

خازن‌گذاری بهینه در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیکی برای تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات با استفاده از PSO

عباس کارگر^۱، استادیار، فهیمه صیادی شهرکی^۲، کارشناسی ارشد، جعفر سلطانی^۳، استاد
 ۱- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران- P7430286@yahoo.com
 ۲- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران- fahimehsyadi@yahoo.com
 ۳- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه شهرکرد- شهرکرد- ایران- J1234sm@cc.iut.ac.ir

چکیده: با افزایش بارهای غیر خطی در سیستم‌های توزیع لزوم لحاظ کردن هارمونیک‌ها در مسئله خازن‌گذاری بهینه احساس می‌شود تا تضمین شود که حل بهینه منجر به افزایش اعوجاج هارمونیکی یا رخداد تشید نمی‌شود. لذا در این مقاله جایابی و تنظیم بهینه خازن‌های موازی در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیکی صورت گرفته است. هدف از بهینه‌سازی، کاهش تلفات، ضمن ارضای قیود عملی و کیفیت توان می‌باشد. بنابراین تابع هدفی که باید مینیمم شود، شامل هزینه تلفات توان اکتیو و هزینه نصب خازن‌ها به انضمام ترم‌های جریمه می‌باشد. باس‌های کاندیدا برای نصب خازن از طریق آنالیز حساسیت برای افزایش سرعت همگرایی و افزایش کیفیت بهینه‌سازی تعیین شده است. تخمین این باس‌های حساسیت عمدتاً منجر به کاهش فضای جستجو برای مسئله بهینه‌سازی می‌شود. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم PSO گستته، انجام شده است. حداقل‌توان راکتیو خازنی نصب شده و مقادیر ولتاژ موثر و کل اعوجاج هارمونیکی و ولتاژ باس‌ها طبق استاندارد IEEE-519 محدود گردیده است. الگوریتم مورد نظر در دو شبکه توزیع آزمایشی^۹ باسه و^{۱۳} باسه اجرا گردیده و نتایج رضایت‌بخشی را در پی داشته است.

واژه‌های کلیدی: اعوجاج هارمونیکی، آنالیز حساسیت، خازن‌گذاری، PSO گستته

Optimal capacitor placement in harmonic distribution systems for voltage regulation and loss reduction with PSO

Abbas Kargar, Fahimeh Sayadi Shahraki, Jafar Soltani

Abstract: The nonlinear portion of the electrical loads has increased significantly in recent years. Harmonic currents injected by these loads into the distribution systems should be considered when solving the capacitor placement problem in order to assure that the optimal solution does not result in excessive harmonic distortion or resonant conditions. This paper presents a binary-PSO approach for placement of the capacitors in a harmonics-polluted distribution system. The binary-PSO is integrated with a harmonic power flow algorithm. In this problem objective function is the total cost of the system power losses, cost of the capacitors placement and additional penalty terms. Constraints in this optimization procedure are the rms voltage and the voltage total harmonic distortion (THDv), as well as available capacitor units to be placed at each bus. Sensitivity analysis is used to find the candidate buses for capacitor locations. Proposed methods are tested on the 9 and 13 buses harmonic distribution systems. Numerical results show that the proposed method advantageous results for the capacitor placement problem.

Key Words: harmonic distortion, sensitivity analysis, Capacitor placement, PSO

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۴/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۰/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عباس کارگر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- شهرکرد- کیلومتر ۵ جاده سامان- دانشگاه شهرکرد- دانشکده- فنی و مهندسی

۱- مقدمه

بهینه‌سازی مسائل خطی و غیر خطی ارائه گردیده است. به صورت ریاضی، یک مسئله بهینه‌سازی با یکتابع برآش درگیر می‌شود که تشریح کننده مسئله می‌باشد و مجموعه‌ای از قیود، بیانگر فضای حل مسئله هستند. متاسفانه، اکثر روش‌های بهینه‌سازی سنتی بر ارزیابی مشتقات اول تمرکز می‌کنند. بهدلیل مشکلات در ارزیابی مشتقات اول برای سطوح بهینه‌سازی ناهموار و غیر پیوسته، اخیراً الگوریتم‌های خالیاز مشتق‌گیری مختلفی ارائه شده‌اند. مسئله بهینه‌سازی امروزه به صورت مسئله جستجوی هوشمند نشان داده شده است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوش مصنوعی، برای تحلیل مسئله جایابی خازن بسیار مورد توجه قرار گرفته و نتایج خوبی را هم در برداشته است [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. روش‌های هوش مصنوعی تضمین نمی‌کنند که حل بهینه سراسری را موجب شوند اما قطعاً پاسخ تقریبی از بهینه سراسری را در کمترین زمان ارایه می‌کنند.

در این مقاله یکی از مدرن‌ترین روش‌های هوش مصنوعی به نام بهینه‌سازی با الگوریتم ذرات (PSO^۱) مورد استفاده قرار گرفته که اخیراً پیشنهاد شده است [۱۴-۲۲]. PSO الگوریتم جستجو بر پایه جمعیت با اجرای ساده و محاسبات کارآمد می‌باشد. همان‌طور که در [۲۳] آمده است این روش بهینه‌سازی برای حل بسیاری از مسایل مثل الگوریتم ژنتیک کارایی داشته و از برخی مشکلات الگوریتم ژنتیک اجتناب می‌کند. این روش همچنین برای سیستم‌های غیر خطی، غیر دیفرانسیلی و ابعاد بالا هم کاراست. مزایای PSO را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- تعداد پارامترهای تنظیم که PSO نیاز دارد کم است بنابراین می‌توان با تنظیم تجربی پارامترها از همگرایی اطمینان حاصل کرد.

۲- در طول پروسه تکرار PSO فقط نیاز به عملگرهای ریاضی اولیه دارد و عملگرهای مشابه الگوریتم ژنتیک را نیاز ندارد بنابراین اجرای آن نسبتاً ساده است.

۳- تابع هدف مستقیماً به عنوان تابع برآزنده‌گی استفاده می‌شود تا جستجو در PSO را هدایت کند. که این موضوع آن را مسئله‌ای قابل دسترس، غیر خطی و غیر دیفرانسیلی می‌کند.

۴- سرعت همگرایی بالا بوده و اکثراً نسبت به الگوریتم ژنتیک، سریعتر همگرا می‌شود.

لازم به ذکر است که PSO هم مانند سایر روش‌های هوش مصنوعی تضمینی نمی‌کند که حل بهینه سراسری را موجب شود.

در مقاله حاضر جایابی و تنظیم خازن در شرایط هارمونیکی صورت گرفته است. برای کاهش فضای جستجو و سرعت همگرایی بالاتر، بسیاری از کاندیدا برای خازن‌گذاری با استفاده از آنالیز حساسیت تعیین

عموماً تخصیص خازن‌های شنت در شبکه توزیع برای جبران توان راکتیو، رگولاتور و لتاژ، تصحیح ضریب توان و کاهش تلفات قدرت/ انرژی بکار می‌رود. میزان جبران‌سازی تا حد بسیار زیادی به مکان خازن در سیستم توزیع قرار می‌گیرند ضروری است. تا کنون تکنیک‌های بسیاری با نگرش‌های گوناگون برای حل مسئله مطرح شده است. در بسیاری از این تکنیک‌ها، شرایط سیستم‌سازی فرض شده است و حضور بارهای غیر خطی نادیده گرفته شده است [۴-۱]. اما باید توجه شود که این فرض به ویژه در زمان کنونی به هیچ عنوان صحت ندارد [۵].

با افزایش کاربرد بارهای غیر خطی و تجهیزاتی که در شبکه توزیع منجر به تزریق جریان هارمونیکی و ایجاد هارمونیک‌های ولتاژ می‌شود، لازم است که توجه ویژه‌ای به مسئله خازن‌گذاری معطوف شود. بررسی‌های اخیر سیستم‌های توزیع، گویای این واقعیت است که اعوجاج هارمونیکی قابل ملاحظه‌ای در شکل موج ولتاژ و جریان وجود دارد، بنابراین این نگرانی وجود دارد که اگر مکان و اندازه خازن‌های شنت به نحو مناسبی تعیین نگردد خازن‌های شنت می‌توانند حتی منجر به تقویت ولتاژ و جریان هارمونیکی شود چرا که امکان تشدید در یکی از فرکانس‌های هارمونیکی متعدد وجود دارد. این شرایط می‌توانند نگرانی‌های بالقوه‌ای برای سیگنال‌های هارمونیکی پدید آورد که استرس و خرابی عایق تجهیزات، احتمال بالای خرابی خازن و افزایش تداخل با سیستم‌های مخابراتی از جمله آن است [۵]. لذا در شبکه‌های هارمونیکی کنونی در نظر گرفتن مسئله هارمونیک‌ها برای تعیین مکان و اندازه خازن‌های شنت الزامی است چرا که در غیر اینصورت ممکن است که خازن‌گذاری اثرات معکوسی داشته باشد.

در برخی از تحقیقات اخیر، وجود ولتاژهای آلوده برای تحلیل مسئله به حساب آمده است. جستجوی کامل [۶]، تغییرات محلی [۷]، برنامه‌ریزی صحیح غیر خطی ترکیب شده [۸]، انتخاب ماکریزم حساسیت [۹]، روش‌های ابتکاری و نظریه مجموعه‌های فازی [۱۰] از جمله آن هاست.

اکثر تکنیک‌های مذکور سریع هستند اما ضعف آن‌ها عدم توانمندی در گریز از بهینه‌سازی موضعی است. هدف از بهینه‌سازی، تعیین بهترین حل ممکن برایک مسئله داده شده تحت دسته‌ای از قیود است. در دهه‌های اخیر تحقیقات زیادی با حل‌های مختلف برای

ولتاژ موثر، طبق استاندارد IEEE-519 در محدوده $V_{max} = 1.1$ (بالاترین حد ولتاژ مجاز) و $V_{min} = 0.9$ (مینیمم ولتاژ مجاز در هر باس)، قرار داده می‌شود، که:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^H (V_i^h)^2} \quad for i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کلیه باس‌ها به کمتر از ۵ درصد محدود می‌شود که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$THDV_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^H (V_i^h)^2}}{V_i^I} * 100 \quad (4)$$

کل واحدهای خازنی موجود هم توسط رابطه زیر محدود می‌شود:

$$\sum_{j=1}^{nc} B_j < B \quad (5)$$

که معمولاً B ، برابر مجموع توان راکتیو بارهای متصل به شبکه مورد مطالعه، انتخاب می‌شود.

۲-۲-محاسبات پخش بار

الف: در هارمونیک اصلی

برای سیستم توزیع، یک الگوریتم پخش بار برای تعیین تلفات و ولتاژ باس‌ها در فرکانس اصلی نیاز است. در این مقاله از روش پسرو-پیشروکه مخصوصاً برای پخش بار سیستم‌های توزیع شعاعی طراحی شده، استفاده شده است. بنابراین، ابتدا یک ماتریس جریان تزریقی از (bus-injection to branch-current) $BIBC$ سه فاز matrix بر پایه ساختار توپولوژی سیستم توزیع برای تعیین ارتباط بین جریان باس‌ها و شاخه‌ها، تشکیل می‌شود. ولتاژ همه باس‌ها طی یک فرآیند تکراری با استفاده از ماتریس $BIBC$ محاسبه می‌شود. ولتاژ باس در هر سه فاز در k امین تکرار پخش بار با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$V^k = [V_0] - [BIBC]^T [Z] [BIBC] [I]^{(k)} \quad (6)$$

که V^k : برداری از ولتاژ باس، V_0 : برداری از ولتاژ باس‌های اسلک، $[BIBC]$: ماتریس جریان تزریقی از باس به شاخه، $[Z]$: ماتریس امپدانس اولیه و $[I]^{(k)}$: بردار جریان بار می‌باشد.

ب: در فرکانس‌های هارمونیکی

بارهای غیر خطی بیشتر به صورت یک منبع جریان ایده‌آل نشان داده می‌شود. بر ترکیبی به صورت یک ادمیتانس (معرف قسمت خطی)

شده و جایابی بهینه خازن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PS و با هدف تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات در شبکه توزیع آزمایشی شامل بارهای غیر خطی صورت گرفته است. کل راکتیو خازنی موجود و ولتاژ IEEE-519 موثق و اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ، مطابق با استاندارد IEEE-519 محدود می‌شود.

۲-فرمول‌بندی مسئله

در این قسمت فرمول‌بندی مسئله شاملتابع هدف، قیود مسئله، فرمول‌بندی محاسبات پخش بار و در نهایت آنالیز حساسیت ارائه می‌گردد.

۱-تابع هدف و قیود مسئله

هدف از خازن‌گذاری بهینه، تعیین مکان و اندازه واحدهای خازنی در سیستم توزیع، کاهش تلفات انرژی و توان اکتیو در فرکانس‌های اصلی و هارمونیکی است. بنابراین تابع هدف خازن‌گذاری که باید مینیمم شود، به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$F = K_p P_{loss} + \sum_{j=1}^{nc} C_j (B_j) + a \cdot \sum_{i=1}^n |(I-V_i)| \quad (1)$$

در رابطه (۱)، K_p ضریب ثابت هزینه تلفات توان اکتیو، B_j و C_j بهترتبیب کیلو وارهای خازنی موجود و ضریب هزینه مربوط به هر کیلووار خازن نصب شده در هر یک از باس‌های کاندیدا می‌باشد. که در آن ترم اول هزینه تلفات توان اکتیو و ترم دوم بیانگر کل هزینه خازن‌گذاری در سیستم می‌باشد. ترم سوم نیز برای رگولاتوریون ولتاژ افزوده شده است تا ضمن اینکه ولتاژ در محدوده تعريف شده قرار می‌گیرد، رگولاتوریون ولتاژ حداکثر گردد. تلفات قدرت در سیستم معنی همان $R \cdot I^2$ در خطوط، با استفاده از رابطه (۲) حاصل می‌شود [۱۰]:

$$P_{loss} = \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{r_{kj}^h}{z_{kj}^h} \left| V_k^h - V_j^h \right|^2 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، H بالاترین مرتبه هارمونیکی قابل توجه، M تعداد باس‌های سیستم توزیع و r_{kj}^h و z_{kj}^h بهترتبیب، مقاومت و امپدانس شاخه بین باس j و در هارمونیک h است.

قیود مسئله خازن‌گذاری، محدودیت در ولتاژ موثق و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ و کل راکتیو خازنی موجود بوده که در ادامه فرمول‌بندی آن ارایه می‌شود:

کند که کدام باس در صورت نصب خازن، بیشترین کاهش تلفات را خواهد داشت. بنابراین این باس‌های حساس می‌توانند به عنوان باس‌های کاندیدا برای نصب خازن استفاده شوند. تخمین این باس‌های حساس عمدها در کاهش فضای جستجو برای مسئله بهینه‌سازی کمک می‌کند.

یک خط در سیستم توزيع با امپدانس $R + jX$ را در نظر بگیرید که) بار $[j]P_{eff}[j] + jQ_{eff}[j]$ بین باس‌های i و j واقع شده است.

تلفات توان حقيقی در خط توسط $\left[I_k^2 \right]^* \left[R_k \right]$ محاسبه می‌شود که توسط رابطه زیر هم بيان می‌شود:

$$P_{loss}[j] = \frac{\left(P_{eff}^2[j] + Q_{eff}^2[j] \right)^* R[k]}{(V[j])^2} \quad (13)$$

$P_{eff}[j]$: کل توان اکتیو موثر تولید شده در آن سوی باس j است. حال، فاکتورهای حساسیت تلفات توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial P_{loss}[j]}{\partial Q_{eff}[j]} = \frac{\left(2 * Q_{eff}[j] \right)^* R[k]}{(V[j])^2} \quad (14)$$

فاکتور حساسیت توان که با رابطه (14) مشخص شده است، از اساس پخش باز محاسبه می‌شود. مقادیر فاکتور حساسیت توان هر باس از سیستم، به ترتیب نزولی مرتب می‌شود و به همان نسبت شماره‌های باس در بردار وضعیت باس ' $bpos[i]$ ' ذخیره می‌شود. ترتیب نزولی عناصر $[j]/\partial Q_{eff}[j]$ از بردار $\partial P_{loss}[j]$ از بردار $\partial Q_{eff}[j]$ در باره توالی انتخاب باس‌ها برای جبران تصمیم خواهد گرفت. در این باس‌های حاصل از بردار $[i]bpos$ ، بزرگی ولتاژ نرمالیزه شده با در نظر گرفتن بزرگی ولتاژ پایه توسط رابطه (15) محاسبه می‌شود:

$$norm[i] = |V[i]| / 0.95 \quad (15)$$

$norm[i]$ نشان می‌دهد که آیا باس‌ها نیاز به جبران توان راکتیو دارند یا خیر. باس‌هایی که مقادیر $[i]norm$ کمتر از $1/0.95$ دارند، به عنوان باس‌های کاندیدا برای نصب خازن انتخاب می‌شوند [۲۶].

۳-الگوریتم PSO

اصل این الگوریتم بر این اساس است که افراد جمعیت در یک فضای جستجو به سمت نواحی موفقیت‌آمیز قبلی وفق داده می‌شوند و از موفقیت افراد همسایه هم تاثیر می‌پذیرند. این ایده صریحاً به صورت زیر بیان می‌شود:

هر فرد در جمعیت ذرات، یک جزء، یا "particle" نامیده می‌شود که یک حل بالقوه را نشان می‌دهد. هر ذره در فضای جستجو، موقعیت

موازی با یک منبع جریان (معرف قسمت غیر خطی)، مدل می‌شود. بنابراین در فرکانس‌های بالاتر، کل سیستم قدرت به صورت ترکیبی از منابع جریان هارمونیکی و المان‌های پسیو مدل می‌شود. به دلیل اینکه مولفه‌های امپدانس سیستم قدرت با مرتبه هارمونیکی تغییر می‌کند، ماتریس ادمیتانس در هر مرتبه هارمونیکی اصلاح می‌شود. اگر از اثر پوستی صرف نظر کنیم به ترتیب، ادمیتانس بار، ادمیتانس خازن شنت و ادمیتانس فیدر در h این فرکانس هارمونیکی در هر باس i عبارتست از:

$$Y_{li}^h = \frac{P_{li}}{|V_i^l|^2} - j \frac{Q_{li}}{h|V_i^l|^2} \quad (7)$$

$$Y_{ci}^h = h Y_{ci}^h \quad (8)$$

$$Y_{i,i+I}^h = \frac{1}{R_{i,i+I} + j h X_{i,i+I}} \quad (9)$$

که P_{li} و Q_{li} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بارهای خطی باس i را نشان می‌دهند. بارهای خطی از یک مقاومت موازی با یک راکتانس تشکیل شده‌اند [۲۵]. بارهای غیر خطی به صورت منابع جریان رفتار می‌کنند، بنابراین جریان تزریقی هارمونیکی توسط بارهای غیر خطی در باس i با استفاده از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$I_i^l = \left[\frac{Phi + i Q_{hi}}{V_i^l} \right] \quad (10)$$

$$I_i^h = C(h) I_i^l \quad (11)$$

که Phi و Q_{hi} به ترتیب، توان اکتیو و راکتیو بارهای غیر خطی باس i را نشان می‌دهند. $(C(h))$ از تست میدان و تحلیل فوریه تمام مصرف کننده‌های فیدر حاصل می‌شود. ولتاژهای هارمونیکی با حل معادله پخش بار (12) محاسبه می‌شوند که از معادلات گره استخراج می‌شود.

$$[Y(h)] [V(h)] = [I(h)] \quad (12)$$

که $[Y(h)]$ ، $[I(h)]$ و $[V(h)]$ به ترتیب، ماتریس ادمیتانس، بردار ولتاژ باس و بردار جریان تزریقی در h این مرتبه هارمونیکی هستند. به دلیل اینکه $[I(h)]$ و $[Y(h)]$ برای هر مرتبه هارمونیکی متفاوت هستند، فرآیند تحلیل هارمونیکی باید برای هر هارمونیک جداگانه صورت گیرد.

۳-۲-آنالیز حساسیت

برای تعیین مکان خازن گذاری در شبکه توزيع فاکتور حساسیت تلفات مورد استفاده قرار می‌گیرد. فاکتور حساسیت تلفات قادر است تعیین

۱۵ حاصل می‌شود ولی برای بهنگام کردن ذرات ازتابع sigmoid بهصورت رابطه ۱۸ و رابطه ۱۹ استفاده می‌شود:

$$S(v_{id}^k) = \frac{1}{1+e^{-v_{id}^k}} \quad (18)$$

$$v_{id}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } rand < S(v_{id}^k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

۴- فرآیند حل

کل فرآیند بهینه‌سازی را می‌توان در گام‌های زیر خلاصه کرد:

گام اول: اطلاعات ورودی، شامل ساختار سیستم و داده‌های شبکه و همچنین پارامترهای کنترل، شامل حدود بالا و پایین ولتاژ باس، ماکریزیم اعوجاج هارمونیکی ولتاژ مجاز در هر باس و ماکریزیم تعداد خازن مجاز در هر باس را وارد کنید. باس‌های کاندیدا را با استفاده از آنالیز حساسیت تعیین و توجه کنید که در این مرحله باقیستی امکان نصب خازن در باس‌های کاندیدا بررسی شود که در صورت عدم امکان باید باس‌های حساس اولویت‌های بعدی انتخاب شود.

گام دوم: بعد از ذره را بهصورت بردارهایی با تعداد سطرها مساوی تعداد واحدهای خازنی موجود و ستون‌ها برابر تعداد باس‌های حساس سیستم، تنظیم کرده و در فضای D بعدی حل یک جمعیت اولیه از ذرات با وضعیت و سرعت تصادفی تولید کرده و اندیس تکرار را در $t=0$ تنظیم کنید.

گام سوم: پخش بار در فرکانس اصلی و هارمونیکی را انجام داده و مقادیر تلفات توان و ولتاژ موثر باس‌ها و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ در هر باس را بهدست آورید.

گام چهارم: برای هر ذره، ابتدا کل هزینه را با استفاده از (۱) محاسبه کرده و قیود را بررسی کنید.

گام پنجم: برای هر ذره، مقدار تابع برآذش را با بهترین فرد مقایسه کنید. اگر مقدار تابع برآذش کمتر از P_{best} بود، این مقادیر را بهعنوان P_{best} جاری تنظیم کنید و وضعیت ذره متناظر را ذخیره کنید.

گام ششم: جمعیت متناظر با مینیمم برآذش مربوط به هر فرد (Pbest) از بین کل ذرات را انتخاب کنید و این مقدار P_{best} را بهعنوان بهترین عمومی یعنی Gbest جاری ثبت کنید.

گام هفتم: با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۸)، سرعت جدید را محاسبه و موقعیت بهنگام شده ذرات را بهدست آورید.

خود را تغییر داده و سرعت خود را بر اساس تجربیات پرواز خود و اجزای همسایه، بهنگام می‌کند که برای کسب موقعیت بهتر کمک می‌کند. یک ذره i بهصورت $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ نشان داده می‌شود. موقعیتی که به بهترین تابع برآذش مربوط است بهعنوان بهترین موقعیت جاری مربوط به آن، ثبت می‌شود این موقعیت بهصورت زیر در نظر گرفته می‌شود: $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ برآذش متناظر، P_{best} نامیده و ثبت می‌شود. بهترین موقعیت سراسری در جمعیت مربوط به بهترین مقدار برآذش با عنوان بهصورت $Gbest = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ ثبت می‌گردد. سرعت، $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ نشان داده می‌شود. در طول پروسه تکرار، سرعت و موقعیت ذره آن مطابق رابطه زیر بهنگام می‌شود [۲۷]:

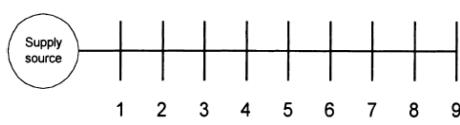
$$\begin{aligned} V_{id}(t+1) &= K(V_{id}(t) + r(0, \varphi_1) \cdot (P_{id}(t) - \\ &\quad X_{id}(t) + r(0, \varphi_2) \cdot (P_{gd}(t) - X_{id}(t))) \end{aligned} \quad (15)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (16) \\ d = 1, 2, \dots, D$$

$$K = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (17)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

فاکتور انقباض بوده و تابعی از φ_1 و φ_2 می‌باشد و ثابت شتاب φ_1 و φ_2 ، نشان دهنده وزن دهی شتاب تصادفی ذرات برای گرایش بهسمت بهترین موقعیت فردی و سراسری است. توابع $r(0, \varphi_1)$ و $r(0, \varphi_2)$ بهترین اعدادی تصادفی در رنج $[0, \varphi_1]$ و $[0, \varphi_2]$ تولید می‌کنند. مطابق رابطه ۱۵، سرعت فعلی پرواز ذرات سه ترم را شامل می‌شود: ترم اول سرعت قبلی ذره و ترم دوم و سوم، نشان دهنده مدل تک‌خویشاوندی و مدل دسته‌جمعی می‌باشد در مدل تک‌خویشاوندی، هر فرد جدا بوده و بهطور مستقل از افراد و تجربیات شخصی خود استفاده می‌کند. در حالی که در مدل دسته‌جمعی، افراد بر اساس تجربیات موثر همسایگان به سمت موفقیت حرکت می‌کنند. در مورد این مسئله، واحدهای خازنی گسته بوده و بنابراین هر ذره در جمعیت وجود یا عدم وجود واحدهای خازنی در باس‌های کاندیدا را نمایش می‌دهد بنابراین از PSO گسته استفاده می‌شود که بهنگام کردن سرعت در آن مشابه قبل از رابطه



شکل ۱: دیاگرام تک خطی سیستم توزیع

جدول ۱: مقاومت و امپدانس خطوط سیستم

from	to	R(ohm)	X(ohm)
•	۱	۰/۱۲۳۳	۰/۴۱۲۷
۱	۲	۰/۰۱۴	۰/۶۰۵۱
۲	۳	۰/۷۴۶۳	۱/۲۰۵
۳	۴	۰/۶۹۸۴	۰/۶۰۸۴
۴	۵	۱/۹۸۳۱	۱/۷۲۷۶
۵	۶	۰/۹۰۵۳	۰/۷۸۸۶
۶	۷	۲/۰۵۵۲	۱/۰۱۶۴
۷	۸	۴/۷۹۵۳	۲/۷۱۶
۸	۹	۵/۳۴۳۴	۳/۰۲۶۴

۱۶۸ \$/KW در پیشنهاد IEEE-519 محدود است. ولتاژ موثر و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باسها با استفاده از استاندارد IEEE-519 محدود است. ضمن اینکه کل راکتیو خازنی مجاز برای نصب به مجموع توان راکتیو مورد تقاضا در سیستم ۴۱۸۶ KVar معنی محدود می‌شود. با استفاده از آنالیز حساسیت باس‌های حساس سیستم برابر ۴، ۶ و ۹ می‌شود.

گام هشتم: برای هر جمعیت جدید، امکان پذیر بودن موقعیت را بررسی کنید. اگر تعداد بانک خازنی از مقدار مجاز در هر بس فراتر رفت، تعداد را به مقدار مورد نظر محدود کنید.

گام نهم: اگر ماکریم تعداد تکرار انجام شد به گام نهم و در غیر اینصورت اندیس $t=t+1$ قرار داده و به گام دوم بروید.

گام دهم: حل بهینه را (شامل بهترین وضعیت و بهترین مقدار تابع برازش) نمایش دهید.

۵- نتایج عددی

برای نشان دادن قابلیت فرآیند پیشنهادی، ابتدا یک شبکه توزیع آزمایشی ۹ باسه تست IEEE با دیاگرام تک خطه شکل ۱، در نظر گرفته و خازن گذاری با روش پیشنهادی انجام می‌شود. این شبکه در [۲۵] نیز مورد مطالعه قرار گرفته است بنابراین به منظور مقایسه دو روش و مشاهده کارآیی روش پیشنهادی تابع هدف، واحدهای خازنی موجود و قیود مسئله یکسان در نظر گرفته شده است. توان بیس برابر با MVA ۱۰۰ و ولتاژ بیس برابر با ولتاژ نامی فیدر، ۲۳kV در نظر گرفته شده است.

در جدول ۱، مقاومت و امپدانس خطوط سیستم مورد مطالعه مشاهده می‌شود. جدول ۲، بارهای PQ متصل به باس‌ها و درصد بارهای غیر خطی هر باس را مشخص می‌کند. ضمن اینکه هارمونیک‌های ۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۹، ۲۳ و ۲۵ در نظر گرفته می‌شود و درصد جریان در هر مرتبه هارمونیکی نیز در [۲۵] آورده شده است.

جدول ۲: درصد بارهای غیر خطی در باس‌های سیستم [۲۶]

باس	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
P(KW)	۱۸۴۰	۹۸۰	۱۷۹۰	۱۵۹۸	۱۶۱۰	۷۸۰	۱۱۵۰	۹۸۰	۱۶۴۰
Q(kVar)	۴۶۰	۳۴۰	۴۴۶	۱۸۴۰	۶۰۰	۱۱۰	۶۰	۱۳۰	۲۰۰
غیر خطی٪	۰	۵۵/۷	۱۸/۹	۹۲/۱	۴/۷	۱/۹	۳۸/۲	۴/۵	۲۴

جدول ۳: واحدهای خازنی بر حسب KVar و ضریب هزینه بر حسب \$/KVar

KVar خازن	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۷۵۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۳۵۰	۱۵۰۰	۱۶۵۰
ضریب هزینه	۰/۵	۰/۳۵	۰/۲۵۳	۰/۲۲	۰/۲۷۶	۰/۱۸۳	۰/۱۷	۰/۲۰۷	۰/۲۰۱	۰/۱۹۳

با اجرای برنامه، مقادیر کیلو وار واحدهای خازنی نصب شده به ترتیب برابر با ۲۷۰۰ و ۱۲۰۰ برای باس‌های ۶ و ۹ سیستم حاصل می‌شود. نکته قابل توجه این است که در [۲۵] خازن گذاری در باس‌های ۴، ۵ و ۹ به ترتیب با مقادیر راکتیو پریونیت ۰/۰۳۶، ۰/۰۱۸ و

نتایج به صورت مقادیر ولتاژ در هر هارمونیک، ولتاژ موثر و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ در باس‌های سیستم قبل از جبران در جدول ۴ ارائه شده است.

با $1904\$$ بوده در حالی که در اینجا $3228\$$ شده است. ضمن اینکه با مشاهده جدول ۵ و در نهایت مقایسه مقادیر ولتاژ موثر نهایی در هر دو روش به رغم نصب خازن بیشتر در مقاله مرجع، تشابه پروفیل ولتاژ نهاییو ارضا شدن قید ولتاژ موثر و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باسها مشهود است.

جدول ۵، مقادیر ولتاژ موثر، ولتاژ در هر مرتبه هارمونیکی و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ را در همه باس‌های سیستم، نشان می‌دهد.

۰/۰۰۹ حاصل شده است که با توجه به اینکه مقدار مبنای راکتیو 100×10^3 بوده کل راکتیو حاصل برابر با 6300 شده که از مقدار 4186 یعنی کل توان راکتیو مورد تقاضا از سیستم تجاوز کرده است. این در حالی است که کمتر بودن مقدار راکتیو خازنی حاصل از کل راکتیو مورد تقاضا از سیستم در همین مقاله جز قیود لحاظ شده است. در اینجا کل راکتیو خازنی حاصل از اجرای برنامه برابر با 3900 بوده که قید مورد نظر را ارضا می‌کند. صرفه‌جویی کل در مقاله مرجع برابر

جدول ۴: نتایج ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ قبل از خازن‌گذاری

باس	پریونیت ولتاژ در هر مرتبه هارمونیک										V_{THD}	%THD
	۱	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵			
۱	۰/۹۹۳	۰/۰۲۴	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۸	۰/۹۹۳	۰/۳۸۳	
۲	۰/۹۸۷	۰/۰۴۵۹	۰/۰۲۸	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۰۴۷	۰/۹۸۷	۵/۴۴	
۳	۰/۹۶۳۵	۰/۰۴۶۳	۰/۰۲۸۸	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۷۴	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۴۶	۰/۹۶۳	۵/۷	
۴	۰/۹۴۸۱	۰/۰۴۶۸	۰/۰۲۹۸	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۹۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷۹	۰/۰۰۰۴۸	۰/۹۴۸	۵/۹	
۵	۰/۹۱۷۳	۰/۰۴۵۵	۰/۰۲۲۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۳۸	۰/۹۱۸	۵/۵	
۶	۰/۹۰۷۳	۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۳۸	۰/۰۰۱۷۹	۰/۰۰۱۸۵	۰/۰۰۱۰۳	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۹۷	۰/۰۰۰۱۱	۰/۹۰۸	۳/۳	
۷	۰/۸۸۹۲	۰/۰۲۹	۰/۰۱۵۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸۸	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۱۲۴	۰/۸۹	۵/۰۶	
۸	۰/۸۵۹۰	۰/۰۲۵۹	۰/۰۱۵۱	۰/۰۰۱۸۳	۰/۰۰۱۹۹	۰/۰۰۱۱۳	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۱۳	۰/۸۶	۳/۷	
۹	۰/۸۳۷۸	۰/۰۴۳۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۱۲۸	۰/۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۸۴	۶/۲	

می‌دهد که کاهش چشمگیر اعوجاج هارمونیکی ولتاژ و افزایش پروفایل ولتاژ را در کلیه باس‌های سیستم نشان می‌دهد.

جدول ۵ مقادیر ولتاژ باس‌های سیستم در فرکانس اصلی و کلیه فرکانس‌های هارمونیکی در باس‌های سیستم و همچنین کل اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌های سیستم بعد از اجرای برنامه را نمایش

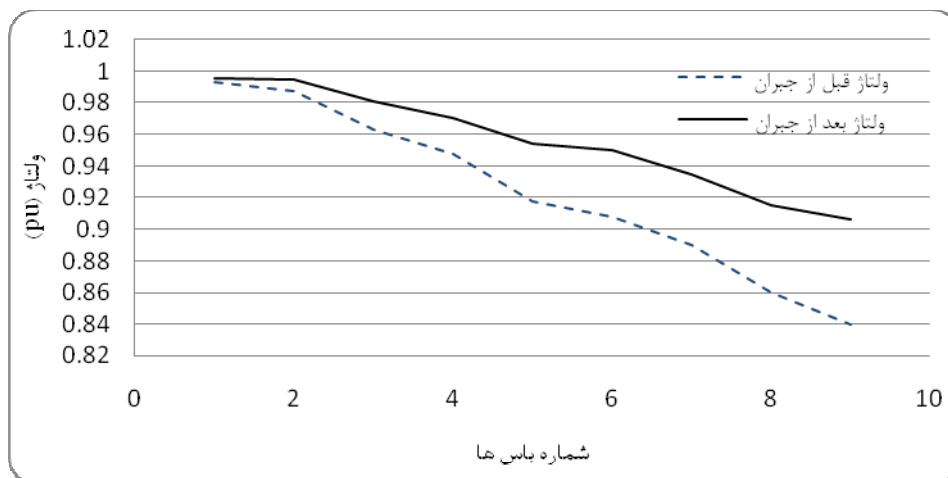
جدول ۵: نتایج ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ بعد از اجرای خازن‌گذاری

باس	پریونیت ولتاژ در هر مرتبه هارمونیک										V_{THD}	%THD
	۱	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵			
۱	۰/۹۹۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۶	۰/۱۶۳	
۲	۰/۹۹۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۵	۰/۴۰۴	
۳	۰/۹۸	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۲	۰/۹۸۱	۰/۸۳۴	
۴	۰/۹۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۹	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۳	۰/۹۷۱	۱/۰۲	
۵	۰/۹۵۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۰۳	۰/۹۵۴	۱/۵۵	
۶	۰/۹۴۹	۰/۰۱۱۷	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۹۵	۱/۴۱	
۷	۰/۹۳۵	۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۳	۰/۹۳۵	۱/۵۶	
۸	۰/۹۱۴	۰/۰۱۶۱	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۳	۰/۹۱۵	۱/۹۷		
۹	۰/۹۰۲	۰/۰۱۹۴	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۹۰۶	۲/۴	

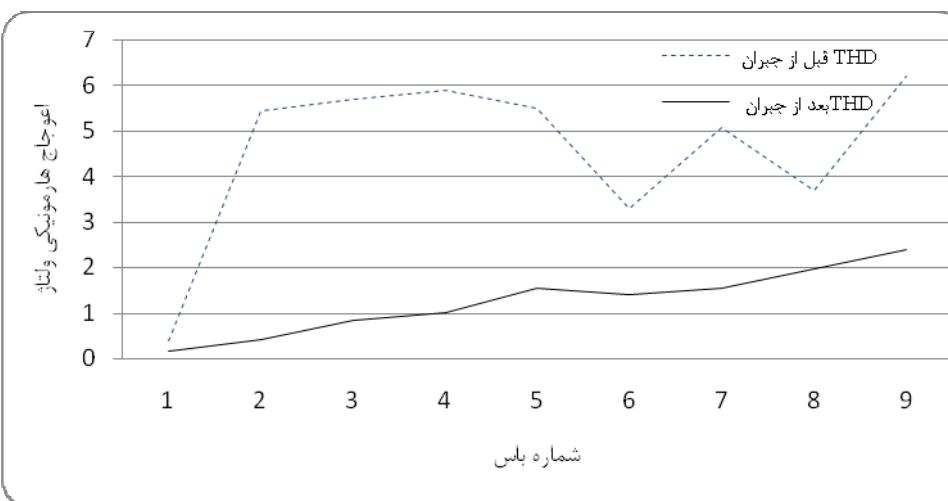
برای وضوح بیشتر نتایج، شکل ۲ و ۳ به ترتیب نتایج مقادیر موثر ولتاژ باس‌ها و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌ها را برای قبل و بعد از جبران نشان می‌دهند. جدول ۶، نتایج حاصل از اجرای خازن‌گذاری را

$$\frac{\text{ولتاژ} - \text{ولتاژ}_{\text{max}}}{\text{ولتاژ}_{\text{max}}} * 100\% = 61.2\%$$

نشان می‌دهد. درصد کاهش اعوجاج هارمونیکی ولتاژ پس از اجرای برنامه نسبت به پیش از آن عبارتست از:



شکل ۲: ولتاژ قبل و بعد از جبران



شکل ۳: اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌ها قبل و بعد از جبران

جدول ۶ : نتایج حاصله از اجرای برنامه

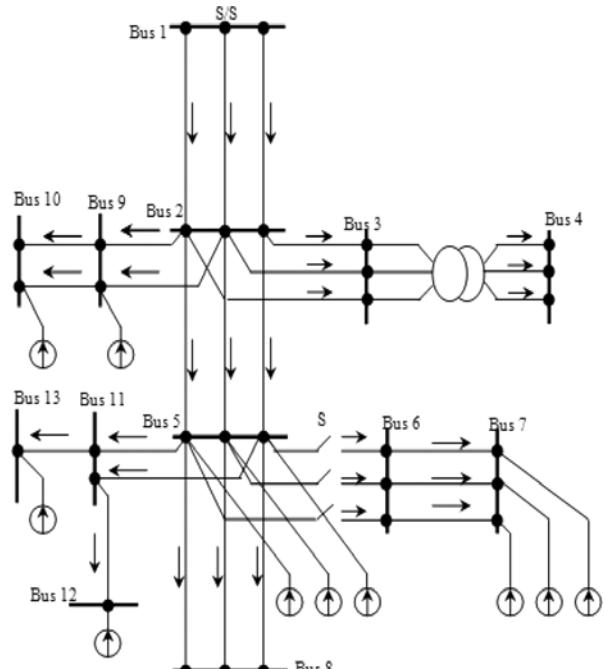
	قبل از خازن گذاری	بعد از خازن گذاری
مینیمم ولتاژ باس (pu)	۰/۸۴	۰/۹۰۶
ماکریمم ولتاژ باس (pu)	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶
$\text{THD}_{\text{max}}\%$	۶/۲	۲/۴
تلفات توان اکتیو (kW)	۷۸۷/۲	۷۶۲/۹۳۷۸
صرفه جویی کل (\$)	-	۳۲۲۸

کل راکتیو خازنی مجاز به مقدار $1568/9$ یعنی مجموع توان راکتیو مورد تقاضا از سیستم محدود می‌شود. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که باس‌های حساس به ترتیب $6, 5$ و 7 می‌باشند. قبل از اجرای برنامه، نتایج ولتاژ موثر و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کلیه باس‌ها مطابق جدول 7 بوده که کاملاً با [۲۸] مطابقت دارد.

جدول ۷: نتایج ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ قبل و بعد از جبران

bus	قبل از جبران			بعد از جبران	
	فاز	V_{rms}	%THD	V_{rms}	%THD
1	a	1	0	1	0
	b	1	0	1	0
	c	1	0	1	0
2	a	۰/۹۶۷	۲/۳	۰/۹۸۹	۰/۴۸۹
	b	۰/۹۸۱	۲/۱۳	۰/۹۷۹	۰/۶۷۴
	c	۰/۹۵	۲/۳۳	۰/۹۹	۰/۴۱۲
3	a	۰/۹۶۴	۲/۳۲	۰/۹۹۱	۰/۵۲۳
	b	۰/۹۷۹	۲/۱۴	۰/۹۸۷	۰/۶۷۵
	c	۰/۹۴۸	۲/۳۳	۰/۹۹	۰/۴۱۳
4	a	۰/۹۴۱	۲/۴	۰/۹۷	۰/۵۶۱
	b	۰/۹۶	۲/۲۱	۰/۹۶۴	۰/۶۵۸
	c	۰/۹۲۹	۲/۴	۰/۹۶۲	۰/۴۲۸
5	a	۰/۹۵	۴/۴۲	۰/۹۹۴	۱/۲۲۱
	b	۰/۹۸۵	۳/۶۶	۰/۹۸۷	۱/۳۶۹
	c	۰/۹	۴/۶۹	۰/۹۶	۰/۷۹۹
6	a	۰/۹۵	۴/۴۲	۰/۹۹۷	۱/۴۹۵
	b	۰/۹۸۵	۳/۶۶	۰/۹۹۶	۱/۵۰۱
	c	۰/۹	۴/۶۹	۰/۹۵۱	۱/۴۰۵
7	a	۰/۹۴۳	۴/۴۹	۰/۹۸۳	۱/۲۹۹
	b	۰/۹۸۶	۳/۶۵	۰/۹۹۵	۱/۶۳
	c	۰/۸۹۷	۴/۷۲	۰/۹۴۶	۱/۲۷۶
8	a	۰/۹۵	۴/۴۲	۰/۹۹۴	۱/۴۹۶
	b	۰/۹۸	۳/۶۶	۰/۹۹۹	۱/۵۴۸
	c	۰/۹	۴/۶۹	۰/۹۹۲	۱/۳۲۹
9	b	۰/۹۷	۲/۳۸	۰/۹۷۶	۱/۰۹
	c	۰/۹۵۴	۲/۳۸	۰/۹۶۴	۰/۵۶۱
	b	۰/۹۶۸	۲/۳۳	۰/۹۷۸	۰/۸۰۱
10	c	۰/۹۵۸	۲/۳۳	۰/۹۷۹	۰/۵۳۱
	a	۰/۹۴۴	۴/۵۸	۰/۹۸۳	۱/۳۱
	c	۰/۸۹۵	۴/۸۶	۰/۹۵۲	۱/۶۷۱

دومین شبکه آزمایشی مورد مطالعه مشابه مرجع [۲۸] در نظر گرفته شده است. شبکه 13 باس نامتعادل آزمایشی IEEE با شماتیک نشان داده شده در شکل ۴ است که مشخصات کامل سه‌فاز آن شامل اطلاعات شبکه و وضعیت بارهای هارمونیکی در مرجع [۲۹] وجود دارد. سیستم شامل خطوط و بارهای تکفار، دو فاز و سه فاز بوده و علاوه بر بارهای نقطه‌ای، شامل یک بار توزیع شده نیز می‌شود. باس اول به صورت اسلک در نظر گرفته شده است. در شرایط هارمونیکی کلیه بارهای سیستم به صورت PQ در نظر گرفته می‌شود. توان ظاهری پایه برابر 10 MVA و ولتاژ پایه برابر با ولتاژ نامی فیدر و در مقدار $۴/۱۶\text{kV}$ تنظیم شده است. واحدهای خازنی موجود و ضریب هزینه آن‌ها نیز مطابق استاندارد مشابه سیستم قبل بوده که در جدول 3 آورده شده است. تابع هدف [۲۸] فقط شامل هزینه تلفات توان و هزینه واحدهای خازنی می‌باشد. در اینجا برای بهبود نتایج بهینه سازی تابع هدف علاوه بر ترم‌های مذکور، ترم جریمه برای رگولاسیون ولتاژ طبق رابطه (۱) را نیز شامل می‌شود. ضریب هزینه تلفات توان برابر $168 \$/\text{kw}$ و ضریب Δt در مقدار 10000 تنظیم شده است. قیود ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ مطابق استاندارد IEEE 519 لحاظ شده است.



شکل ۴: شماتیک شبکه آزمایشی 13 باس [۲۸]

جدول ۹: مقایسه نتایج حدی

	قبل از جران	مرجع [۲۸] بعد از جران	بعد از جران
مینیمم ولتاژ باس (pu)	۰/۸۹۵	۰/۹۵۵	۰/۹۵۲
ماکریمم ولتاژ باس (pu)	۰/۹۸۶	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹
$THD_{max}\%$	۴/۸۶	۱/۷۲۷	۱/۶۷۱
$THD_{min}\%$	۲/۱۳	۰/۴۰۸۵	۰/۴۱۲
تلفات توان اکتیو (kW)	۱۹۲/۷۵	۱۶۵/۲۱۶	۱۶۲/۹۴۱
صرفه جویی کل (\$)	-	۴۲۵۷/۶۹	۴۸۴۲
کل راکتیو خازنی (kvar)	-	۱۳۵۰	۱۵۰۰

مطابق جدول (۹) مشاهده می‌شود که با وجود نصب راکتیو خازنی بیشتر نسبت به مرتع مذکور، بهدلیل کاهش بیشتر تلفات توان اکتیو در سیستم، صرفه جویی کل حاصل کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه

در این مقاله خازن گذاری بهینه سیستم‌های توزیع هارمونیکی با استفاده از PSO گستته ارایه شد. برای نشان دادن قابلیت PSO نسبت به روش الگوریتم ژنتیک، سیستم توزیع هارمونیکی ^۹ باشه تحت شرایط کاملاً یکسان با مرتع معرفی شده برای بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ، و کاهش تلفات ضمن کاهش هزینه‌ها با در نظر گرفتن قیود عملی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصله مقایسه شد و قابلیت روش پیشنهادی مشاهده گردید. برای افزایش سرعت همگرایی و کیفیت بهینه‌سازی، باس‌های حساس سیستم توسط آنالیز حساسیت تعیین شدند. سیستم دیگری برای مطالعه انتخاب گردید که مقایسه نتایج با مرتع [۲۸] نشان‌دهنده قابلیت بالای تابع هدف انتخابی و روند ارائه شده برای بهینه‌سازی می‌باشد. مسئله مورد نظر چند هدفه و غیر خطیبوده و اجرای برنامه نشان می‌دهد که ضمن کاهش هزینه کل سیستم و کاهش تلفات توان اکتیو، قیود کاملاً ارضاء شده و ولتاژ مؤثر و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ در باس‌های سیستم در محدوده تعريف شده طبق استاندارد IEEE-519 قرار گرفته و نتایج رضایت‌بخشی حاصل شد. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهد که PSO گستته، با توجه به سرعت همگرایی و دقت بالای محاسبات و تنظیم ساده انتخاب سیار مناسبی برای خازن گذاری شبکه‌های توزیع واقعی، در ابعاد بزرگ‌تر با شرایط هارمونیکی می‌باشد.

با اجرای برنامه تلفات سیستم قبل از خازن گذاری برابر $kw = ۱۹۲/۷۵$ محاسبه شده و تابع هدف شامل ترم جریمه برای افزایش رگولاسیون ولتاژ و بدون احتساب آن به ترتیب برابر با ۴۷۵۶۱ و $۳۲۳۸۲$$ حاصل می‌شود.

اندازه و مکان خازن‌ها با اجرای برنامه به صورت جدول ۸ حاصل می‌شود. کل راکتیو خازنی حاصل از اجرای برنامه $1500 kvar$ بوده که از مجموع توان راکتیو مورد تقاضا از سیستم کمتر است. همچنین مطابق جدول ۷، پس از اجرای برنامه قیود ولتاژ مؤثر و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ ارضاء گردیده است.

جدول ۸: اندازه و مکان خازن‌ها با اجرای برنامه

شماره و فاز باس	۶۶	۵۰	۷۸
راکتیو خازنی	۴۵۰	۶۰۰	۴۵۰

کل تلفات در سیستم شامل تلفات در فرکانس اصلی و فرکانس‌های هارمونیکی پس از اجرای برنامه به $kw = ۱۶۲/۹۴۱$ و تابع هزینه شامل هزینه تلفات و هزینه واحدهای خازنی به $$/year$ کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با اجرای برنامه ضمن اینکه قیود ولتاژ مؤثر و کل راکتیو خازنی مجاز ارضاء شده است، مقدار اعوجاج هارمونیکی ولتاژ نیز در کلیه باس‌ها به میزان چشمگیری افزایش یافته به طوری که درصد کاهش اعوجاج هارمونیکی ولتاژ پس از اجرای برنامه نسبت به پیش از آن عبارتست از:

$$\frac{THD_{max} - THD_{max}}{THD_{max}} * 100\% = 66.87\%$$

از طرفی با توجه به اینکه در تابع هدف ترم اضافی برای رگولاسیون ولتاژ افزوده شده است، مشاهده می‌شود که پس از اجرای برنامه و با توجه به افزایش نسبی سطح ولتاژ باس‌ها پس از خازن گذاری، مقدار این ترم جریمه از $\$ ۶۱۹۰$ به $\$ ۱۵۱۷۹$ کاهش می‌یابد. برای مقایسه نتایج قبل و بعد از خازن گذاری و نیز مقایسه با نتایج حدی مرتع [۲۸]، در جدول ۹ نتایج نهایی دسته‌بندی شده است.

- IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis, pp. 53-57, 2003.
- [17] K. Sedlacek, P. Eberhard, "Optimization of Nonlinear Mechanical Systems under Constraints with the Particle Swarm Method" Proceedings of Applied Mathematics and Mechanics, 4(1), pp. 169-170, 2004.
- [18] J. B. Park, K. S. Lee, J. R. Shin, and K. Y. Lee, "A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch With Nonsmooth Cost Functions" AIME 06 International Conference, 13 - 15 June 2006, Sharm El Sheikh, Egypt 142 IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 34-42, Feb. 2005.
- [19] K. Sedlacek and P. Eberhard, "Constrained Particle Swarm Optimization of Mechanical Systems" 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization Rio de Janeiro, 30 May - 03, Brazil, June 2005.
- [20] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, and Y. Nakanishi "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment" IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, pp. 1232-1239, Nov. 2000.
- [21] M. A. Abido, "Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 17, no. 3, pp. 406-413, Sept. 2002.
- [22] B. Zhao, C. X. Guo, and Y. J. Cao, "A Multiagent-Based Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Reactive Power Dispatch" IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 1070-1078, May. 2005.
- [23] R. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, in: Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp. 39-43, 1995.
- [24] Jen-Hao Teng, Chuo-Yean Chan "Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Analysis Method for Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 22, NO. 3, JULY 2007
- [25] T.S. Chung, H.C. Leung, "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations", Electrical Power and Energy Systems vol.21, no.8, pp 561-569, 1999.
- [26] Naveen Sethi, "Optimal capacitor placement in radial distribution system using genetic algorithm", Master of Engineering in power system & electrical drives, pp.19-21, July 2009.
- [27] R. Eberhart, Y. Shi, Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm, in: Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, pp. 84-88, 2000.
- [28] Abdelsalam A., M. E. El-Hawary, "Capacitor Placement and Sizing in Distribution systems with Harmonics using Particle Swarm Optimization", IEEE Transactions on Power Delivery, VOL. 25, NO. 3, JULY 2010.
- [29] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 3, pp. 975-985, Jul. 1991.

زیرنویس

¹Particle Swarm Optimization

مراجع

- [1] H. N. Ng, M. M. A. Salama, and A. Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 1, pp. 387-392, Jan. 2000.
- [2] B. A. de Souza, H. N. Alves, and H. A. Ferreira, "Microgenetic algorithms and fuzzy logic applied to the optimal placement of capacitor banks in distribution networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, pp. 942-947, May 2004.
- [3] J. Huang, "An immune-based optimization method to capacitor placement in a radial distribution system," IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 744-749, Apr. 2000.
- [4] M. Delfanti, G. P. Granelli, P. Marannino, and M. Montagna, "Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms," IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 3, pp. 1041-1046, Aug. 2000.
- [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519-1992, 1993.
- [6] Y. Baghzouz, "Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 6, pp. 245-251, Jan. 1991.
- [7] Y. Baghzouz and S. Ertem, "Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltage," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, pp. 650-657, Apr. 1990.
- [8] B. Gou and A. Abur, "Optimal capacitor placement for improving power quality," in Proc. Power Eng. Meeting, vol. 1, pp. 488-492, 1999.
- [9] M.A.S. Masoum, M. Ladjevardi, E.F. Fuchs, E.M. Grady, "Optimal placement and sizing of fixed and switched capacitor banks under nonsinusoidal operating conditions", IEEE, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 807-813, 2002.
- [10] M. A. S. Masoum, A. Jafarian, M. Ladjevardi, E. F. Fuchs, and W. M. Grady, "Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics," IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 2, pp. 822-829, Apr. 2004.
- [11] M. A. S. Masoum, M. Ladjevardi, A. Jafarian, and E. F. Fuchs, "Optimal placement, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks by genetic algorithms," IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 4, pp. 1794-1801, Oct. 2004.
- [12] Ejajal, A.A., El-Hawary, M.E., "Optimal capacitor placement and sizing in distorted radial distribution systems part II: Problem formulation and solution method", 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010.
- [13] Vargas, L.S., Jimenez-Estevez, G.A., "Genetic algorithms for the capacitor placement problem in distribution networks", 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011.
- [14] L.-P Zhang, H.-J. Yu and S.-X Hu, "Optimal choice of parameters for particle Swarm Optimization," Journal of Zhejiang Univ. SCI, pp. 528-534, 6A(6), 2005.
- [15] J. F. Schutte, J. A. Reinbold, B. J. Frey, R. T. Haftka, and A. D. George, "Parallel global optimization with the particle swarm algorithm" Int. J. Numer. Meth. Engng, 61:2296-2315, 2004.
- [16] X. Hu, R. Eberhart, Y. Shi, "Engineering Optimization with Particle Swarm". Proceedings of the