



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<sup>\*</sup>، 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

<sup>\*</sup> نویسنده مسنول

### 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 به کار گرفته شده در مبدل‌ها است، به صورت 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 DG‌ها 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<sup>\*</sup>, 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

<sup>\*</sup>Corresponding Author

## 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 optimally 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 particle 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

DG، جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG<sup>3</sup> در شبکه‌های توزیع غیر قابل اجتناب است، به طوری که 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 به کارگیری 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

به طور کلی 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 به عنوان 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<sup>۴</sup> برای شبکه‌های توزیع شامل منابع انرژی DG مناسب نباشند. از این رو پخش بار مبتنی بر تزریق جریان<sup>۵</sup> برای این سیستم‌ها پیشنهاد می‌شود. یکی از مزیت‌های CILF سازگار بودن آن با تجهیزات کنترلی در شبکه است. سه روش برای مدل‌سازی DG به صورت PQ در دسترس است:

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

### 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 به صورت شعاعی بوده و یا شبکه‌ای ضعیف هستند [۱-۳]. در نتیجه، تلفات خط و افت ولتاژ مرتبط با انتهای فیدرها، به دلیل نسبت بالای R به X سیستم‌های توزیع، قابل توجه است. علاوه بر این، شبکه‌های توزیع متمرکز بوده و به صورت یک طرفه 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 به وجود آمده است. تولید پراکنده به معنای استفاده از نیروگاه‌هایی با واحدهای تولیدی مقیاس کوچک و انعطاف‌پذیر است که به طور معمول در ساختار خود از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان 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 [۱۷-۱۵]. از این رو به منظور بهره بردن از بیشترین ویژگی‌های مثبت منابع

$$P_{load,i} = P_{load,i} - P_{DG,i} \quad (1)$$

**۲- ضریب توان ثابت:** این مدل معمولترین مدل سازی برای منابع DG در شبکه توزیع است. توان اکتیو منبع DG و تزریق جریان معادل از رابطه های (۲) و (۳) محاسبه می شود:

$$Q_{iDG} = P_{iDG} \tan(\cos^{-1}(PF_{iDG})) \quad (2)$$

$$I_{iDG} = I_{iDG}^r(V_{iDG}) + jI_{iDG}^i(V_{iDG}) = (P_{iDG} + j \frac{Q_{iDG}}{V_{iDG}})^* \quad (3)$$

**۳- توان راکتیو متغیر:** ژنراتورهای القایی در منابع DG به عنوان ژنراتورهای توان راکتیو متغیر در نظر گرفته می شوند. به عنوان مثال برای توربین های بادی، توان اکتیو را می توان از روی منحنی مشخصه توربین استخراج نمود و بر اساس رابطه زیر مقدار توان راکتیو تقاضا شده را محاسبه کرد:

$$Q'_{iDG} = -Q_0 - Q_1 P_{iDG} - Q_2 P_{iDG}^2 \quad (4)$$

که در این رابطه  $Q'_{iDG}$  توان راکتیو مصرفی توسط توربین بادی و مقادیر  $Q_0, Q_1, Q_2$  از طریق تقریب به دست می آیند. در این مقاله از روش های بالا برای مدل سازی منابع DG استفاده خواهد شد. برای مدل سازی بار نیز می توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$P_i = P_{0i} \times V_i^\alpha, Q_i = Q_{0i} \times V_i^\beta \quad (5)$$

که در این رابطه  $P_i$  و  $Q_i$  توان های اکتیو و راکتیو در باس  $i$ ام،  $P_{0i}$  و  $Q_{0i}$  توان اکتیو و راکتیو در باس  $V_i$  ولتاژ در باس  $i$  و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ثابت هستند (برای حالت توان ثابت این دو مولفه صفر در نظر گرفته می شوند).

#### ۲-۲- تعریف تابع هدف برای مساله

یکی از مهمترین اهداف از حل مساله جابجایی و تعیین سائز بهینه منابع DG در شبکه قدرت کاهش تلفات کل توان در سیستم می باشد. این مهم را می توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\text{Minimize } S_{loss} = \sqrt{P_{loss}^2 + Q_{loss}^2} \quad (6)$$

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 می تواند بر تثبیت پروفیل ولتاژ به طور کامل موثر باشد. کل تلفات توان اکتیو در سیستم توزیع با رابطه زیر داده می شود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i, Q_{loss} = \sum_{i=1}^n I_i^2 X_i \quad (7)$$

که در این رابطه  $n$  شماره خطوط در باس  $i$ ،  $I_i$  جریان خط در باس  $R_i$  مقاومت خط و  $X_i$  راکتانس خط هستند. تلفات کل توان سیستم نیز بر اساس تلفات توان اکتیو و راکتیو فرمول بندی می شوند. می توان مقدار دقیق تلفات توان های فعال و واکنشی را با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) محاسبه نمود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [a_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + b_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (8)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [c_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + d_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (9)$$

که در رابطه بالا ضرایب به صورت زیر تعریف می شوند:

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), b_{ij} = \frac{R_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (10)$$

$$c_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j), d_{ij} = \frac{X_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (11)$$

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  $i$ ،  $Q_{i(j)}$  سیلان توان واکنشی در باس  $i$ ،  $R_{ij}$  مقاومت بین باس های  $i$  و  $j$ ،  $X_{ij}$  راکتانس بین باس های  $i$  و  $j$ ،  $V_{i(j)}$  ولتاژ باس  $i$  و  $j$  و  $\delta_{ij}$  زاویه ولتاژ باس  $i$  هستند. امپدانس بین باس  $i$  و  $j$  به صورت  $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$  نمایش داده می شود. مدل معمول برای تابع هدف به صورت زیر است:

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (12)$$

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 نانسوای حل شود:

$$g(x) = g_1(x), g_2(x), \dots, g_k(x) = 0 \quad (13)$$

$$h(x) = h_1(x), h_2(x), \dots, h_k(x) \geq 0$$

استراتژی معمول برای جابجایی 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 به صورت 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) به صورت زیر بیان می شود (که در آن  $P_{L(base)}$  تلفات توان فعال قبل از نصب DG،  $P_{L(dg)}$  تلفات توان فعال بعد از نصب DG می باشد):

$$f_1 = PLRI = \frac{P_{L(base)} - P_{L(dg)}}{P_{L(base)}} \quad (14)$$

در یک سیستم قدرت انتظار می رود تا ولتاژ در هر باس در محدوده مجاز قرار گیرد. شاخص بهبود نمایه ولتاژ (Profile Voltage) به تعیین سائز موقعیت بهینه DG کمک می کند تا کمینه تغییرات ولتاژ از مقدار مرجع در باس های مختلف سیستم را شاهد باشیم. این شاخص در این مقاله به صورت زیر تعریف می شود (یک مقدار عددی ثابت است):

$$f_2 = VPII = \frac{1}{\lambda + \max_{i=1}^n (|1 - V_{DG}|)} \quad (15)$$

می توان تابع هزینه چند هدفه برای تعیین موقعیت و ظرفیت بهینه DG را به صورت زیر تعریف نمود:

$$MOF = w_1 PLRI + w_2 VPII \quad (16)$$

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

$$|w_1| + |w_2| = 1 \quad (17)$$

این وزن ها برای اهمیت دادن به هر یک از این شاخص ها در تابع هزینه برآیند بوده و بر اساس نظر طراح می تواند متغیر باشد. همچنین، هنگام حل مساله بهینه سازی باید شرایط تعادل توان نیز برقرار باشد:

$$P_i = P_{DG_i} - P_{D_i}, Q_i = Q_{DG_i} - Q_{D_i} \quad (18)$$

که در این رابطه  $P_i$  و  $Q_i$  توان فعال و واکنشی در باس  $i$ ،  $P_{DG_i}$  و  $Q_{DG_i}$  توان های فعال و واکنشی مبادله ای توسط DG در باس  $i$ ،  $P_{D_i}$  و  $Q_{D_i}$  تقاضای توان فعال و واکنشی در باس  $i$  می باشند. رابطه  $P_i$  را می توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$P_i = -\frac{1}{a_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [a_{ij} P_j - b_{ij} Q_j] \quad (19)$$

معادله بالا را می توان برای مساله تعیین سائز موقعیت بهینه DG

به صورت زیر نوشت:

$$P_{DGi} = P_{Di} + \frac{1}{a_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [a_{ij} P_j - b_{ij} Q_j] \quad (20)$$

در نتیجه برای توان واکنشی:

$$Q_{DGi} = Q_{Di} + \frac{1}{c_{ij}} \sum_{j=1}^n \sum_{j \neq i} [c_{ij} Q_j - b_{ij} P_j] \quad (21)$$

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

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (22)$$

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:

$$P_{DG \min} \leq P_{DGi} \leq P_{DG \max} \\ Q_{DG \min} \leq Q_{DGi} \leq Q_{DG \max} \quad (23)$$

### 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  $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})$  نمایش داده می‌شود. هر ذره موقعیت بهترین حالت خود در فضای D بعدی را حفظ می‌کند. مقدار تابع هزینه برای هر ذره به صورت  $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$  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 به روز می‌کند. سرعت ذره i ام به صورت  $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})$  نمایش داده می‌شود.

موقعیت ذره i ام در تکرار k ام با رابطه (24) محاسبه خواهد شد.

$$V_{id}^{k+1} = w \times V_{id}^k + c_1 \times \text{rand} \times (P_{id} - X_{id}^k) + c_2 \times \text{ran} \times (P_{gd} - X_{id}^k) \quad (24)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^k \quad (25)$$

که در این رابطه  $P_{gd}$  و  $P_{id}$  به ترتیب موقعیت‌های بهینه مطلوب و نسبی هستند. در الگوریتم PSO، هر نوع تغییر در ذرات بر مبنای سرعت و جهت ذرات موفق انجام می‌شود که لزوماً این ذرات پاسخ‌های بهینه ممکن برای مساله محسوب نمی‌شوند. برای اجتناب از به دام افتادن الگوریتم در اکسترم‌های 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 اکسترم‌های 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  $P_{gd}$  ترکیب خواهد شد. ترکیب بر اساس رابطه زیر انجام خواهد شد ( $X_{newk}$  اشاره به ذره جدید دارد که جایگزین ذره انتخابی  $X_{randk}$  در مرحله k ام می‌شود و  $\theta$  عدد تصادفی بین صفر و یک است):

$$\theta \times P_{gd}^k + (1 - \theta) X_{rand}^k = X_{new}^k \quad (26)$$

۲- جهش دینامیکی (Mutation Dynamic): می‌تواند ضمن گسترش فضای جست و جو باعث جلوگیری از گیر افتادن جمعیت ذرات در اکسترم‌های محلی گردد. تعریف جهش دینامیکی بصورت زیر انجام می‌شود ( $X_{max}$  و  $X_{min}$  به بیشترین و کمترین مقدار ممکن اشاره دارند و  $\mu$  پارامتری ثابت است):

$$X_{rand}^{k+1} = \begin{cases} X_{rand}^k + (X_{max} - X_{rand}^k) \times \text{rand} \times \exp\left(\frac{1}{1-\mu}\right) & \text{rand} > 0.5 \\ X_{rand}^k - (X_{rand}^k - X_{min}) \times \text{rand} \times \exp\left(\frac{1}{1-\mu}\right) & \text{rand} < 0.5 \end{cases} \quad (27)$$

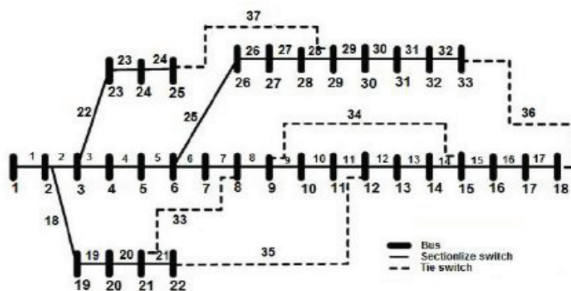
این رابطه نوسان ذرات حول مقادیر بهینه احتمالی را باعث خواهد شد.

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

- ۱- مقدار دهی اولیه موقعیت و سرعت ذرات
- ۲- محاسبه تابع هزینه برای هر یک ذرات و تعیین  $P_{gd}$  و  $P_{id}$
- ۳- به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات بر اساس رابطه (25)
- ۴- اعمال عملگرهای جهش و ترکیب (رابطه (26) و (27))
- 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.

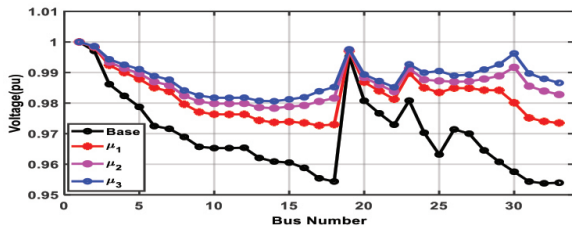


شکل ۱: سیستم قدرت مورد مطالعه

#### 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 ۱: فقط شاخص تلفات توان فعال در تابع بهینه‌سازی لحاظ می‌شود.



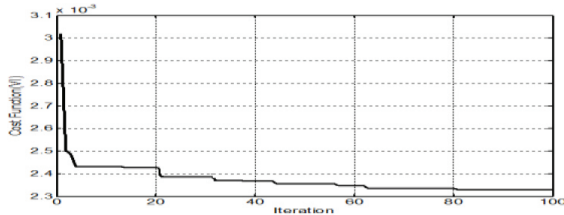
شکل ۳: نمایه ولتاژ در سناریوی λ1 برای سیستم ۳۳ باس

#### ۴-۲-۲- شبیه‌سازی سناریوی دوم (λ2)

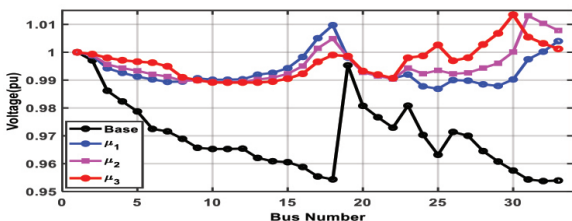
در این سناریو تابع هدف بر مبنای شاخص ولتاژ تعریف خواهد شد. در شکل (۴) تغییرات تابع هزینه نمایش داده شده است. شکل (۵) مقدار ولتاژ برای حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای این سناریو را نمایش می‌دهد. به‌علت در نظر گرفتن شاخص ولتاژ و همچنین فرض تبادل توان راکتیو DG با شبکه، ملاحظه می‌شود که کمینه ولتاژ 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 باس برای سناریوی λ2

|                       | μ <sub>1</sub> |    | μ <sub>2</sub> |      | μ <sub>3</sub> |      |
|-----------------------|----------------|----|----------------|------|----------------|------|
| موقعیت نصب            | ۱۸             |    | ۳۱             |      | ۳۰             | ۱۲   |
| ظرفیت (فعال-واکنشی)   | ۲/۹۷۹          | ۰  | ۲/۵۶           | ۱/۲۳ | ۳/۰۵<br>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 باس



شکل ۵: نمایه ولتاژ در سناریوی λ2 برای سیستم ۳۳ باس

#### 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

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 OPSPDG 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 OPSPDG 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.

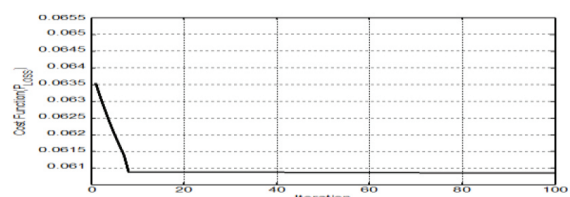
۴-۲- شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باس استاندارد IEEE

#### ۴-۱-۲- شبیه‌سازی سناریوی نخست (λ1)

مساله OPSPDG 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 باس برای سناریوی λ1

|                       | μ1     |    | μ2     |      | μ3         |      |
|-----------------------|--------|----|--------|------|------------|------|
| موقعیت نصب            | ۳۰     |    | ۳۰     |      | ۳۰         | ۱۲   |
| ظرفیت (فعال-واکنشی)   | ۱/۹۸   | ۰  | ۱/۸    | ۰/۹۱ | ۲<br>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   |

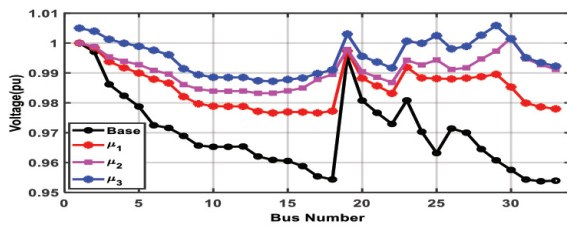


شکل ۲: تابع هزینه در سناریوی λ1 برای سیستم ۳۳ باس

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 ۳

|                       | $\mu 1$    |    | $\mu 2$ |      | $\mu 3$ |      |
|-----------------------|------------|----|---------|------|---------|------|
|                       | موقعیت نصب | ۲۹ | ۳۰      | ۲۹   | ۱۰      | ۲۹   |
| ظرفیت (فعال-واکنشی)   | ۲/۴۵       | ۰  | ۲/۰۹    | ۱/۵۸ | ۲/۵۳    | ۱/۲۷ |
| تلفات (قبل نصب)       | ۰/۱۲۴۷۱    |    | ۰/۱۲۴۷۱ |      | ۰/۱۲۴۷۱ |      |
| تلفات (بعد نصب)       | ۰/۰۵۹      |    | ۰/۰۲۹   |      | ۰/۰۲۸۱۰ |      |
| %کاهش تلفات           | ۵۲/۱       |    | ۷۶/۷    |      | ۷۷/۵    |      |
| حداقل ولتاژ (قبل نصب) | ۰/۹۵۳۷۶    | ۳۲ | ۰/۹۵۳۷۶ | ۳۲   | ۰/۹۵۳۷۶ | ۳۲   |
| حداقل ولتاژ (بعد نصب) | ۹۸/۰       | ۱۴ | ۹۸۴/۰   | ۱۳   | ۹۸۸/۰   | ۱۴   |

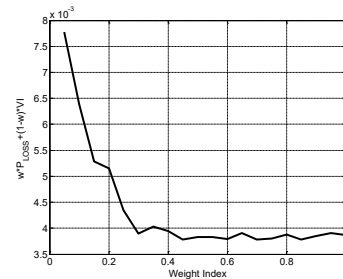


شکل ۸: نمایه ولتاژ در سناریوی ۳ برای سیستم ۳۳ باسه

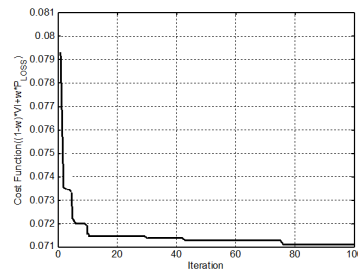
### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله حل مساله OPDGD 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 به کار 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

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 می‌یابد.



شکل ۶: تابع هزینه بر اساس شاخص وزن انتخاب شده



شکل ۷: تابع هزینه برای سناریوی ۳ برای سیستم ۳۳ باسه

### ۴-۳- سناریوی چهارم: به کارگیری چهار منبع DG

برای نمایش موثر بودن استراتژی مقاله نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در مقالات به‌ویژه مقاله پایه این مقاله از شبیه‌سازی

جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی سیستم ۳۳ باسه برای سناریوی ۴

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

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 پریرز، دانشگاه فردوسی مشهد
۸. دکتر مهدی توکلی افشار، دانشگاه آبرتا
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 دهرسرخ، 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 مققانی، دانشگاه بیرجند
۲۴. دکتر غلامرضا عرب مارکده، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۵. دکتر مجید علومی بایگی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲۶. دکتر مصطفی عیدیان، 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

\*\*\*

نشان داد که جایابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع DG با توجه به ضریب توان آنها و در نظر گرفتن هر دو شاخص ولتاژ و تلفات در تابع هزینه می‌تواند تلفات سیستم را بطور قابل توجهی کاهش داده و علاوه بر این نمایه ولتاژ را بهبود 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-Aguştín. "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.

\*\*\*