

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 روئینا 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 تغذیه MV 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 بار 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.

واژه های 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 شبکه های توزیع و تزریق روح مهندسی به فعالیت های آن در دهه ی گذشته شتاب فراوانی به خود گرفته است. امروزه تهیه ی طرح ها و نقشه های مهندسی در این شاخه از صنعت برق نیز جایگاه خود را می طلبد که آن را می توان دگرگونی و شکوفایی در شبکه های 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 اجتناب ناپذیر است [۱]. اغلب مشترکین برق در شبکه های توزیع مصرف کننده های تک فاز بوده و توزیع این مشترکین روی فازهای سه گانه به طور یکسان و متعادل نمی باشد. لذا شبکه های توزیع معمولاً نامتعادل بوده و از سیم نول آن ها جریان نسبتاً زیادی عبور می کند. امروزه میزان عدم تعادل بار به عنوان یکی از شاخص های

کیفیت انرژی الکتریکی تلقی می شود. 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 خاموشی های ناخواسته، افزایش حوادث تأسیسات و کاهش عمر آن ها، افزایش فعالیت های 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 می رسد [۲]. امروزه مشکل نامتعادلی بار با استفاده از تکنیک برنامه نویسی از روش های مختلفی قابل حل است. استراتژی جابجایی بار یکی از روش های بهینه برای متعادل سازی بار می باشد. در استراتژی جابجایی بار، بارهای شبکه باید به گونه ای متعادل بر روی سه فاز قرار گیرند. انجام این روش در شبکه ها معمولاً به روش های سعی و خطا و با

بقیه گره‌ها در شبکه نیز کاهش می‌یابد. این کاهش از قطعی سرویس مشترکین جلوگیری می‌کند [۶].

۲) افت ولتاژ متوسط: مسئله‌ی مهم دیگری که باید در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شود مینیم 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 مینیم 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 شبکه‌های 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 به صورت زیر است:

$$\min of = w_1 \times I_N + w_2 \times (V_d)_{AV} + w_3 \times P_{loss} + w_4 \times RC_t \quad (1)$$

که فاکتورهای w_1 تا w_4 ، مقادیر فاکتور وزنی هستند که اپراتور سیستم برحسب اهمیت فاکتور تعیین می‌شوند.

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$$

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

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

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:

$$\max of = w_1 \times \mu_{I_N} + w_2 \times \mu_{(V_d)_{AN}} + w_3 \times \mu_{P_{loss}} + w_4 \times \mu_{RC_t} \quad (3)$$

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 w_1 سایر فاکتورها در نظر گرفته می‌شود؛ به عبارت دیگر، 0.4 و سایر فاکتورها برابر 0.2 تعیین شده‌اند. در بهینه‌سازی،

تابع هدف داده شده در (۳) باید ماکزیمم شده و بنابراین

هزینه‌های سیستم مینیم شوند.

متعادل سازی 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

روش‌های سنتی انجام می‌شود که معمولاً نتایج مناسبی به دست نمی‌دهد. اخیراً استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند برای متعادل سازی 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، زنبور عسل الهام گرفته شده‌اند. این روش‌های بهینه‌سازی توسط جامعه علمی هوش محاسباتی مورد تحسین قرار گرفته است. آن‌ها عملکرد بهتری در مسائل بهینه‌سازی پیچیده گسسته داشتند. علاوه بر این، این الگوریتم‌ها به طور موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های متعدد علمی مانند کنترل فرآیند، پردازش تصویر و دیگر مسائل مهندسی به کار گرفته شده‌اند [۳]. ضمن درک این موضوع در این مقاله، الگوریتم کلونی مورچگان برای متعادل سازی 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 بنا شده‌اند، یکی از فرآیندهایی که با در نظر گرفتن آن از همگرایی زود هنگام مورچه‌ها به یک مسیر غیر بهینه جلوگیری می‌شود، عمل تبخیر می‌باشد. پس از آن 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 فرمون 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 متعادل سازی بار در شبکه‌های توزیع ارائه خواهد شد، که می‌تواند آرایش جدیدی از بارهای مشترکین با تغییر بار و حوزه‌های مختلف ارائه دهد. بنابراین می‌توان به صورت دوره‌هایی 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 به طور خلاصه در زیر آورده شده‌اند:

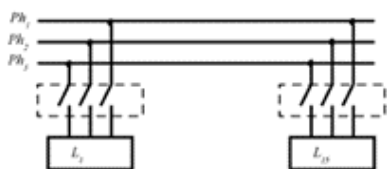
۱) جریان خنثی فیدر تغذیه: یکی از مهم‌ترین معیارهایی که به طور مستقیم متناظر با کاهش نامتعادلی فاز است جریان خنثی فیدر تغذیه است. اگر ما جریان خنثی فیدر تغذیه را کاهش دهیم، جریان خنثی

* Ant colony optimization algorithms

حدود ظرفیت خط

۲-۱-۲- تعادل فاز و بار

یک فیدر توزیع معمولاً یک سیستم سه فاز، چهار سیستم 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 مهندسين توزیع می باشد، زیرا آن ها 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 فاز 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 بدون بار (V_{0j})، امپدانس داخلی (Z_j) و جریان بار (I_j) در (۶) نشان داده شده است که در آن V_j ، I_j و Z_j فازورهای مختلط هستند و $j = 1, 2, 3$.

$$V_j = V_{0j} - Z_j I_j \quad (6)$$

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)

فاز در نظر گرفته شده اند. هر مورچه یک موقعیت دارد که به صورت یک رشته معرفی شده است. تعداد کاراکترها برای موقعیت با تعداد گره های فیدر توزیع است؛ همچنین تعداد رقم های تعیین شده برای هر گره یا کاراکتر معادل با تعداد استراتژی های ممکن برای آرایش فاز در آن گره است [۷].

۲-۱-۲- فرمول بندی مسئله

۲-۱-۱- پیکربندی مجدد شبکه و فیدر

سیستم توزیع، در واقع مرحله نهایی در انتقال توان به مشتریان می باشد. معمولاً این کار از ثانویه ترانسفورماتورهای 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 سوییچ در سیستم های توزیع اولیه وجود دارد: سوییچ به طور معمول بسته که بخش های خط را متصل می کند و سوییچ 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]:

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (4)$$

که در آن V_i ، Q_i ، P_i ، r_i به ترتیب مقاومت، توان حقیقی، توان راکتیو و ولتاژ شاخه 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 V_j 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.

$$V_j^{min} \leq |V_j| \leq V_j^{max} \quad (5)$$

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 تکرار شونده 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 شده است. الگوریتم اصلاح شده، شامل یک ماتریس رویش فرومون منفرد است. این روش مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه تکراری را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده مجموعه‌ای از بهترین مسیرهای بهینه تکراری تاکنون است که نشان‌دهنده بهترین مسیرهای بهینه تکراری می‌باشد. مکانیزم به هنگام سازی فرومون، به فرومون موجود اضافه می‌شود.

Input
f: the objection function
 Ω : constraint condition
Output
 S_{best} : 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 $f(S) < f(S_{best})$ then
7. $S_{best} \leftarrow S$
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_{best}
13. End

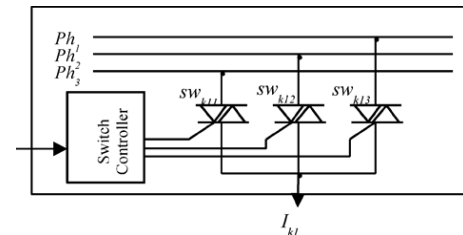
شکل (۳): شبه کد الگوریتم سیستم مورچگان max-min

مکانیزم به هنگام سازی 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 می‌گردد [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. ورودی‌ها برای الگوریتم مورچگان، جریان

نشان می‌دهد که هر مصرف کننده، یک بار تک فاز است که توسط یک سوئیچ استاتیک قابل کنترل (در این مورد تریاک) قابل اتصال به یک فاز مطلوب است.



شکل (۲): انتخابگر سوئیچ

بنابراین سوئیچ استاتیک قابل کنترل، عمل کنترل را از الگوریتم راه حل برای پیاده سازی میسر می‌سازد به طوری که یک بار، به یک فاز مطلوب دوباره متصل می‌شود که منجر به تعادل فاز بهتر می‌شود [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 می‌شود. مدل ریاضی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۹]:

$$I_{ph1k} = \sum_{i=1}^3 SW_{k1i} I_{ki} + I_{ph1(k-1)} \quad (7)$$

$$I_{ph2k} = \sum_{i=1}^3 SW_{k2i} I_{ki} + I_{ph2(k-1)} \quad (8)$$

$$I_{ph3k} = \sum_{i=1}^3 SW_{k3i} I_{ki} + I_{ph3(k-1)} \quad (9)$$

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} سوئیچ های متفاوت هستند (مقدار ۱ به معنای این است که سوئیچ روشن و ۰ بدین معناست که خاموش می‌باشد). I_{k1} و I_{k2} و I_{k3} جریان های متفاوت بار (فازورها) متصل به سیستم توزیع را در نقطه اتصالات k نشان می‌دهند. محدودیت ها در مورد سوئیچ ها در بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sum_{i=1}^3 SW_{k1i} - 1 = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^3 SW_{k2i} - 1 = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^3 SW_{k3i} - 1 = 0 \quad (12)$$

۳- الگوریتم ACO

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.

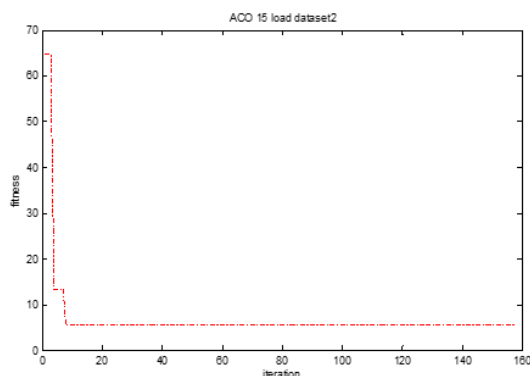
الگوریتم ACO در هنگام به روز رسانی فرومون، به سادگی تبخیر و افزایش می‌یابد و اطلاعات تکامل پویا را در مسیر بهینه تکرار شونده در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، سرعت هم‌گرایی کند ACO و کارایی راه‌حل باید در هنگام حل مسایل بهینه‌سازی ترکیبی وسیع، بهبود

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، نشان دهنده کیفیت تعادل است.

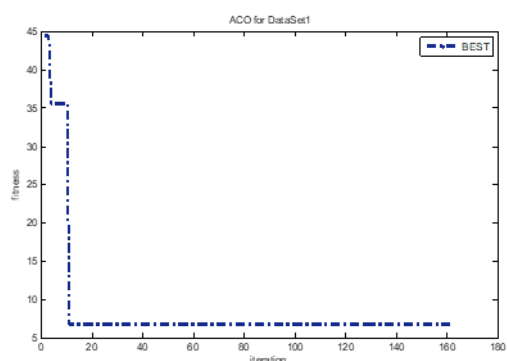
$$\Delta I_{max} = \max\{\|I_{ph1} - I_{ph2}\|, \|I_{ph2} - I_{ph3}\|, \|I_{ph3} - I_{ph1}\|\} \quad (18)$$

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

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

$$C = [I_{L1}, \dots, I_{L2}]^T \quad (13)$$

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 نورهن های بیشتری نسبت به شبکه های تغذیه مستقیم استاندارد نیاز داشته باشند. اما آن ها 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 Ideal در ابتدا محاسبه می شود که برابر با یک سوم از مجموع ۱۵ جریان بار IL است [۱۳].

$$I_{ideal} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N I_{Lj} \quad (14)$$

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 $\{I_{ij}, j = 1, \dots, n\}$

$$I_{Load} = \{I_{Lij}, j = 1, \dots, N\} \quad (15)$$

$$I_{ph} = \{I_{ij}, j = 1, \dots, n\} \text{ where } I_j \in I_{Load} \quad (16)$$

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

$$\min |(\sum_{j=1}^n I_j) - I_{ideal}|, \text{ where } I_j \in I_{Load} \quad (17)$$

پیرو این توالی های سویچینگ 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 سویچینگ خروجی و جریان های بار ورودی محاسبه شده اند. برای مثال I_{ph1} توسط اضافه نمودن دو جریان بار متناظر با توالی های سویچینگ خروجی محاسبه می شود. بنابراین اختلاف بین I_{ph1} و I_{ph2} 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 سویچینگ خروجی به عنوان هدف قرار داده می شوند. بنابراین شبکه بار مجموعه داده های بار نامتعادل مختلف آزمایش می شود. خروجی توالی های سویچینگ بهینه $\{1, 2, 3\}$ برای سه فاز به صورت توضیح داده شده در

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

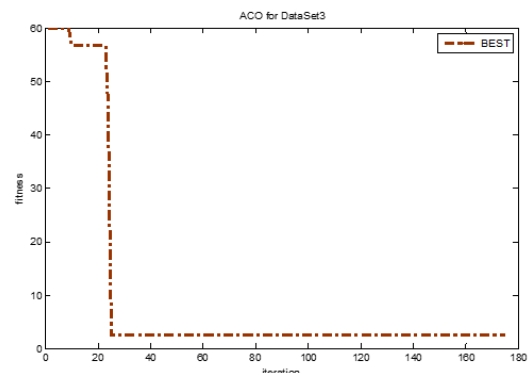
داده های سوم	داده های دوم		داده های اول		مصرف کننده
	$I_L(A)$	SW	$I_L(A)$	SW	
۱	۱.۵۱	۱	۴۰.۱۶	۱	۹۴.۰۶
۲	۷۳.۹۳	۲	۹۲.۶۱	۲	۲۲.۸۸
۳	۴۴.۰۶	۳	۹۰.۷۷	۳	۶۰.۰۷
۴	۹۲.۲۴	۱	۴۰.۶۱	۱	۴۸/۱۱
۵	۴۶.۱۳	۲	۸۸.۴۷	۲	۸۸/۲۳
۶	۴۱.۴۴	۳	۵.۷۳	۳	۷۵/۴۴
۷	۸۳.۷۷	۱	۳۴.۹۳	۱	۴۵/۱۹
۸	۵۱.۹۹	۲	۸۰.۵	۲	۱/۸۳
۹	۲۰.۰۶	۳	۰.۹۷	۳	۸۱/۳۱
۱۰	۶۶.۵۴	۱	۱۳.۷۵	۱	۶۰/۹۲
۱۱	۸۲.۹۷	۲	۲۰.۰۷	۲	۷۸/۴
۱۲	۱.۹۴	۳	۱۹.۶۷	۳	۹۱/۲۵
۱۳	۶۷.۴۴	۱	۵۹.۷۷	۱	۷۳/۰.۸
۱۴	۳۷.۵۶	۲	۲۶.۹۴	۲	۱۷/۴۵
۱۵	۸۲.۳۴	۳	۱۹.۶۸	۳	۴۴/۰.۲
جریان فازها به صورت خلاصه					
$I_{ph1}(A)$	۳۱۱.۵		۱۸۹.۲۲		۳۲۱.۳۶
$I_{ph2}(A)$	۲۵۲.۵۸		۳۰۱.۲۳		۲۰.۸
$I_{ph3}(A)$	۱۸۹.۸۴		۱۴۳.۵۸		۲۶۰.۸۴
$\Delta I_{ph-max}(A)$	۱۲۱.۶۶		۱۵۷.۶۵		۱۱۳.۳۶

جدول (۲): توالی های سویچینگ خروجی

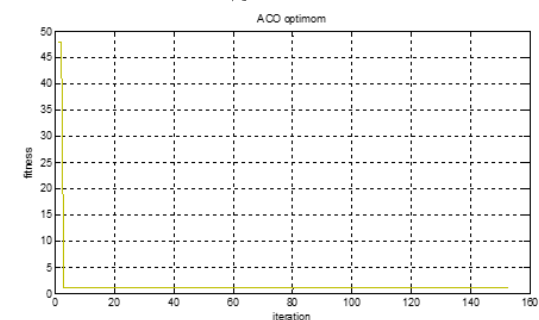
توالی سویچینگ برای ۱۵ بار	داده های سوم			داده های دوم			داده های اول		
	ACO	HE	NN1	ACO	HE	NN1	ACO	HE	NN1
۱	۲	۱	۱	۳	۱	۱	۲	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۳	۱	۲	۱	۲	۲
۳	۲	۳	۳	۲	۲	۳	۱	۱	۱
۴	۲	۲	۱	۲	۳	۱	۱	۳	۳
۵	۲	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۳	۱
۶	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۱
۷	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۸	۳	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۳	۳
۹	۲	۳	۲	۱	۲	۲	۲	۳	۲
۱۰	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱
۱۱	۳	۲	۱	۳	۲	۳	۱	۳	۳
۱۲	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲
۱۳	۱	۳	۳	۱	۱	۱	۳	۳	۱
۱۴	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۱	۲	۲
۱۵	۱	۱	۲	۳	۳	۳	۱	۱	۱

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

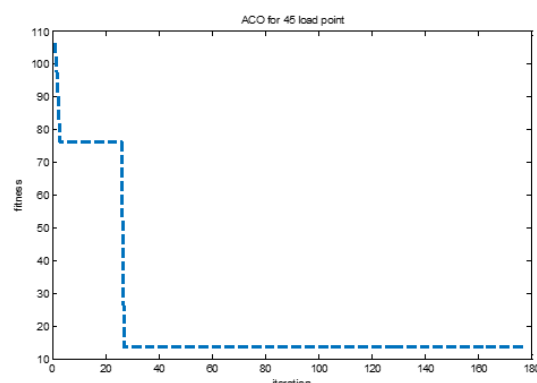


شکل (۶): روند همگرایی الگوریتم مورچگان در متعادل سازی شبکه با ۱۵ بار دیتاست سوم

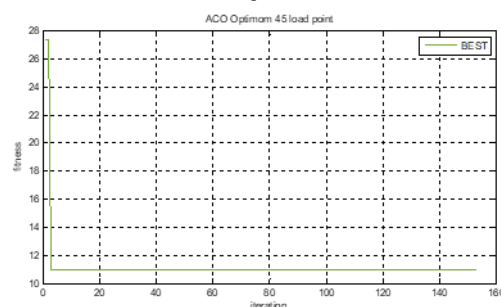


شکل (۷): روند همگرایی الگوریتم مورچگان و الگوریتم مورچگان اصلاح شده در متعادل سازی شبکه با ۱۵ بار دیتاست سوم

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 سوئیچ نگ برای ۱۵ بار	داده های اول			داده های دوم			داده های سوم		
	ACO	HE [14]	NN[14]	ACO	HE [14]	NN[14]	ACO	HE [14]	NN[14]
Iph1(A)	270	290	470.	175	208	276.	299	262	391.
	.9	.8	3	.5	.3	65	.6	.3	94
Iph2(A)	304	299	472.	245	210	271.	227	267	388.
	.1	.5	81	.2	.6	4	.4	.9	02
Iph3(A)	307	291	470.	213	215	276.	266	263	386.
	.3	.9	45	.9	.8	98	.9	.7	6
$\Delta I_{ph-max}(A)$	36.	8.7	4.76	69.	7.5	5.54	72.	5.6	5.88
	4			7			2		

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 مسئله مینیمم سازی تلفات توان به منظور کنترل باز شدن و بسته شدن سوئیچ 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 می دهد.

نامتعادلی بار در شبکه های 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 شبکه های 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 محرمه 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، شانزدهمین 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

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. Söder, 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. Söder, 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 Ning¹, Qin Zhang¹, Changsheng Zhang, Bin Zhang, (2018), "A best-path-updating information-guided ant colony optimization algorithm," *Information Sciences*

رزومه



محمد امین اسفنده در دزفول متولد شده است (۱۳۷۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - کنترل از دانشگاه صنعتی جندی شاپور (۱۳۹۴)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - سیستم های قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

(۱۳۹۸) سپری کرده است. فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، شبکه های هوشمند انرژی الکتریکی و بهره برداری از سیستم های قدرت است و در حال حاضر کارشناس برق کارخانه ذوب و نورد پیوسته میدا (MIDA)، مجتمع فولاد روینا جنوب می باشد.

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

Mohammad Amin Esfandeh¹

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