity of DG resources (OPSDG) in distribution networks, in which the load flow injection model is used to model DGs and the working state of the resources is also considered. This model minimizes the influence of the control strategy of converters on solving the problem. In the method discussed in this article, the objective function is a weighted combination of voltage profile indicators and power loss reduction. To optimize the objective function, the enhanced algorithm of particel swarm optimization algorithm is presented. The enhancement of the algorithm will be done through the use of crossover and dynamic mutation operators for the set of particles. The simulation results show that under the strategy presented in this article, the voltage profile and active power losses will be in the optimal state.

Keywords: DG optimal allocation and sizing, Distributed generation, Enhanced particle swarm optimizations

۱- مقدمه

رشد تصاعدی تقاضای انرژی در چند دهه اخیر باعث شده است تا تلفات توان الکتریکی و افت ولتاژ در سیستم‌های توزیع افزایش یابد. بیشتر شبکه‌های توزیع یا به‌صورت شعاعی بوده و یا شبکه‌ای ضعیف هستند[۱-۳]. در نتیجه، تلفات خط و افت ولتاژ مرتبط با انتهای فیدرها، به‌دلیل نسبت بالای R به X سیستم‌های توزیع، قابل توجه است. علاوه بر این، شبکه‌های توزیع متمرکز بوده و به‌صورت یک‌طرفه از طریق شبکه اصلی (که شامل نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی هستند) تغذیه می‌شوند. بنابراین شبکه‌های توزیع بر گسیل آلاینده‌های زیست محیطی نیز موثر هستند[۴-۶]. با ظهور فناوری شبکه هوشمند (Smart Grid) و منابع تولید پراکنده (Distributed Generation)، تغییرات گسترده‌ای در شبکه‌های توزیع به‌وجود آمده است. تولید پراکنده به معنای استفاده از نیروگاه‌هایی با واحدهای تولیدی مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیر است که به‌طور معمول در ساختار خود از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان محرک اولیه ژنراتور استفاده می‌کنند.

ظرفیت پایین تولید در منابع DG و وابستگی آن به عدم قطعیت‌های متعدد باعث شده است تا بیشتر این نیروگاه‌ها در محل مصرف‌کننده (بار) نصب شوند [۷-۹]. از جمله مهمترین مزایای منابع DG می‌توان به جبران‌سازی سریع توان از دست رفته در سیستم، عدم نیاز به ایجاد پست‌های جدید توان، کاهش تلفات توان، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری در احداث خطوط انتقال جدید، بهبود بازار برق در محیط تجدید ساختار یافته، تغذیه بارهای محلی و دوردست و . . . اشاره نمود[۱۰-۱۴].

استفاده از DG ها در شبکه توزیع باعث تغییر پیکربندی شعاعی سیستم خواهد شد. در صورت نفوذ منابع DG در شبکه توزیع، سیلان مولفه‌های توان (فعال و غیرفعال) دستخوش تغییر شده و نمایه ولتاژ نیز به همان نسبت تغییر خواهد کرد. همچنین شبکه از سیستم غیرفعال به سیستمی فعال تبدیل شده و این مهم بر جریان خطا، جریان بار و سیستم حفاظتی شبکه اثرگذار خواهد بود. لازم به ذکر است که عدم قطعیت موجود در محرک‌های اولیه منابع DG تشدید کننده موارد بیان شده هستند [۱۵-۱۷]. از این‌رو به منظور بهره بردن از بیشترین ویژگی‌های مثبت منابع DG، جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG[۳] در شبکه‌های توزیع غیر قابل اجتناب است، به‌طوری‌که تحقیقات نشان می‌دهند اگر این فرایند مهم در نصب منابع تولید پراکنده در نظر گرفته نشود، نه تنها اهداف و ویژگی‌های مثبت مد نظر از نصب منابع تولید پراکنده حاصل نمی‌گردند، بلکه ممکن است وضعیت عملکرد شبکه بدتر از حالت قبل از نصب (منابع) نیز شود[۱۸-۲۰].

در این مقاله روشی مبتنی بر به‌کارگیری الگوریتم حرکت جمعی ذرات به همراه راهکارهای افزایش قابلیت این الگوریتم در جهت حل مساله جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG ارائه می‌شود. همگرایی سریع به نقاط اکسترمم محلی و تاثیرپذیری از سرعت و موقعیت ذرات بهینه مطلق جهت حرکت جمعی ذرات از مهمترین چالش‌های الگوریتم PSO محسوب می‌شوند. در این مقاله با استفاده از عملگرهای پیشنهادی ترکیب و جهش دینامیکی ذرات چالش‌های بیان شده تعدیل خواهند شد.

۲- مدل‌سازی سیستم قدرت

۲-۱-مدل‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر و بارها

به‌طورکلی می‌توان این منابع را به دو شکل زیر مدل‌سازی نمود:

۱- مدل PV که در این صورت ضروری است تا از طریق تصحیح توان راکتیو اندازه ولتاژ باسی که DG به آن متصل شده است، تنظیم شود.

۲- مدل PQ و به‌عنوان یک بار منفی که مورد نظر این مقاله است.

ساختار شعاعی شبکه توزیع، بالا بودن مقدار مقاومت سیستم و همچنین نسبت پایین X به R باعث می‌شوند که روش‌های معمول پخش بار نظیر نیوتن- رافسون، گوس- سایدل و تکنیک‌های دکوپله‌سازی سریع[۴] برای شبکه‌های توزیع شامل منابع انرژی DG مناسب نباشند. از این‌رو پخش بار مبتنی بر تزریق جریان[۵] برای این سیستم‌ها پیشنهاد می‌شود. یکی از مزیت‌های CILF سازگار بودن آن با تجهیزات کنترلی در شبکه است. سه روش برای مدل‌سازی DG به‌صورتPQ در دسترس است:

۱- بار PQ منفی: در این حالت منبع DG به‌عنوان یک منبع توان اکتیو در نظر گرفته می‌شود. توان اکتیو خروجی PDG منبع به‌عنوان توان تزریقی لحاظ می‌گردد:

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

$$P_{load,i} = P_{load,i} - P_{DG,i} \quad (۱)$$

۲- ضریب توان ثابت: این مدل معمولترین مدل‌سازی برای منابع DG در شبکه توزیع است. توان اکتیو منبع DG و تزریق جریان معادل از رابطه‌های (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

$$Q_{iDG} = P_{iDG}\tan(\cos^{-1}(PF_{iDG})) \quad (۲)$$

$$I_{iDG} = I^{r}_{iDG}(V_{iDG}) + jI^{i}_{iDG}(V_{iDG}) = (P_{iDG} + j\frac{Q_{iDG}}{V_{iDG}})^{*} \quad (۳)$$

۳- توان راکتیو متغیر: ژنراتورهای القایی در منابع DG به‌عنوان ژنراتورهای توان راکتیو متغیر در نظر گرفته می‌شوند. به‌عنوان مثال برای توربین‌های بادی، توان اکتیو را می‌توان از روی منحنی مشخصه توربین استخراج نمود و بر اساس رابطه زیر مقدار توان راکتیو تقاضا شده را محاسبه کرد:

$$Q'_{iDG} = -Q_0 - Q_1P_{iDG} - Q_2P^2_{iDG} \quad (۴)$$

که در این رابطه Q'iDG توان راکتیو مصرفی توسط توربین بادی و مقادیر Q_0, Q_1, Q_2 از طریق تقریب به‌دست می‌آیند. در این مقاله از روش‌های بالا برای مدل‌سازی منابع DG استفاده خواهد شد. برای مدل‌سازی بار نیز می‌توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$P_i = P_{0i} \times V_i^{\alpha}, Q_i = Q_{0i} \times V_i^{\beta} \quad (۵)$$

که در این رابطه Pi و Qi توان‌های اکتیو و راکتیو در باس iام، P_{0i} و Q_{0i} توان اکتیو و راکتیو در باس i، Vi ولتاژ در باس i، α و β ضرایب ثابت هستند (برای حالت توان ثابت این دو مولفه صفر در نظر گرفته می‌شوند).

۲-۲- تعریف تابع هدف برای مساله

یکی از مهمترین اهداف از حل مساله جایابی و تعیین سایز بهینه منابع DG در شبکه قدرت کاهش تلفات کل توان در سیستم می‌باشد. این مهم را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$\text{Minimiza } S_{loss} = \sqrt{P^2_{loss} + Q^2_{loss}} \quad (۶)$$

توجه شود که هدف این مقاله کاهش تلفات توان اکتیو و همچنین بهبود پروفیل ولتاژ در فیدرهای شبکه است. از آنجا که ولتاژ سیستم مرتبط با مقدار جاری شدن توان راکتیو است بنابراین کاهش تلفات توان راکتیو می‌تواند بر تثبیت پروفیل ولتاژ به‌طور کامل موثر باشد. کل تلفات توان اکتیو در سیستم توزیع با رابطه زیر داده می‌شود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n} I_i^2R_i, Q_{loss} = \sum_{i=1}^{n} I_i^2X_i \quad (۷)$$

که در این رابطه n شماره خطوط در باس i، Ii جریان خط در باس i، Ri مقاومت خط و Xi راکتانس خط هستند. تلفات کل توان سیستم نیز بر اساس تلفات توان اکتیو و راکتیو فرمول‌بندی می‌شوند. می‌توان مقدار دقیق تلفات توان‌های فعال و واکنشی را با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) محاسبه نمود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[a_{ij}(P_iP_j + Q_iQ_j) + b_{ij}(Q_iP_j - P_iQ_j)] \quad (۸)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}[c_{ij}(P_iP_j + Q_iQ_j) + d_{ij}(Q_iP_j - P_iQ_j)] \quad (۹)$$

که در رابطه بالا ضرایب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_iV_j}\cos(\delta_i - \delta_j), b_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_iV_j}\sin(\delta_i - \delta_j) \quad (۱۰)$$

$$c_{ij} = \frac{x_{ij}}{V_iV_j}\cos(\delta_i - \delta_j), d_{ij} = \frac{x_{ij}}{V_iV_j}\sin(\delta_i - \delta_j) \quad (۱۱)$$

متغیر n شماره باس، a_{ij}، b_{ij}، c_{ij}، d_{ij} ضرایب تلفات بین باس i و j، $P_{i(j)}$ سیلان توان حقیقی در باس i (j) $Q_{i(j)}$ سیلان توان واکنشی در باس i (j)، Rij مقاومت بین باس‌های i و j، Xij راکتانس بین باس‌های i و j، $V_{i(j)}$ ولتاژ باس i (j) و δij زاویه ولتاژ باس i (j) هستند. امپدانس بین باس i و j به‌صورت $Z_{ij}=R_{ij}+jX_{ij}$ نمایش داده می‌شود. مدل معمول برای تابع هدف به‌صورت زیر است:

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (۱۲)$$

که در آن $f_1(x), f_2(x), \dots f_k(x)$ متغیرات در تابع هزینه هستند. این تابع هزینه باید در شرایط قیود تساوی و ناتساوی حل شود:

$$g(x) = g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x) = 0$$
$$h(x) = h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x) \geq 0 \quad (۱۳)$$

استراتژی معمول برای جایابی و تعیین ظرفیت بهینه DG مبتنی بر به کمینه رساندن مقدار تلفات و بهبود نمایه ولتاژ است. فاکتور کاهش تلفات توان فعال در هر گره به‌صورت نسبت درصد کاهش تلفات توان فعال به توان پایه در زمانی است که DG در باس i نصب گردد. در این مقاله شاخص کاهش تلفات توان فعال (PLRI) به‌صورت زیر بیان می‌شود (که در آن $P_{L(base)}$ تلفات توان فعال قبل از نصب DG و $P_{L(dg)}$ تلفات توان فعال بعد از نصب DG می‌باشد.):

$$f_1 = PLRI = \frac{P_{L(base)} - P_{L(dg)}}{P_{L(base)}} \quad (۱۴)$$

در یک سیستم قدرت انتظار می‌رود تا ولتاژ در هر باس در محدوده مجاز قرار گیرد. شاخص بهبود نمایه ولتاژ (Profile Voltage) به تعیین سایز-موقعیت بهینه DG کمک می‌کند تا کمینه تغییرات ولتاژ از مقدار مرجع در باس‌های مختلف سیستم را شاهد باشیم. این شاخص در این مقاله به‌صورت زیر تعریف می‌شود(یک مقدار عددی ثابت است):

$$f_2 = VPII = \frac{1}{\lambda + \max_{i=1}^{n}(|1 - V_{DG}|)} \quad (۱۵)$$

می‌توان تابع هزینه چند هدفه برای تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه DG را به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$MOF = w_1PLRI + w_2VPII \quad (۱۶)$$

که در این رابطه w_1 و w_2 وزن‌های متناظر با هر شاخص است. لازم است تا جمع ضرایب وزنی برابر با یک باشد. یعنی:

$$|w_1| + |w_2| = 1 \quad (۱۷)$$

این وزن‌ها برای اهمیت دادن به هر یک از این شاخص‌ها در تابع هزینه برآیند بوده و بر اساس نظر طراح می‌توانند متغیر باشد. همچنین، هنگام حل مساله بهینه‌سازی باید شرایط تعادل توان نیز برقرار باشد:

$$P_i = P_{DGi} - P_{Di}, Q_i = Q_{DGi} - Q_{Di} \quad (۱۸)$$

که در این رابطه Pi و Qi توان فعال و واکنشی در باس i، PDGi و QDGi توان‌های فعال و واکنشی مبادله ای توسط DG در باس i، PDi و QDi تقاضای توان فعال و واکنشی در باس i می‌باشند. رابطه Pi را می‌توان به‌صورت زیر نیز نوشت:

$$P_i = -\frac{1}{a_{ij}}\sum_{j=1}^{n}\sum_{j\neq 1}[a_{ij}P_j - b_{ij}Q_j] \quad (۱۹)$$

معادله بالا را می‌توان برای مساله تعیین سایز-موقعیت بهینه DG

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

به‌صورت زیرنوشت:

$$P_{DGi} = P_{Di} + \frac{1}{a_{ij}} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j\neq 1} [a_{ij}P_j - b_{ij}Q_j] \quad (۲۰)$$

در نتیجه برای توان واکنشی:

$$Q_{DGi} = Q_{Di} + \frac{1}{c_{ij}} \sum_{j=1}^{n} \sum_{j\neq 1} [c_{ij}Q_j - b_{ij}P_j] \quad (۲۱)$$

در حین نصب واحدهای تولید پراکنده در باس‌های مختلف باید عدم تجاوز اندازه ولتاژ از حد مجاز به‌طور پیوسته بررسی گردد (قید ناتساوی). به عبارت دیگر برای هر باس باید داشته باشیم:

$$V_{i\,min} \leq V_i \leq V_{i\,max} \quad (۲۲)$$

که در این رابطه $V_{i\,min}$ حد پایین ولتاژ و $V_{i\,max}$ حد بالای ولتاژ می‌باشد. هر یک از منابع DG نیز محدودیتی برای تولید توان‌های فعال و واکنشی دارند و بنابراین:

$$\begin{aligned} P_{DG\,min} &\leq P_{DG\,i} \leq P_{DG\,max} \\ Q_{DG\,min} &\leq Q_{DG\,i} \leq Q_{DG\,max} \end{aligned} \quad (۲۳)$$

۳-الگوریتم تکاملی PSO تصحیح شده

در مورد بکارگیری الگوریتم‌های تکاملی دو نکته زیر حائز اهمیت خواهند بود:

- زمان جست‌وجوی راه‌حل قابل توجه خواهد بود.
- راه‌حل‌ها به الزام راه‌حل بهینه نیستند.

ضروری است تا مصالحه‌ای بین فضای جست‌وجوی گسترده و سرعت همگرایی به پاسخ‌های بهینه فراهم شود. روش بهینه‌سازی حرکت دسته جمعی ذرات دارای ویژگی‌هایی نظیر سادگی، سرعت بالا و کدینگ راحت است. علاوه بر این جهت اجرا نیاز به فضای ذخیره‌سازی ناچیزی دارد. مزیت دیگر این الگوریتم حفظ جمعیت اولیه است که باعث می‌شود تا نیاز به حافظه چندانی برای ذخیره‌سازی کلیه عناصر نباشد. در ضمن ذرات در این الگوریتم با یکدیگر برای رسیدن به جواب بهینه همکاری می‌کنند. این عمل در مقابل روش‌هایی چون ژنتیک الگوریتم می‌باشد که ذرات برای جواب نهایی با یکدیگر در حال رقابت هستند. PSO با یک جمعیت اولیه (ذرات) در فضای D بعدی شروع به فعالیت می‌کند. ذره i ام با $X_i=(X_{i1},X_{i2},\ldots,X_{iD})$ نمایش داده می‌شود. هر ذره موقعیت بهترین حالت خود در فضای D بعدی را حفظ می‌کند. مقدار تابع هزینه برای هر ذره به صورت $P_i=(P_{i1},P_{i2},\ldots,P_{iD})$ ذخیره می‌شود. در این الگوریتم بهترین جواب ممکن و موقعیت ذره مربوطه نیز ذخیره می‌گردد. PSO در هر گام بر اساس سرعت ذرات، موقعیت ذرات را به‌روز می‌کند. سرعت ذره i ام به‌صورت $V_i=(V_{i1},V_{i2},\ldots,V_{iD})$ نمایش داده می‌شود.

موقعیت ذره i ام در تکرار k ام با رابطه (۲۴) محاسبه خواهد شد.

$$\begin{aligned} V_{id}^{k+1} = w \times V_{id}^{k} &+ c_1 \times rand \times \left(P_{id} - X_{id}^{k}\right) \\ &+ c_2 \times ran \times \left(P_{gd} - X_{id}^{k}\right) \end{aligned} \quad (۲۴)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^{k} + V_{id}^{k} \quad (۲۵)$$

که در این رابطه Pgd و Pid به ترتیب موقعیت‌های بهینه مطلق و نسبی هستند. در الگوریتم PSO، هر نوع تغییر در ذرات بر مبنای سرعت و جهت ذرات موفق انجام می‌شود که لزوما این ذرات پاسخ‌های بهینه ممکن برای مساله محسوب نمی‌شوند. برای اجتناب از به دام افتادن الگوریتم در اکسترمم‌های محلی مساله، پیشنهاد می‌شود تا بعد از تغییرات صورت گرفته روی ذرات (به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات) از عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شود تا شرایط برای گریز از اکسترمم‌های محلی مهیا گردد. برای این منظور به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- عملگر ترکیب (Crossover): بر این اساس از جمعیت ذرات، ذره‌ای به تصادف انتخاب می‌شود. این ذره با Pgd ترکیب خواهد شد. ترکیب بر اساس رابطه زیر انجام خواهد شد (Xnewk اشاره به ذره جدید دارد که جایگزین ذره انتخابی Xrandk در مرحله k ام می‌شود و θ عدد تصادفی بین صفر و یک است):

$$\theta \times P_{gd}^{k} + (1-\theta)X_{rand}^{k} = X_{new}^{k} \quad (۲۶)$$

۲- جهش دینامیکی (Mutation Dynamic): می‌تواند ضمن گسترش فضای جست و جو باعث جلوگیری از گیر افتادن جمعیت ذرات در اکسترمم‌های محلی گردد. تعریف جهش دینامیکی بصورت زیر انجام می‌شود (Xmax و Xmin به بیشترین و کمترین مقدار ممکن اشاره دارند و μ پارامتری ثابت است):

$$X_{rand}^{k+1} = \begin{cases} X_{rand}^{k} + (X^{max} - X_{rand}^{k}) \times rand \times \exp(\frac{1}{1-\mu}) & rand > 0.5 \\ X_{rand}^{k} - (X_{rand}^{k} - X^{min}) \times rand \times \exp(\frac{1}{1-\mu}) & rand < 0.5 \end{cases} \quad (۲۷)$$

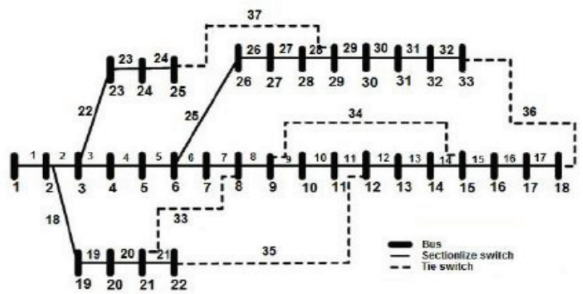
این رابطه نوسان ذرات حول مقادیر بهینه احتمالی را باعث خواهد شد.

به این ترتیب، مراحل بهینه‌سازی یک مساله بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم PSO تصحیح شده به‌صورت زیر می‌باشد:

۱- مقدار دهی اولیه موقعیت و سرعت ذرات
۲- محاسبه تابع هزینه برای هر یک ذرات و تعیین Pgd و Pid
۳- بروزرسانی موقعیت و سرعت ذرات بر اساس رابطه (۲۵)
۴- اعمال عملگرهای جهش و ترکیب (رابطه (۲۵) و (۲۶))
۵- تکرار مراحل (۱) الی (۴) تا ارضای شرط توقف مورد نظر

۴-نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار MATPOWER انجام خواهد شد. سیستم نمونه ۳۳ باسه استاندارد IEEE جهت اعمال روش مورد بحث این مقاله جهت حل مساله OPSDG لحاظ شده است. سیستم‌های تحت مطالعه در شکل(۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: سیستم قدرت مورد مطالعه

۴-۱-سناریوهای شبیه‌سازی

همچنان که اشاره شد، برای ارزیابی مدل ارائه شده در این مقاله برای حل مساله OPSDG سیستم استاندارد ۳۳ باسه و سناریوهای زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۱- سناریوی λ1: فقط شاخص تلفات توان فعال در تابع بهینه‌سازی لحاظ می‌شود.

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

۲- سناریوی λ2: فقط شاخص ولتاژ در تابع بهینه‌سازی لحاظ می‌گردد.

۳- سناریوی λ3: هر دو شاخص ولتاژ و توان در تابع بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود و مساله OPSDG به‌صورت چند مساله بهینه‌سازی چند هدفه تعریف می‌شود.

۴- سناریوی λ4: سناریوی λ3 با حضور چهار منبع DG تکرار می‌شود (جهت اهداف مقایسه‌ای در سیستم ۳۳ باس) .

در سناریوهای بالا منابع DG با قابلیت تبادل مولفه‌های توان فعال و واکنشی و تحت شرایط مختلف به شرح زیر در مساله OPSDG وارد می‌شوند:

۱- حالت μ1: منبع DG با ضریب توان واحد

۲- حالت μ2: منبع DG با ضریب توان ۰.۸۵ که امکان تبادل توان فعال و واکنشی با شبکه را دارد.

۳- حالت μ3: دو منبع DG با ضرایب توان ۰.۸۵ که امکان تبادل توان واکنشی با شبکه را دارد و همچنین ۱ منبع که فقط توان فعال به شبکه تزریق می‌کند.

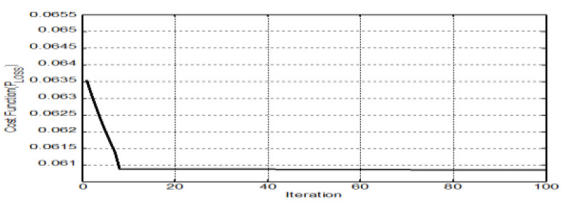
۴-۲- شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه استاندارد *IEEE*

۴-۲-۱- شبیه‌سازی سناریوی نخست (λ_1)

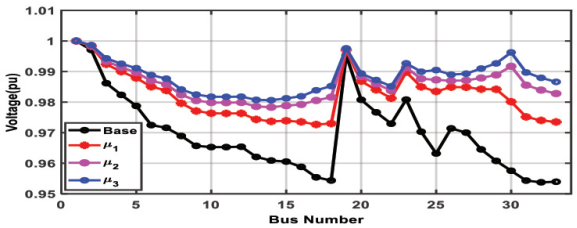
مساله OPSDG بر اساس تابع هزینه مبتنی بر تلفات و با به‌کارگیری الگوریتم تصحیح شده PSO حل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است. تغییرات تابع هزینه در شکل (۲) نمایش داده شده است. در شکل (۳) تغییرات ولتاژ در سناریو λ1 نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات جدول (۱) مقدار تلفات برای حالت μ3 حدود ۷۴/۳ درصد کاهش داشته است. همچنین در صورت استفاده از دو منبع DG نمایه ولتاژ (شکل (۲)) به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. در چنین شرایطی کمترین اندازه ولتاژ در باس شماره ۱۴ بوده و مقدار آن ۰/۹۸۱ پریونیت است.

جدول ۱: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی λ1

	μ1		μ2		μ3	
موقعیت نصب	۳۰		۳۰		۳۰	۱۲
ظرفیت (فعال-واکنشی)	۱/۹۸	۰	۱/۸	۰/۹۱	۲ ۱/۱۰۳	۰/۲۸
تلفات (قبل نصب)	۰/۱۲۴۷		۰/۱۲۴۷		۰/۱۲۴۷	
تلفات (بعد نصب)	۰/۰۶		۰/۰۳۵		۰/۰۳۲	
٪کاهش تلفات	۵۱/۸		۷۱/۹		۷۴/۳	
حداقل ولتاژ (قبل نصب)	۰/۹۵۳۷	۳۲	۰/۹۵۳۷	۳۲	۰/۹۵۳۷	۳۲
حداقل ولتاژ (بعد نصب)	۰/۹۷۳	۱۷	۰/۹۷۹	۱۴	۰/۹۸۱	۱۴



شکل ۲: تابع هزینه در سناریوی λ1 سیستم ۳۳ باس



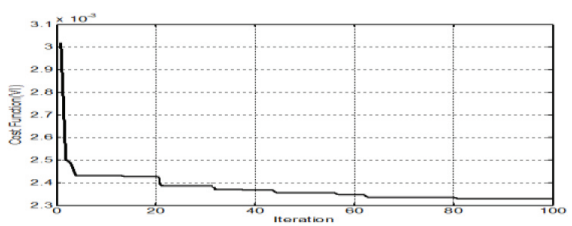
شکل۳: نمایه ولتاژ در سناریوی λ1 برای سیستم ۳۳ باس

۴-۲-۲-شبیه‌سازی سناریوی دوم (λ2)

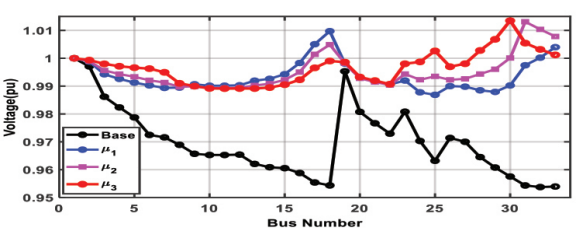
در این سناریو تابع هدف بر مبنای شاخص ولتاژ تعریف خواهد شد. در شکل (۴) تغییرات تابع هزینه نمایش داده شده است. شکل(۵) مقدار ولتاژ برای حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای این سناریو را نمایش می‌دهد. به‌علت در نظر گرفتن شاخص ولتاژ و همچنین فرض تبادل توان راکتیو DG با شبکه، ملاحظه می‌شود که کمینه ولتاژ در کلیه باس‌های سیستم قدرت بهبود پیدا کرده است (جدول (۲)). محدوده نوسان ولتاژ در باس‌ها در حدود است که مقداری قابل قبول است. در مقایسه با سناریوی λ2 مشخص است که تلفات توان اکتیو افزایش یافته است و منابع *DG* توان بیشتری به شبکه تزریق می‌کنند.

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی λ2

	μ_1		μ_2		μ_3	
موقعیت نصب	۱۸		۳۱		۳۰	۱۲
ظرفیت (فعال-واکنشی)	۲/۹۷۹	۰	۲/۵۶	۱/۲۳	۳/۰۵ ۱۶۵.۰	۱/۴۸
تلفات (قبل نصب)	۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱	
تلفات (بعد نصب)	۰/۱۰۳		۰/۰۶۴		۰/۰۴۲۲	
٪کاهش تلفات	۱۷/۴		۴۸/۶		۶۶/۳	
حداقل ولتاژ (قبل نصب)	۰/۹۵۳۷	۳۲	۰/۹۵۳۷	۳۲	۰/۹۵۳۷	۳۲
حداقل ولتاژ (بعد نصب)	۰/۹۸۷	۲۵	۰/۹۹	۱۱	۰/۹۸۹۲	۱۱



شکل ۴: تابع هزینه برای سناریوی λ2 برای سیستم ۳۳ باسه



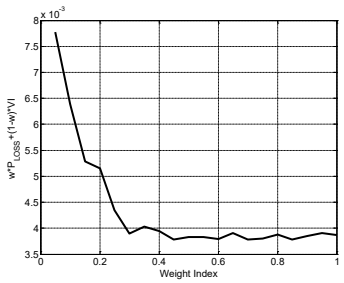
شکل۵: نمایه ولتاژ در سناریوی λ2 برای سیستم ۳۳ باسه

۴-۲-۳-شبیه‌سازی سناریوی سوم (λ3)

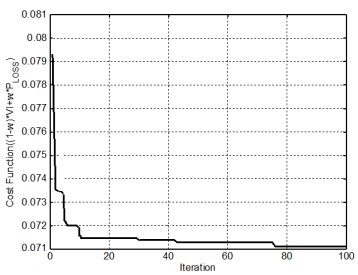
تابع هزینه برای حل مساله شامل شاخص ولتاژ و تلفات توان فعال است. با این حال وزن لحاظ شده برای هر یک از شاخص‌ها در

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

تابع هزینه مشخص نیست. جهت تعیین ضریب وزنی بهینه (w در رابطه (۱۸))، ابتدا تابع هزینه بر اساس مقادیر متفاوت w ترسیم می‌شود و سپس از نمودار حاصل مقدار تقریبی برای w استخراج می‌شود. شکل (۶) تغییرات تابع هزینه به ازای w را نشان می‌دهد. بازه مناسب برای انتخاب w بازه [۰/۳۵-۱] می‌باشد. در این مقاله برای ادامه شبیه‌سازی‌ها w برابر با ۰.۷ در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این سناریو در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین تغییرات ولتاژ در باس‌های مختلف سیستم قدرت نیز در شکل (۸) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی سوم کمترین تلفات (حدود ۷۶ درصد) ممکن برای سیستم حاصل می‌شود. علاوه بر این نمایه ولتاژ نیز به‌طور قابل توجهی بهبود می یابد.



شکل ۶: تابع هزینه بر اساس شاخص وزن انتخاب شده



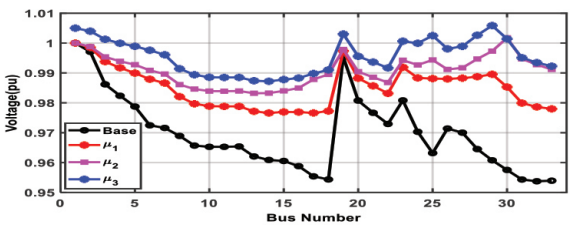
شکل ۷: تابع هزینه برای سناریوی λ3 برای سیستم ۳۳ باسه

۴-۳-سناریوی چهارم: به‌کارگیری چهار منبع DG

برای نمایش موثر بودن استراتژی مقاله نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در مقالات به‌ویژه مقاله پایه این مقاله از شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه به همراه چهار منبع DG استفاده می‌شود. نتایج این شبیه‌سازی در جدول (۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در روش مورد بحث این مقاله حداقل ولتاژ مطلوب‌تر و تلفات کمتری حاصل شده است.

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی λ3

	μ1		μ2		μ3	
موقعیت نصب	۲۹		۳۰		۲۹	۱۰
ظرفیت (فعال-واکنشی)	۲/۴۵	۰	۲/۰۹	۱/۵۸	۲/۵۳ ۰/۲۵۱	۱/۲۷
تلفات (قبل نصب)	۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱		۰/۱۲۴۷۱	
تلفات (بعد نصب)	۰/۰۵۹		۰/۰۲۹		۰۲۸۱/۰	
٪کاهش تلفات	۵۲/۱		۷۶/۷		۷۷/۵	
حداقل ولتاژ (قبل نصب)	۰/۶۵۳۷۶	۳۲	۰/۹۵۳۷۶	۳۲	۰/۹۵۳۷۶	۳۲
حداقل ولتاژ (بعد نصب)	۹۸/۰	۱۴	۹۸۴/۰	۱۳	۹۸۸/۰	۱۴



شکل۸: نمایه ولتاژ در سناریوی λ3 برای سیستم ۳۳ باسه

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله حل مساله OPSDG از طریق الگوریتم تکاملی بهبود یافته PSO و بر اساس تابع هزینه مبتنی بر شاخص‌های تلفات توان اکتیو و نمایه ولتاژ انجام شد. از آنجا که مساله تحت مطالعه غیرخطی و چند متغیره است، برای حل آن الگوریتم تکاملی PSO تصحیح شده به‌کار گرفته شد. الگوریتم تصحیح شده مجهز به دو عملگر ترکیب و جهش دینامیکی است که ضمن افزایش سرعت و دقت دستیابی به پاسخ‌های بهینه، از به دام افتادن ذرات در اکسترمم‌های محلی نیز جلوگیری می‌کند. نتایج شبیه‌سازی

جدول۴: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی λ4

روش	موقعیت و ظرفیت DG.1	موقعیت و ظرفیت DG.1	موقعیت و ظرفیت DG.1	موقعیت و ظرفیت DG.1	کمترین ولتاژ	کمترین تلفات
GA[40]	۳۰	۱۳	۶	۲۴	۰/۹۷۷۴	۰/۰۷۰۱
	۰/۷۳۸۲	۰/۸۵۷۱	۰/۶۴۲۹	۰/۸۵۷۱		
PSO[40]	۳۱	۱۵	۶	۲۵	۰/۹۶۹۶	۰/۰۷۱۳
	۰/۶۴۷۸	۰/۸۳۳۰	۰/۸۳۰۱	۰/۵۴۱۳		
GA/PSO [40]	۳۲	۱۴	۲۶	۲۴	۰/۹۷۰۳	۰/۰۶۸۲
	۰/۶۶۳۹	۰/۶۶۲۸	۰/۸۶۷۱	۱/۰۲۳۲		
IMOHS [41]	۳۱	۲۴	۱۴	۶	۰/۹۷۲۳	۰/۰۶۷۸
	۰/۷۳۱۲	۱/۰۱۱۷	۰/۶۶۷۲	۰/۹۳۶۹		
MOSH [42]	۳۲	۲۴	۷	۱۴	۰/۹۸۴۴	۰/۰۶۳۶
	۰/۸۵۹۶	۱/۰۷۰۷	۱/۱۶۰۶	۰/۷۳۶		
مقاله حاضر	۱۴	۲۶	۱۳	۶	۰/۹۹۱	۰/۰۶۰۱

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]

نشـان داد کـه جایابـی و تعییـن ظرفیت بهینـه منابع DG بـا توجه به ضریـب تـوان آنهـا و در نظـر گرفتن هر دو شـاخص ولتـاژ و تلفات در تابـع هزینـه می‌توانـد تلفـات سیسـتم را بطـور قابـل توجهـی کاهش داده و عـلاوه بـر ایـن نمایه ولتـاژ را بهبـود دهد.

۶-مراجع

[1] Subbaramaiah, K., and P. Sujatha. "Optimal DG unit placement in distribution networks by multi-objective whale optimization algorithm & its techno-economic analysis." Electric Power Systems Research 214 (2023): 108869.

[2] Gümüş, Talha Enes, Selcuk Emiroglu, and Mehmet Ali Yalcin. "Optimal DG allocation and sizing in distribution systems with Thevenin based impedance stability index." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 144 (2023): 108555.

[3] Rekha, Rekha, and Shankaralingappa Channappa Byalihal. "Optimal allocation of solar and wind distributed generation using particle swarm optimization technique." International Journal of Electrical and Computer Engineering 13, no. 1 (2023): 229.

[4] Swaminathan, Dhivya, and Arul Rajagopalan. "Multi-Objective Golden Flower Optimization Algorithm for Sustainable Reconfiguration of Power Distribution Network with Decentralized Generation." Axioms 12, no. 1 (2023): 70.

[5] Hamidan, Mohammad-Ali, and Farzaneh Borousan. "Optimal planning of distributed generation and battery energy storage systems simultaneously in distribution networks for loss reduction and reliability improvement." Journal of Energy Storage 46 (2022): 103844.

[6] García Vera, Yimy E., Rodolfo Dufo-López, and José L. Bernal-Agustín. "Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review." Applied Sciences 9, no. 18 (2019): 3854.

[7] Suresh, M. C. V., and J. Belwin Edward. "A hybrid algorithm based optimal placement of DG units for loss reduction in the distribution system." Applied Soft Computing 91 (2020): 106191.

[8] Dawoud, Samir M., Xiangning Lin, and Merfat I. Okba. "Optimal placement of different types of RDGs based on maximization of microgrid loadability." Journal of Cleaner Production (2017).

[9] Ghadi, M. Jabbari, Sahand Ghavidel, Amin Rajabi, Ali Azizivahed, Li Li, and Jiangfeng Zhang. "A review on economic and technical operation of active distribution systems." Renewable and Sustainable Energy Reviews 104 (2019): 38-53.

[10] Tanwar, Surender Singh, and D. K. Khatod. "Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system." Energy 127 (2017): 52-67.

[11] Wong, JunYing, ChiaKwang Tan, N. A. Rahim, and Rodney HG Tan. "A Communication-less adaptive protection scheme for Self-Healing distribution systems." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 148 (2023): 108992.

[12] Nageswari, D., N. Kalaiarasi, and G. Geethamahalakshmi. "Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Using Metaheuristic Algorithm." Comput. Syst. Sci. Eng. 41, no. 2 (2022): 493-509.

[13] Swaminathan, Dhivya, and Arul Rajagopalan. "Multi-Objective Golden Flower Optimization Algorithm for Sustainable Reconfiguration of Power Distribution Network with Decentralized Generation." Axioms 12, no. 1 (2023): 70.

[14] Imran, A. Mohamed, M. Kowsalya, and D. P. Kothari. "A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 63 (2014): 461-472.

[15] Qi, Qi, and Jianzhong Wu. "Increasing Distributed Generation Penetration Using Network Reconfiguration and Soft Open Points." Energy Procedia 105 (2017): 2169-2174.

[16] Muthukumar, K., and S. Jayalalitha. "Integrated approach of network reconfiguration with distributed generation and shunt capacitors placement for power loss minimization in radial distribution networks." Applied Soft Computing 52 (2017): 1262-1284.

[17] Gallego Pareja, Luis A., Jesús M. López-Lezama, and Oscar Gómez Carmona. "Optimal Feeder Reconfiguration and Placement of Voltage Regulators in Electrical Distribution Networks Using a Linear Mathematical Model." Sustainability 15, no. 1 (2023): 854.

[18] Fathi, Rahim, Behrouz Tousi, and Sadjad Galvani. "Allocation of renewable resources with radial distribution network reconfiguration using improved salp swarm algorithm." Applied Soft Computing 132 (2023): 109828.

[19] Reddy, VC Veera, and T. Gowri Manohar. "Ant Lion optimization algorithm for optimal sizing of renewable energy resources for loss reduction in distribution systems." Journal of Electrical Systems and Information Technology (2017).

[20] ChithraDevi, S. A., L. Lakshminarasimman, and R. Balamurugan. "Stud Krill herd Algorithm for multiple DG placement and sizing in a radial distribution system." Engineering Science and Technology, an International Journal 20.2 (2017): 748-759.

***

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران - شاخه خراسان

Khorasan Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers

همکاری علمی استادان گرامی و فرهیختگان ارجمند در داوری مقاله‌های نشریه علمی ترویجی عصر برق در سال ۱۴۰۱ که ثمره آن در غنای علمی و فنی مطالب منتشر شده بسیار موثر بوده است باعث خوشحالی و شایسته تقدیر است. امید است افتخار همراهی صاحب‌نظران و اندیشمندان گرامی باعث تداوم موفقیت‌ها در ادامه راه باشد.

با احترام و امتنان
شورای سردبیری

۱. دکتر حسین ابوترابی زارچی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دکتر ایمان احدی اخلاقی، دانشگاه سجاد
۳. دکتر محمدرضا اکبرزاده توتونچی، دانشگاه فردوسی مشهد
۴. دکتر حمیدرضا بخشی، دانشگاه شاهد
۵. دکتر بهشید بهکمال، دانشگاه فردوسی مشهد
۶. دکتر محسن پارسا مقدم، دانشگاه تربیت مدرس تهران
۷. دکتر ناصر پریز، دانشگاه فردوسی مشهد
۸. دکتر مهدی توکلی افشار، دانشگاه آلبرتا
۹. دکتر محمود جورابیان، دانشگاه شهید چمران اهواز
۱۰. دکتر سمیه حسن پور دربان، دانشگاه سجاد
۱۱. دکتر سید ابراهیم حسینی، دانشگاه فردوسی مشهد
۱۲. مهندس سعید خادمی، شرکت سامان انرژی
۱۳. دکتر محمدعلی خلیل زاده، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد
۱۴. دکتر حبیب رجبی مشهدی، دانشگاه فردوسی مشهد
۱۵. دکتر مصطفی رجبی مشهدی، شرکت مدیریت شبکه برق ایران
۱۶. دکتر احسان رحیمی نژاد، دانشگاه صنعتی قوچان
۱۷. مهندس زهره رضایی، دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد
۱۸. دکتر حمید رضا رضایی دهسرخ، دانشگاه سجاد
۱۹. دکتر سید مجتبی روحانی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۰. دکتر مریم زارع، دانشگاه صنعتی قوچان
۲۱. دکتر جواد ساده، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۲. مهندس تکتم شریفیان عطار، شرکت برق منطقه ای خراسان
۲۳. دکتر سید حمید ظهیری ممقانی، دانشگاه بیرجند
۲۴. دکتر غلامرضا عرب مارکده، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۵. دکتر مجید علومی بایگی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۶. دکتر مصطفی عیدیانی، موسسه غیرانتفاعی خراسان
۲۷. دکتر محسن قاینی، دانشگاه سجاد
۲۸. دکتر عباس قائمی بافقی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۹. دکتر علی کارساز، موسسه غیرانتفاعی خراسان
۳۰. دکتر سید محمد سعید ماجدی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳۱. دکتر خلیل مافی نژاد، دانشگاه سجاد
۳۲. دکتر هاشم مرتضوی، شرکت تولید نیروی برق خراسان
۳۳. دکتر حامد ملا احمدیان، موسسه غیرانتفاعی خراسان
۳۴. دکتر محمد منفرد، دانشگاه فردوسی مشهد
۳۵. دکتر منیره هوشمند، دانشگاه بین المللی امام رضا (ع)
۳۶. دکتر حمید یعقوبی، دانشگاه سمنان

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-11-27]