Construction Science and Technology
Volume 5, Issue 3

Optimal reconfiguration of power distribution networks to improve power quality using multi-objective planning

Farhad Rashidi [1], Mohamad Tabrizian [2*], Hamidreza Shahmirzad [3]

[1] Department of electrical engineering, Yadegar-e-Imam Khomeini, Shahre-Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2] Assistant Professor, Islamic Azad University, Yadegar Imam Branch, Tehran, Iran
[3] Master of Science, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering - Yadegar Imam Khomeini Branch, Shahr-e Ray - Islamic Azad University - Tehran - Iran

R T I C L E I N F O

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2024 May 13

Accepted: 2024 September 5

* Correspondence Email Addres:

mm_tabrizian@yahoo.com

Keywords:

Distribution Network,

Reconfiguration,

Single-Objective Optimization,

Multi-Objective Optimization

A B S T R A C T

One of the most important components of electrical energy systems is power distribution networks, which is our interface between power transmission networks and micro and macro consumers. The main task of these networks can be considered as reducing the voltage level and preparing electrical energy for delivery to consumers, which is done according to different structures and voltage levels. An example of extensive and important research in this area is the rearrangement of distribution networks. One of the effective optimization methods in network rearrangement is the use of heu rustic algorithms in order to find the best arrangement for the distribution network by considering various network constraints. In this paper, while modeling the problem of optimal rearrangement of power distribution networks with the aim of improving power quality, it is solved using particle swarm optimization (PSO) algorithm both single-objective and multi-objective and the results from the simulation, it shows the successful performance and proper efficiency of the two methods of finagle-objective and multi-objective PSO optimization in this regard.

Publisher: Imam Hussein University
© **Authors**
This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال سوم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۴۱ الی ۴۹

علمی- تخصصی

بازآرایی بهینه شبکه‌های توزیع برق جهت بهبود کیفیت توان با استفاده از برنامه‌ریزی چند هدفی

فرهاد رشیدی[۱]، محمد تبریزیان[۲*]، حمیدرضا شاهمیرزاد[۳]

۱و۳- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵)

چکیده

یکی از اجزای مهم سامانه‌های انرژی الکتریکی، شبکه‌های توزیع توان بوده که واسط ما بین شبکه‌های انتقال توان و مصرف‌کننده‌های خرد وکلان است. وظیفه اصلی این شبکه‌ها را می‌توان کاهش سطح ولتاژ و آماده‌سازی انرژی الکتریکی برای تحویل به مصرف‌کنندگان دانست که با توجه به ساختارها و سطوح مختلف ولتاژ انجام می‌گیرد. یک نمونه از تحقیقات گسترده و پراهمیت در این حوزه، بازآرایی شبکه‌های توزیع است. از جمله روش‌های بهینه‌سازی موثر در بازآرایی شبکه‌ها، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به‌منظور یافتن بهترین آرایش برای شبکه توزیع با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف و محدودیت‌های متنوع شبکه است. در این مقاله ضمن مدل‌سازی مناسب برای مسئله بازآرایی بهینه شبکه‌های توزیع برق با هدف بهبود کیفیت توان، حل آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، به هر دو صورت تک‌هدفه و چندهدفه، صورت گرفته است و نتایج حاصله از شبیه‌سازی بیانگر عملکرد موفق و کارآیی مناسب دو روش بهینه‌سازی PSO تک هدفه و چندهدفه در این موضوع است.

کلید واژه‌ها: شبکه توزیع، بازآرایی، بهینه‌سازی تک‌هدفه، بهینه‌سازی چندهدفه

۱. مقدمه

سامانه‌های انرژی الکتریکی یکی از پیچیده‌ترین تجهیزات ساخته شده توسط بشر در چند دهه اخیر بوده‌اند. به‌دلیل گسترش روز افزون نیاز تأمین انرژی الکتریکی در انواع واحدهای خانگی، تجاری و صنعتی، شبکه‌های گسترده تولید، انتقال و توزیع توان در سراسر کشورها گسترده شده‌اند. از سوی دیگر به دلیل ماهیت پیچیده شبکه‌های برق‌رسانی مطالعات گسترده‌ای در راستای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری این شبکه‌ها انجام گرفته و در حال توسعه می‌باشد. یکی از اجزای مهم شبکه‌های انرژی الکتریکی شبکه‌های توزیع توان بوده که واسط ما بین شبکه‌های انتقال توان و مصرف‌کننده‌های خرد و کلان می‌باشند. وظیفه اصلی این سامانه‌ها را می‌توان کاهش سطح ولتاژ و آماده‌سازی انرژی الکتریکی برای تحویل به مصرف‌کنندگان دانسته که با توجه به ساختارها و سطوح مختلف ولتاژ انجام می‌گیرد. تحقیقات انجام گرفته در زمینه شبکه‌های توزیع معطوف به موارد گسترده‌ای چون کیفیت توان، بازآرایی شبکه‌ها، شبکه‌های هوشمند و قابلیت اطمینان بوده که با توجه به اهداف مختلف ارگان‌های فعال در این حوزه‌ها گسترش یافته‌اند. یکی از زمینه‌هایی که در چندین دهه اخیر توجه محققان دانشگاهی و مهندسان شرکت‌های فعال در صنعت برق را به خود مشغول کرده است مسئله بهبود کیفیت توان می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان معطوف به ساختار شبکه‌های توزیع توان دانسته که در آن عموما بارهای غیرخطی و دارای نوسان زیاد وجود داشته است. وجود این بارها باعث می‌شود اعوجاجات زیادی در جریان‌ها و ولتاژهای شبکه رخ دهد. این امر می‌تواند علاوه بر صدمه به تجهیزات مشترکین مصرف‌کننده آسیب‌های جدی به اجزای سامانه‌های توزیع توان چون ترانسفورمرها وارد نماید. لازم به ذکر است علاوه بر کیفیت توان از دیگر مسائل درگیر در شبکه‌های توزیع میزان تلفات بوده که در اکثر پژوهش‌ها به آن پرداخته شده است. راهکارهای مختلفی برای بهبود کیفیت توان در سامانه‌های توزیع ارائه شده است. از جمله مهم‌ترین روش‌های مربوطه می‌توان به بازآرایی

* نویسنده پاسخگو: mm_tabrizian@yahoo.com

شبکه‌های توزیع و هوشمندسازی شبکه‌ها اشاره نمود. بازآرایی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی با توجه به تأثیر به‌سزای ساختار آن‌ها در کیفیت توان، یکی از روش‌های پرکاربرد در بهبود شاخص‌های آن بوده که همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین به دلیل کاربردی بودن این روش‌ها در حالت‌های مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی شبکه، راهکار بازآرایی در مقایسه با دیگر روش‌های بهبود کیفیت می‌تواند مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

۲. روش تحقیق

ساختار برنامه‌ریزی شده برای بسیاری از شبکه‌های توزیع، ساختاری حلقوی بوده اما به دلایل مختلف ساختار مورد نظر برای بهره‌برداری به‌صورت ساختاری شعاعی می‌باشد. دلایل این امر را می‌توان به موارد مختلفی معطوف نمود. دو دلیل عمده آن یکی سادگی سامانه‌های حفاظتی و هماهنگی‌های لازم و دیگری کاهش جریان اتصال کوتاه در داخل شبکه است.

در مطالعات ابتدایی برای شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی هدف اصلیِ تحقیقات صرفا تحلیلی از وضعیت شبکه با توجه به میزان بار مصرفی آن بوده است. ساختار شعاعی این شبکه‌ها و عدم وجود فناوری‌های تولید و تبدیل انرژی در این ساختارها، منجر به توسعه روش‌هایی مختلف برای ارائه پخش بار شده که صرفا جریان‌ها و ولتاژهای سامانه را معین می‌سازد. البته محاسبات تلفات نیز یکی از اصول حیاتی این سامانه‌ها بوده که در این تحقیقات مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است مهم‌ترین روش‌های پخش‌بار مورد استفاده در پژوهش‌های سنتی روش پخش بار "جاروب پس‌رو-پیش‌رو" می‌باشد. دلیل اصلی استفاده از این روش در مقابل روش‌های مرسوم انجام پخش‌بار چون روش‌های نیوتون-رافسون و گاوس-سایدل، بالا بودن نسبت مقاومت به راکتانس در شبکه‌های توزیع توان و همچنین ساختار شعاعی آن می‌باشد[4-1].

در جهت بهره‌برداری به صورت بهینه از شبکه‌های انرژی الکتریکی و بهبود راندمان این شبکه‌ها، محققان روش‌های مختلفی چون پخش بار بهینه و بازآرایی شبکه‌ها را مورد استفاده قرار داده‌اند. در روش‌های مربوط به پخش بار بهینه، با توجه به منحنی‌های هزینه تولید برای نیروگاه‌های بزرگ و کوچک موجود در شبکه، باعث می‌شود تخصیص بهینه توان به شکل کاملا بهینه و کارا انجام گیرد. این امر باعث می‌شود هزینه کلی سامانه کمینه شده و تخصیص بهینه برای اجزای شبکه به شکل جامعی انجام گیرد. برای نمونه در[5] به عنوان پژوهشی در این مورد اشاره نموده که در آن پخش‌بار بهینه شبکه‌های الکتریکی در حضور تولیدات پراکنده و همچنین عدم قطعیت آن‌ها انجام گرفته است.

در مورد بازآرایی شبکه‌های توزیع نیز کمینه‌کردن هزینه‌ها هدف اصلی پژوهش بوده که عموما بهره‌برداران شبکه‌های توزیع از آن استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که این روش فراتر از روش پخش بار بهینه در سامانه‌های توزیع انرژی بوده و می‌تواند علاوه بر بهبود تلفات سامانه اهداف دیگری چون متعادل‌سازی بار و بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان را نیز به همراه داشته باشد [6-8]. لازم به ذکر است که مسائل ارائه شده برای بازآرایی شبکه‌های توزیع مدل‌هایی بسیار پیچیده و غیرخطی از نوع MINLP است.

در بسیاری از تحقیقات انجام گرفته در حوزه بازآرایی به بررسی انواع مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی و مجموع مربعات انجام گرفته است. از این رو می‌توان از [9] به عنوان پژوهشی یاد نمود که در آن با ارائه یک مدل خطی به مسئله بازآرایی پرداخته شده است. لازم به ذکر است در این مرجع با استفاده از متدهای مربوط به حمل و نقل و همچنین روش‌های فراابتکاری مسئله بازآرایی مورد بررسی قرار گرفته و ارزیابی شده است. مرجع [10] از دو روش اصلی برای برخورد با مسئله بازآرایی استفاده کرده است. در روش اول با مدلسازی مسئله به صورت یکی مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مدلسازی‌های مربوطه انجام گرفته است. این نکته ضروریست که برای مدلسازی سامانه به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح لازم است توابع هدف و همچنین قیود سامانه به شکل خطی تبدیل گردد. در روش دوم بدون انجام فرآیند خطی‌سازی، مدلسازی‌ها به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح درآمده که با استفاده روش‌های حل ابتکاری (الگوریتم ژنتیک) حل شده است.

در مرجع[12-11] به ترتیب مدل‌هایی به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح مربعی و برنامه‌ریزی عدد صحیح مخروطی انجام گرفته و نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به ماهیت پیچیده این مسائل روش‌های مختلف حل برای آن ارائه شده که این روش‌ها عموما به دو دسته روش‌های قطعی و تکنیک‌های مبتنی بر الگوریتم های ابتکاری تقسیم می‌شود.

مرجع[11] به بررسی مسئله بازآرایی به صورت حل قطعی و بسته پرداخته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش شاخه و کران(*Branch and Bound*) اشاره نمود. روش‌های دیگر نیز بر پایه الگوریتم‌های فرابتکاری موجود بوده به عنوان نمونه [13,14] به بررسی الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، در[15] به بررسی الگوریتم کلونی مورچگان، در [16] به بررسی الگوریتم ازدحام ذرات، در[17,18] به بررسی الگوریتم ژنتیک و در[19] به بررسی الگوریتم جستجوی ممنوعه در حل مسئله بازآرایی پرداخته شده است. در بررسی تحقیقات انجام گرفته در حوزه کیفیت توان می توان به مراجع[25-20] اشاره نمود. در این پژوهش‌ها تکنیک‌های

مختلفی برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی مسئله

۳-۱. بهینه‌سازی چند هدفه بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO)

در حالت کلی مسئله بهینه‌سازی چندهدفه می‌تواند به شکل زیر بیان شود:

$$\min_{x\epsilon R^n} f(x) = \{f_1(x).f_2(x).\dots.f_n(x)\} \quad (۱)$$

$$s.t.\, g(x) > 0 \quad ; \quad h(x) = 0 \quad (۲)$$

که x بردار متغیرهای تصمیم‌گیری و محدود به فضای تصمیم‌گیری Ω می‌باشد. به طوری که f مجموعه‌ای از اهداف می‌باشد که باید کمینه شود. توابع h و g بیان‌کننده مجموعه‌ای از قیود تساوی و نامساوی می‌باشند که ناحیه‌های امکان‌پذیر از فضای جواب n بعدی گسسته یا پیوسته ممکن را تعریف می‌کنند. در بهینه‌سازی یک‌هدفه، مجموعه امکان‌پذیر فقط بر اساس تابع هدف تعیین می‌شود و برای هر مجموعه جواب داده شده، بهترین جواب بر اساس مقدار تابع هدف مشخص می‌شود. بنابراین هدف یافتن پاسخی است که تابع هدف را کمینه یا بیشینه نماید. در حالی که در بهینه‌سازی چندهدفه که هدف‌های زیادی دارد، مرتب کردن مجموعه جواب بسیار پیچیده می‌شود. روش‌های اولیه، مسئله چندهدفه را به مسئله یک هدفه تبدیل می‌کرد. از جمله محدودیت‌های این روش حجم زیاد محاسبات و نیاز به دانش قبلی از مسئله و بایاس نسبت به مناطق خاصی از نمودار مصالحه می‌باشد. در مسائل چندهدفه تنها یک پاسخ وجود ندارد. بلکه مجموعه‌ای از جواب‌ها وجود دارد که مجموعه بهینه پارتو نامیده می‌شود.

مزیت اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی توانایی آن‌ها در نمونه‌سازی همزمان پاسخ‌های کاندیدا شده می‌باشد. از این رو این قابلیت را دارند که در هر اجرای الگوریتم به جای یک پاسخ بهینه تمام مجموعه جواب‌های پارتو را تخمین بزنند.

مقایسه الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه *PSO* با الگوریتم‌های تکاملی، نشان می‌دهد استفاده از رتبه‌بندی پارتو می‌تواند راه مناسبی برای توسعه این الگوریتم به منظور حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه باشد. آرشیو خارجی برای ذخیره پاسخ‌های غالبی که تاکنون تولید شده‌اند به‌کار می‌رود. این مفهوم مشابه مفهوم نخبه‌گرایی در الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه تکاملی می‌باشد.

ساز و کار جاذبه سراسری در ترکیب با آرشیو بردارهای غالب یافته شده قبلی، می‌تواند همگرایی به پاسخ‌های غالب سراسری را تقویت کند. آرشیو خارجی دو بخش مهم کنترل‌کننده آرشیو و شبکه‌بندی را شامل می‌شود و مهمترین هدف آن نگهداری بردارهای نامغلوب یافته شده تاکنون طی فرایند جست و جو می‌باشد. کنترل‌کننده آرشیو تعیین می‌کند آیا پاسخ خاصی باید به آرشیو اضافه شود یا خیر و فرایند تصمیم‌گیری آن بدین صورت است که بردارهای نامغلوبی که در هر تکرار الگوریتم بدست می‌آیند، با محتوای آرشیو که در ابتدا تهی است مقایسه می‌شوند. اگر آرشیو خارجی تهی باشد، پاسخ‌های فعلی قابل قبول هستند. اگر پاسخ‌های جدید توسط فردی از آرشیو مغلوب شود، این پاسخ حذف می‌شود. اگر هیچ یک از اعضای جمعیت خارجی پاسخ جدید را مغلوب نکند، این پاسخ در آرشیو ذخیره می‌شود. سرانجام اگر جمعیت خارجی به ظرفیت ماکزیمم خود برسد، روند شبکه‌بندی تطبیقی اجرا خواهد شد.

به‌منظور ایجاد جبهه‌های پاسخ با توزیع مناسب، از روش شبکه‌بندی تطبیقی استفاده می‌شود. در آرشیو، فضای توابع هدف به چند ناحیه تقسیم می‌شود. اگر عضوی از آرشیو خارج از مرزهای فعلی شبکه قرار گیرد، شبکه باید بار دیگر محاسبه شده و هر عضو آن موقعیت‌دهی شود. سرعت و موقعیت هر ذره در این الگوریتم به کمک رابطه‌های زیر محاسبه و به‌روز می‌شوند:

$$vel(i) = w * vel(i) + c_1 r_1\big(Pbest(i) - pop(i)\big) + c_2 r_2(rep(h) - pop(i)) \quad (۳)$$

$$pop(i) = pop(i) + vel(i) \quad (۴)$$

بطوری که در رابطه اول، پارامتر w وزن اینرسی و مقدار آن عددی بین ۰ و ۱ می‌باشد که در اجراهای مختلف الگوریتم تقریبا ۰.۳ یا ۰.۴ در نظر گرفته می‌شود. همچنین *r1* و *r2* در بازه [0,1] و همچنین $C_1=1$ و $C_2=3$، در نظر گرفته می‌شود.

بهترین موقعیت ذره *i*ام را با *pop(i)* و مقدار کنونی ذره iام را با *rep(h)* نشان می‌دهیم که از آرشیو به دست آمده است. اندیس h نیز بدین صورت انتخاب شده است که پس از شبکه‌بندی و محاسبه تعداد اعضای خانه‌های جدول، برای هر خانه به کمک روش بولتزمن، احتمالاتی در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌که خانه‌های با اعضای بیشتر احتمال کمتری برای انتخاب دارند.

۳-۲. توابع هدف

شبکه توزیع همواره بصورت شعاعی تنظیم می‌شود تا مزایای عملکردی خود را نشان دهد. از آنجایی که بازآرایی شبکه به منزله تغییر حالات سوئیچ‌های شبکه به منظور دستیابی به هدفی خاص می‌باشد و از آنجایی که در این پژوهش به دنبال افزایش

کیفیت توان می‌باشیم، لذا یافتن توابع هدفی متناسب با هدف مذکور می‌توان ایده نوینی در راستای افزایش کیفیت توان ارائه دهد. از آنجایی که تغییر در امپدانس موثر جریان توان و اندوکتانس مشترک خطوط در اثر تغییرات جریان خط، تغییرات هارمونیک‌ها در هریک از گره‌ها را به دنبال خواهد داشت. بنابراین یافتن یک بازآرایی بهینه برای داشتن کمترین نوسانات و هارمونیک‌ها و همچنین افزایش کیفیت توان ضروری است. در همین راستا توابع هدف زیر برای شبکه مورد بررسی انتخاب شدند:

- کمینه کردن تلفات توان در کل شبکه (توان اکتیو و راکتیو)
- بیشینه‌کردن Sag ولتاژ در شبکه در طی فرایند خطا یا سوئیچینگ
- کمینه کردن اعوجاجات هارمونیکی در گره‌های ولتاژ
- کمینه کردن نامتعادل بودن بار

کمینه کردن تلفات توان راکتیو را می‌توان بصورت رابطه زیر نشان داد:

$$f(x) = \min TPL$$
$$x = [T_{ie1}; T_{ie2}; \dots; T_{ieN}; S\omega_1; S\omega_2; \dots; S\omega_{Ns\omega}] \quad (۵)$$

که در این روابط x متغیرهای بردار کنترل می‌باشد که T_{iei} وضعیت سوئیچ i ام می‌باشد. همچنین $S\omega_i$ شماره سوئیچ می‌باشد. همچنین برای کمینه‌کردن تلفات کل نیز می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

$$Minimize\ P_{loss} = Re\ (\sum_{m=1}^{l}(\sum_{j=1}^{a}(V_j(p) - V_j(k))I^*(m))) \quad (۶)$$

که در رابطه (۶) l تعداد خطوط است. همچنین $V_j(p)$ ولتاژ در گره p از فاز j می‌باشد. همچنین $V_j(k)$ نیز ولتاژ در گره kام از فاز j ام می‌باشد. پارامتر $I^*(m)$ نیز جریان مزدوج از خط mام بین گره pام تا kام می‌باشد.

رابطه ولتاژ Sag بصورت زیر می‌باشد که باید به عنوان یکی از توابع هدف برای بیشینه کردن آن در نظر گرفته شود.

$$V_{sag;av} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}V_i^j\right) \quad (۷)$$

در این رابطه V_i^j دامنه ولتاژ در گره iام برای یک خطا در گره jاست. واحد ولتاژ در این رابطه برحسب پریونیت می‌باشد. در نهایت $V_{sag;av}$ نیز میانگین ولتاژ گره‌ها تحت شرایط ولتاژ Sag می‌باشد.

در این رابطه V_i^j دامنه ولتاژ در گره iام برای یک خطا در گره j است. واحد ولتاژ در این رابطه برحسب پریونیت می‌باشد. در نهایت $V_{sag;av}$ نیز میانگین ولتاژ گره‌ها تحت شرایط ولتاژ Sag می‌باشد.

در این پژوهش این پارامتر تحت عنوان اعوجاج هارمونیکی کل گره‌ها اندازه‌گیری می‌شود که V_{THD} نامیده شده و با رابطه ذیل نشان داده می‌شود:

$$\%\,V_{THDi} = \frac{V_{di}}{V_{rms;i}} * 100 \quad (۸)$$

که در این رابطه برای $V_{rms;i}$ داریم:

$$V_{rms;i} = \sqrt{(V_{li}^2 + V_{di}^2)} \quad (۹)$$

که در رابطه فوق V_{di}^2 مولفه اعوجاج گره ولتاژ می‌باشد و رابطه آن نیز برابر است با:

$$V_{di} = \sqrt{\sum_{h=2}^{m} V_{hi}^2} \quad (۱۰)$$

برای کمینه‌کردن اعوجاج هارمونیکی کل، ماکزیمم ولتاژ تمامی گره‌های ولتاژ کمینه می‌گردد. این جمله را به بیان ریاضی می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$Minimize\ Max(V_{THDi});\ i = 1; 2; 3; \dots; n \quad (۱۱)$$

مسئله نامتعادل بودن بار در شبکه بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$Minimize\ V_{unb;av} = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n}\left(\sum_{j=a}^{c}\left(100\frac{V_{Negi}}{V_{Posi}}\right)\right) \quad (۱۲)$$

که در رابطه فوق داریم:

$$V_{Posi} = \frac{1}{3}\left(V_i^a + \alpha_1 V_i^b + \alpha_2 V_i^b\right) \quad (۱۳)$$

$$V_{Negi} = \frac{1}{3}\left(V_i^a + \alpha_2 V_i^b + \alpha_1 V_i^b\right) \quad (۱۴)$$

همچنین ضرایب α_1 و α_2 نیز ضرایب مختلط هستند. پارامتر V_{Negi}جمله منفی ولتاژ در گره iام بوده و V_{Posi} نیز جمله مثبت ولتاژ در گره iام می‌باشد و در نهایت V_i^j ولتاژ در گره iام از فاز jام می‌باشد.

۳-۳. قیود

از مهم‌ترین قیود در انواع شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، قیود مربوط به تعادل توان در گره‌های شبکه می‌باشد.

این رابطه بخشی حیاتی از معادلات مربوط به پخش توان بوده که در رابطه (۰۱۵) نشان‌داده شده است.

$$P_i + jQ_i = V_{ai}I_{ai}^{*} + V_{bi}I_{bi}^{*} + V_{ci}I_{ci}^{*}$$

$$i = 1, 2, 3, ..., n \qquad (۱۵)$$

در این رابطه با اندیس‌های ولتاژ و جریان مربوط به فازهای مختلف شبکه بوده و متعاقبا P_i و Q_i میزان توان اکتیو و راکتیو برای هر باس شبکه می‌باشد. در ادامه و در روابط (۱۶) و (۱۷) می‌توان محدودیت مربوط به ولتاژ یک گره و جریان یک شاخه را مشاهده نمود.

$$V^{\min} \le V_{pi} \le V^{\max}$$

$$p = a, b, c, i = 1, 2, 3, ..., n \qquad (۱۶)$$

$$I_{pl}^{\min} \le I_{pl}^{\max}$$

$$p = a, b, c, \mathrm{l} = 1, 2, 3, ..., \mathrm{L} \qquad (۱۷)$$

در روابط فوق اندیس n و l به ترتیب مربوط به تعداد گره‌ها و خطوط شبکه می‌باشد. در ادامه و در بررسی قیود شبکه لازم است قیود مربوط عدم تعادل ولتاژ به صورت روابط (۱۸) الی (۲۰) بیان گردد. در رابطه (۱۸) می‌توان محدودیت عدم تعادل ولتاژ را به صورت کلی معرفی نمود.

$$\frac{|V_{Neg,i}|}{|V_{Pos,i}|} \le V_{unb}^{\max}, i = 1, 2, 3, ..., n \qquad (۱۸)$$

در روابط۰۱۹) و (۲۰) به‌ترتیب محدودیت میزان اعوجاجات ولتاژ و همینطور فرورفتگی ولتاژ به‌صورت یک قید محدودکننده بیان شده است. لازم به ذکر است در این روابط V_{THD}^{mac} و V_{sag}^{min} به‌ترتیب به‌عنوان کمینه مجاز برای میزان میزان اعوجاجات و فرورفتگی ولتاژ در نظر گرفته شده است.

$$V_{THD,i} \le V_{THD}^{\max} \qquad (۱۹)$$

$$V_{sag,av} \ge V_{sag}^{\min} \qquad (۲۰)$$

در روابط فوق یک سری از مهم‌ترین روابط و قیود حاکم برای مسئله بازآرایی شبکه‌های توزیع بیان گردید. در ادامه به بررسی قیود مربوط به آرایش شبکه خواهیم پرداخت. یکی از مهم‌ترین شروط و محدودیت‌های شبکه‌های توزیع و مسئله بازآرایی شعاعی بودن شبکه بوده که می‌توان معادلات تصدیق‌کننده این امر را به صورت روابط (۲۱) و (۲۲) فرمول‌بندی نمود.

$$n_b = n - 1 \qquad (۲۱)$$

در این رابطه n_b برابر با تعداد شاخه‌های فعال در شبکه می‌باشد. همچنین از رابطه (۲۲) می‌توان برای جلوگیری از ایزوله شدن یکی قسمت از شبکه و گره‌های آن استفاده نمود.

$$\sum_{j=1}^{L} \left|A(i, j)\right| \ge 1, i = 1, 2, ..., n \qquad (۲۲)$$

در رابطه (۲۲)، A در واقع ماتریس تلاقی شبکه بوده که با استفاده از نامساوی ذکر شده اغنا می‌گردد.

۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

همانگونه که در بخش ۳-۲ اشاره گردید توابع هدف در بهینه‌سازی چندهدفه بصورت زیر تعریف می‌شوند:

- $V_{unb;av}$ نامتعادلی بار که باید کمینه شود.
- $V_{sag;av}$ ولتاژ Sag که باید بیشینه شود.
- V_{THDi} مجموع اعوجاجات کل که باید کمینه شود.
- P_{loss} تلفات توان کل که باید کمینه شود.

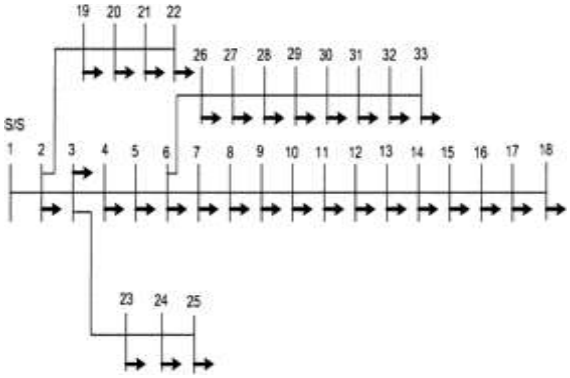
با توجه به اینکه در بهینه‌سازی تک‌هدفه در اینجا از الگوریتم فراابتکاری PSO استفاده می‌شود و همچنین نوع عملکرد الگوریتم که کمینه‌سازی تابع هدف را انجام می‌دهد، می‌توان گفت در صورت تشکیل یک عبارت کسری با توابع هدفی که باید کمینه شوند در صورت آن و تابع هدفی که باید بیشینه شود در مخرج، می‌توان به یک تابع هدف کلی برای بهینه‌سازی تک‌هدفه دست یافت. بنابراین تابع هدف زیر برای بهینه‌سازی تک‌هدفه در نظر گرفته می‌شود:

$$Minimize\ fitness = \frac{P_{li}+V_{unb;av}+V_{THDi}+P_{loss}}{V_{sag;av}} \qquad (۲۳)$$

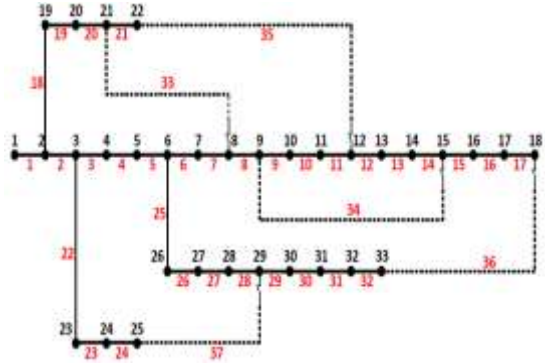
شبیه‌سازی و مطالعه موردی در شبکه ۳۳ باسه استاندارد $IEEE$ صورت گرفته است. شکل‌های(۱) و (۲) ساختار شبکه توزیع ۳۳ با سه استاندارد را نشان می‌دهد. ابتدا بازآرایی شبکه از طریق الگوریتم عادی پخش بار انجام گرفته و سپس با استفاده از روش پیشنهادی به بازآرایی شبکه مورد نظر پرداخته شده و نتایج روش پیشنهادی ارائه و تحلیل می‌گردد.

ابتدا به پیاده سازی روش پخش بار عادی پرداخته و نتایج آن تشریح می‌گردد. لازم به ذکر است در روش مذکور بازآرایی شبکه قدرت با استفاده از روش نیوتون رافسون انجام می‌پذیرد و پس از تکرارهای مختلف الگوریتم نیوتون-رافسون، پس از اینکه جواب‌های بدست آمده کمترین اختلاف از یکدیگر را داشتند، الگوریتم متوقف شده و جواب‌های نهایی بدست می‌آید. در شکل(۳) ملاحظه می‌شود، در این حالت پروفیل ولتاژ علاوه بر

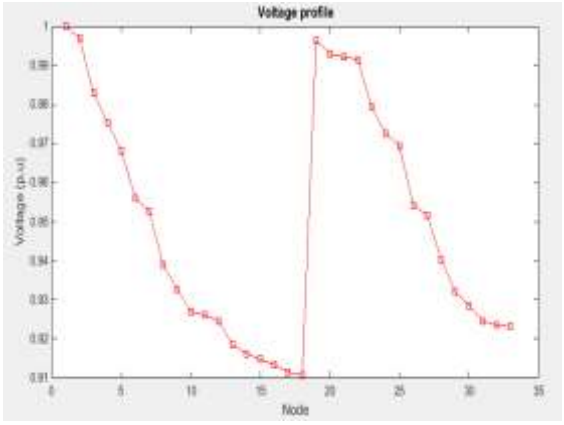
نوسان زیاد از یک باس به باس دیگر که می‌توان گفت یک نقطه ضعف برای روش نیوتون رافسون است، مقدار آن در برخی باس‌ها تا ۰.۹۱ پریونیت نیز افت داشته است.



شکل(۱). شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE

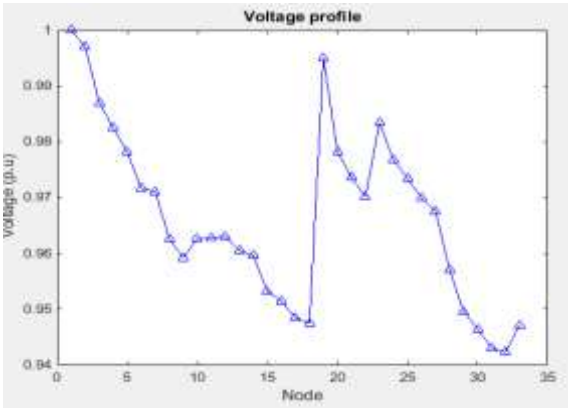


شکل(۲). ساختار شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE



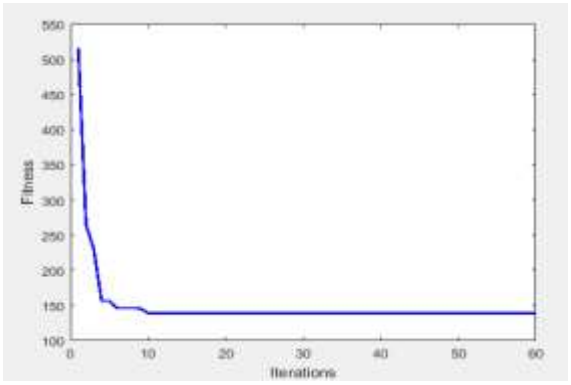
شکل(۳). پروفیل ولتاژ قبل از اعمال الگوریتم پیشنهادی و با استفاده از پخش بار عادی(نیوتون – رافسون)

در بهینه‌سازی تک‌هدفه به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با حداکثر تعداد تکرار تعریف شده برابر ۶۰ ، که با استفاده از تابع هدف مذکور در بخش ۳-۲ انجام گرفته، بشرح شکل(۴) تابع هدف ما بهینه گردید.



شکل(۴). پروفیل ولتاژ پس از بهینه‌سازی تک‌هدفه PSO

ملاحظه می‌گردد در حالت کلی تلفات توان در شاخه‌های مختلف نسبت به روش پیشین کمتر شده است اما در برخی شاخه‌ها تلفات توان نسبت به روش قبلی بیشتر است. لذا لازم است تا با اعمال روشی این تلفات را نیز کمتر نمود. با توجه به تجارب پیشین می‌توان بیان کرد که بهینه‌سازی چند هدفه می‌تواند تا حدودی ایراد مذکور را برطرف نماید. منحنی همگرایی بهینه‌سازی تک‌هدفه نیز مطابق شکل(۵) بدست آمده است.



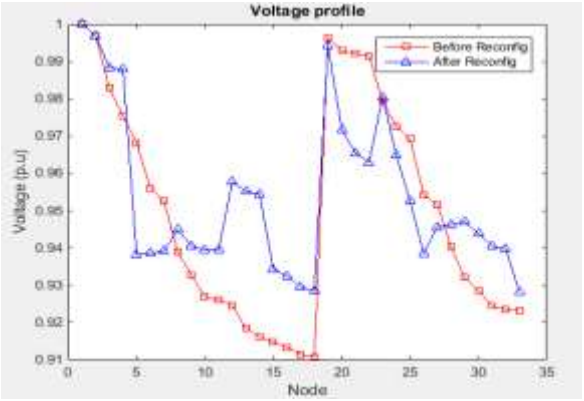
شکل(۵). روند همگرایی الگوریتم PSO

جدول(۱). خلاصه نتایج حاصل از روش تک هدفه

	قبل از بازآرایی	بعداز بازآرایی
سوییچ‌های مربوطه	۳۳.۳۴.۳۵.۳۶.۳۷	۷.۹.۱۴.۳۲.۳۷
توان اتلافی	۲۰۸.۴۵۹۲	۱۳۸.۹۲۷۵
درصد کاهش اتلاف توان(%)	----------	۳۳.۳۵۵
ولتاژ حداقل(Pu)	۰.۹۱۰۷۵	۰.۹۴۲۳۴

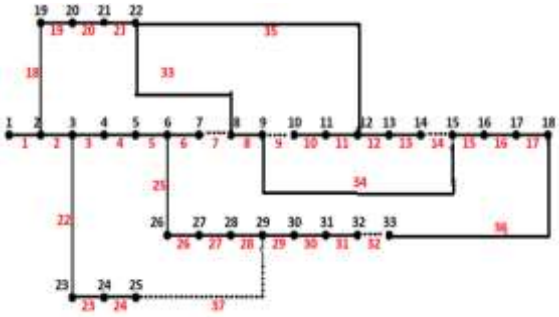
با توجه به مقایسه پارامترهای ارائه شده در جدول(۶) با در نظر گرفتن سوئیچهایی که بازآرایی شدند با روش تک هدفه، در نتایج بهینه‌سازی چند هدفه نیز ملاحظه می‌گردد، پروفیل ولتاژ در بهینه‌سازی چندهدفه نسبت به حالت نیوتون رافسون بهبود داشته است. بدین‌ترتیب که پروفیل ولتاژ در حالت بهینه‌سازی مطابق شکل(۶) چندهدفه از مقدار ۰.۹۲ کمتر نشده است.

همچنین نوسانات پروفیل ولتاژ نیز به مراتب کمتر است.



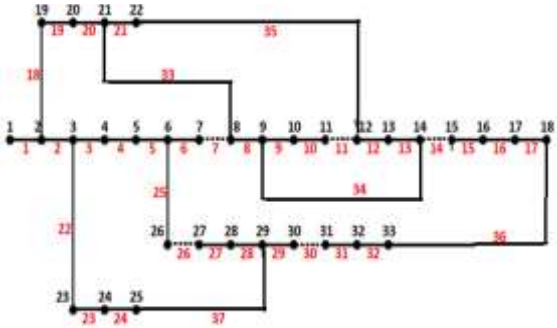
شکل(۶). پروفیل ولتاژ پس از بهینه‌سازی چندهدفه

ساختار شبکه که در شکل(۲) معرفی گردید، پس از بازآرایی با روش تک هدفه یعنی صرفا روش PSO در شکل(۷) آمده است.



شکل(۷). ساختار شبکه پس از بازآرایی با روش تک هدفه

و شکل(۸) ساختار شبکه ۳۳ باسه شکل(۲) با اعمال بازآرایی با الگوریتم چندهدفه MOPSO در زیر آمده است.



شکل(۸). ساختار شبکه پس از بازارایی با الگوریتم MOPSO

باتوجه به شکل(۶) که بهبودی پروفیل ولتاژ در بهینه‌سازی چندهدفه نسبت به حالت نیوتون رافسون را نشان می دهد، نتایج مقایسه پارامترهای ارائه شده در جدول(۷) قبل و بعد از بازآرایی نشان داده شده است.

جدول(۲). اطلاعات شبکه بازآرایی شده توسط الگوریتم MOPSO

	قبل از بازآرایی	بعداز بازآرایی
سوییچ‌های مربوطه	۳۳.۳۴.۳۵.۳۶.۳۷	۷.۱۱.۱۴.۲۶.۳۰
توان اتلافی(kw)	۲۰۸.۴۵۹۲	۱۶۵.۹۲۷۹
درصد کاهش اتلاف توان(%)	----------	۲۰.۴۰۲۷
ولتاژ حداقل(Pu)	۰.۹۱۰۷۵	۰.۹۰۲۷۳

به منظور نشان داده کارایی روش پیشنهادی در این تحقیق نتایج بدست آمده با چند مقاله روز دنیا که در این زمینه مطالعه کرده‌اند در جدول(۳) آمده است، نتایج نشان داده شده کارایی روش پیشنهادی را به وضوح نشان می دهد.

جدول(۳). مقایسه روشهای چند مطالعه با مطالعه حاضر از نظر توان اتلافی و ولتاژ حداقل، در دوحالت قبل و بعد از بازآرایی

	قبل از بازآرایی		بعداز بازآرایی	
	توان اتلافی (kw)	ولتاژ حداقل (pu)	توان اتلافی (kw)	ولتاژ حداقل (pu)
PSO	۲۰۸.۴۵۹	۰.۹۱۰	۱۳۸.۹۲۷	۰.۹۴۲۳۴
MPSO	۲۰۸.۴۵۹	۰.۹۱۰	۱۶۵.۹۲۷	۰.۹۰۲
PSO-TVAC +DR[26]	۲۰۸.۴۵۹	۰.۹۱۰	۹۷.۹۱۶	۰.۹۷۳
Fuzzy[27]	۲۰۸.۴۶	۰.۹۱۱	۷۵.۱۲	۰.۹۵۹
FWA[28]	۲۰۲.۶۷	۰.۹۱۳	۱۳۹.۹۸	۰.۹۴۱
HAS[29]	۲۰۲.۶۷	۰.۹۱۳	۱۴۶.۳۹	۰.۹۳۳
ITS[29]	۲۰۲.۶۷	۰.۹۱۳	۱۴۵.۱۱	۰.۹۳۳
RGA[29]	۲۰۲.۶۷	۰.۹۱۳	۱۳۹.۵۵	۰.۹۳۷

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم PSO تک‌هدفه و چندهدفه، بازآرایی بهینه شبکه‌های توزیع با هدف بهبود کیفیت توان در شبکه‌های قدرت، مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردید. از جمله مواردی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت بهبود پروفیل ولتاژ است، از آنجاکه هرچه میزان آن بالاتر باشد، بیانگر کارایی بیشتر روش پیشنهادی در بازآرایی شبکه است. لذا نتایج حاصله نشان می‌دهد که سطح پروفیل ولتاژ در اغلب گره‌های شبکه ۳۳ باسه مورد آزمایش از نمونه روش‌های پیشنهادی در مقالات قبلی بالاتر بوده است. همچنین از جمله پارامترهایی که مورد بررسی قرار گرفت *Sag* یا میانگین دامنه ولتاژ روی باس‌های شبکه تست

می‌باشد و ملاحظه گردید، در اکثر شین‌ها پروفیل ولتاژ در بازآرایی توسط بهینه‌سازی چندهدفه بهتر بوده است. همچنین با بررسی نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که در بهینه‌سازی تک‌هدفه با تابع هدف ارائه شده، میزان *Sag* ولتاژ تا حد قابل قبولی نسبت به روش پخش بار عادی بهتر بوده است، زیرا کیفیت توان در الگوی تک هدفه و چند هدفه به میزان قابل توجهی نسبت به روش پخش بار عادی بهبود را نشان می‌دهد و مقدار تلفات در بهینه‌سازی چندهدفه کاهش بیشتری داشته است.

۶. مراجع

1. G. Chicco, “Challenges for smart distribution systems: data representation and optimization objectives,” In 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 1236-1244, 2010.
2. H. L. Willis, “Power Distribution Planning Reference Book,” 2nd, New York: Mercel Dekkar, 2004.
3. M. H. Haque,”Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration in Generation,” Transmission and Distribution IEEE Proceedings, (143)1, pp. 33-38, 1996.
4. Ch. Yadaiah, S. K.Goswami & D. Chatterjee, “Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, (83), pp. 87-95, 2016.
5. A. M. Imran & M. Kowsalya, “A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, (62), pp. 312-322, 2014.
6. A. Kavousi-Fard & M. R. Akbari-Zadeh, “Reliability enhancement using optimal distribution feeder reconfiguration,” Neurocomputing, (106), pp. 1, 2013.
7. A. Merlin & G. Back, “Search for minimum-loss operational spanning tree con- figuration for an urban power distribution system,” Proc. of the 5th Power System Conference Cambridge, pp. 1–18, 1975.
8. T. P. Wagner, A. Y. Chikhani & R. Hackam, “Feeder reconfiguration for loss reduction. An application of distribution automation,” IEEE Transactions on Power Delivery, (6), pp. 1922–1930, 1991.
9. R. A. Jabr, R. Singh & B. C.Pal ,”Minimum loss network reconfiguration using mixed- integer convex programming,” IEEE Transactions on Power Systems, (27), pp. 1106-1111, 2012.
10. Y. J. Jeon, J. C. Kim, J. O. Kim, J. R. Shin & K. Y. Lee, “An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems,” IEEE Transactions on Power Delivery, (17), pp. 1070-1078, 2002.
11. V. Parada, J. A. Ferland, M. Arias & K. Daniels Optimization of electric distribution feeders using simulated annealing. IEEE Transactions on Power Delivery, (19), 1135-1141, 2004.
12. A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohammed, S. F. Mekhamer & M. A. L. Badr, “Distribution systems reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm,” International Journal of Electric Power Systems Research, (79), pp. 1521-1530, 2009.
13. J. Mendoza, R. Lopez, D. Morales, E. Lopez, P. Dessante & Moraga, “Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators,” real application. IEEE Transactions on Power Systems, (21), pp. 948-954, 2006.
14. K. Prasad, R. Ranjan, N. C. Sahoo & A. Chaturvedi,”Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated genetic algorithm,” IEEE Transactions on Power Delivery, (20), pp. 1211-1213, 2005.
15. A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohamed, S. F. Mekhamer & M. A. L. Badr, “Distribution system reconfiguration using a modified tabu search algorithm,” International Journal of Electric Power Systems Research, (80), pp. 943-953, 2010.
16. Ch. Y. Goswami and D. Chatterjee, “Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, (83), pp.87-95, 2016.
17. H. R. Esmaeillian and R. Fadaeinedjad, ”Optimal reconfiguration and capacitor allocation in unbalanced distribution network considering power quality issues,” CIRED 22nd international conference and exhibition. 2013.
18. J. B. V. Subramanyam and C. Radhakrishn, “A simple method for feeder reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for loss minimization Taylor and Francis,” EPCS, (38), pp.72–84, 2010.
19. R. Viswanadha & P. R. Bijwe, “Efficient reconfiguration of balanced and unbalanced distribution system for loss minimization,” IET Gener Transm Distrib, (2)1, pp.7-12, 2001.
20. N. Thuan & T. A.Viet, ”Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm,” Electric Power Energy Syst, (68), pp. 233-242, 2015.
21. N. Gupta & A.Swarnkar, “Multi objective reconfiguration of distribution systems using adaptive genetic algorithm in fuzzy framework,” IET Generation Transmition Distribution, (4)12, pp. 1288-98, 2010.
22. https://www.scribd.com/doc/143306826/IEEE-33-Bus-Test-Distribution-Syste
23. G. K. Viswanadha Raju & P. R. Bijwe, “Efficient reconfiguration of balanced and unbalanced distribution system for loss minimization,” IET Gener Transm Distrib, (2)1, pp. 7-12, 2001.
24. A. A. Eajal & M. E. El-Hawary, ”Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization,” IEEE Trans Power Deliver, (25)3, pp. 1734-1741, 2010.
25. R. A. Gallego, A. J. Monticelli & R. Romero, “Optimal capacitor placement in radial distribution network,” IEEE Trans Power System, (16)4, pp. 630-637, 2001.
26. H. R. Shahmirzad & M. Tabrizian, “Integrate Demand Response and Reconfiguration for energy management in optimal operation of microgrids,” Electrical Power Distribution Conference, Alborz Province, 2010.
27. R. Syahputra, R. O. Wiyagi, & S. Suripto, “A novel fuzzy approach for multi-objective optimization of distribution network configuration in complex system,” International Journal of Applied Engineering Research, (13)2, pp. 1120-1127, 2018.
28. A. Mohamed Imran & M. Kowsalya, “A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm,”

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, (62), pp. 312-322, 2014.

29. S. R. Rayapudi, N. Lakshmi & R. R. Manyala, ”Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm,” IEEE Trans Power Syst, (26)3, pp. 1080-1088, 2011.