متعادل سازی بار با استفاده از الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان هدایت شده بر اساس اطلاعات بروز رسانی شده بهترین مسیر

محمد امین اسفنده*[۱]

*۱- کارشناس ارشد برق، مجتمع فولاد روهینا جنوب، دزفول، ایران ، amin.esfandeh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۱

چکیده: متعادل سازی بار و فاز مکمل مهمی برای پیکربندی مجدد تغذیه کننده و شبکه هستند. در اتوماسیون توزیع این مسائل باید به طور پیوسته و همزمان حل شوند تا عملکرد مطلوب یک شبکه ی توزیع را تضمین کنند. عدم تعادل شبکه ی توزیع ، تبعات مختلفی از جمله افزایش تلفات توان، افت ولتاژ ، افزایش هزینه و غیره در شبکه ی توزیع دارد.در این مقاله مسئله ی متعادل سازی فاز ترانسفورماتورهای توزیع در یک ساختار شعاعی و متعادل سازی بار در طول یک تغذیهMV بین تغذیه کننده ی ویژه در سطح همانند مسائل بهینه سازی متعادل سازی جریان با توجه به محدودیت های مختلف، فرمول بندی شده است. در واقع مسئله ی پیکربندی مجدد تغذیه کننده و شبکه همانند مسئله ی به حداقل رسانی اتلاف توان با توجه به اهمیت آن برای کنترل باز و بسته کردن مقاطع (بخش بندی ها) و اتصال (کراس) سوئیچ ها فرمول بندی شده است. نتایج مقاله نشان داد که روش مبتنی بر الگوریتم کلونی مورچگان بهینه به خوبی در مقایسه با روش های پیشنهادی دیگر به طور موفق با استفاده از داده های حقیقی به دست آمده از تامین کننده برق شهری محلی ، جواب مطلوب تری ارائه می دهد. از دیدگاه عملی ، این روش ها می توانند بسیار موثر باشند ، زیرا روش های مبتنی بر مدل معمولاً زمان اجرای بسیار طولانی دارند. روش کلونی مورچگان بهینه مناسب تر است و در مقایسه با شبکه عصبی جواب بهتری ارائه می دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچگان؛ شبکه های توزیع؛ متعادل سازی بار؛ بازآرایی

۱- مقدمه

دنیای مدرن امروزی به شدت نیازمند انرژی برق با کیفیت و قابلیت اطمینان بالا است. توجه به شبکه‌های توزیع و تزریق روح مهندسی به فعالیت‌های آن در دهه‌ی گذشته شتاب فراوانی به خود گرفته است. امروزه تهیه‌ی طرح‌ها و نقشه‌های مهندسی در این شاخه از صنعت برق نیز جایگاه خود را می‌طلبد که آن را می‌توان دگرگونی و شکوفایی در شبکه‌های توزیع نامید. در سیستم های توزیع به دلیل عدم توزیع یکنواخت بارهای تک فاز بر روی سه فاز، تصادفی بودن اتصال و قطع بارهای تک فاز به شبکه و نیز وجود بارهای سه فاز نامتعادل، عدم تعادل ولتاژ امری اجتناب‌ناپذیر است[۱]. اغلب مشترکین برق در شبکه‌های توزیع مصرف‌کننده‌های تک فاز بوده و توزیع این مشترکین روی فازهای سه‌گانه به‌طور یکسان و متعادل نمی‌باشد. لذا شبکه‌های توزیع معمولاً نامتعادل بوده و از سیم نول آن‌ها جریان نسبتاً زیادی عبور می‌کند. امروزه میزان عدم تعادل بار به‌عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت انرژی الکتریکی تلقی می‌شود. عدم تعادل شبکه توزیع و جریان دار شدن سیم نول ؛ تبعات مختلفی از قبیل افزایش تلفات توان، افت ولتاژ، نامتعادلی ولتاژهای سه فاز، افزایش هزینه در شبکه توزیع و... دارد ، که نهایتاً منجر به نارضایتی مشترکین، افت توان و انرژی، فیوز سوزی، قطع کلید اتوماتیک، عدم تنظیم تعادل بار جریان فیدر خروجی پست و خطرات ناشی از آن، افزایش برخی خاموشی‌های ناخواسته، افزایش حوادث تأسیسات و کاهش عمر آن‌ها، افزایش فعالیت‌های کارکنان عملیات، سوختن تابلوهای برق و ترانسفورماتورها و خسارات ناشی از افزایش یا کاهش شدید ولتاژ خواهد شد. بنابراین از بین بردن یا کاهش نامتعادلی بار امری ضروری به نظر می‌رسد[۲].

امروزه مشکل نامتعادلی بار با استفاده از تکنیک برنامه‌نویسی از روش‌های مختلفی قابل‌حل است. استراتژی جابجایی بار یکی از روش‌های بهینه برای متعادل‌سازی بار می‌باشد. در استراتژی جابجایی بار، بارهای شبکه باید به‌گونه‌ای متعادل بر روی سه فاز قرار گیرند. انجام این روش در شبکه‌ها معمولاً به روش‌های سعی و خطا و با

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

روش‌های سنتی انجام می‌شود که معمولاً نتایج مناسبی به دست نمی‌دهد. اخیراً استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند برای متعادل‌سازی شبکه پیشنهاد شده‌اند. این روش‌های جدید بهتر از روش‌های سنتی عمل می‌کنند.نمونه‌های هوشمند توزیع جدید برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده می‌باشند که از رفتار اجتماعی پرندگان، کلونیزه گونه‌هایی مانند مورچه، زنبورعسل الهام گرفته‌شده‌اند. این روش‌های بهینه‌سازی توسط جامعه علمی هوش محاسباتی مورد تحسین قرارگرفته است.آن‌ها عملکرد بهتری در مسائل بهینه‌سازی پیچیده گسسته داشتند. علاوه بر این، این الگوریتم‌ها به‌طور موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های متعدد علمی مانند کنترل فرآیند، پردازش تصویر و دیگر مسائل مهندسی به کار گرفته‌شده‌اند[۳]. ضمن درک این موضوع در این مقاله ، الگوریتم کلونی مورچگان برای متعادل‌سازی بار در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شود.امروزه الگوریتم‌های aco ، در طیف زیادی از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی کاربردهای فراوانی یافته‌اند[۴]. با الهام گیری از رفتار مورچه‌های طبیعی، طراحی مورچه‌های مصنوعی ممکن گردید. به صورتی که با حرکت مورچه‌ها بر روی گرافی که مدلی از مسئله‌ی فوق است ، کوتاه‌ترین مسیر را بین دو نود مبدأ و مقصد که به ترتیب معرف لانه و غذا هستند، می‌یابند. با استفاده از قوانین اجتماعی که بر پایه‌ی اطلاعات محلی بناشده‌اند ، یکی از فرآیندهایی که با در نظر گرفتن آن از همگرایی زود هنگام مورچه‌ها به یک مسیر غیر بهینه جلوگیری می‌شود ، عمل تبخیر می‌باشد. پس‌ازآن عمل تبخیر فرمون صورت می‌گیرد.در الگوریتم مورچه بهینه، مکانیسم به روز رسانی تقویت فرمون و مکانیسم جدید سازگاری فرمون برای بهبود عملکرد الگوریتم ACO* طراحی شده است ؛ این مکانیسم‌های به روز رسانی فرومون موجب بهبود سرعت همگرایی الگوریتم و بهبود کارایی آن بدون تأثیر بر کیفیت راه‌حل‌های آن می‌شود[۵].

در این مقاله استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان بهینه برای متعادل‌سازی بار در شبکه‌های توزیع ارائه خواهد شد ، که می‌تواند آرایش جدیدی از بارهای مشترکین با تغییر بار و حوزه‌های مختلف ارائه دهد. بنابراین می‌توان به‌صورت دوره‌ایی که مقدار مصرف و تعداد مشترکین تغییر می‌کند، استراتژی جابجایی بار پیشنهادی را برای مشترکین تک فاز به منظور کاهش تلفات و بهبود ضرایب عدم تعادل در سیستم اعمال کرد.

۲- تابع هدف مسئله

اهداف متفاوتی باید برای ارزیابی مسئله‌ی جابجایی فاز مد نظر قرار گیرد که به‌طور خلاصه در زیر آورده شده‌اند:

۱) جریان خنثی فیدر تغذیه: یکی از مهم‌ترین معیارهایی که به‌طور مستقیم متناظر با کاهش نامتعادلی فاز است جریان خنثی فیدر تغذیه است. اگر ما جریان خنثی فیدر تغذیه را کاهش دهیم، جریان خنثی بقیه گره‌ها در شبکه نیز کاهش می‌یابد. این کاهش از قطعی سرویس مشترکین جلوگیری می‌کند[۶].

۲) افت ولتاژ متوسط: مسئله ی مهم دیگری که باید در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شود مینیمم سازی افت ولتاژ در طول انتقال توان است. تلفات توان رسیدن به این هدف را مشکل می‌کند و بنابراین افت ولتاژ بایستی تا جایی که ممکن است مینیمم شود.

۳) هزینه جابجایی فاز: استراتژی جابجایی فاز با قطع سرویس مشترکین ، هزینه‌ی بسیار بالایی تحمیل می‌کند که به خاطر خروج توان و هزینه‌ی کارکنان مورد نیاز برای انجام عمل جابجایی فاز است.

۴) تلفات توان: تلفات توان هزینه‌ی انتقال توان را افزایش می‌دهد. در شبکه های توزیع، همواره تلاش برای کاهش هزینه انتقال و توزیع توان بوده است ؛ بنابراین تلفات توان به عنوان یکی از فاکتورهای مناسب در تابع هدف مسئله جابجایی فاز است.

به دلیل اینکه تابع هدف چهار هدف دارد (جریان خنثی فیدر تغذیه ، افت ولتاژ متوسط ، هزینه جابجایی فاز و تلفات توان) که هم‌زمان با هم در شبکه توزیع در نظر گرفته می‌شود، تابع هدف به‌صورت زیر است:

$$minof = w_1 \times I_N + w_2 \times (V_d)_{AV} + w_3 \times P_{loss} + w_4 \times RC_t \quad (۱)$$

که فاکتورهای w1 تا w4، مقادیر فاکتور وزنی هستند که اپراتور سیستم برحسب اهمیت فاکتور تعیین می‌شوند $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$.

ولتاژهای مرتبط با گره ها در سه فاز سیستم باید در محدوده مینیمم (V_{kmin}) و ماکزیمم (V_{kmax}) باشند.

$$V_{kmin} < V_k < V_{kmax} , k = 1, 2, \dots, n \quad (۲)$$

یک راه حل بهینه با حل مسئله ماکزیمم سازی مجموع چهار تابع به دست می‌آید. برای این منظور تابع هدف فازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\max of = w_1 \times \mu_{I_N} + w_2 \times \mu_{(Vd)_{AN}} + w_3 \times \mu_{P_{loss}} + w_4 \times \mu_{RC_t} \quad (۳)$$

که فاکتورهای وزنی توسط اپراتور سیستم برحسب اهمیت آن فاکتور تعیین می‌شوند. در این قسمت به دلیل اهمیت جریان خنثی در مسئله جابجایی فاز وزن این فاکتور دو برابر مقادیر برابر w1سایر فاکتورها در نظر گرفته می‌شود ؛ به عبارت دیگر، ۰/۴ و سایر فاکتورها برابر ۰/۲ تعیین‌شده‌اند. در بهینه‌سازی ، تابع هدف داده شده در (۳) باید ماکزیمم شده و بنابراین هزینه‌های سیستم مینیمم شوند .

متعادل‌سازی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان به صورت زیر است:

ابتدا با انجام متعادل سازی بار اولیه، خصوصیات شبکه مانند تلفات توان، جریان خنثی فیدر تغذیه، افت ولتاژ متوسط و هزینه جابجایی فاز به دست آمده‌اند.در این روش، برای یک فیدر با یک استراتژی جابجایی

* Ant colony optimization algorithms

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

فاز در نظر گرفته شده‌اند. هر مورچه یک موقعیت دارد که به صورت یک رشته معرفی شده است. تعداد کاراکترها برای موقعیت با تعداد گره‌های فیدر توزیع است ؛ همچنین تعداد رقم‌های تعیین‌شده برای هر گره یا کاراکتر معادل با تعداد استراتژی‌های ممکن برای آرایش فاز در آن گره است[۷].

۲-۱- فرمول بندی مسئله

۲-۱-۱- پیکربندی مجدد شبکه و فیدر

سیستم توزیع، در واقع مرحله نهایی در انتقال توان به مشتریان می‌باشد. معمولاً این کار از ثانویه تراسنسفورماتورهای ایستگاه انتقال فرعی آغاز می شود و به طور نرمال شامل دو سطح می شود: توزیع اولی یا سطح ولتاژ متوسط (MV) و توزیع ثانویه یا سطح ولتاژ پایین (LV).دو نوع سوئیچ در سیستم های توزیع اولیه وجود دارد: سوئیچ به طور معمول بسته که بخش های خط را متصل می کند و سوئیچ به طور معمول باز در خطوط ارتباطی که دو فیدر اولیه، یا دو ایستگاه فرعی یا جانبی نوع حلقه را به هم متصل می کند. پیکربندی مجدد شبکه (یا پیکربندی مجدد فیدر) ، فرآیند تعویض ساختارهای توپولوژیک فیدرهای تغذیه توسط تغییر وضعیت باز/بسته سوییچ ارتباطی و تقسیم بندی است. به طور کلی بارهای توزیع ، مشخصات متفاوتی را با توجه به خطوط توزیع متناظر خود و مقاطع خط نشان می دهند. بنابراین، سطوح بار برای هر دوره زمانی را می توان به عنوان غیریکسان در نظر گرفت. در مورد یک سیستم توزیع با مقدار بار بیش از حد و شاخه های بار سبک ، نیاز به پیکربندی مجدد سیستم وجود دارد به طوری که بارها از فیدرهای به شدت بارگذاری شده تا فیدرهای کمتر بارگذاری شده تغییر نمایند. حداکثر جریان بار که هادی فیدر می تواند حمل کند ، به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود. با این وجود، انتقال بار باید به گونه ای باشد که یک هدف از پیش تعریف شده خاص برآورده شود. در این مورد، هدف ، اطمینان از این است که شبکه دارای حداقل تلفات توان حقیقی باشد. در نتیجه ، پیکر بندی دوباره را می توان به عنوان بازآرایی شبکه مانند به حداقل رساندن تلفات کل توان حقیقی ناشی از شاخه های خط تعریف نمود. از نظر ریاضی، تلفات توان کلی را می توان به صورت زیر بیان نمود[۸]:

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^{n} r_i \frac{P_i^2+Q_i^2}{|V_i|^2} \qquad (۴)$$

که در آن V_i, Q_i, P_i, r_i به ترتیب مقاومت ، توان حقیقی ، توان راکتیو و ولتاژ شاخه $\boldsymbol{i}$ هستند و n تعداد کل شاخه ها در سیستم است. هدف از این مقاله ، مینیمم نمودن تلفات توان تحت محدودیت های زیر است.

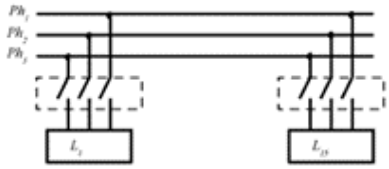
دامنه ولتاژ هر گره از هر شاخه Vj باید درون گستره مجاز قرار گیرد. در اینجا یک شاخه می تواند یک ترانسفورماتور ، یک مقطع خط یا یک خط ارتباطی با سوییچ تقسیم بندی باشد.

$$V_j^{min} \le |V_j| \le V_j^{max} \qquad (۵)$$

حدود ظرفیت خط

۲-۱-۲- تعادل فاز و باز

یک فیدر توزیع معمولاً یک سیستم سه فاز، چهار سیستمه است که می تواند ساختار حلقه شعاعی یا باز باشد. مثال فیدر نشان داده شده در شکل (۱) دارای سه هادی فاز برای بخش بین ترانسفورماتور اصلی و نقاط بار متفاوت است. در این مقاله ، تعداد بارها به پانزده نقاط بار محدود می شود. به منظور بهبود عدم تعادل های ولتاژ و جریان فاز سیستم ، نیاز است که در سطح MV ، اتصال بین فیدر خاص و ترانسفورماتورهای توزیع به طور مناسب بازآرایی شوند. در حالی که در سطح LV ، انتساب بارهای تک فاز به چند فاز در طول یک فیدر شعاعی نیز باید تجدید سازماندهی شود. در این کار، تک فاز به عنوان تعادل فاز نامیده می شود ، در حالی که دومی به طور کلی به عنوان متعادل کننده بار نامیده می شود. مزایای آن، کاهش تلفات و عملکرد بهتر شبکه خواهد بود.



شکل (۱) : نمونه فیدر توزیع

متعادل نمودن جریان های سه فاز در هر بخش و سپس کاهش جریان خط خنثی ، یک کار بسیار دشوار برای مهندسین توزیع می باشد ،زیرا آن‌ها بر مشتریان خود کنترل ندارند. به طور سنتی، تعادل فاز و بار به صورت دستی انجام می شود. بر اساس دانش متخصص ، این کار توسط تغییر فازهای اتصال نقاط توزیع بحرانی متصل به فیدر اولیه با اندازه گیری جریان های سه فار ترانسفورماتورها انجام می شود. تعادل یک فیدر ، که در آن فازهای اتصال برخی سیستم های توزیع بازآرایی می شوند ، ممکن است بهبود یابد اما معمولاً تغییر برای یک دوره طولانی، مدت زمانی طول نمی کشد. این حقیقت وجود دارد که امکان یافتن یک طرح اتصال خوب برای متعادل نگهداشتن فاز فقط با استفاده از روش سعی و خطا تقریباً غیرممکن است. با استفاده از این تکنیک سعی و خطای دستی ، توقف پیوستگی خدمات در هنگام تغییر فازهای اتصال ترانسفورماتورهای توزیع به فیدر غیرقابل اجتناب است.

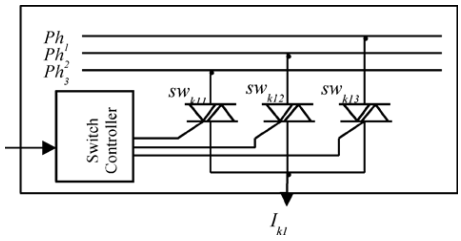
رابطه در هر فاز بین ولتاژ بدون‌بار (Voj) ، امپدانس داخلی (Zj) و جریان بار (Ij) در (۶) نشان داده شده است که در آن Vj، Ij و Zj فازورهای مختلط هستند و j = 1,2,3.

$$V_j = V_{oj} - Z_j I_j \qquad (۶)$$

با توجه به وابستگی بالا بین ولتاژ و جریان بار و این حقیقت که امپدانس ثابت است ، این مقاله بر روی جریان ها تمرکز خواهد نمود. به دلیل توپولوژی سلکتور سوییچ ، شکل (۲) یک ثابت روی تعداد سوییچ های روشن و خاموش می تواند وجود داشته باشد. شکل (۲)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

نشان می دهد که هر مصرف کننده ، یک بار تک‌فاز است که توسط یک سوییچ استاتیک قابل کنترل (در این مورد تریاک) قابل اتصال به یک فاز مطلوب است.



شکل (۲) : انتخابگر سوئیچ

بنابراین سوییچ استاتیک قابل کنترل ، عمل کنترل را از الگوریتم راه حل برای پیاده سازی میسر می سازد به طوری که یک بار ، به یک فاز مطلوب دوباره متصل می شود که منجر به تعادل فاز بهتر می شود[۹]. برای سیستم توزیع نشان داده شده در شکل (۱) ، یک شبکه با سه فاز با یک ساختار شناخته شده ، این مسئله شامل یافتن یک وضعیت تعادل می شود. مدل ریاضی را می توان به صورت زیر بیان نمود [۹]:

$$I_{ph1k} = \sum_{i=1}^{3} sw_{k1i} I_{ki} + I_{ph1(k-1)} \quad (۷)$$

$$I_{ph2k} = \sum_{i=1}^{3} sw_{k2i} I_{ki} + I_{ph2(k-1)} \quad (۸)$$

$$I_{ph3k} = \sum_{i=1}^{3} sw_{k3i} I_{ki} + I_{ph3(k-1)} \quad (۹)$$

که در آن I_{ph1k} ، I_{ph2k} و I_{ph3k} نشان‌دهنده جریان های فازور در هر فاز (۱, ۲ و ۳) بعد از نقطه اتصال k است ؛ sw_{k1i} ، sw_{k2i} و sw_{k3i} سوییچ های متفاوت هستند (مقدار ۱ به معنای این است که سوییچ روشن و ۰ بدین معناست که خاموش می باشد). I_{k1} و I_{k2} و I_{k3} جریان های متفاوت بار (فازورها) متصل به سیستم توزیع را در نقطه اتصالات k نشان می دهند. محدودیت ها در مورد سوییچ ها در بالا را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{i=1}^{3} sw_{k1i} - 1 = 0 \quad (۱۰)$$

$$\sum_{i=1}^{3} sw_{k2i} - 1 = 0 \quad (۱۱)$$

$$\sum_{i=1}^{3} sw_{k3i} - 1 = 0 \quad (۱۲)$$

۳- الگوریتم ACOH

یک تحلیل از مکانیزم به روز سازی فرومون در الگوریتم اصلی ACO، نشان می‌دهد که پس از ایجاد یک راه‌حل کامل، فرومون براساس معادله به روزرسانی فرومون، که هم تبخیر فرومون و هم افزایش فرومون را شامل می‌شود، به روز می‌شود. تبخیر به طور خودکار تبخیر می‌شود و به تدریج قدرت مسیر فرومون در هر یال یا راس را کاهش می‌دهد و عمدتاً برای جلوگیری از گیر افتادن الگوریتم در یک ناحیه بهینه محلی استفاده می‌شود.

الگوریتم ACO در هنگام به روز رسانی فرومون، به سادگی تبخیر و افزایش می‌یابد و اطلاعات تکامل پویا را در مسیر بهینه تکرارشونده در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، سرعت هم‌گرایی کند ACO و کارآیی راه‌حل باید در هنگام حل مسایل بهینه‌سازی ترکیبی وسیع، بهبود یابد. علاوه بر این، فضای جستجوی ACO خیلی بزرگ است، که منابع جستجو را از بین می‌برد. در نتیجه، فضای جستجو را براساس مکانیزم به روزرسانی فرومون، برای بهبود کارایی جستجو، کاهش می‌دهیم. این مکانیزم به طور کامل از اطلاعات اختلاف پویای مسیر بهینه تکرارشونده استفاده می‌کند و فرومون را بر روی لبه‌ها افزایش می‌دهد که هرگز قبلاً ظاهر نشده اند[۱۰].

در ادامه یک ماتریس رویش فرومون به ماتریس فرومون ، اضافه شده‌است. الگوریتم اصلاح‌شده ، شامل یک ماتریس رویش فرومون منفرد است. این روش مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه تکراری را نشان می‌دهد ، که نشان‌دهنده‌ی مجموعه‌ای از بهترین مسیرهای بهینه تکراری تاکنون است که نشان‌دهنده‌ی بهترین مسیرهای بهینه مسیر می‌باشد. مکانیزم به‌هنگام سازی فرومون ، به فرومون موجود اضافه می‌شود.

Input
f: the objection function
Ω: constraint condition
Output
S_{bs}: the optimal solution
1. **Begin**
2. Set parameters and Initialize pheromone and heuristic information
3. **repeat**
4. **for** each ant *k* **do**
5. Construct a complete solution S
6. **if** f(*S*) < f(S_{bs}) **then**
7. $S_{bs} \leftarrow S$
8. **end if**
9. **end for**
10. Update pheromone on each vertex referenced by Eqs. (2) and (3)
11. **until** maximum iteration number reached
12. **return** S_{bs}
13. **End**

شکل (۳) : شبه کد الگوریتم سیستم مورچگان max-min

مکانیزم به‌هنگام‌سازی این الگوریتم مسیر بهینه تکرار شونده را ایجاد می‌کند ؛ سپس بهترین مسیر بهینه تکراری را تاکنون با مسیر بهینه تکرار شونده قبلی برای تعیین بهترین اطلاعات مسیر مقایسه می‌کند. در ادامه افزایش فرومون در محل عملیات ، به روز رسانی فرومون اولیه را برای این اطلاعات متغیر و حفظ رویش در ماتریس افزایش فرومون انجام می‌دهیم. این افزایش به سمت بهترین مسیر بهینه تنظیم می‌شود. در نتیجه احتمال اینکه مورچه‌های بعدی به قوس حاشیه دسترسی داشته باشند ؛ افزایش می‌یابد که تنوع راه‌حل را افزایش می‌دهد. و همچنین باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم و بهبود سرعت هم‌گرایی و کارایی الگوریتم می گردد[۱۱].

۴- حل مسئله متعادل سازی بار با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان بهینه

استراتژی پیشنهادی ، استفاده از کلونی مورچگان برای کنترل توالی بسته شدن سوئیچ هر بار جهت کاهش تلفات توان است که به تعادل فاز بهینه منجر خواهد شد. ورودی ها برای الگوریتم مورچگان ، جریان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

های بار نامتعادل هستند (پانزده تا در این مقاله) و خروجی ها ، توالی های بسته شدن سوییچ برای هر بار است[۱۲]. لذا متغییر اصلی الگوریتم شامل بردار این سوئیچ ها برای سه فاز در هر باس است که مشخص می کند کدام‌یک باز و کدام‌یک بسته باشند.بردارهای ستون زیر به عنوان ورودی فرض شده اند.

$$C = [I_{L1}, \dots, I_{L2}]^T \quad (۱۳)$$

شبکه پایه شعاعی برای این منظور استفاده شده است. آزمایشات بر مبنای شبکه شعاعی ، همگرایی سریع تر و بهتر را نشان داد. شبکه های پایه شعاعی ممکن است به نورون های بیشتری نسبت به شبکه های تغذیه مستقیم استاندارد نیاز داشته باشند.اما آن‌ها اغلب در کسری از زمان مورد نیاز برای شبکه های تغذیه مستقیم استاندارد طراحی می شوند. با فرض تعداد بارهای به طور مساوی توزیع شده در هر فاز، مسئله پیدا کردن سه مجموعه بهینه از دو بار، با حداقل تفاوت های میان مقادیر منحصر به فرد از سه مجموعه است. برای رسیدن به این منظور، مقدار جریان تعادل فاز ایده آل Iideal در ابتدا محاسبه می شود که برابر با یک سوم از مجموع ۱۵ جریان بار IL است[۱۳].

$$I_{ideal} = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{N} I_{l_i} \quad (۱۴)$$

در گام دوم، ما به طور بهینه سه مجموعه از جریان خود را برای سه جریان فاز Iph انتخاب می کنیم که هر یک شامل دو جریان بار است $\{I_i, j = 1, \dots n\}$.

$$I_{Load} = \{I_{Li}, j = 1, \dots, N\} \quad (۱۵)$$

$$I_{ph} = \{I_i, j = 1, \dots, n\} \ where\ I_j \in I_{Load} \quad (۱۶)$$

تفاوت بین مجموع منفرد این مجموعه ها و Iideal باید مینیمم باشند ، به طور ایده آل ۰ برای تعادل فاز کامل. بنابراین یافتن سه مجموعه ، تحت این محدودیت نیاز می شود.

$$min\left|\left(\sum_{j=1}^{n} I_j\right) - I_{ideal}\right|, \quad where\ I_j \in I_{Load} \quad (۱۷)$$

پیرو این توالی های سوییچنگ خروجی به عنوان مجموعه داده های هدف برای تابع هدف الگوریتم مورچگان در نظر گرفته می شود . جریان های فاز متعادل I_{ph1}، I_{ph2} و I_{ph3} با استفاده از توالی های سوییچنگ خروجی و جریان های بار ورودی محاسبه شده اند. برای مثال I_{ph1} توسط اضافه نمودن دو جریان بار متناظر با توالی های سوییچنگ خروجی محاسبه می شود. بنابراین اختلاف بین I_{ph1} و I_{ph2}، I_{ph3} محاسبه شده است که به طور ایده آل باید صفر باشد. تفاوت ها نشان دهنده کیفیت تعادل فاز است.

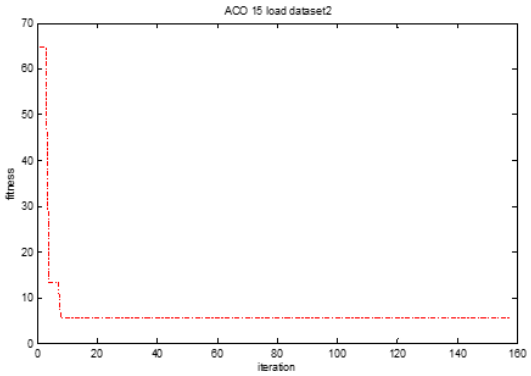
بنابراین الگوریتم مورچگان ذکر شده در بالا با استفاده از بار نامتعادل حقیقی و شبیه سازی به عنوان بردار ورودی و توالی های سوییچنگ خروجی به عنوان هدف قرار داده می شوند. بنابراین شبکه بار مجموعه داده های بار نامتعادل مختلف آزمایش می شود. خروجی توالی های سوییچنگ بهینه $\{۱،۲،۳\}$ برای سه فاز به صورت توضیح داده شده در بالا بود. با استفاده از رویه ای مشابه توضیح داده شده در بالا ، جریان های فاز متعادل محاسبه شده است و تفاوت ها بین جریان های فاز ΔI و نتایج ، نشان‌دهنده‌ی کیفیت تعادل است.

$$\Delta I_{max} = max\{\|\,|I_{ph1}| - |I_{ph2}|\,\|, \|\,|I_{ph2}| - |I_{ph3}|\,\|, \|\,|I_{ph3}| - |I_{ph1}|\,\|\} \quad (۱۸)$$

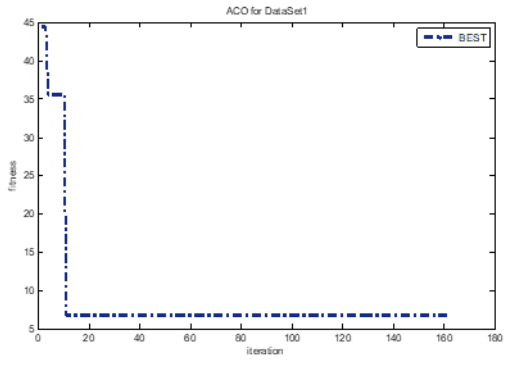
۵- نتایج شبیه سازی

ابتدا الگوریتم بر اساس داده های واقعی دریافت شده از منبع برق محلی مورد آزمایش قرار گرفت. این مجموعه داده ها دارای متوسط بار مقادیر جریان در هر مصرف کننده در یک محل خاص از شهر برای زمان های مختلف هر روز در یک ماه بود. همان پانزده مصرف کننده ، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شدند. جریان های بار سه بار در دوره زمان متفاوت روز اندازه گیری شدند و نتایج به صورت ارائه شده در جدول ۱ هستند که در آن ۱ به معنای بار مورد نظر متصل به Ph1 و ۲ متصل به Ph2 و ۳ متصل به Ph3 است. این داده ها با عدم تعادل اصلی به صورت مبنا برای اعتبارسنجی دو الگوریتم اتخاذ می شوند.

در شکل (۴) ، (۵) ، (۶) و (۷) روند مینیمم سازی مقدار تابع هدف برای شبکه با ۱۵ بار ، توسط الگوریتم مورچگان به ترتیب برای دیتاست اول و دوم و سوم نشان داده شده است.



شکل (۴) : روند همگرایی الگوریتم مورچگان در متعادل سازی شبکه با ۱۵ بار دیتاست اول

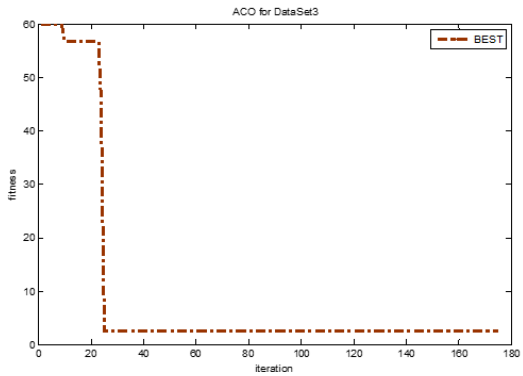


شکل (۵) : روند همگرایی الگوریتم مورچگان در متعادل سازی شبکه با ۱۵ بار دیتاست دوم

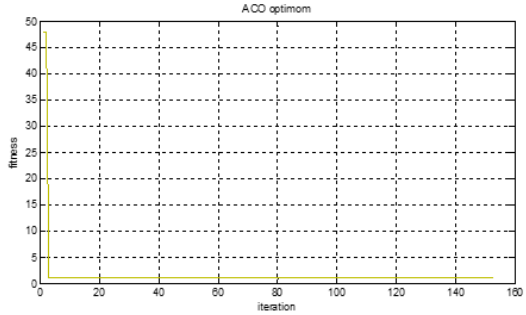
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

جدول (۱) : جریان های بار نامتعادل (داده ها)[۱۴]

مصرف کننده	داده های اول		داده های دوم		داده های سوم	
	$I_L(A)$	SW	$I_L(A)$	SW	$I_L(A)$	SW
۱	۹۴.۰۶	۱	۴۰.۱۶	۱	۱.۵۱	۱
۲	۲۲.۸۸	۲	۹۲.۶۱	۲	۷۳.۹۳	۲
۳	۶۰.۰۷	۳	۹۰.۷۷	۳	۴۴.۰۶	۳
۴	۴۸/۱۱	۱	۴۰.۶۱	۱	۹۲.۲۴	۱
۵	۸۸/۲۳	۲	۸۸.۴۷	۲	۴۶.۱۳	۲
۶	۷۵/۴۴	۳	۵.۷۳	۳	۴۱.۴۴	۳
۷	۴۵/۱۹	۱	۳۴.۹۳	۱	۸۳.۷۷	۱
۸	۱/۸۳	۲	۸۰.۵	۲	۵۱.۹۹	۲
۹	۸۱/۳۱	۳	۰.۹۷	۳	۲۰.۰۶	۳
۱۰	۶۰/۹۲	۱	۱۳.۷۵	۱	۶۶.۵۴	۱
۱۱	۷۸/۴	۲	۲۰.۰۷	۲	۸۲.۹۷	۲
۱۲	۹۱/۲۵	۳	۱۹.۶۷	۳	۱.۹۴	۳
۱۳	۷۳/۰۸	۱	۵۹.۷۷	۱	۶۷.۴۴	۱
۱۴	۱۷/۴۵	۲	۲۶.۹۴	۲	۳۷.۵۶	۲
۱۵	۴۴/۰۲	۳	۱۹.۶۸	۳	۸۲.۳۴	۳
جریان فازها به صورت خلاصه						
$I_{ph1}(A)$	۳۲۱.۳۶		۱۸۹.۲۲		۳۱۱.۵	
$I_{ph2}(A)$	۲۰۸		۳۰۱.۲۳		۲۵۲.۵۸	
$I_{ph3}(A)$	۲۶۰.۸۴		۱۴۳.۵۸		۱۸۹.۸۴	
$\Delta I_{ph-max}(A)$	۱۱۳.۳۶		۱۵۷.۶۵		۱۲۱.۶۶	



شکل (۶) : روند همگرایی الگوریتم مورچگان در متعادل سازی شبکه با ۱۵ بار دیتاست سوم



شکل (۷) : روند همگرایی الگوریتم مورچگان و الگوریتم مورچگان اصلاح شده در متعادل سازی شبکه با ۱۵ بار دیتاست سوم

جدول (۲) : توالی های سوییچینگ خروجی

توالی سوئیچینگ برای ۱۵ بار	داده های اول			داده های دوم			داده های سوم		
	NN[1 ۸ ۱]	HE [۱ ۱ ۱]	ACO	NN[1 ۸ ۱]	HE [۱ ۱ ۱]	ACO	NN[1 ۸ ۱]	HE [۱ ۱ ۱]	ACO
۱	1	1	2	1	1	3	1	1	2
۲	2	2	1	2	1	3	2	2	1
۳	1	1	1	3	2	2	3	3	2
۴	3	3	1	1	3	2	1	2	2
۵	1	3	1	3	3	3	1	1	2
۶	1	3	1	1	1	1	2	2	1
۷	2	2	3	3	3	3	3	3	3
۸	3	3	2	1	2	2	1	1	3
۹	2	3	2	2	2	1	3	2	2
۱۰	1	1	1	1	1	2	2	3	3
۱۱	3	2	1	3	2	3	2	1	3
۱۲	2	1	1	2	2	2	3	3	2
۱۳	2	2	3	3	1	1	1	3	1
۱۴	2	2	3	2	3	3	1	2	2
۱۵	1	1	2	2	3	3	1	1	1

الگوریتم ها با استفاده از MATLAB2018 پیاده سازی شدند. جدول (۲) نشان دهنده توالی های سوییچینگ خروجی برای دو الگوریتم است. جدول (۲) نشان دهنده‌ی نتایج دو الگوریتم مقاله و الگوریتم کلونی مورچگان بهینه و جریان های فاز متعادل است. در جداول (۲) و (۳) ، NN علامت اختصاری برای روش مبتنی بر شبکه عصبی است و HE علامت اختصاری برای روش مبتنی بر روش ابتکاری است.

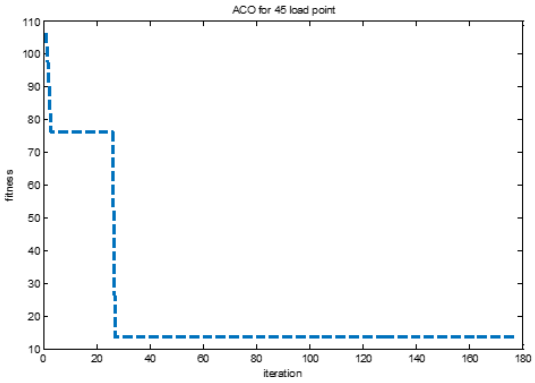
پارامتر $\Delta I_{Ph} - max$ در جداول (۱) و (۳) ، ماکزیمم اختلاف جریان های فاز است که به طور ایده آل باید صفر باشد ، اگر هیچ تعادلی وجود نداشته باشد.

برای تایید قابلیت کاربرد کلی روش ها و اظهار نظرهای حاصل ، این آزمون برای سیستم بزرگتر ۴۵ بار تکرار شد. نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

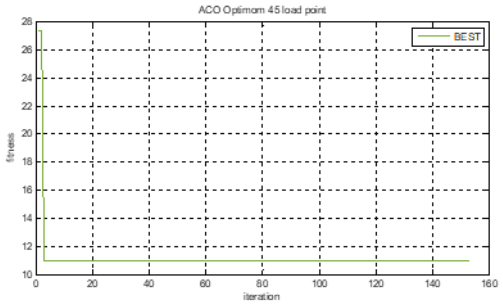
- با مقایسه پارامتر $\Delta I_{Ph} - max$، ماکزیمم تفاوت جریان های فاز ، در وضعیت عدم تعادل جدول (۱) با موارد به دست آمده بعد از اعمال دو الگوریتم جدول (۲)، یک بهبود قابل توجه در عدم تعادل دیده می شود و به نظر می رسد که الگوریتم کلونی مورچگان بهینه ، نتیجه تعادل بهتری را ارائه دهد.
- از نظر زمان محاسبه متوسط (Tc) ، همان‌طور که می توان از جداول (۲) و (۳) دید ، الگوریتم مورچگان بهینه در مقایسه با روش شبکه عصبی سریع تر است. به نظر می رسد این تفاوت با تعداد بیشتر بارها افزایش یابد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

- روش های پیشنهادی و اجزای حاصل از آنها به طور کلی برای هر تعداد از داده ها یا سیستم بار نامتعادل قابل استفاده هستند.



شکل (۸) : روند همگرایی الگوریتم مورچگان در متعادل سازی شبکه با ۴۵ بار



شکل (۹) : روند همگرایی الگوریتم مورچگان و الگوریتم مورچگان اصلاح شده در متعادل سازی شبکه با ۴۵ بار

جدول (۳) : جریان های فاز تعادل

توالی سوئیچینگ برای ۱۵ بار	داده های اول			داده های دوم			داده های سوم		
	NN[14]	HE [14]	ACO	NN[14]	HE [14]	ACO	NN[14]	HE [14]	ACO
Iph1(A)	270.9	290.8	470.3	175.5	208.3	276.65	299.6	262.3	391.94
Iph2(A)	304.1	299.5	472.81	245.2	210.6	271.4	227.4	267.9	388.02
Iph3(A)	307.3	291.9	470.45	213.9	215.8	276.98	266.9	263.7	386.6
ΔIph-max(A)	36.4	8.7	4.76	69.7	7.5	5.54	72.2	5.6	5.88

۶- نتیجه گیری

تعادل بار و فاز ، مکمل مهمی برای پیکربندی مجدد شبکه و فیدر هستند. در اتوماسیون توزیع ، این مسائل باید به طور پیوسته و همزمان برای تضمین عملکرد بهینه یک شبکه توزیع حل شوند. در این مقاله ، مسئله متعادل نمودن فاز بین فیدر خاص در سطح MV و ترانسفورماتورهای توزیع در یک ساختار شعاعی و متعادل نمودن بار در طول یک فیدر LV به عنوان مسائل بهینه سازی متعادل نمودن جریان با توجه به محدودیت های مختلف فرموله شد. از سوی دیگر ، مسئله پیکربندی مجدد شبکه و فیدر به عنوان مسئله‌ی مینیمم سازی تلفات توان به منظور کنترل باز شدن و بسته شدن سوییچ های ارتباطی فرموله شد.

تاکید این مقاله بر حل مسائل متعادل سازی بار و فاز متمرکز شده است.راه حل این مسئله پیکربندی مجدد به خوبی در متون فنی پوشش داده شده است. سه الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر MATLAB پیشنهاد شد و با داده های حقیقی نشان داده شدند. اولی یک روش ابتکاری و دیگری روش مبتنی بر شبکه عصبی و دیگری کلونی مورچگان بهینه بود.این الگوریتم به خوبی در مقایسه با روش های دیگر با استفاده از داده های حقیقی به دست آمده از تامین کننده برق شهری محلی ، جواب مطلوب تری ارائه داد. از دیدگاه عملی ، این روش ها می توانند بسیار موثر باشند ، زیرا روش های مبتنی بر مدل معمولاً زمان اجرای بسیار طولانی دارند. روش کلونی مورچگان بهبود یافته ، مناسب تر است و در مقایسه با شبکه عصبی جواب بهتری ارائه می‌دهد.

نامتعادلی بار در شبکه‌های توزیع نه تنها موجب افزایش تلفات انرژی است بلکه از لحاظ افت ولتاژ نیز اثرات نامطلوبی روی مصرف کنندگان خواهد داشت. همین طور از نظر ایمنی نیز جریان داشتن سیم نول خطر آفرین بوده و صدمات جانبی برای انسان در بر دارد. از طرفی اثرات مالی زیان باری که از این طریق بر شبکه‌های توزیع تحمیل میگردد قابل تعمق است.

سپاسگزاری

نویسنده ی این مقاله از حمایت علمی و مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول و در کسوت شاگردی از دلسوزی ، تلاش و کوشش دکتر افشین لشکرآرا محمره دانشیار و مدیر گروه ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت این دانشگاه که در تعلیم و تربیت و انتقال معلومات و تجربیات ارزشمند ، در کنار برقراری رابطه صمیمی و دوستانه با دانشجویان و ایجاد فضایی دلنشین برای کسب علم و دانش و درک شرایط دانشجویان ، تقدیر و تشکر می نماید. از خداوند متعال برای ایشان سلامتی، موفقیت و همواره یاد دادن را مسئلت دارم.

مراجع

[۱] عرب یار محمدی ، محمد تقی؛ صادقیان لمراسکی ، محبوبه و محمد علی هرمزی، ۱۳۸۷، متعادل سازی بار بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک ، شانزدهیمن کنفرانس مهندسی برق ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.

[۲] صمدی شادلو ، میلاد؛ داودی ، احسان ؛ پاکدامن ،جلیل و هادی رحمانی، ۱۳۹۱، متعادل سازی بار بهینه به کمک

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

الگوریتم تکامل تفاضلی، چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران، گناباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد.

[۳] محمود آبادی ، رضا و مسعود رشیدی نژاد، ۱۳۹۳، متعادل سازی بار بهینه با استفاده از منطق فازی، همایش الکترونیکی پژوهش های نوین در علوم و فناوری، بصورت الکترونیکی، شرکت علم محوران آسمان

[4] J. Matevosyan, G. Thurnher, W. Katzenstein, and A. Stryker, "ERCOT reserve adequacy study for the future system development scenarios with large share of renewable energy resources," in *Proc. 2013 IEEE Grenoble PowerTech*, Jun. 2013, pp. 1–6.

[5] P. V. Etingov *et al.*, "Prediction of regulation reserve requirements in California ISO balancing authority area based on BAAL," in *Proc. 2013 IEEE Power Energy Soc. General Meeting*, Jul. 2013, pp. 1–5.

[6] Y. Rebours, D. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A survey of frequency and voltage control ancillary services—part I: Technical features," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 350–357, Feb. 2007.

[7] M. Nilsson, L. S¨oder, and G. N. Ericsson, "Evaluation of different strategies for frequency quality control," in *Proc. 2016 Biennial Int. Conf. Power Energy Syst., Towards Sustain. Energy*, Jan. 2016, pp. 1–6.

[8] M. Nilsson, L. S¨oder, and Z.Yuan, "Estimation of power system frequency response based on measured simulated frequencies," in *Proc. 2016 IEEE Power Energy Soc. General Meeting*, Jul. 2016, pp. 1–5.

[9] P. Kundur *et al.*, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.

[10] "Balancing and frequency control,"North Amer. Electr.Rel. Corp., Princeton, NJ, USA, Jan. 2011.

[11] C. B. Alexandre, A. Carlos, and Newton, "Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration,"*IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, pp. 206–212, Feb. 2005.

[12] M. Siti, A. A. Jimoh, and D. Nicolae, "Load balancing in distribution feeder through reconfiguration," presented at the IECON, Raleigh, NC,Nov. 6-12, 2005.

[13] Z. Wang , H. Xing , T. Li , et al. , A modified ant colony optimization algorithm for network coding resource minimization [J], IEEE Trans. Evol. Comput. 20 (3) (2016) 325–342 .

[14]Siti,M.W.,Nicolae,D.V.,Jimoh,(2007).Reconfiguration and load balancing in the LV and MV distribution networks for optimal performance .IEEE Transactions on power Delivery,22(4),2534-2540.

[15] Jiaxu Ning 1 , Qin Zhang 1 , Changsheng Zhang , Bin Zhang , (2018) , A best-path-updating information-guided ant colony optimization algorithm , Information Sciences

رزومه



محمد امین اسـفنده در دزفـول متولـد شـده است (۱۳۷۰). تحصیلات دانشگاهی خـود را در مقطـع کارشناسـی مهندسـی بـرق- کنتـرل از دانشـگاه صـنعتی جنـدی شـاپور (۱۳۹۴) ، کارشناسی‌ارشد مهندسی بـرق- سیسـتم هـای قـدرت از دانشـگاه آزاد اسـلامی واحـد دزفـول (۱۳۹۸) سپری کرده است.فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌منـدی ایشـان در زمینه ادوات FACTS ، شبکه های هوشمند انرژی الکتریکی و بهره برداری از سیستم‌های قدرت اسـت و در حـال حاضـر کارشـناس بـرق کارخانه ذوب و نورد پیوسته میـدا (MIDA) ، مجتمـع فـولاد روهینـا جنوب می باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Load Balancing Using a Best-Path-Updating Information-Guided Ant Colony Optimization Algorithm

Mohammad Amin Esfandeh[1]

1-Senior Electrical Engineer, South Rouhina Steel Complex, Dezful, Iran,
amin.esfandeh@gmail.com

Abstract: Load balancing and phase balancing are important complement to reconfiguration of the feeder and the network.In the distribution automation ,these issues must be solved continuously and simultaneously to ensure the optimal performance of a distribution network.Distribution network imbalance has various consequences such as increase in power losses, voltage drop,cost increase,etc.In this paper,the problem of phase balancing of distribution transformers in a radial structure and load balancing during a MV feeder between the special feeder at the surface is formulated as flow equilibrium optimization problems due to different constraints.In fact,the problem of reconfiguration of the power supply and the grid is formulated as a problem of minimizing power losses due to its importance for controlling the opening and closing of sections and switches.The results showed that the ant colony optimization algorithm approach better than other proposed methods and successfully using real data obtained from the local municipal electricity supplier.From a practical point of view ,these methods can be very effective,because these methods usually have a very long runtime.The optimal ant colony method is more suitable and offers a better response than the neural network.

Keywords: Ant Colony Algorithm Optimization; Distribution Networks; Load Balancing; Reconfiguration

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.4.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]