جایابی و تعیین اندازه بهینه و چند هدفه مولدهای انرژی تجدید پذیر در یک شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل بار

مهدی پرویزی مساعد[۱] فرید فرمانی[۲] امجد انوری مقدم[۳] اشکان رحیمی‌کیان[۴] حسن منصف[۵]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
m.parvizimosaed@ut.ac.ir
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
f.farmani@ut.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
a.anvari@ut.ac.ir
۴- دانشیار، دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
arkian@ut.ac.ir
۵- دانشیار، دانشکده مهندسی برق وکامپیوتر، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
hmonsef@ut.ac.ir

چکیده: افزایش چشمگیر میزان سرمایه‌گذاری در بهره‌گیری موثرتر از مولدهای تجدیدپذیر، مهندسان و محققان را به طراحی مدل‌هایی برای استفاده بهینه و کارآمد از این منابع سوق داده است. به همین منظور، جایابی و اندازه‌یابی بهینه‌ی مولدهای الکتریکی تجدیدپذیر از آنجایی که توانایی کاهش تلفات، هزینه‌های بهره برداری و انحراف ولتاژ را دارا می‌باشند، به عنوان دو پارامتر اساسی در طراحی اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند. در این مقاله یک بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم هوش جمعی مبتنی بر روش فازی، برای تعیین اندازه و مکان مولدهای الکتریکی تجدیدپذیر معرفی شده است. این الگوریتم بر روی‌یک سیستم تست ۷۰ باسه با در نظر گرفتن ترکیبی از مولدهای تجدیدپذیر به منظور کمینه کردن اهداف اقتصادی، آلایندگی و تلفات سیستم توزیع انجام شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند که اندازه و چینش مناسب تحت سناریوهای مختلف انتخاب مولدها به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه، آلودگی و تلفات سیستم توزیع را کاهش می‌دهند.

کلمات کلیدی: مولد تجدید پذیر، بهینه‌سازی چند هدفه،جایابی و اندازه‌یابی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۰۶/۱۲
تاریخ پذیرش مشروط: ۱۳۹۳/۹/۱۱
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۲/۱۲/۶
نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی پرویزی مساعد
نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – تهران – خیابان کارگر شمالی – پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران – دانشکده‌ی مهندسی برق وکامپیوتر- آزمایشگاه شبکه‌های هوشمند

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت، میزان مصرف انرژی و در نتیجه تولید گازهای گلخانه‌ای به صورت چشمگیری افزایش یافته است. به همین منظور، محققان به دنبال راهکارهایی مناسب برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پاسخ به نیاز مصرف‌کنندگان می‌باشند. افزایش بازده تولید و کاهش تلفات، استفاده از تولیدات پراکنده خصوصاً منابع تجدیدپذیر مانند انرژی بادی و خورشیدی از جمله راهکارهای کاهش آلایندگی می‌باشند. با این حال، استفاده از مولدهای تجدیدپذیر در شبکه با وجود مزایایی مانند مشارکت در بازار رزرو، بهبود سطح ولتاژ و کاهش تلفات توان، مشکلاتی مانند اعوجاج هارمونیک و نگرانی‌هایی مربوط به پایداری را به همراه خواهد داشت[۲،۱]. شناخت عواملی مانند محل قرارگیری، نوع تکنولوژی و میزان ظرفیت، برای استفاده مناسب و کارآمد این منابع اهمیت ویژه‌ای دارد. از طرفی جایابی و اندازه‌یابی بهینه‌ی مولدهای تجدیدپذیر به منظور کمینه یا بیشینه کردن توابع هدف مختلف تحت قیود مشخص انجام می‌گیرد[۳-۷]. معمولاً این توابع هدف تناسب‌ناپذیر و اغلب در تضاد با یکدیگر هستند. به همین دلیل، بهینه‌سازی چندهدفه با توابع هدف متناقض منجر به ایجاد یک مجموعه جواب به جای یک جواب بهینه می‌شود. جایابی و اندازه‌یابی بهینه در مقالات مختلف با اهداف متفاوتی انجام شده است به طوری که در مراجع [۹،۸] با هدف کمینه کردن تابع تلفات اکتیو فیدرها، در [۱۰،۱۱] با هدف کاهش هزینه‌های کلی تولید شبکه و در [۱۲،۱۳] به منظور بهبود پروفیل ولتاژ انجام شده است. در [۱۴] روشی برای تولید ترکیبی مولدها در چندین طرح سیستم توزیع با در نظر گرفتن افزایش سالانه‌ی بارهای شبکه بیان شده است. برای جامعیت مدل‌سازی یک الگوریتم بهینه-سازی چند هدفه با ترکیبی از مولدهای تجدیدپذیر درنظرگرفته شده است. توابع هدف مورد مطالعه در این مقاله شامل کمینه کردن هزینه‌های کلی سرمایه‌گذاری و تولید شبکه، میزان انتشار آلاینده‌ها و تلفات توان حقیقی سیستم توزیع می‌باشد.

روش‌های گوناگون برای حل مسئله‌ی بهینه سازی بکار گرفته شده‌اند، به طوری که در مراجع [۱۵،۱۶] الگوریتم ژنتیک و در مرجع [۱۷] الگوریتم دینامیکی جستجوی مورچگان استفاده شده است. یکی از الگوریتم‌های تکاملی که اخیراً به-کار رفته و پتانسیل بالا و چشم‌انداز مناسبی را برای حل مسائل بهینه‌سازی گوناگون از خود نشان داده است، الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی و یا اجتماع ذرات (PSO) است. الگوریتم PSO دقت و سرعت محاسبه‌ی قابل ملاحظه‌ای در حل مسائل بهینه سازی دارد. فواید الگوریتم بهینه سازی PSO در مراجع [۱۹،۱۸] ارائه شده‌اند. در این مقاله، یک بهینه‌سازی چند هدفه برای جایابی و اندازه‌یابی مولدهای تجدیدپذیر با استفاده از الگوریتم توسعه‌یافته‌ی PSO به‌کاررفته است. به منظور جلوگیری از همگرایی به بهینه محلی، از یک مکانیزم تطبیقی فازی برای افزایش دقت الگوریتم و اصلاح پارامترهای آن در موقع نیاز استفاده شده است.

این مقاله در ۵ بخش تنظیم شده است که در قسمت اول فرمول‌بندی توابع هدف با در نظر گرفتن قیود فنی و زیست-محیطی موجود توضیح داده می‌شود. در قسمت دوم الگوریتم PSO و بهینه‌سازی چند هدفه شرح داده می‌شود. سپس در قسمت سوم یک شبکه‌ی نمونه ارائه می‌گردد. در قسمت چهارم توابع هدف به دو صورت بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه مورد ارزیابی قرار می گیرند و نتایج جایابی و اندازه‌یابی ترکیب های مختلف مولدهای تجدیدپذیر نمایش داده می‌شود.

۲- فرمول بندی مسئله

تعیین مکان و اندازه‌ی بهینه‌ی مولدهای تولید پراکنده به منظور اهداف مختلفی انجام می‌گیرد. از جمله این اهداف اقتصادی، آلایندگی و تلفات سیستم توزیع می باشد که در این بخش مدل-سازی می شوند.

۲-۱- کمینه کردن هزینه

هزینه‌ی هر مولد به دو قسمت متغیر و ثابت تقسیم می‌شود. هزینه‌ی ثابت شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه ی متغیر تابعی از هزینه‌ی سوخت، و هزینه‌ی نگهداری می‌باشد [۲۰].

$$C(P) = a + b \times P \qquad (۱)$$

که در آن a و b عبارتند از:

$$a = \frac{CapitalCost(\$ / kW) \times Capacity(kW)}{T_a \times LF} \times Gr_{cap} \qquad (۲)$$

$$b = Gr_{fuel} FuelCost(\$ / kWh) \qquad (۳)$$

$$+Gr_{O\&M} O\&M\cos t(\$ / kWh)$$

که:

$$Gr_{cap} = \frac{r_C(1+r_C{}^n)}{(1+r_C)^n - 1} \qquad (۴)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

$$Gr_{fuel} = \frac{r_f(1+r_f{}^n)}{(1+r_f)^n - 1} \quad (۵)$$

$$Gr_{O\&M} = \frac{r_o(1+r_o{}^n)}{(1+r_o)^n - 1} \quad (۶)$$

LF ضریب توان، r_c، r_f و r_o به ترتیب نرخ سالانه‌ی سود ناشی از استهلاک سرمایه، نرخ قیمت سوخت و نرخ تغییرات هزینه تعمیر و نگه‌داری می‌باشد. n عمر مفید، T_a مدت استفاده و $O\&M\ \ cost$ هزینه‌ی نگهداری و عملکرد است. کمینه کردن تابع هزینه می‌تواند به‌صورت زیر مدل شود:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{N_i} C_i(P_i) + C(P_{grid}) \quad (۷)$$
$$F_1(x) = \min\left[f_1(x)\right]$$

که P_i توان تولید شده توسط مولدهای تجدیدپذیر و P_{grid} میزان توان مبادله‌ای با شبکه بالادست می باشد. N_i تعداد مولدهای تجدیدپذیر می‌باشد. x برداری است که مکان و توان مولدهای تجدیدپذیر را شامل می‌شود و $f_1(x)$ تابع هدف اولیه می‌باشد که باید کمینه شود.

۲-۲- کمینه کردن تلفات توان

تلفات سیستم توزیع به‌عنوان تابع هدف دوم برای جایابی و اندازه‌یابی مولدها در نظر گرفته شده است. کاهش تلفات توان حقیقی فیدرهای توزیع به‌عنوان هدفی مهم در به‌کارگیری مولدهای تجدید پذیر به شمار می‌رود. کمینه‌کردن تلفات توان حقیقی فیدرها در طول یک دوره‌ی مطالعه‌ی N_d ساله می‌تواند همانند زیر محاسبه شود:

$$f_2(x) = \sum_{t=1}^{N_d}\sum_{i=1}^{N_{br}}(R_i \times |I_i|^2 \times \Delta t) \quad (۸)$$
$$F_2(x) = \min(f_2(x))$$

که R_i و I_i، به ترتیب مقاومت و جریان شاخه‌ی iام می‌باشند. N_{br} تعداد شاخه‌ها است، Δt بازه‌ی زمانی است که در این مقاله برابر با یک سال است و N_d تعداد سالهای ارزیابی تلفات می باشد[۱۸].

۲-۳- کمینه کردن آلاینده‌ها

تابع آلایندگی شامل آلاینده‌هایی همچون SO_x و NO_x می‌باشد که به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$E_t = \sum_{d=1}^{N_d}\left(\sum_{i=1}^{N_i} E_i(P_i) + E_{grid}\right)\Delta t$$
$$= \sum_{d=1}^{N_d}\left(\sum_{i=1}^{N_i}(\alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i + \xi_i \exp(9\lambda_i P_i)) + E_{grid}\right)\Delta t \quad (۹)$$
$$F_3(x) = \min(f_3(x))$$

که α_i، β_i، γ_i، ξ_i و λ_i ضرایب آلایندگی iامین مولد هستند، E_{grid} میزان آلایندگی ناشی از تولید شبکه می‌باشد.$f_3(x)$ سومین تابع هدفی است که باید مینیمم شود.

۲-۴- قیود

توابع هدف معمولاً توسط قیود گوناگون محدود می‌شوند که این قیود می‌توانند به‌صورت زیر بیان شوند:

۲-۴-۱- قیود ولتاژ

ولتاژ باس‌های شبکه باید همواره در محدوده مجاز قرار بگیرند:

$$V_{\min} \le |V_k| \le V_{\max} \quad (۱۰)$$

که در آن V_{min} و V_{max}، به ترتیب حدود بالا و پایین ولتاژ باس‌ها می‌باشند. همچنین $|V_k|$ دامنه‌ی ولتاژ در باس k است.

۲-۴-۲- تعداد مولدهای تجدید پذیر انرژی

درواقع، اگر همه‌ی بارها توسط ژنراتورهای محلی‌شان تأمین شوند، به مانند شرایط ایده‌آل، تلفات در سیستم می‌تواند به کلی حذف شود. البته این موضوع تقریباً غیر ممکن است چرا که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بسیار زیاد می‌شود. بنابراین ما به‌کارگیری یک تابع هدف برای کاهش تلفات با تعداد مشخصی مولد را ترجیح می دهیم.

$$n_{DG} \le N_{DG} \quad (۱۱)$$

که در آن n_{DG} و N_{DG} به ترتیب تعداد مولدهای تجدیدپذیر و ماکزیمم تعداد مولدهای قابل نصب می باشند.

۲-۴-۳- اندازه‌ی مولد

بسته به بیشینه‌ی سرمایه‌گذاری ممکن مولدها ، اندازه‌ی کلی مولدها می‌تواند با رابطه‌ی زیر بیان شود:

$$\sum_{K=1}^{n_{REG}} KW_{REG}^{K} \le \eta P_{Load} \quad (۱۲)$$

که درآن KW_{REG}^{K} ظرفیت Kامین مولد و P_{load} توان کلی باراست. همچنین، η ثابتی به‌صورت $0<\eta<1$ می باشد.

۳- معرفی الگوریتم پیشنهادی هوش جمعی مبتنی بر روش فازی

به‌طورکلی بهینه‌سازیPSO روشی است مبتنی بر یک ساختار اجتماعی و تکراری با تأکید بر عمل مشارکت که نسبتاً تصادفی و بدون حق انتخاب می‌باشد. در این ساختار ذرات سه گونه جابه-

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

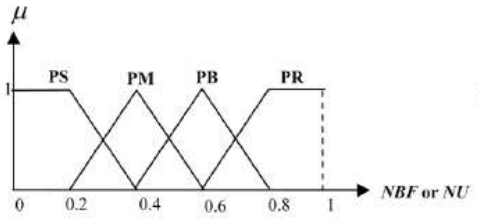
جایی به یک نقطه ممکن را دارند که به صورت حرکت بر اساس سرعت مناسب خود ذره، حرکت به سمت بهترین عملکرد خودی و نهایتاً حرکت به سمت عملکرد بهترین ذره خبردهنده مدل می‌شوند.

به طور خلاصه می‌توان گفت که الگوریتم PSO در آغاز فرایند حل مسئله، توسط یک گروه تصادفی از ذرات مقدار دهی اولیه می‌شود و در مسیر رسیدن به نقطه مطلوب، نسل قبل ذرات را اصلاح و به هنگام می‌کند. به عبارتی در هر مرحله از تکرار هر ذره به کمک دو مقدار بهترین بازسازی می‌گردد. اولین بهترین، بهترین محلی است که تاکنون خود ذره به آن دست یافته است (P_{best}) و دومین بهترین، در حقیقت بهترین راه‌حل موجود در میان سایر جواب‌هاست که توسط تابع بهینه‌ساز شناسایی می‌شود و به بهترین حل سراسری (g_{best}) معروف است. پس از شناسایی دو مقدار بهترین تمامی ذرات سرعت و موقعیت قبلی خود را متناظر با مقادیر بدست آمده و مطابق معادلات (۱۳) و (۱۴) به‌روزرسانی می‌کنند:

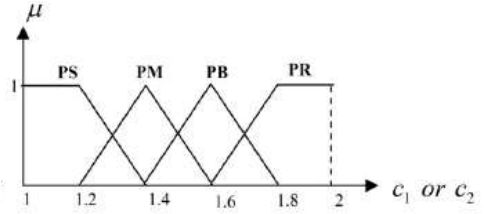
$$\vec{v}_i^{t+1} = \omega.\vec{v}_i^t + C_1 \times rand(.) \times (P_{best,i}{}^t - \vec{x}_i^t) + C_2 \times rand(.) \times (g_{best,i}{}^t - \vec{x}_i^t) \quad (۱۳)$$

$$\vec{x}_i^{t+1} = \vec{x}_i^t + \vec{v}_i^{t+1} \quad (۱۴)$$

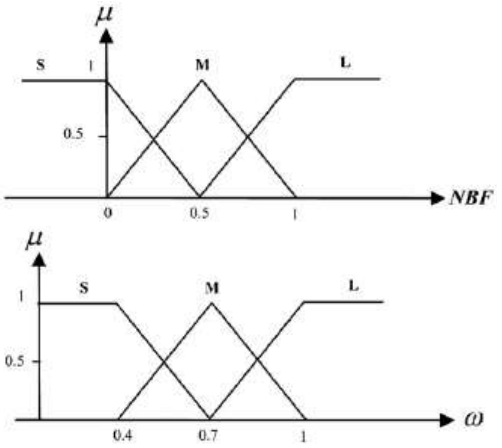
که $\vec{v}_i^{t+1}$ و $\vec{x}_i^{t+1}$ به ترتیب نشانگر سرعت و موقعیت ذره iام در تکرار t+1 می‌باشد، rand(.) یک عدد تصادفی در بازه (۱و۰) است، C_1 و C_2 پارامترهای یادگیری و ω ضریب وزنی یا اینرسی ذره می‌باشد. باید توجه داشت سرعت هر یک از ذرات در هر بُعد به یک مقدار بیشینه ($v_{\max}$) محدود می‌گردد و چنانچه مجموع شتاب‌های یک ذره سبب شود سرعت آن از حد مجاز فراتر رود آن‌گاه باید در مقدار بیشینه خود تثبیت گردد[۱۸]. در ساختار الگوریتم PSO استاندارد نتایج با تعداد جمعیت و اندازه swarm تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تعداد کم‌جمعیت‌ها باعث می‌شود که الگوریتم در مینیمم محلی گرفتار شود و اگر تعداد جمعیت‌ها زیاد باشد سرعت الگوریتم کاهش می‌یابد. از طرفی از رابطه (۱۳) مشاهده می‌شود که عملکرد PSO استاندارد به شدت وابسته به پارامترهای یادگیری و ضریب وزنی می‌باشد. پارامتر یادگیری C_1 در واقع میزان توانایی یک ذره برای جستجو بر مبنای بهترین یافته خودی را نشان می‌دهد حال آن‌که C_2 به عمل ذرات بر مبنای بهترین عملکرد موجود در جمع اشاره دارد. از این‌رو انتخاب مقادیر بزرگتر برای C_1 نسبت به C_2 بها دادن بیشتر به عمل خودی ذره است و این‌که هر عضو برای حرکت در فضای مسئله بهترین رفتار خود را نسبت به بهترین عملکرد جمع ملاک قرار می‌دهد. به همین منوال مقادیر مختلف فاکتور وزنیω، کنترل میدان جستجو و کاهش اثر سرعت بیشینه را بر عهده دارد به‌طوری‌که انتخاب وزن‌های بزرگتر قابلیت جستجوی سراسری را افزایش می‌دهد و ضرایب وزنی کوچکتر امکان جستجوی محلی و همگرایی بهتر را نتیجه می‌دهد. در این مقاله برای حل مشکل از یک روش تطبیقی فازی برای اصلاح ضرایب مذکور در مواقع نیاز استفاده شده است و در این راستا دو تابع عضویت فازی پیشنهاد شده است. یک تابع عضویت مطابق شکل (۱) و (۲) برای تنظیم پارامترهای یادگیری (C_1 و C_2) با ورودی‌های بهترین نقطه سراسری (BF) و تعداد نسل برای نقطه بهینه غیرمتغیر(NU) و دیگری مطابق شکل (۳) برای تنظیم ضریب اصلاح وزنی ($\Delta\omega$) با ورودی‌های BF و ωدر نظر گرفته می‌شود.



شکل(۱):تابع عضویت ورودی برای تنظیم پارامترهای یادگیری

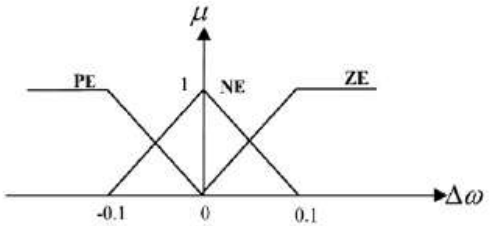


شکل(۲): تابع عضویت خروجی برای تنظیم پارامترهای یادگیری



(الف)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]



(ب)

شکل(۳): تابع عضویت ورودی‌ها (الف) و خروجی (ب) برای تنظیم ضریب اصلاح وزنی

همان‌طوری‌که از شکل(۳) نمایان است، تابع عضویت ذوزنقه‌ای برای توصیف روابط ورودی و خروجی استفاده شده است و نامگذاری‌های مربوطه بر روی اشکال از قرار زیر است:
در اولین تابع عضویت برای متغیرهای ورودی(NBF و یا NU) و خروجی(C_1 و C_2) از ادبیات به صورت PS(positive small)، PM(positive medium)، PB(positive big) و برای حالت بزرگترین ضریب از PR(positive bigger) استفاده شده است و در دومین تابع عضویت برای متغیرهای ورودی (NBF و ω) از نامگذاری S(Small)، M(Medium) و L(Large) و برای متغیر خروجی ($\Delta\omega$) از ZE(Zero)، NE(Negative) و PE(Positive) کمک گرفته شده است. همچنین برای بیان گزاره‌های شرطی که نمایان‌گر نگاشتی از فضای ورودی به خروجی می‌باشند از قانون فازی ممدانی مطابق با جداول (۱) و (۲) بهره‌گیری شده است.

جدول(۱): قوانین فازی برای پارامتر یادگیری C_1

C_1		NU			
		PS	**PM**	**PB**	**PR**
NBF	**PS**	PR	PB	PB	PM
	PM	PB	PM	PM	PS
	PB	PB	PM	PS	PS
	PR	PM	PM	PS	PS

جدول(۲): قوانین فازی برای پارامتر یادگیری C_2

C_2		NU			
		PS	**PM**	**PB**	**PR**
NBF	**PS**	PR	PB	PM	PM
	PM	PB	PM	PS	PS
	PB	PM	PM	PS	PS
	PR	PM	PS	PS	PS

جدول(۳): قوانین فازی برای ضریب اصلاح وزنی $\Delta\omega$

$\Delta\omega$		ω		
		S	**M**	**L**
NBF	**S**	ZE	NE	NE
	M	PE	ZE	NE
	L	PE	ZE	NE

از آنجایی‌که برای تصحیح ضریب وزنی به هر دو تغییرات مثبت و منفی نیاز می‌باشد لذا بازه[۱،۱-] برای $\Delta\omega$ لحاظ می‌گردد.

$$\omega^{k+1} = \omega^k + \Delta\omega \qquad (۱۵)$$

از طرفی به منظور طراحی یک الگوریتم جامع که برای حل مسائل گسترده‌ای قابل پیاده‌سازی باشد، نیاز است تغییرات BF در بازه [۰،۱] نرمالیزه شود. در این مسئله نمونه، BF نرمالیزه شده در واقع همان تابع عضویت نرمال در نظر گرفته می‌شود. همچنین نیاز است مقادیر پارامترهای یادگیری و ضریب وزنی مطابق رابطه (۱۶) به بازه معینی محدود شوند.

$$0.4 \le \omega \le 1 \; ; \; 1 \le C_1 \le 2 \;\; ; \;\; 1 \le C_2 \le 2 \qquad (۱۶)$$

در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه مفهوم بهینه‌سازی کلاسیک با بهینه‌سازی پارتو جایگزین شده است. با توجه به این‌که توابع هدف غالباً متناقض با یکدیگر حرکت می‌کنند به‌جای دست‌یابی به یک جواب بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه به دست می آید و این مجموعه پاسخ مناسب (یا بهینه‌ی پارتو)، پاسخی است که از نظر تمامی توابع بهترین می‌باشد. این موضوع می‌تواند به این ترتیب بیان شود که، در صورتی که نقطه‌ی X^* پاسخ بهینه‌ی پارتو و X مجموعه جواب‌های ممکن در فضای جستجو باشد، آنگاه داریم:

$$\forall k \in \{1,2,3,...,K\} : \forall X \in \chi - \{X^*\}, \quad f_k(X^*) \le f_k(X) \;\&\; \exists m \in \{1,2,3,...,K\} : f_m(X^*) < f_m(X) \qquad (۱۷)$$

که در آن K تعداد توابع هدف می‌باشد. به بیان دیگر برای‌یک مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی مفروض می‌توان گفت:

$$\min F(x) = \left[f_1(x) f_2(x) ... f_{N_{obj}}(x) \right] \qquad (۱۸)$$

که در آن $f_i(x)$ ، iامین تابع هدف و X یک جواب قابل قبول است. برای هر دو جواب X_1 و X_2 دو حالت می‌تواند وجود داشته باشد: یکی دیگری را مغلوب کند یا هیچ‌کدام دیگری را مغلوب نکند. دریک مسئله‌ی مینیمم‌سازی یک پاسخ X_1 پاسخ X_2 را مغلوب می‌کند اگر دو شرط زیر ارضا شوند:

$$\forall i \in \{1,2,...,N_{obj}\} : f_i(X_1) \le f_i(X_2) \quad \exists j \in \{1,2,...,N_{obj}\} : f_j(X_1) < f_j(X_2) \qquad (۱۹)$$

اگر دو شرط فوق برآورده شود، X_1، X_2 را مغلوب می‌کند. پاسخ هایی که در تمام فضای ممکن جستجو غیرغالب هستند به‌عنوان بهینه‌ی پارتو معرفی شده و دسته‌ی بهینه‌ی پارتو را مشخص می‌کنند.
همان‌طوری‌که پیشتر عنوان شد توابع هدف موجود در مسئله بهینه سازی پیشنهادی تناسب‌ناپذیر هستند و لذا نیاز است از

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

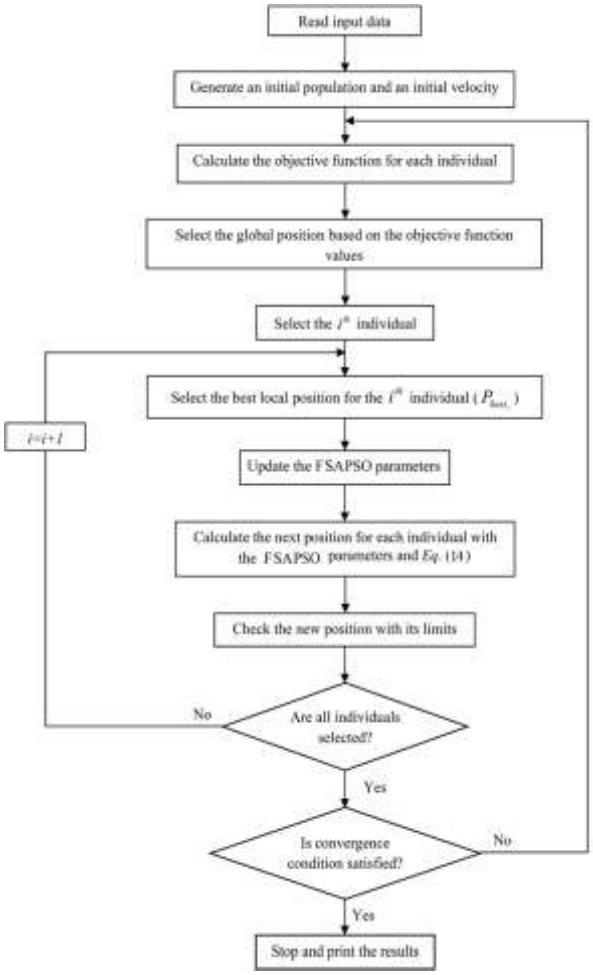
یک روش دسته‌بندی مبتنی بر تکنیک فازی برای کنترل اندازه ذخیره‌کننده جواب‌های بهینه استفاده شود. در این روش یک تابع عضویت فازی برای تشخیص بهترین جواب استفاده می‌شود و تابع عضویت برای هر تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{fi}(X)=\begin{cases}1 & , \quad f_i(X)\le f_i^{\min}\\ 0 & , \quad f_i(X)\ge f_i^{\max}\\ \dfrac{f_i^{\max}-f_i(X)}{f_i^{\max}-f_i^{\min}} & , \quad f_i^{\min}\le f_i(X)\le f_i^{\max}\end{cases} \qquad (۲۰)$$

که در آن $f_i^{\min}$ و $f_i^{\max}$ به ترتیب حد پایینی و بالایی تابع هدف iام هستند، که در روش پیشنهاد شده این مقادیر با استفاده از نتایج بهینه‌سازی هر تابع هدف به صورت جداگانه بدست می‌آیند. برای هر جمعیت داخل ذخیره کننده مقدار تابع عضویت نرمالیزه شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N\mu(j)=\frac{\sum_{k=1}^{n}\omega_k\times\mu_{fk}(X_j)}{\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}\omega_k\times\mu_{fk}(X_j)} \qquad (۲۱)$$

که در آن m تعداد جوابهای غالب می‌باشد و ω_k ضریب k امین تابع هدف است که معمولاً یک در نظر گرفته می‌شود. در روش دسته‌بندی فازی جمعیت‌ها براساس مقدار تابع عضویت مرتب می‌شوند و سپس بهترین جمعیت‌ها برای ذخیره شدن در ذخیره-کننده انتخاب می‌شوند[۲۳،۲۲]. فلوچارت الگوریتم نمونه شمایی از روند کار را در شکل (۴) نشان می‌دهد.



شکل(۴): فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۴- نتایج شبیه‌سازی

سیستم تحت مطالعه مطابق شکل (۵) یک سیستم توزیع ۷۰ باسه با ۷۸ شاخه می‌باشد. یک دیاگرام تک‌خطی از این سیستم با دو پست، ۴ فیدر ، ۷۰ گره و ۷۸ شاخه در شکل (۵) نمایش داده شده است. هم‌چنین، در جدول (۴) مقادیر ظرفیت مبنا، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌ی سوخت، هزینه‌ی عملکرد و طول عمر برای هر یک از مولدهای تجدیدپذیر نمایش داده شده است.

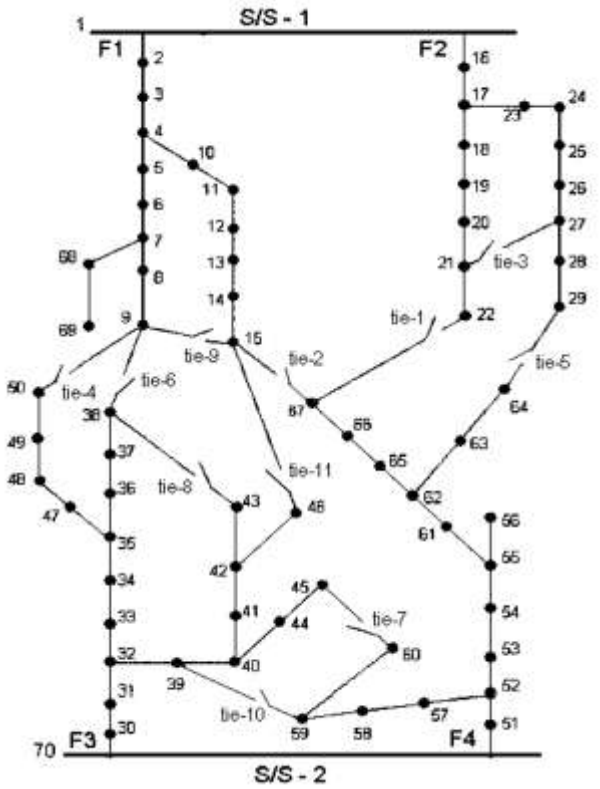
در این شبکه بارهای مختلفی مدل‌سازی شده‌اند که بسته به ولتاژ میزان مصرف آن‌ها متفاوت می‌باشد. این مدل بارهای تجاری، صنعتی و خانگی که در مرجع [۲۴] نیز آمده‌اند، به بیان ریاضی عبارتند از:

$$Q_i = Q_{0i}V_i^{\beta}$$
$$P_i = P_{0i}V_i^{\alpha} \qquad (۲۲)$$

که P_i و Q_i به ترتیب توان حقیقی و راکتیو و P_{0i} و Q_{0i} نقطه‌ی کار اکتیو و راکتیو در باس i می‌باشند. همچنین V_i ولتاژ در باس i و همچنین α و β فاکتورهای وابستگی توان اکتیو و راکتیو به ولتاژ باس می‌باشند. در مدل مرسوم توان ثابت به‌کار رفته در مطالعات پخش بار $\alpha=\beta=0$ در نظر گرفته می‌شود. فاکتورهای وابستگی به‌کار رفته در این تحقیق برای بارهای صنعتی، خانگی و تجاری در جدول (۵) آمده‌اند[۲۵]. باید اشاره نمود که در این

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

مقاله، نرخ بهره ۸٪ لحاظ شده است و مدت بهره‌برداری برای مولدها ۱۰ سال فرض می‌شود.



شکل(۵): سیستم ۷۰ باسه مورد مطالعه

جدول (۴): مشخصات واحدهای مورد استفاده در سیستم

نوع مولد	ظرفیت مبنا (kW)	هزینه‌ی کل ($/kW)	هزینه‌ی سوخت ($/kWh)	هزینه‌ی نگهداری و عملکرد ($/kWh)	طول‌عمر (سال)
پیل سوختی همراه با CHP	۲۰۰	۳۶۷۴	۰/۰۲۹	۰/۰۱	۱۰
پنل‌خورشیدی	۱۰۰	۶۶۷۵	۰	۰/۰۰۵	۲۰
توربین بادی	۱۰	۳۸۶۶	۰	۰/۰۰۵	۲۰

جدول (۵): مدل بارهای استفاده شده به همراه ضرایب مربوطه

نوع بار	α	β
ثابت	۰	۰
بار صنعتی	۰/۱۸	۶
خانگی	۰/۹۲	۴/۰۴
تجاری	۱/۵۱	۳/۴۰

۴-۱- نتایج برای حالت تک هدفه

در ابتدا توابع مربوط به تلفات کل، آلاینده‌ها و هزینه به‌طور مجزا جهت یافتن نقاط بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرند. ضرایب مربوط به آلاینده ها عبارتند از:

$$\alpha = 4.285 \frac{kg}{hMW^2}$$
$$\beta = -5.094 \frac{kg}{hMW}$$
$$\gamma = 4.586 \frac{kg}{h}$$
$$\xi = 1.0 \times 10^{-6} \frac{kg}{h}$$
$$\lambda = 8.000 MW^{-1}$$

در جدول (۶) مسئله ی بهینه‌سازی تک‌هدفه برای توابع هدف مختلف توسط الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات استاندارد و فازی انجام شده است. این بخش نتایج مربوط به ۱۲ پیل سوختی با حداکثر ظرفیت تولید ۱۰۰kW در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، الگوریتم ازدحام ذرات فازی به علت ساختار تنظیم فازی مرتبط با ضرایب بهترین جواب را از نظر کمینه‌بودن و مدت زمان شبیه‌سازی دارا می‌باشد.

جدول (۶): مقادیر توابع به دست آمده ناشی از بهینه‌سازی تک تک حالت‌ها برای الگوریتم‌های مختلف

Algorithm	Cost($)	Emission(kg)	Loss(kW)	Sim. Time(s)
GA	467.3064	53887970	124.5127	117.2
Standard PSO	471.2232	53893983	124.1232	157.1
Fuzzy PSO	467.3064	53881790	123.3036	97.4

بهترین نتایج که با بهینه‌سازی هر ۴ هدف به‌طور مجزا حاصل شده اند، به ترتیب در جدول (۷) نمایش داده شده اند.

جدول (۷): مقادیر توابع به دست آمده ناشی از بهینه‌سازی تک تک حالت ها

Mode	Cost($)	Emission(kg)	Loss(kW)
12 FC	467.3064	53881790	123.3036
12 WT	484.5231	53879402	126.1131
12 PV	493.4122	53879402	123.0096
8 FC+2 WT+ 2PV	472.2245	53878423	123.0094

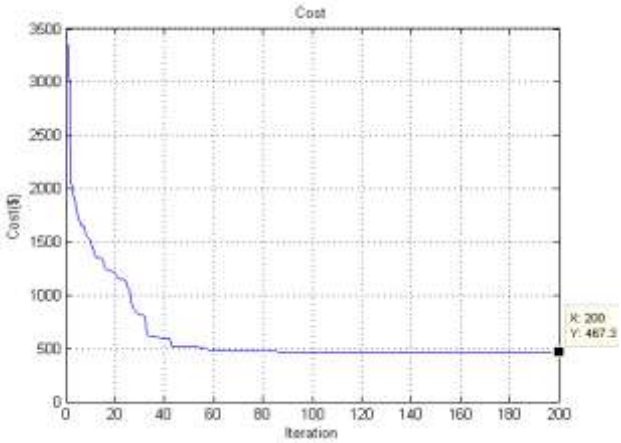
خواص همگرایی هر سه تابع هدف در اشکال (۶) تا (۸) نمایش داده شده است.

۴-۲- نتایج برای حالت چند هدفه

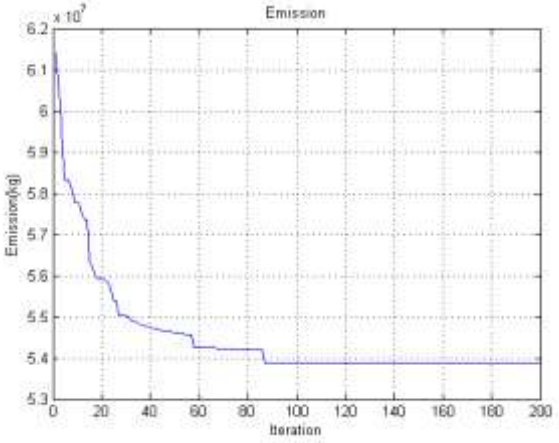
در این بخش شبیه‌سازی با استفاده الگوریتم پیشنهادی برای ترکیب‌های مختلف مولدهای تجدیدپذیر انجام شده است. همان-

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

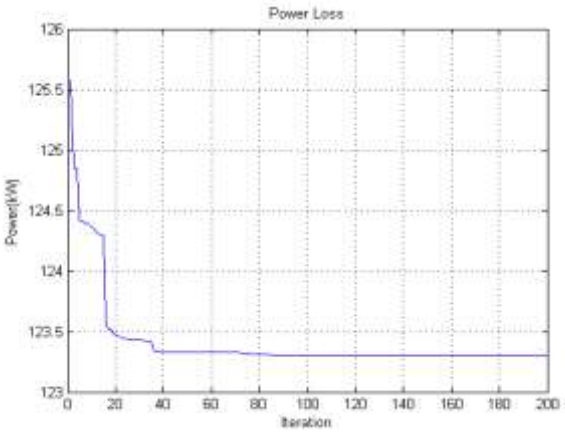
طور که در جدول (۷) دیده می‌شود در حالتی که تمامی ترکیب-ها از پیل سوختی باشد آلایندگی بیشتر ولی در عین حال تلفات و هزینه‌ی کمتری نسبت به حالت‌های دیگر خواهیم داشت. حالت آخر یک حالت ترکیبی است که در آن از ترکیب ۸ پیل سوختی، ۲ توربین بادی و ۲ پنل خورشیدی استفاده شده است، که آلایندگی کمتر شده ولی هزینه و تلفات کمی افزایش یافته است. این طرح می‌تواند به عنوان یک طرح مناسب انتخاب شود.



شکل (۶): همگرایی تابع هدف هزینه برای حالت ۱۲ پیل سوختی



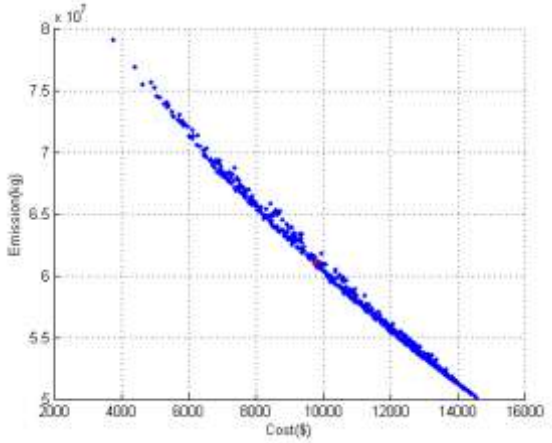
شکل (۷): همگرایی تابع هدف آلایندگی برای حالت ۱۲ پیل سوختی



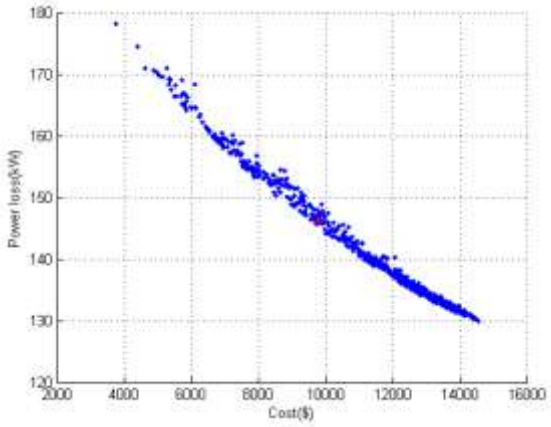
شکل (۸): همگرایی تابع هدف تلفات برای حالت ۱۲ پیل سوختی

جدول (۸): مقادیر توابع به دست آمده ناشی بهینه سازی چند هدفه

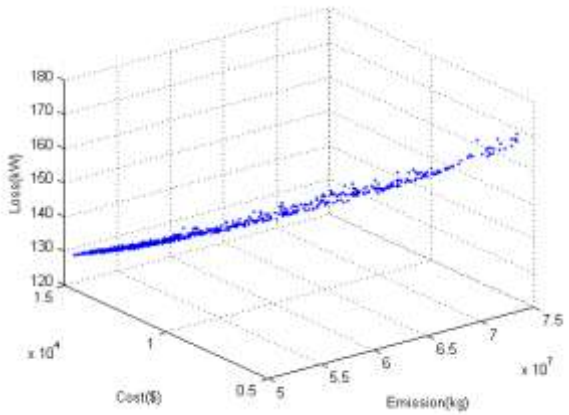
Mode	Cost($)	Emission(kg)	Loss(kW)
12 FC	9760.35	61571875	146.2323
12 WT	9844.22	61562212	149.9212
12 PV	9921.12	61562212	147.2828
8 FC+2 WT+ 2PV	9801.21	61570118	148.1272



شکل (۹): منحنی پارتو هزینه-آلایندگی



شکل (۱۰): منحنی پارتو هزینه-تلفات



شکل (۱۱): منحنی سه بعدی توابع هزینه-آلایندگی-تلفات

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

جدول (۹): ظرفیت و مکان به دست آمده ناشی از بهینه سازی چندهدفه

Location DG	**25**	**69**	**13**	**17**
Size(kW)	86.45	80.77	84.30	50.25
Location DG	**57**	**28**	**12**	**53**
Size(kW)	53.01	72.47	48.38	91.32
Location DG	**8**	**54**	**34**	**68**
Size(kW)	11.44	63.31	85.99	98.73

جدول (۹) ظرفیت و مکان بهینه‌ی تولیدات پراکنده توسط الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود، از آن‌جا که اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در مسئله جایابی و ظرفیت‌یابی مذکور در تقابل با یکدیگر می‌باشند، حرکت از نقاط ابتدایی نمودارها به سمت نقاط انتهایی آن‌ها و بر مسیر پارتو به معنای تغییر الگوی بهینه‌سازی از آلودگی کمتر و هزینه بیشتر به آلودگی بیشتر و هزینه پایین‌تر می‌باشد. توابع هزینه و تلفات نیز در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند که این امر به علت حضور تولیدات پراکنده می‌باشد. در شکل (۱۰) منحنی پارتوی هزینه بر حسب تلفات نمایش داده شده است. در شکل (۱۱) دسته منحنی جواب بهینه ناشی از تغییرات توابع هزینه، آلایندگی و تلفات بر حسب یکدیگر به صورت سه بعدی نمایش داده شده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر تصمیم‌گیری فازی برای جایابی و اندازه‌یابی مولدهای تجدیدپذیر به‌وسیله‌ی الگوریتم PSO انجام شده است. در طرح پیاده‌سازی شده، جایابی و اندازه‌یابی مولدهای تجدیدپذیر با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی تولید، آلایندگی و تلفات الکتریکی در شبکه‌ی ۷۰ باسه انجام گرفته است. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود، مکان و اندازه‌ی بهینه‌ی تولیدات پراکنده برای حالت تک هدفه و چند هدفه به دست آمده است. همان طوری که دیده می‌شود، مکان و اندازه‌ی بهینه‌ی تولیدات پراکنده به صورت همزمان در نظر گرفته شده است که باعث ارائه‌ی یک طرح جامع و کامل شده است. از سوی دیگر، این الگوریتم نسبت به الگوریتم‌های رایج تکاملی دیگر مانند ژنتیک از دقت و سرعت بالاتری برخوردار می‌باشد. هم چنین، می‌توان استنباط کرد که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه پیشنهادی، ارائه‌ی مجموعه جواب بهینه غیرمغلوب است که به اپراتور سیستم اجازه‌ی مانور و پیاده‌سازی سناریوهای مختلف را می‌دهد که بسته به چگونگی آن‌ها در هر شرایط می‌تواند تصمیمات مناسب را اتخاذ و اعمال نماید. از نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود مدل بهینه‌سازی پیشنهادی نه تنها ساختاری ساده دارد بلکه در رسیدن به جواب‌های بهینه از قدرت بالایی نیز برخوردار است.

مراجع

[۱] محمد فرشاد، محمد حسین جاویدی دشت بیاض، جواد ساده "ارائه قانون تشویقی تولیدات پراکنده در سیستمی با قانون تسویه تمایزی و پیشنهاد الگوریتم جایابی و تعیین ظرفیت بهینه" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۹، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۱.

[۲] سید حمید فتحی، مرتضی محمدی اردهالی، محمد علی فتاحی اردکانی "تعیین نقطه کار بهینه در سیستم تولید همزمان انرژی الکتریکی و گرمایی به همراه مخزن ذخیره گرمایی با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۶، شماره ۶، بهار و تابستان ۱۳۸۸.

[3] M. A. Golkar, S. Hosseinzadeh, A. Hajizadeh "Optimal Multi-Objective Planning of Distribution System with Distributed Generation" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 5, No. 2, 2008.

[4] J.Huang, C.Jiang, R.Xu, 2008, "A review on distributed energy resources and microgrid", Renew Sust Energy Rev;12(9):2472–83.

[5] A. Zangeneh, Sh. Jadid, A. Rahimi-Kian,2009, "Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning", Renewable Energy, 34, 2765-2773.

[6] Manfren M, Caputo P, Costa G. Paradigm shift in urban energy systems through distributed generation: methods and models. Appl Energy 2011;88(4):1032–48.

[7] Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Leahy M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. Appl Energy 2010;87(4):1059–82.

[8] Jurado F, Cano A. Optimal placement of biomass fuelled gas turbines for reduced losses. Energy Convers Manage 2006;47:2673–81.

[9] Nara K, Hayashi Y, Ikeda K, Ashizawa T. Application of tabu search to optimal placement of distributed generators. In: IEEE Power Engineering Society winter meeting, vol. 1; 2001. p. 918–23.

[10] El-Khattam W, Bhattacharya K, Hegazy Y, Salama MMA. Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market. IEEE Trans Power Syst 2004;19:1674–84.

[11] Ahmadigorji M, Abbaspour A, Rajabi-ghahnavieh A, Fotuhi-Firuzabad M. Optimal DG placement in distribution systems using cost/worth analysis. J World Acad Sci Eng Technol 2009;49:746–53.

[12] Hedayati H, Nabaviniaki SA, Akbarimajd A. A method for placement of DG unit in distribution

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

network. IEEE Trans Power Deliv 2008;23(3):1620–8.
[13] Senjyu T, Tona A, Funabashi T. Optimal distribution voltage control and coordination with distributed generation. IEEE Trans Power Deliv 2008;23:1236–42.
[14] Asakura T, Yura T, Hayashi N, Fukuyama Y. Long-term distribution network expansion planning considering multiple construction plans. Power Syst Technol Conf 2000;2:1101–6.
[15] Sadeghizadeh M, Rezazadeh A. Using genetic algorithm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile. J World Acad Sci Eng Technol 2008;37:251–6.
[16] Teng JH, Liu YH, Chen CY, Chen CF. Value-based distributed generator placements for service quality improvements. J Electr Power Energy Syst 2007;29:268–74.
[17] Favuzza S, Graditi G, Ippolito MG, Sanseverino ER. Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas turbines by dynamic ant colony search algorithm. IEEE Trans Power Syst 2007;22(2):580–7.
[18] R. Poli. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation. Journal of Artificial Evolution and Applications, Article ID 685175, 10 pages, 2008.
[19] M. Clerc and J. Kennedy. The particle swarm-explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(1):58-73, 2002.
[20] Agalgaonkar P, Kulkarni SV, Khaparde SA, Soman SA. Placement and penetration of distributed generation under standard market design. Int J Emerg Electr Power Syst 2004;1(1).
[21] Olamaie J, Niknam T, Gharehpetion G. Application of particle swarm optimization for distribution feeder reconfiguration considering distributed generators. Appl Math Comput 2008;20(1):575–86.
[22] A.Anvari-Moghaddam, A.Seifi, T.Niknam, 2012 , "Multi-Operation Management of a Typical Micro Grids Using Particle Swarm Optimization: A Comparative Study", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (1): 1268– 1281.
[23] A.Anvari-Moghaddam, A.Seifi, T.Niknam, M.R. Alizadeh-Pahlavani, 2011,"Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source".,Energy; 36(1): 6490-6507
[24] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 1, pp. 523–538, Feb. 1995.
[25] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Load representation for dynamic performance analysis. IEEE Trans. Power Syst., 1993;8(2):472-82.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]