

Optimal Capacitor Placement in Distribution Networks Considering the Effect of Harmonics using the New Recursive Harmonic Power Flow Method

Mahmoud Reza Shakarami¹, Majid Toulabi², Hamzeh Beiranvand³

¹ Dept. of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran
shakarami.mr@lu.ac.ir

² Dept. of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran
toolabi.maj@fe.lu.ac.ir

³ Dept. of Electrical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran
beiranvand.ha@fe.lu.ac.ir

Abstract:

In this paper, a multi-objective function is proposed for optimal placement of the capacitors in radial distribution networks considering the effect of harmonics. In addition to the voltage profile, active losses and installation cost, the resonant phenomenon caused by the harmonics is also included in proposed objective function. The PSO meta-initiative method has been employed in order to optimize the function. A novel approach has been introduced to analyze the harmonic load flow in distribution networks. The proposed method is based on four matrices that are constant during the load flow. Therefore, in this method, the repeater counters and the harmonic frequencies are the only variables. Due to the elimination of backward-forward sweeps in this approach, the calculations are fast and accurate. This method has been implemented on a standard 14-bus system and a real power distribution network in Lorestan province, Iran. Simulation results confirm the accuracy and speed of the proposed load flow method as well as the effectiveness of the proposed method for optimal placement of the capacitors in the harmonic polluted networks.

Keywords: Recursive Harmonic Load Flow, Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Load Flow, Resonance, Optimal Capacitor Placement, Radial Distribution Systems.

جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌ها به

کمک روش جدید پخش بار هارمونیکی بازگشتی

محمودرضا شاکرمی^۱، مجید طولابی^۲، حمزه بیرانوند^۳

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران

shakarami.mr@lu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران

toolabi.maj@fe.lu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - خرم‌آباد - ایران

beiranvand.ha@fe.lu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک تابع هدف چندگانه به منظور جایابی بهینه خازن‌ها در شبکه‌های توزیع شعاعی با در نظر گرفتن اثرات هارمونیکی معرفی شده است. در این تابع هدف علاوه بر پروفیل ولتاژ، تلفات اکتیو و هزینه نصب، پدیده رزونانس ناشی از هارمونیک‌ها نیز منظور شده است. به منظور بهینه‌سازی تابع هدف از روش فرا - ابتکاری PSO استفاده شده است. برای تحلیل پخش بار هارمونیکی در شبکه‌های توزیع، روشی جدید معرفی شده است. این روش مبتنی بر چهار ماتریس است که در طول پخش بار ثابت می‌مانند و تنها متغیر در آن، شمارنده تکرار و فرکانس‌های هارمونیکی‌اند. با توجه به اینکه در این روش جاروب‌های پس‌رو - پیش‌رو حذف شده‌اند، در عین داشتن دقت مناسب، سرعت محاسبات به‌طور مؤثری افزایش می‌یابد. روش پیشنهادی روی یک سیستم استاندارد ۱۴ شینه نامتعادل و یک سیستم واقعی از شبکه توزیع برق استان لرستان پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی بیان‌کننده دقت و سرعت روش پخش بار پیشنهادی و همچنین مؤثر بودن روش ارائه‌شده در جایابی بهینه خازن در شبکه‌های آلوده به هارمونیک‌اند.

واژه‌های کلیدی: پخش بار هارمونیکی بازگشتی، پخش بار هارمونیکی جاروب پس‌رو - پیش‌رو، جایابی بهینه خازن، رزونانس، سیستم‌های توزیع شعاعی

۱- مقدمه

توزیع علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو نیز در این شبکه‌ها جاری شده است و این موضوع تلفات شبکه را افزایش می‌دهد. روش‌های مختلفی به منظور کاهش تلفات در بخش توزیع ارائه شده که یکی از متداول‌ترین آنها جبران‌سازی توان راکتیو است. جبران‌سازی توان راکتیو در سیستم‌های توزیع علاوه بر کاهش تلفات اکتیو به بهبود پروفیل ولتاژ و اصلاح ضریب قدرت نیز کمک می‌کند. متداول‌ترین روش‌ها برای جبران توان راکتیو در شبکه‌های توزیع، استفاده از خازن‌های موازی است [۱-۳]؛ البته امروزه در

بیش‌ترین سهم تلفات در شبکه‌های قدرت مربوط به بخش توزیع است. با وجود بارهای القایی در سیستم‌های

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

نام نویسنده مسئول: محمودرضا شاکرمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - خرم‌آباد - دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی

شبکه‌ها از ادوات مبتنی بر الکترونیک قدرت همچون SVC و DSTATCOM نیز استفاده می‌شود [۵، ۴].

در بیشتر مراجع کمینه کردن تلفات اکتیو و هزینه نصب خازن‌ها، تابع هدف در نظر گرفته شده است [۶-۸]. در [۷]، یک روش برای مکان‌یابی و تعیین اندازه خازن‌ها با استفاده از استراتژی‌های جستجوی اکتشافی ارائه شده است. در این پژوهش، جایابی خازن‌ها به صورت جداگانه و یکی پس از دیگری انجام شده و اثر متقابل بین خازن‌ها با هم در یک بهینه‌سازی کلی در نظر گرفته نشده است. در مراجع [۶، ۸-۱۰] برای جایابی خازن‌ها در شبکه‌های توزیع، بارهای شبکه به صورت خطی (غیرهارمونیک) فرض شده است؛ بنابراین، روش‌های مطرح شده در این مراجع قادر به حل مسئله در حالت هارمونیک نیستند. در مراجع [۶، ۱۱]، علاوه بر تلفات توان اکتیو و هزینه نصب خازن، بهبود پروفیل ولتاژ نیز در تابع هدف منظور شده است.

یکی از مسائل مهم در جایابی خازن‌های موازی در شبکه‌های توزیع آلوده به هارمونیک، احتمال بروز پدیده رزونانس است. اگر جایابی خازن در سیستم‌های آلوده به هارمونیک به درستی انجام نشود، امکان تقویت و انتشار این هارمونیک‌ها و رخداد پدیده رزونانس در سیستم‌های توزیع وجود دارد [۱۲، ۱۳]. پدیده رزونانس در شبکه‌های توزیع به دلیل برابری راکتانس تونن شبکه دیده شده از محل نصب خازن با راکتانس خازن در یکی از فرکانس‌های هارمونیک رخ می‌دهد. این پدیده باعث ایجاد یک جریان بالاتر از ظرفیت نامی در تجهیزات شبکه می‌شود و امکان آسیب‌رساندن به آنها وجود دارد. در پژوهش‌های منتشر شده در خصوص جایابی خازن‌ها، به پدیده تشدید کمتر توجه و ارزیابی شده است. در مرجع [۱۴]، تجزیه و تحلیل سیستم در شرایط هارمونیک با روش پخش بار نیوتن رافسون انجام شده است. این روش تجزیه و تحلیل علاوه بر زمان محاسبات طولانی، برای سیستم‌های شعاعی چندان مناسب نیست. در مرجع [۱۵]، شاخص اعوجاج هارمونیک کل برای تعریف رفتار رزونانس به کار برده شده است؛ بنابراین در این روش، تعریف مشخصی از رزونانس در هریک از مرتبه‌های فرکانس هارمونیک استفاده نشده است.

با توجه به حضور روزافزون بارهای غیرخطی در شبکه توزیع، نفوذ هارمونیک در سیستم‌های توزیع قدرت شعاعی روزبه‌روز در حال افزایش است؛ بنابراین، ارائه روش‌هایی دقیق و سریع برای تحلیل هارمونیک پخش‌توان در این شبکه‌ها به منظور ارزیابی و تصمیم‌گیری در طراحی جبران‌سازها ضروری است.

یک روش پخش‌بار هارمونیک مبتنی بر جاروب پس‌رو - پیش‌رو در مراجع [۱۶، ۱۷]، برای حل مسئله پخش‌توان هارمونیک در سیستم‌های توزیع قدرت شعاعی توسعه داده شده است. مشکل عمده این روش، وجود حلقه‌های پیش‌رو و پس‌رو است که باعث افزایش زمان محاسبات به‌ویژه برای هارمونیک‌ها می‌شود؛ زیرا برای هر هارمونیک، اجرای پخش‌بار نیاز است.

یک روش پخش‌توان هارمونیک با استفاده از قاب حلقه مرجع به جای روش رایج قاب شینه مرجع در [۱۸] ارائه شده است. این پژوهش نشان می‌دهد پخش‌توان هارمونیک مبتنی بر قاب حلقه مرجع با روش‌های متداول مانند روش z-bus صریح گاوس [۱۹] مقایسه‌پذیر است. از مقایسه انجام شده در مراجع [۱۶، ۱۸] نتیجه گرفته می‌شود پخش‌توان هارمونیک مبتنی بر جاروب پس‌رو - پیش‌رو نسبت به پخش‌توان هارمونیک مبتنی بر قاب حلقه مرجع دقیق‌تر و سریع‌تر است.

در این مقاله یک روش جدید پخش‌بار هارمونیک بازگشتی در شبکه‌های توزیع شعاعی براساس روش پخش‌بار بازگشتی [۲۰] ارائه شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر چهار ماتریس است که در طول پخش‌بار ثابت می‌مانند و تنها متغیر در آن شمارنده تکرار و فرکانس‌های هارمونیک‌اند. در این روش، جاروب‌های پس‌رو - پیش‌رو حذف شده‌اند؛ بنابراین این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم همچون روش جاروب پس‌رو - پیش‌رو [۱۶، ۱۷]، در عین داشتن ویژگی‌های مثبت، سرعت بیشتری دارند. همچنین در این روش، حل پخش‌توان در هر هارمونیک به‌طور مستقل به دست می‌آید. این استقلال امکان استفاده از پردازش موازی را حین محاسبات فراهم می‌کند. همچنین، برخلاف روش تجزیه و تحلیل هارمونیک مبتنی بر ماتریس ادمیتانس، تجزیه LU برای هر هارمونیک لازم نیست.

$$V_h^k = A_{eq}^h V_{1,h} + B_{eq}^h I_h^k \quad (۳)$$

در برنامه پخش توان هارمونیک، منابع هارمونیک به صورت منابع جریان هارمونیک غیرخطی نشان داده می شوند. همچنین، فرض می شود شینه اصلی، اعوجاج هارمونیک ندارد؛ بنابراین می توان نوشت:

$$I_{h, inj}^{k-1} = I_{h,s}^{k-1} + Y_{Lh} V_h^{k-1} \quad (۴)$$

فرض می شود ولتاژ شینه شماره ۱ که منبع توان است، هارمونیک ندارد.

$$V_{1,h} = 0 \quad (۵)$$

با اعمال فرضیات بالا، روابط ۲ و ۳ به صورت زیر نوشته می شوند:

$$I_h^k = C_{eq}^h V_h^{k-1} + D_{eq}^h (I_{h,s}^{k-1} + Y_{Lh} V_h^{k-1}) \quad (۶)$$

$$V_h^k = B_{eq}^h I_h^k \quad (۷)$$

با جایگزین کردن معادله ۶ در ۷ می توان نوشت:

$$\begin{aligned} V_h^k &= B_{eq}^h (C_{eq}^h V_h^{k-1} + D_{eq}^h (I_{h,s}^{k-1} + Y_{Lh} V_h^{k-1})) \\ &= B_{eq}^h C_{eq}^h V_h^{k-1} + B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^{k-1} + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{Lh} V_h^{k-1} \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{Lh}) V_h^{k-1} + B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^{k-1} \end{aligned} \quad (۸)$$

با فرض $V_h^0 = 0$ می توان نوشت:

$$V_h^1 = B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \quad (۹)$$

که در آن، $I_{h,s}^0$ منابع جریان هارمونیک اند که مستقل از ولتاژ هارمونیک هستند و مقدارشان در تکرارهای مختلف تغییر نمی کند؛ بنابراین، ولتاژ در تکرار دوم به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} V_h^2 &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{Lh}) V_h^1 + B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{Lh}) (B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0) + B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{Lh} + U) B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \end{aligned} \quad (۱۰)$$

با انجام دادن دوباره این فرایند، ولتاژ در تکرار سوم به صورت زیر به دست می آید:

$$V_h^3 = (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{Lh}) V_h^2 + B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \quad (۱۱)$$

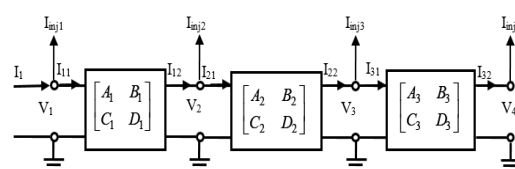
با توجه به روابط فوق می توان نوشت:

در این مقاله نیز برای جابجایی خازن های موازی در شبکه آلوده به هارمونیک یک تابع هدف با در نظر گرفتن اثرات رزونانس معرفی شده است. به منظور بهینه سازی این تابع هدف از روش بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است.

برای نشان دادن اثربخشی روش ارائه شده از سیستم استاندارد نامتقارن آلوده به هارمونیک سه فاز ۱۴ شینه و سیستم واقعی ۱۳۳۷ شینه از شبکه توزیع نیروی برق استان لرستان استفاده شده است.

۲- روش پخش توان هارمونیک بازگشتی

یک سیستم توزیع نمونه در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل توان های اکتیو و راکتیو به جریان های تزریقی تبدیل شده و جزئیات روش پیشنهادی براساس آن شرح داده شده است. در این روش، مدل دوقطبی یک پارچه برای هر شاخه سری در حوزه فرکانس در نظر گرفته شده است. معادلات مربوط به ولتاژ و جریان های ترمینال مدل دوقطبی عبارت اند از:



شکل (۱): سیستم توزیع شعاعی با مؤلفه های دوقطبی

$$V_{2,h} = A_{eq}^h V_{1,h} + B_{eq}^h I_{2,h} \quad (۱)$$

$$I_{1,h} = C_{eq}^h V_2 + D_{eq}^h I_{2,h}$$

که h مرتبه هارمونیک را نشان می دهد. ماتریس های A^h ، B^h ، C^h و D^h مشابه ماتریس های روش بازگشتی مرجع [۲۰] در هر هارمونیک محاسبه می شوند. در مواردی که اثرات فرکانس بالا در ادمیتانس ها و امپدانس ها لحاظ شوند، ماتریس های ادمیتانس و امپدانس اولیه خطوط هوایی و زیرزمینی براساس فرمول های کارسون محاسبه می شوند [۲۱]. براساس مرجع [۲۰]، فرمولاسیون جدید در حوزه فرکانس هارمونیک به شکل زیر نوشته می شوند:

$$I_h^k = C_{eq}^h V_h^{k-1} + D_{eq}^h I_{h, inj}^{k-1} \quad (۲)$$

جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌ها به کمک روش جدید ...

$$I_{s,h} = I_{s,1} \frac{I_{sp,h}}{I_{sp,1}} \quad (18)$$

$$\theta_{s,h} = \theta_{sp,h} + h(\theta_{s,1} - \theta_{sp,1}) \quad (19)$$

که $I_{s,1}$ اندازه جریان نامی، $I_{sp,1}$ اندازه جریان فرکانس اصلی، $I_{sp,h}$ اندازه طیف هارمونیک، $\theta_{s,1}$ زاویه فاز جریان نامی، $\theta_{sp,1}$ زاویه فاز جریان فرکانس اصلی و $\theta_{sp,h}$ زاویه فاز طیف هارمونیک منابع هارمونیک‌اند.

۳- تابع هدف

در روش پیشنهادی فرض شده است خازن‌ها از نوع ثابت‌اند و بارهای خطی و غیرخطی در سیستم سه‌فاز نامتعادل وجود دارند.

برای محاسبه تلفات انرژی در شبکه، تغییرات بار در شبکه به صورت گسسته و برای یک دوره زمانی T در محاسبات اعمال می‌شوند. فرض بر آن است M نقطه کاندیدا برای نصب خازن در شبکه موجود است. تابع هدف کل شامل کمینه کردن تلفات انرژی، هزینه خازن و انحراف ولتاژ است. همچنین، یک قید به منظور جلوگیری از پدیده رزونانس به تابع هدف اصلی اضافه می‌شود. معمولاً تمام هزینه‌ها با توجه به میزان برگشت سرمایه، طول عمر خازن، طول عمر نیروگاه و تجهیزات شبکه در یک سال محاسبه می‌شوند.

۳-۱- تابع هدف انحراف ولتاژ

یکی از ویژگی‌های مثبت شبکه‌های توزیع این است که ولتاژ شین‌ها برحسب پریونیت به مقدار واحد نزدیک باشد؛ بنابراین، ضروری است مقدار افت ولتاژ شین‌ها همواره در حد مجاز باشد. چنانچه این افت ولتاژ بیش از مقدار مجاز باشد، کیفیت توان نامناسب است و نارضایتی مشترکین را به دنبال خواهد داشت؛ بنابراین، اختلاف بین مقدار ولتاژ شین‌ها با مقدار واحد (۱ پریونیت) به عنوان انحراف ولتاژ به صورت تابع هدف ذیل در نظر گرفته شده است [۱۵].

$$dV = \sum_{i=1}^n |1 - V_i| \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (20)$$

$$V_h^1 - V_h^0 = B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_h^2 - V_h^1 &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) V_h^1 \\ &+ B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 - B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) V_h^1 \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} V_h^3 - V_h^2 &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) V_h^2 + B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \\ &- (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) V_h^1 - B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) (V_h^2 - V_h^1) \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h}) \\ &\quad * B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \\ &= (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h})^2 B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \end{aligned} \quad (14)$$

بنابراین، اختلاف در دو تکرار متوالی به طور کلی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_h^k - V_h^{k-1} = (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h})^{k-1} * B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \quad (15)$$

معیار همگرایی روش ارائه شده به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\|V_h^k - V_h^{k-1}\|_{\infty} \leq \varepsilon \quad (16)$$

تعریف معیار بی نهایت بصورت $\|A\|_{\infty} = \max_{i,j} |a_{i,j}|$ است و ε عدد بسیار کوچک و مثبت است. همان طور که مشاهده می‌شود، بین پارامترهای موجود در معادله ۱۶، فقط k متغیر است که نشان دهنده تکرار است و پارامترهای دیگر ثابت‌اند.

معادله ۱۵ برای به دست آوردن شکل کلی پخش بار هارمونیک پیشنهادی مجدداً به فرم زیر نوشته می‌شود:

$$V_h^k = V_h^{k-1} + (B_{eq}^h C_{eq}^h + B_{eq}^h D_{eq}^h Y_{L,h})^{k-1} * B_{eq}^h D_{eq}^h I_{h,s}^0 \quad (17)$$

بنابراین، روش پیشنهادی با تکرار و حل رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

همان طور که در مرجع [۲۲] شرح داده شده است، مقادیر و زاویه فاز جریان منابع هارمونیک به صورت زیر در فرمول بندی برنامه پخش بار هارمونیک اضافه می‌شوند.

کیلووات ساعت انرژی K_e فرض شود، هزینه مربوط به تلفات به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Cost_L = K_e * T * P \quad (23)$$

در اینجا K_e هزینه انرژی در هر کیلووات ساعت، T مدت زمان عملکرد (در اینجا به صورت سالانه فرض شده است) و P تلفات کل توان اکتیو هستند.

۳-۲-۲- تابع هدف کاهش هزینه نصب خازن

یکی از روش های بهبود ولتاژ شین ها و همچنین کاهش تلفات در شبکه های توزیع، استفاده از خازن ها است. خازن ها در صورت جابجایی بهینه با تزریق توان راکتیو مناسب، به شرایط بهره برداری مناسب شبکه های توزیع کمک می کنند. در مقابل فواید این تجهیزات، هزینه های مربوط به خازن گذاری نیز از مسائل مهم است؛ بنابراین، همواره تلاش می شود به منظور کاهش هزینه ها مقدار و مکان خازن ها در شبکه های توزیع بهینه شوند.

اگر فرض شود در n مکان شبکه خازن نصب شده باشد، هزینه تمام شده برای تمام خازن ها با توجه به رابطه ۲۴ محاسبه می شود:

$$Cost_c = \sum_{i=1}^n K_c * Q_i^c \quad (24)$$

در اینجا K_c هزینه هر کیلووار خازن و Q_i^c مقدار خازن جبران ساز در شینه i ام است.

۳-۳- قیود مسئله بهینه سازی

قید محدوده مجاز ولتاژ: به منظور رعایت کیفیت توان تحویلی به مشترکین، ولتاژ هریک از شینه ها در شبکه های توزیع باید در محدوده حداقل و حداکثر مجاز ولتاژ قرار گیرد. این موضوع به صورت قید زیر در نظر گرفته شده است:

$$V_{\min} = 0.95^{p.u} \leq V_i^1 \leq V_{\max} = 1.05^{p.u} \text{ for } i = 1, \dots, n \quad (25)$$

که در آن V_i^1 مقدار ولتاژ شینه i ام در مؤلفه اصلی است.

که در آن، V_i^1 مقدار ولتاژ شینه i ام در مؤلفه اصلی است.

۳-۲- تابع هدف کاهش هزینه ها

در این مقاله تابع هزینه شامل هزینه مربوط به تلفات و هزینه نصب خازن در نظر گرفته شده است [۲۳]. تابع هزینه با تقسیم شدن بر مقدار هزینه ها قبل از خازن گذاری نرمال شده است. چون در این مقاله تلفات انرژی نیز تابع هدف در نظر گرفته شده، هزینه قبل از خازن گذاری همان هزینه تلفات انرژی است.

$$Cost_T = (Cost_L + Cost_c) / Cost_B \quad (21)$$

که $Cost_L$ تابع هزینه مربوط به تلفات، $Cost_c$ تابع هزینه مربوط به نصب خازن و $Cost_B$ مقدار هزینه ها قبل از خازن گذاری اند.

۳-۲-۱- تابع هزینه مربوط به تلفات

با توجه به اینکه سطح ولتاژ شبکه های توزیع پایین است، مقدار جریان در این شبکه ها نسبت به شبکه های انتقال بالا است. از طرفی چون نسبت R/X در شبکه های توزیع نیز در مقایسه با شبکه های انتقال بالاست، تلفات اهمی در این شبکه ها چشمگیر است. به طور کلی بخش عمده تلفات انرژی در شبکه های قدرت مربوط به شبکه های توزیع است. کاهش این تلفات همواره از مسائل مهم مدنظر بهره برداران شبکه های توزیع است. به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی، هزینه مشخصی محاسبه می شود که این هزینه با توجه به قیمت سوخت و هزینه های تولید در هر کشور متفاوت است. به منظور محاسبه هزینه تلفات انرژی شبکه، باید مجموع انرژی تلف شده در سطح بار در مدت زمان مورد مطالعه (معمولاً یک سال) محاسبه شود. در رابطه ۲۲، نحوه محاسبه تلفات انرژی ارائه شده است:

$$P_{E,loss} = T * P \quad (22)$$

که T مدت زمان مورد مطالعه (معمولاً یک سال) و P تلفات توان اکتیو کل است. چنانچه هزینه هر

۳-۴- تابع هدف کل

باتوجه به مطالب بیان‌شده، تابع هدف خازن‌گذاری با رابطه ۲۹ بیان می‌شود:

$$\min \left\{ J = (w_1 * dV + w_2 * \text{Cost}_T + g * Jh) \right\} \quad (29)$$

Constraints

که در آن w_1 و w_2 ضرایب وزنی اند که در این مقاله این ضرایب مساوی و برابر ۰/۵ فرض شده‌اند.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله یک شبکه ۱۴ شینه استاندارد IEEE و یک شبکه واقعی ۱۳۳۷ شینه از شبکه توزیع نیروی برق استان لرستان شبیه‌سازی شده‌اند. پس از اجرای پخش بار هارمونیک با برنامه پخش بار RHPF، بهترین مکان و اندازه بهینه خازن‌ها با الگوریتم PSO به دست می‌آیند. شبیه‌سازی‌ها در محیط برنامه MATLAB روی لپ‌تاپ سونی core-i7، ۲/۲۰ گیگاهرتز با رم ۴ گیگابایت اجرا شده‌اند. قیمت انرژی و هزینه نصب خازن براساس مرجع [۲۳] استفاده شده‌اند.

۴-۱- شبکه ۱۴ شینه

دیگرام تک‌خطی این سیستم در شکل (۲) نشان داده شده است. این سیستم، خطوط قدرت هوایی و زمینی چندفاز و ماهیتی نامتقارن و نامتعادل دارد. همچنین، یک تنظیم‌کننده ولتاژ پست متشکل از سه واحد تک‌فاز با اتصال ستاره دارد. تنظیم‌کننده ولتاژ، شینه اول در نظر گرفته شده است. اطلاعات این سیستم در مرجع [۲۶] آمده است. طیف‌های جریان هارمونیک براساس اطلاعات داده‌شده در [۲۷] برای بارهای مختلف اتخاذ شده است. سه نوع بار تولیدکننده هارمونیک شامل بانک‌های فلورسنت (FLB)، درایوهای سرعت قابل تنظیم (ASD) و بارهای ترکیبی مسکونی (CS) در نظر گرفته شده‌اند. طیف هارمونیک برای این بارها و اطلاعات پایه بار سیستم به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) آمده است. در این مقاله، بار توزیع شده بین شینه‌های ۲ و ۸ به صورت بار معادل در یک سوم طول فاصله بین دو شینه به‌عنوان شینه جدید با

قید اعوجاج هارمونیک: برای کنترل اعوجاج

هارمونیک کل به منظور بهبود کیفیت توان قید زیر در نظر گرفته شده است:

$$THD_{v,i} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{15} (V_i^h)^2}}{V_i^1} \right) \cdot 100\% \leq THD_v^{\max} \quad (26)$$

for $i = 1, \dots, n$

که در آن، حداکثر اعوجاج هارمونیک مجاز ($THD_v^{\max}$) طبق استاندارد IEEE-519 برابر ۵ درصد فرض شده است [۲۴].

قید محدودیت توان راکتیو تزریقی جبران‌ساز: حداکثر

مقدار خازن جبران‌ساز باید برابر با حداکثر بار راکتیو شبکه در نظر گرفته شود [۲۵]. این موضوع به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$Q_i^c \leq \sum_{i=1}^n Q_{Li} \quad (27)$$

که n تعداد شینه‌های کاندید برای خازن‌گذاری، Q_i^c مقدار خازن جبران‌ساز در شینه i ام و Q_{Li} توان راکتیو بار در شینه i ام هستند.

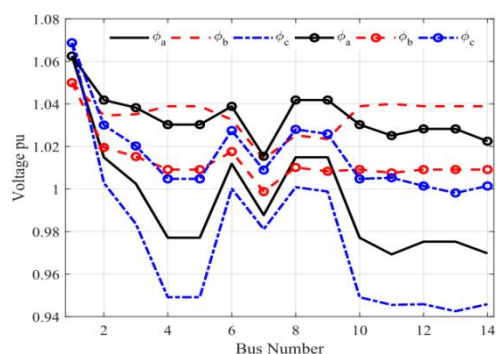
قید جلوگیری از رزونانس: برای جلوگیری از

رزونانس یک تابع جریمه به صورت رابطه ۲۸ به تابع هدف کلی اضافه شده است.

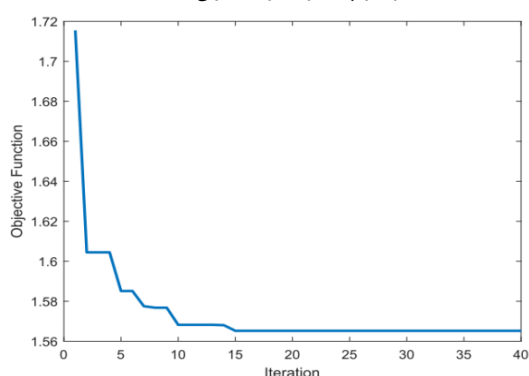
$$Jh = \sum_{V_i^h > VhLim} (V_i^h - VhLim)^2 \quad (28)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$, $h = 3, 5, 7, \dots, 15$

که در آن V_i^h مقدار ولتاژ هارمونیک h ام در شینه i ام در مؤلفه‌های هارمونیک و $VhLim = 0/2$ فرض شده است. مفهوم این قید به این صورت است که اگر بعد از خازن‌گذاری، اندازه ولتاژهای هارمونیک (V_i^h) از ۰/۲ بیشتر شود، احتمال بروز رزونانس وجود دارد؛ به همین منظور رابطه ۲۸ در عدد بزرگ (g) ضرب و به صورت ضریب جریمه به تابع هدف کلی اضافه می‌شود. چنانچه اندازه ولتاژهای هارمونیک از ۰/۲ کمتر باشد، مقدار g برابر صفر فرض می‌شود. در این مقاله $g = 5000$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): مقادیر ولتاژ در فرکانس اصلی براس سیستم ۱۴ شینه قبل و بعد از خازن گذاری. علامت ۰ نشان دهنده مقادیر ولتاژ بعد از خازن گذاری است.



شکل (۴): روند بهینه سازی تابع هدف برای سیستم ۱۴ شینه بدون در نظر گرفتن هارمونیک ها

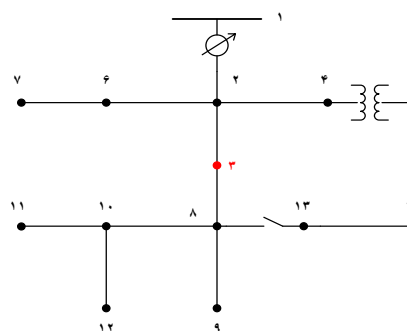
۴-۲-۱- نتایج با در نظر گرفتن هارمونیک ها

ابتدا پخش بار بدون خازن گذاری در شبکه و با حضور هارمونیک ها انجام شده است. نتایج پخش بار و زمان شبیه سازی در جدول (۵) نشان داده شده اند. بیشترین مقدار خطا تا هارمونیک ۱۵ ام در مقایسه با روش پسر-رو - پیش رو در ستون یازدهم جدول (۵) ارائه شده است. مقادیر بسیار کم خطا صحت روش پیشنهادی را نشان می دهد. برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی، زمان اجرا برای همگرایی پخش توان در روش پیشنهادی (ET1) و روش پسر-رو - پیش رو هارمونیک (ET2)، برحسب ثانیه و همچنین نسبت این دو زمان در جدول (۶) آمده است؛ برای مثال، بهترین عملکرد روش پیشنهادی در فرکانس اصلی است که ۱/۷ برابر سریع تر از روش پسر-رو - پیش رو به دست آمده است. علاوه بر این، بدترین عملکرد برای هارمونیک ۱۱ ام است که روش پیشنهادی، ۱/۲۶ برابر از

شماره ۳ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، سیستم ۱۳ شینه استاندارد [۲۶] به سیستم جدید ۱۴ شینه تبدیل می شود.

۴-۱-۱- نتایج در فرکانس اصلی

ولتاژ شینه ها قبل از خازن گذاری در شکل (۳) نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد ولتاژ برخی شینه ها در بعضی فازها در حد مطلوبی نیست. کمترین مقدار ولتاژ مربوط به فاز c در شینه ۱۳ است (۰/۹۴۲۵۴۶ پرینیت). تلفات توان اکتیو کل شبکه در این حالت برابر با ۴۱۱/۸۳۷۳ کیلووات است. نتایج بهینه سازی به منظور جابجایی خازن در فرکانس اصلی در جدول (۳) ارائه شده اند. این جدول نشان می دهد شینه های چهارم و سیزدهم کاندیدای خازن گذاری با مقادیر به ترتیب ۲۰۷ و ۴۳۸ کیلووات هستند. شکل (۴)، روند بهینه سازی تابع هدف را نشان می دهد. نتایج پخش بار قبل و بعد از بهینه سازی با هر دو روش پسر-رو - پیش رو و روش پیشنهادی در جدول (۴) ارائه شده اند. جدول (۴) نشان می دهد اختلاف بین هر دو روش تقریباً صفر است. این موضوع دقت روش پیشنهادی را بیان می کند. شکل (۳) بیان می کند میزان پروفیل ولتاژ پس از خازن گذاری به میزان چشمگیری بهبود یافته است (کمترین مقدار ولتاژ ۰/۹۹۴۳۲۱ پرینیت است). مطابق جدول (۳)، مقدار تلفات اکتیو کل پس از نصب خازن برابر با ۳۴۹/۷۵۵۹ کیلووات است. در این حالت، کاهش تلفات (تقریباً ۶۲ کیلووات) در مجموع سبب سود سالیانه ۳۰۶۹۵ دلار شده است.



شکل (۲): ساختار تک خطی شبکه استاندارد ۱۴ شینه

و (۸) مشاهده می‌شود، سود سالانه برای حالتی که فرکانس‌های هارمونیک در نظر گرفته نشده‌اند، ۳۰۶۹۵ دلار و در حالت هارمونیک ۴۳۰۵۶ دلار در سال است. سود بیشتر در حالت هارمونیک بیان‌کننده اثربخش بودن این روش در کاهش تلفات سیستم است.

۴-۲- شبکه ۱۳۳۷ شینه

دومین شبکه مطالعه‌شده شبکه توزیع واقعی ۱۳۳۷ شینه، ۲۰ کیلوولت شبکه توزیع نیروی برق استان لرستان است [۲۰]. طیف هارمونیک برای بارهای ASD، FLB و CS در جدول (۱) آمده است. از نوشتن مقادیر بارها به دلیل حجم خیلی زیاد خودداری شده است. مقادیر ولتاژ شینه‌ها به صورت نمودار در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده‌اند (به دلیل نزدیکی نتایج تنها از روش پیشنهادی استفاده شده است).

جدول (۳): نتایج بهینه‌سازی برای سیستم استاندارد ۱۴ شینه بدون در نظر گرفتن هارمونیک‌ها

مقدار	شینه	نقاط کاندید و مقادیر خازن‌ها
خازن	کاندید	
(کیلووار)		
۲۰۷	۴	
۴۳۸	۱۳	
۶۴۵		مجموع خازن‌گذاری (کیلووار)
۴۱۱/۸۳۷۳		تلفات توان قبل از خازن‌گذاری (کیلووات)
		هزینه سالانه تلفات انرژی قبل از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات ساعت/سال)
۲۱۶۴۶۱/۶۸۴۸		تلفات توان بعد از خازن‌گذاری (کیلووات)
۳۴۹/۷۵۵۹		هزینه سالانه تلفات انرژی بعد از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات ساعت/سال)
۱۸۳۸۳۱/۷۰۱۰		هزینه کل بعد از خازن‌گذاری (دلار/کیلووار)
۱۸۵۷۶۶/۷۰۱۰		هزینه کل بعد از خازن‌گذاری (دلار/سال)
۳۰۶۹۴/۹۸۳۷		سود حاصله سالیانه (دلار/سال)

روش پسر رو - پیش‌رو هارمونیک سریع‌تر است. با جمع کردن زمان‌های اجرا (ثانیه) برای تمام طیف‌های هارمونیک داده شده و فرکانس اصلی، زمان اجرای کلی روش پیشنهادی، ۰/۰۳۱۳ ثانیه و زمان اجرای کلی روش پسر رو - پیش‌رو هارمونیک برابر ۰/۰۴۹۸۶ ثانیه است. مقایسه زمان اجرای برنامه نشان می‌دهد روش پیشنهادی در عین داشتن دقت برابر، به طور متوسط ۱/۵ برابر سریع‌تر از روش پسر رو - پیش‌رو هارمونیک همگرا می‌شود. با اجرای برنامه بهینه‌سازی شینه‌های چهارم و یازدهم مکان‌های مناسب برای قراردادن خازن انتخاب شده‌اند که مقادیر آنها به ترتیب ۴۰۷ و ۵۴۲ کیلووار به دست آمده‌اند. شکل (۵) روند بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. نتایج پخش‌بار بعد از خازن‌گذاری در جدول (۷) ارائه شده‌اند. مقایسه نتایج جدول‌های (۵) و (۷) بهبود چشمگیر پروفیل ولتاژ در فرکانس اصلی را نشان می‌دهد؛ به طوری که قبل از بهینه‌سازی، حداقل مقدار ولتاژ ۰/۹۴۲۵۴۶ پریونیت بود و پس از خازن‌گذاری به مقدار ۰/۹۹۸۱۳۹ پریونیت رسید که بیان‌کننده نزدیک شدن مقادیر ولتاژهای شینه‌ها به مقدار واحد بعد از خازن‌گذاری است. جدول (۷) بیان می‌کند مقادیر ولتاژهای هارمونیک و THD ولتاژ بعد از خازن‌گذاری برای هر شینه مقدار کمی کاهش یافته یا ثابت مانده‌اند که می‌تواند بیان‌کننده جایابی صحیح خازن‌ها و همچنین نبود رخداد رزونانس در مؤلفه‌های هارمونیک شبکه باشد. همان‌طور که در جدول (۸) مشخص است در شرایط هارمونیک تلفات کل (۴۱۲/۰۸۱۰۴ کیلو وات) مقداری افزایش یافته، اما پس از خازن‌گذاری به مقدار ۳۲۴/۷۲۹۸ کیلووات کاهش یافته است. مقایسه نتایج این جدول با جدول (۳) نشان می‌دهد در حالت هارمونیک، مکان و مقدار خازن با حالت فرکانس اصلی تفاوت دارد. از نقطه نظر سود سالانه نیز روش ارائه شده به طور چشمگیری سبب کاهش هزینه‌ها می‌شود؛ برای مثال، در شرایط هارمونیک هزینه سرمایه‌گذاری افزایش یافته، اما به دلیل کاهش بیشتر تلفات نسبت به حالت فرکانس اصلی، سود سالیانه افزایش یافته است. همان‌طور که در جدول‌های (۳)

۴-۲-۱- نتایج در فرکانس اصلی

پروفیل ولتاژ قبل از خازن‌گذاری در شکل (۶) نشان داده شده است. حداقل مقدار ولتاژ در این حالت برابر با ۰/۹۳۷۰۲ پریونیت است. همچنین در زمان قبل از خازن‌گذاری مقدار تلفات اکتیو کل برابر با ۲۲۲/۷۲۳۵ کیلووات است. به منظور بررسی دقیق‌تر، مقایسه‌ای بین ویژگی‌های شبکه قبل و بعد از خازن‌گذاری در جدول (۹) نشان داده شده است. بعد از اجرای برنامه بهینه‌سازی مکان به عنوان شینه‌های کاندید برای خازن‌گذاری انتخاب شده‌اند.

جدول (۴): ولتاژ شینه‌ها در شبکه ۱۴ شینه قبل و بعد از خازن‌گذاری بدون در نظر گرفتن هارمونیک‌ها

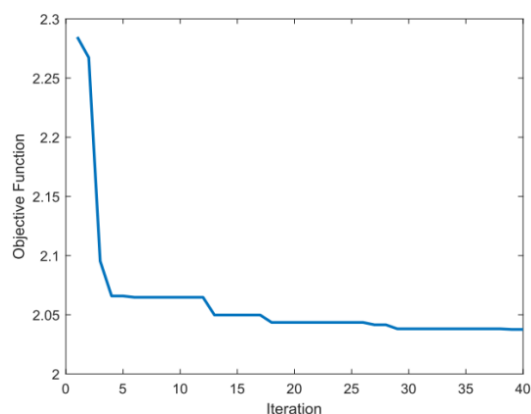
شماره شینه	قبل از خازن‌گذاری	قبل از خازن‌گذاری	اختلاف بین دو خازن‌گذاری	بعد از خازن‌گذاری	شماره شینه
	با روش ارائه شده	با روش پخش بار	با روش پخش بار	با روش ارائه شده	
فاز	h=۱	h=۱	h=۱	h=۱	
۱	۱/۰۶۲۵۰۰	۱/۰۶۲۵۰۰	۱/۰۶۲۵۰۰	۱/۰۶۲۵۰۰	A-N
	۱/۰۵۰۰۰۰	۱/۰۵۰۰۰۰	۱/۰۵۰۰۰۰	۱/۰۵۰۰۰۰	B-N
	۱/۰۶۸۷۵۰	۱/۰۶۸۷۵۰	۱/۰۶۸۷۵۰	۱/۰۶۸۷۵۰	C-N
۲	۱/۰۲۷۷۴۲	۱/۰۱۴۹۰۱	۱/۰۱۴۹۰۱	۱/۰۲۷۷۴۲	A-N
	۱/۰۲۳۳۶۸	۱/۰۳۴۵۳۵	۱/۰۳۴۵۳۵	۱/۰۲۳۳۶۸	B-N
	۱/۰۲۷۹۲۲	۱/۰۰۲۸۵۲	۱/۰۰۲۸۵۲	۱/۰۲۷۹۲۲	C-N
۳	۱/۰۱۹۴۵۰	۱/۰۰۲۵۰۹	۱/۰۰۲۵۰۹	۱/۰۱۹۴۵۰	A-N
	۱/۰۲۰۳۳۷	۱/۰۳۵۱۴۷	۱/۰۳۵۱۴۷	۱/۰۲۰۳۳۷	B-N
	۱/۰۱۷۲۲۰	۰/۹۸۳۶۱۶	۰/۹۸۳۶۱۶	۱/۰۱۷۲۲۰	C-N
۴	۱/۰۰۲۰۵۰	۰/۹۷۷۰۸۷	۰/۹۷۷۰۸۷	۱/۰۰۲۰۵۰	A-N
	۱/۰۱۶۸۰۷	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۱۶۸۰۷	B-N
	۰/۹۹۹۹۰۵	۰/۹۴۹۱۲۷	۰/۹۴۹۱۲۷	۰/۹۹۹۹۰۵	C-N
۵	۱/۰۰۲۰۵۰	۰/۹۷۷۰۸۷	۰/۹۷۷۰۸۷	۱/۰۰۲۰۵۰	A-N
	۱/۰۱۶۸۰۷	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۱۶۸۰۷	B-N
	۰/۹۹۹۹۰۵	۰/۹۴۹۱۲۷	۰/۹۴۹۱۲۷	۰/۹۹۹۹۰۵	C-N
۶	۱/۰۲۴۷۲۶	۱/۰۱۱۸۶۳	۱/۰۱۱۸۶۳	۱/۰۲۴۷۲۶	A-N

۱/۰۲۱۴۲۰	۰/۰۰۰	۱/۰۳۲۶۲۴	۱/۰۳۲۶۲۴	B-N
۱/۰۲۵۳۳۷	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰۱۹۹	۱/۰۰۰۱۹۹	C-N
۱/۰۰۰۹۱۸	۰/۰۰۰	۰/۹۸۷۷۳۶	۰/۹۸۷۷۳۶	A-N
۱/۰۰۲۷۱۶	۰/۰۰۰	۱/۰۱۴۱۳۱	۱/۰۱۴۱۳۱	B-N
۱/۰۰۰۶۷۰۸	۰/۰۰۰	۰/۹۸۱۰۸۱	۰/۹۸۱۰۸۱	C-N
۱/۰۲۷۷۴۲	۰/۰۰۰	۱/۰۱۴۹۰۱	۱/۰۱۴۹۰۱	A-N
۱/۰۱۳۹۹۹	۰/۰۰۰	۱/۰۲۵۲۶۳	۱/۰۲۵۲۶۳	B-N
۱/۰۲۵۹۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰۸۶۷	۱/۰۰۰۸۶۷	C-N
۱/۰۲۷۷۴۲	۰/۰۰۰	۱/۰۱۴۹۰۱	۱/۰۱۴۹۰۱	A-N
۱/۰۱۲۲۱۳	۰/۰۰۰	۱/۰۲۳۴۹۲	۱/۰۲۳۴۹۲	B-N
۱/۰۲۳۷۸۹	۰/۰۰۰	۰/۹۹۸۷۹۵	۰/۹۹۸۷۹۵	C-N
۱/۰۰۲۰۴۰	۰/۰۰۰	۰/۹۷۷۰۷۸	۰/۹۷۷۰۷۸	A-N
۱/۰۱۶۸۰۵	۰/۰۰۰	۱/۰۳۸۹۰۴	۱/۰۳۸۹۰۴	B-N
۰/۹۹۹۸۹۸	۰/۰۰۰	۰/۹۴۹۱۲۰	۰/۹۴۹۱۲۰	C-N
۰/۹۹۴۳۸۴	۰/۰۰۰	۰/۹۶۹۲۶۸	۰/۹۶۹۲۶۸	A-N
۱/۰۱۷۸۲۵	۰/۰۰۰	۱/۰۳۹۹۸۵	۱/۰۳۹۹۸۵	B-N
۰/۹۹۶۴۸۰	۰/۰۰۰	۰/۹۴۵۵۱۴	۰/۹۴۵۵۱۴	C-N
۰/۹۹۹۹۶۰	۰/۰۰۰	۰/۹۷۵۲۴۲	۰/۹۷۵۲۴۲	A-N
۱/۰۱۶۸۰۷	۰/۰۰۰	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۳۸۹۰۵	B-N
۱/۰۰۲۳۴۷	۰/۰۰۰	۰/۹۴۵۸۳۵	۰/۹۴۵۸۳۵	C-N
۰/۹۹۹۹۶۰	۰/۰۰۰	۰/۹۷۵۲۴۲	۰/۹۷۵۲۴۲	A-N
۱/۰۱۶۸۰۷	۰/۰۰۰	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۳۸۹۰۵	B-N
۱/۰۰۴۸۷۸	۰/۰۰۰	۰/۹۴۲۵۴۶	۰/۹۴۲۵۴۶	C-N
۰/۹۹۴۳۲۱	۰/۰۰۰	۰/۹۶۹۷۴۳	۰/۹۶۹۷۴۳	A-N
۱/۰۱۶۸۰۷	۰/۰۰۰	۱/۰۳۸۹۰۵	۱/۰۳۸۹۰۵	B-N
۱/۰۰۲۳۴۷	۰/۰۰۰	۰/۹۴۵۸۳۵	۰/۹۴۵۸۳۵	C-N

مجموع کل توان راکتیو خازن‌ها ۸۵۳ کیلووار است. پروفیل ولتاژ شبکه مدنظر پس از خازن‌گذاری در شینه‌های کاندید در شکل (۶) نشان داده شده است. این شکل بیان‌کننده بهبود پروفیل ولتاژ است. مطابق جدول (۹)، تلفات اکتیو کل و حداقل مقدار ولتاژ در این حالت به ترتیب ۱۸۷/۴۴۲۶ کیلووات و ۰/۹۵۶۲۳۱ پریونیت به دست آمده‌اند. کاهش تلفات باعث سود سالیانه ۱۵۹۷۵ دلار/سال شده است.

جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌ها به کمک روش جدید ...

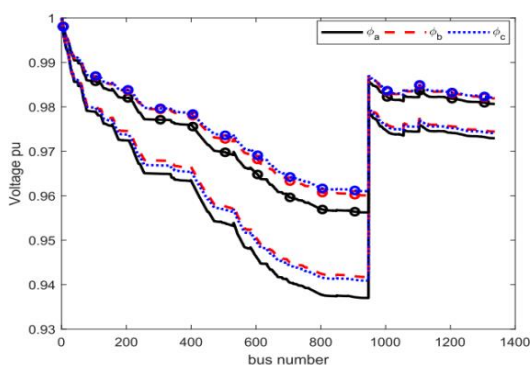
خازن‌گذاری تفاوت چندانی ندارند. به دلیل حجم زیاد نتایج عددی مرتبه‌های فرکانس هارمونیک، فقط پروفیل ولتاژ فرکانس‌های هارمونیک سوم و پانزدهم قبل و بعد از خازن‌گذاری در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها بیان‌کننده نبود رخداد رزونانس در شبکه‌اند. همچنین، نتایج نشان دادند در دیگر مرتبه‌های فرد هارمونیک پدیده رزونانس ایجاد نشد.



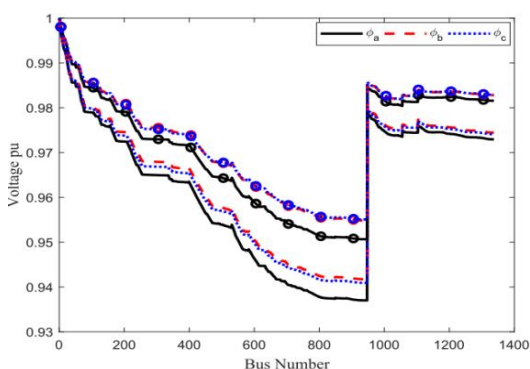
شکل (۵): روند بهینه‌سازی تابع هدف برای سیستم استاندارد ۱۳۳۷ شینه با در نظر گرفتن هارمونیک‌ها

۴-۲-۲- نتایج با در نظر گرفتن هارمونیک‌ها

در شکل (۷)، پروفیل ولتاژ شبکه در شرایط هارمونیک برای فرکانس اصلی قبل از خازن‌گذاری مشخص است. با توجه به این شکل، حداقل مقدار ولتاژ برابر با 0.93702 پریونیت است. همچنین، مقدار تلفات اکتیو کل قبل از خازن‌گذاری برابر با $223/5635$ کیلووات است. همان‌طور که مشخص است، تلفات توان در حالت هارمونیک مقدار کمی افزایش یافته است. بعد از اجرای برنامه بهینه‌سازی ۶ خازن برای بهینه‌سازی شبکه به شینه‌های مربوطه اضافه می‌شوند. در جدول (۱۰)، نتایج به‌دست‌آمده بعد از بهینه‌سازی سیستم نشان داده شده‌اند. مقایسه این نتایج با جدول (۹) نشان می‌دهد در حالت هارمونیک مکان و اندازه خازن‌ها با حالت فرکانس اصلی تفاوت دارد. مقادیر ولتاژ برای فرکانس اصلی پس از خازن‌گذاری شبکه نیز در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، پروفیل ولتاژ بهبود داشته است؛ به‌طوری‌که حداقل سطح ولتاژ به مقدار 0.950642 پریونیت رسیده است. با توجه به جدول (۱۰)، تلفات کل شبکه پس از خازن‌گذاری برابر با $185/9404$ کیلووات به دست آمده است. مقادیر ولتاژ شینه‌ها در مرتبه‌های هارمونیک در حالت‌های قبل و بعد از



شکل (۶): مقادیر ولتاژ در فرکانس اصلی قبل و بعد از خازن‌گذاری برای سیستم ۱۳۳۷ شینه لرستان بدون در نظر گرفتن اثرات هارمونیک. علامت ۰ نشان‌دهنده مقادیر ولتاژ بعد از خازن‌گذاری است.



شکل (۷): مقادیر ولتاژ در فرکانس اصلی قبل و بعد از خازن‌گذاری برای سیستم ۱۳۳۷ شینه لرستان با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک، علامت ۰ نشان‌دهنده مقادیر ولتاژ بعد از خازن‌گذاری است.

جدول (۵): نتایج پخش بار قبل از قرارداد خازن برای شبکه ۱۴ شینه با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک

شماره شینه	فاز	مقدار ولتاژ در هارمونیک h ام							
		$h=1$	$h=3$	$h=5$	$h=7$	$h=9$	$h=11$	$h=13$	$h=15$
۱	A-N	۱/۰۶۲۵۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	B-N	۱/۰۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	C-N	۱/۰۶۸۷۵۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۲	A-N	۱/۰۱۴۹۰۱	۰/۰۱۰۰۱۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۱۵۸۹	۰/۰۰۱۸۴۱	۰/۰۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۰۰۰۶۶۱
	B-N	۱/۰۳۴۵۳۵	۰/۰۰۷۰۶۳	۰/۰۰۳۰۶۳	۰/۰۰۰۵۲۵	۰/۰۰۱۵۱۷	۰/۰۰۱۲۱۱	۰/۰۰۰۷۱۸	۰/۰۰۰۷۴۱
	C-N	۱/۰۲۸۵۲	۰/۰۰۴۹۴۵	۰/۰۰۲۹۳۹	۰/۰۰۰۴۷۷	۰/۰۰۰۸۵۲	۰/۰۰۰۶۴۹	۰/۰۰۰۴۴۰	۰/۰۰۰۳۱۷
۳	A-N	۱/۰۰۲۵۰۹	۰/۰۱۰۰۱۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۱۵۸۹	۰/۰۰۱۸۴۱	۰/۰۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۰۰۰۶۶۱
	B-N	۱/۰۳۵۱۴۷	۰/۰۰۷۰۶۳	۰/۰۰۳۰۶۳	۰/۰۰۰۵۲۵	۰/۰۰۱۵۱۷	۰/۰۰۱۲۱۱	۰/۰۰۰۷۱۸	۰/۰۰۰۷۴۱
	C-N	۰/۹۸۳۶۱۶	۰/۰۰۴۹۴۵	۰/۰۰۲۹۳۹	۰/۰۰۰۴۷۷	۰/۰۰۰۸۵۲	۰/۰۰۰۶۴۹	۰/۰۰۰۴۴۰	۰/۰۰۰۳۱۷
۴	A-N	۰/۹۷۷۰۸۷	۰/۰۱۰۰۱۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۱۵۸۹	۰/۰۰۱۸۴۱	۰/۰۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۰۰۰۶۶۱
	B-N	۱/۰۳۸۹۰۵	۰/۰۰۷۰۶۳	۰/۰۰۳۰۶۳	۰/۰۰۰۵۲۵	۰/۰۰۱۵۱۷	۰/۰۰۱۲۱۱	۰/۰۰۰۷۱۸	۰/۰۰۰۷۴۱
	C-N	۰/۹۴۹۱۲۷	۰/۰۰۴۹۴۵	۰/۰۰۲۹۳۹	۰/۰۰۰۴۷۷	۰/۰۰۰۸۵۲	۰/۰۰۰۶۴۹	۰/۰۰۰۴۴۰	۰/۰۰۰۳۱۷
۵	A-N	۰/۹۷۷۰۸۷	۰/۰۱۰۰۱۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۱۵۸۹	۰/۰۰۱۸۴۱	۰/۰۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۰۰۰۶۶۱
	B-N	۱/۰۳۸۹۰۵	۰/۰۰۷۰۶۳	۰/۰۰۳۰۶۳	۰/۰۰۰۵۲۵	۰/۰۰۱۵۱۷	۰/۰۰۱۲۱۱	۰/۰۰۰۷۱۸	۰/۰۰۰۷۴۱
	C-N	۰/۹۴۹۱۲۷	۰/۰۰۴۹۴۵	۰/۰۰۲۹۳۹	۰/۰۰۰۴۷۷	۰/۰۰۰۸۵۲	۰/۰۰۰۶۴۹	۰/۰۰۰۴۴۰	۰/۰۰۰۳۱۷
۶	A-N	۱/۰۱۱۸۶۳	۰/۰۱۰۰۱۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۱۵۸۹	۰/۰۰۱۸۴۱	۰/۰۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۰۰۰۶۶۱
	B-N	۱/۰۳۲۶۲۴	۰/۰۰۷۹۹۳	۰/۰۰۲۵۷۹	۰/۰۰۰۶۸۰	۰/۰۰۱۷۴۴	۰/۰۰۱۴۸۳	۰/۰۰۰۹۷۶	۰/۰۰۰۹۹۷
	C-N	۱/۰۰۰۱۹۹	۰/۰۰۵۱۵۲	۰/۰۰۲۷۶۹	۰/۰۰۰۳۷۲	۰/۰۰۰۹۰۷	۰/۰۰۰۷۳۹	۰/۰۰۰۵۲۷	۰/۰۰۰۳۹۶
۷	A-N	۰/۹۸۷۷۳۶	۰/۰۱۰۰۱۲	۰/۰۰۷۰۴۹	۰/۰۰۱۵۸۹	۰/۰۰۱۸۴۱	۰/۰۰۱۳۰۷	۰/۰۰۰۹۱۶	۰/۰۰۰۶۶۱
	B-N	۱/۰۱۴۱۳۱	۰/۰۰۸۵۷۸	۰/۰۰۲۲۹۹	۰/۰۰۰۸۲۶	۰/۰۰۱۸۸۵	۰/۰۰۱۶۴۶	۰/۰۰۱۱۳۲	۰/۰۰۱۱۵۱
	C-N	۰/۹۸۱۰۸۱	۰/۰۰۵۲۸۴	۰/۰۰۲۶۶۸	۰/۰۰۰۳۱۱	۰/۰۰۰۹۴۲	۰/۰۰۰۷۹۴	۰/۰۰۰۵۸۰	۰/۰۰۰۴۴۵
۸	A-N	۱/۰۱۴۹۰۱	۰/۰۱۹۱۸۸	۰/۰۱۴۸۴۴	۰/۰۰۳۶۶۹	۰/۰۰۳۵۶۲	۰/۰۰۲۲۵۰	۰/۰۰۱۴۵۶	۰/۰۰۱۱۴۹
	B-N	۱/۰۲۵۶۶۳	۰/۰۱۲۲۴۰	۰/۰۰۷۵۹۰	۰/۰۰۱۲۳۰	۰/۰۰۲۳۶۲	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۶۹۰
	C-N	۱/۰۰۰۸۶۷	۰/۰۰۹۲۹۳	۰/۰۰۶۴۴۸	۰/۰۰۱۳۱۹	۰/۰۰۱۵۵۲	۰/۰۰۰۹۹۶	۰/۰۰۰۵۹۲	۰/۰۰۰۴۰۲
۹	A-N	۱/۰۱۴۹۰۱	۰/۰۱۹۱۸۸	۰/۰۱۴۸۴۴	۰/۰۰۳۶۶۹	۰/۰۰۳۵۶۲	۰/۰۰۲۲۵۰	۰/۰۰۱۴۵۶	۰/۰۰۱۱۴۹
	B-N	۱/۰۲۳۴۹۲	۰/۰۱۲۲۴۱	۰/۰۰۷۵۹۰	۰/۰۰۱۲۳۰	۰/۰۰۲۳۶۲	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۶۹۱
	C-N	۰/۹۹۸۷۹۵	۰/۰۰۹۲۹۳	۰/۰۰۶۴۴۸	۰/۰۰۱۳۱۹	۰/۰۰۱۵۵۲	۰/۰۰۰۹۹۶	۰/۰۰۰۵۹۲	۰/۰۰۰۴۰۲
۱۰	A-N	۰/۹۷۷۰۷۸	۰/۰۱۹۳۰۱	۰/۰۱۴۹۲۱	۰/۰۰۳۶۸۷	۰/۰۰۳۵۷۷	۰/۰۰۲۲۵۸	۰/۰۰۱۴۵۲	۰/۰۰۱۱۳۸
	B-N	۱/۰۳۸۹۰۴	۰/۰۱۲۲۴۰	۰/۰۰۷۵۹۰	۰/۰۰۱۲۳۰	۰/۰۰۲۳۶۲	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۶۹۰
	C-N	۰/۹۴۹۱۲۰	۰/۰۰۹۳۴۰	۰/۰۰۶۴۸۱	۰/۰۰۱۳۲۷	۰/۰۰۱۵۵۹	۰/۰۰۱۰۰۰	۰/۰۰۰۵۹۱	۰/۰۰۰۳۹۷
۱۱	A-N	۰/۹۶۹۲۶۸	۰/۰۱۹۳۰۱	۰/۰۱۴۹۲۱	۰/۰۰۳۶۸۷	۰/۰۰۳۵۷۷	۰/۰۰۲۲۵۸	۰/۰۰۱۴۵۲	۰/۰۰۱۱۳۸
	B-N	۱/۰۳۹۹۸۵	۰/۰۱۲۲۴۰	۰/۰۰۷۵۹۰	۰/۰۰۱۲۳۰	۰/۰۰۲۳۶۲	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۶۹۰

مقدار ولتاژ در هارمونیک h ام											شمارهٔ
فاز	$h=1$	$h=3$	$h=5$	$h=7$	$h=9$	$h=11$	$h=13$	$h=15$	خطا (%)	THD (%)	شینه
C-N	۰/۹۴۵۵۱۴	۰/۰۰۹۳۴۷	۰/۰۰۶۴۸۴	۰/۰۰۱۳۲۷	۰/۰۰۱۵۵۹	۰/۰۰۱۰۰۰	۰/۰۰۰۵۹۱	۰/۰۰۰۳۹۷	۰/۰۰۰۰۹	۱/۲۲۳۸	۱۲
A-N	۰/۹۷۵۲۴۲	۰/۰۱۹۴۰۱	۰/۰۱۴۹۷۷	۰/۰۰۳۶۸۷	۰/۰۰۳۵۸۸	۰/۰۰۲۲۶۴	۰/۰۰۱۴۴۷	۰/۰۰۱۱۲۶	۰/۰۰۰۰۴	۲/۵۷۳۸	
B-N	۱/۰۳۸۹۰۵	۰/۰۱۲۲۴۰	۰/۰۰۷۵۹۰	۰/۰۰۱۲۳۰	۰/۰۰۲۳۶۲	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۶۹۰	۰/۰۰۰۰۴	۱/۴۲۰۹	
C-N	۰/۹۴۵۵۳۵	۰/۰۰۹۳۴۰	۰/۰۰۶۴۸۱	۰/۰۰۱۳۲۷	۰/۰۰۱۵۵۹	۰/۰۰۱۰۰۰	۰/۰۰۰۵۹۱	۰/۰۰۰۳۹۷	۰/۰۰۰۰۹	۱/۲۲۸۱	۱۳
A-N	۰/۹۷۵۲۴۲	۰/۰۱۹۱۸۸	۰/۰۱۴۸۴۴	۰/۰۰۳۶۶۹	۰/۰۰۳۵۶۲	۰/۰۰۲۲۵۰	۰/۰۰۱۴۵۶	۰/۰۰۱۱۴۹	۰/۰۰۰۰۵	۲/۵۷۳۸	
B-N	۱/۰۳۸۹۰۵	۰/۰۱۲۲۴۰	۰/۰۰۷۵۹۰	۰/۰۰۱۲۳۰	۰/۰۰۲۳۶۲	۰/۰۰۱۵۸۱	۰/۰۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۶۹۰	۰/۰۰۰۰۴	۱/۴۲۰۹	
C-N	۰/۹۴۲۵۴۶	۰/۰۰۹۲۹۳	۰/۰۰۶۴۴۸	۰/۰۰۱۳۱۹	۰/۰۰۱۵۵۲	۰/۰۰۰۹۹۶	۰/۰۰۰۵۹۲	۰/۰۰۰۴۰۲	۰/۰۰۰۰۸	۱/۲۳۳۲	۱۴
A-N	۰/۹۶۹۷۴۳	۰/۰۱۹۵۶۱	۰/۰۱۵۱۸۲	۰/۰۰۳۷۴۳	۰/۰۰۳۶۰۸	۰/۰۰۲۲۷۱	۰/۰۰۱۴۸۱	۰/۰۰۱۱۸۰	۰/۰۰۰۰۹	۲/۶۰۰۱	
B-N	۱/۰۳۸۹۰۵	۰/۰۱۲۳۱۸	۰/۰۰۷۷۲۱	۰/۰۰۱۲۶۲	۰/۰۰۲۳۸۸	۰/۰۰۱۵۷۹	۰/۰۰۰۶۱۲	۰/۰۰۰۷۰۰	۰/۰۰۰۰۹	۱/۴۲۰۹	
C-N	۰/۹۴۵۵۳۵	۰/۰۰۹۲۹۶	۰/۰۰۶۴۶۷	۰/۰۰۱۳۱۷	۰/۰۰۱۵۵۴	۰/۰۰۰۹۹۵	۰/۰۰۰۵۸۹	۰/۰۰۰۴۰۰	۰/۰۰۰۰۹	۱/۲۲۸۱	

جدول (۶): زمان اجرای پخش بار با روش پیشنهادی و روش پسر و - پیشرو

زمان اجرا	$h=1$	$h=3$	$h=5$	$h=7$	$h=9$	$h=11$	$h=13$	$h=15$	مجموع زمان‌های اجرا
ET1(s)	۰/۰۱۳۵۱۸	۰/۰۱۲۹۴۸	۰/۰۰۰۸۶۳	۰/۰۰۰۷۴۶	۰/۰۰۰۷۳۰	۰/۰۰۰۸۴۷	۰/۰۰۰۸۰۶	۰/۰۰۰۸۴۲	۰/۰۳۱۳۰۰
ET2(s)	۰/۰۲۳۰۰۵	۰/۰۲۰۴۱۱	۰/۰۰۱۰۹۰	۰/۰۰۱۰۷۲	۰/۰۰۱۰۸۷	۰/۰۰۱۰۶۶	۰/۰۰۱۰۷۵	۰/۰۰۱۰۶۸	۰/۰۴۹۸۶۵
ET2/ET1	۱/۷۰۱۸	۱/۵۷۶۴	۱/۲۶۳۰	۱/۴۳۷۰	۱/۴۷۶۷	۱/۲۵۷۵	۱/۳۳۷	۱/۲۶۸۴	۱/۵۹۳۱

جدول (۷): نتایج پخش بار بعد از قراردادن خازن برای سیستم استاندارد ۱۴ شینه با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک

مقدار ولتاژ در هارمونیک h ام											شماره شینه
فاز	$h=1$	$h=3$	$h=5$	$h=7$	$h=9$	$h=11$	$h=13$	$h=15$	خطا (%)	THD (%)	
A-N	۱/۰.۶۲۵۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۱
B-N	۱/۰.۵۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	
C-N	۱/۰.۶۸۷۵۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	۰/۰.۰۰۰۰۰	
A-N	۱/۰.۱۱۸۲۴	۰/۰.۰۹۷۰۲	۰/۰.۰۶۷۷۴	۰/۰.۰۱۵۲۰	۰/۰.۰۱۷۹۶	۰/۰.۰۱۲۶۱	۰/۰.۰۸۵۶	۰/۰.۰۵۳۸	۰/۰.۰۰۰۰۱	۱/۱.۶۸۴	۲
B-N	۱/۰.۱۹۵۴۲	۰/۰.۰۶۹۷۴	۰/۰.۰۲۹۴۱	۰/۰.۰۰۵۸۸	۰/۰.۰۱۵۷۷	۰/۰.۰۱۲۶۴	۰/۰.۰۰۷۰۰	۰/۰.۰۰۶۶۵	۰/۰.۰۰۰۰۳	۰/۰.۷۷۵۰	
C-N	۱/۰.۰۰۰۰۷۴	۰/۰.۰۴۸۰۹	۰/۰.۰۲۸۱۷	۰/۰.۰۰۴۶۵	۰/۰.۰۰۸۶۴	۰/۰.۰۰۶۵۸	۰/۰.۰۰۴۲۶	۰/۰.۰۰۲۶۳	۰/۰.۰۰۰۰۵	۰/۰.۵۵۵۲	
A-N	۱/۰.۲۸۸۵۴	۰/۰.۰۹۷۰۲	۰/۰.۰۶۷۷۴	۰/۰.۰۱۵۲۰	۰/۰.۰۱۷۹۶	۰/۰.۰۱۲۶۱	۰/۰.۰۸۵۶	۰/۰.۰۵۳۸	۰/۰.۰۰۰۰۱	۱/۰.۵۵۴۲	۳
B-N	۱/۰.۱۷۵۷۰	۰/۰.۰۶۹۷۴	۰/۰.۰۲۹۴۱	۰/۰.۰۰۵۸۸	۰/۰.۰۱۵۷۷	۰/۰.۰۱۲۶۵	۰/۰.۰۰۷۰۰	۰/۰.۰۰۶۶۵	۰/۰.۰۰۰۰۳	۰/۰.۹۸۱۹	
C-N	۱/۰.۰۰۰۰۷۵	۰/۰.۰۴۸۰۹	۰/۰.۰۲۸۱۷	۰/۰.۰۰۴۶۵	۰/۰.۰۰۸۶۴	۰/۰.۰۰۶۵۸	۰/۰.۰۰۴۲۶	۰/۰.۰۰۲۶۳	۰/۰.۰۰۰۰۵	۰/۰.۷۳۸۱	
A-N	۱/۰.۱۵۳۸۸	۰/۰.۰۹۷۰۲	۰/۰.۰۶۷۷۴	۰/۰.۰۱۵۲۰	۰/۰.۰۱۷۹۶	۰/۰.۰۱۲۶۱	۰/۰.۰۸۵۶	۰/۰.۰۵۳۸	۰/۰.۰۰۰۰۱	۲/۰.۳۳۹۳	۴
B-N	۰/۰.۹۹۸۷۹۳	۰/۰.۰۶۹۷۵	۰/۰.۰۲۹۴۱	۰/۰.۰۰۵۸۸	۰/۰.۰۱۵۷۷	۰/۰.۰۱۲۶۵	۰/۰.۰۰۷۰۰	۰/۰.۰۰۶۶۵	۰/۰.۰۰۰۰۳	۱/۰.۴۰۷۶	
C-N	۱/۰.۰۸۹۱۲	۰/۰.۰۴۸۰۹	۰/۰.۰۲۸۱۷	۰/۰.۰۰۴۶۵	۰/۰.۰۰۸۶۴	۰/۰.۰۰۶۵۸	۰/۰.۰۰۴۲۶	۰/۰.۰۰۲۶۳	۰/۰.۰۰۰۰۵	۱/۱.۱۴۹	

مقدار ولتاژ در هارمونیک h ام										شماره شینه	
فاز	$h=1$	$h=3$	$h=5$	$h=7$	$h=9$	$h=11$	$h=13$	$h=15$	خطا (%)	THD (%)	
A-N	۱/۰۱۵۳۸۸	۰/۰۰۹۷۰۲	۰/۰۰۶۷۷۴	۰/۰۰۱۵۲۰	۰/۰۰۱۷۹۶	۰/۰۰۱۲۶۱	۰/۰۰۰۸۵۶	۰/۰۰۰۵۳۸	۰/۰۰۰۱	۲/۳۳۹۳	۵
B-N	۰/۹۹۸۷۹۳	۰/۰۰۶۹۷۵	۰/۰۰۲۹۴۱	۰/۰۰۰۵۸۸	۰/۰۰۱۵۷۷	۰/۰۰۱۲۶۵	۰/۰۰۰۷۰۰	۰/۰۰۰۶۶۵	۰/۰۰۰۳	۱/۴۰۷۶	
C-N	۱/۰۰۸۹۱۲	۰/۰۰۴۸۰۹	۰/۰۰۲۸۱۷	۰/۰۰۰۴۶۵	۰/۰۰۰۸۶۴	۰/۰۰۰۶۵۸	۰/۰۰۰۴۲۶	۰/۰۰۰۲۶۳	۰/۰۰۰۵	۱/۱۱۴۸	
A-N	۱/۰۲۱۸۲۴	۰/۰۰۹۷۰۲	۰/۰۰۶۷۷۴	۰/۰۰۱۵۲۰	۰/۰۰۱۷۹۶	۰/۰۰۱۲۶۱	۰/۰۰۰۸۵۶	۰/۰۰۰۵۳۸	۰/۰۰۰۱	۱/۱۷۱۸	۶
B-N	۱/۰۱۰۱۳۵	۰/۰۰۷۹۱۶	۰/۰۰۲۴۵۳	۰/۰۰۰۷۴۳	۰/۰۰۱۸۱۱	۰/۰۰۱۵۴۰	۰/۰۰۰۹۵۹	۰/۰۰۰۹۲۲	۰/۰۰۱۹	۰/۷۷۵۳	
C-N	۱/۰۰۱۰۳۲	۰/۰۰۵۰۱۷	۰/۰۰۲۶۴۶	۰/۰۰۰۳۶۳	۰/۰۰۰۹۲۴	۰/۰۰۰۷۵۱	۰/۰۰۰۵۱۳	۰/۰۰۰۳۴۴	۰/۰۰۰۵	۰/۵۵۶۶	
A-N	۱/۰۰۱۸۲۴	۰/۰۰۹۷۰۲	۰/۰۰۶۷۷۴	۰/۰۰۱۵۲۰	۰/۰۰۱۷۹۶	۰/۰۰۱۲۶۱	۰/۰۰۰۸۵۶	۰/۰۰۰۵۳۸	۰/۰۰۰۱	۱/۱۹۸۹	۷
B-N	۱/۰۰۸۳۴۱	۰/۰۰۸۵۰۹	۰/۰۰۲۱۷۲	۰/۰۰۰۸۸۷	۰/۰۰۱۹۵۵	۰/۰۰۱۷۰۵	۰/۰۰۱۱۱۵	۰/۰۰۱۰۷۷	۰/۰۰۲۸	۰/۷۸۱۱	
C-N	۱/۰۱۰۵۹۰۱	۰/۰۰۲۵۴۵	۰/۰۰۰۳۰۷	۰/۰۰۰۹۶۲	۰/۰۰۰۸۰۷	۰/۰۰۰۵۶۵	۰/۰۰۰۳۹۴	۰/۰۰۰۲۶۹	۰/۰۰۰۴	۰/۵۶۶۹	
A-N	۱/۰۱۰۲۶۷	۰/۰۰۱۸۵۶۷	۰/۰۰۱۴۳۰۱	۰/۰۰۰۳۵۳۵	۰/۰۰۰۳۴۴۳	۰/۰۰۲۱۳۶	۰/۰۰۱۳۳۸	۰/۰۰۰۹۳۸	۰/۰۰۰۵	۱/۱۶۸۴	۸
B-N	۱/۰۰۹۱۳۷	۰/۰۰۱۲۰۵۵	۰/۰۰۰۷۳۶۰	۰/۰۰۰۱۳۰۲	۰/۰۰۰۲۴۵۱	۰/۰۰۱۶۸۵	۰/۰۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۵۴۶	۰/۰۰۰۴	۰/۸۲۵۶	
C-N	۱/۰۰۴۷۶۲	۰/۰۰۹۰۲۳	۰/۰۰۰۶۲۰۹	۰/۰۰۰۱۲۹۰	۰/۰۰۰۱۵۵۴	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۰۰۵۶۵	۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۰۰۰۸	۰/۵۶۸۱	
A-N	۱/۰۲۰۲۶۷	۰/۰۰۱۸۵۶۷	۰/۰۰۱۴۳۰۲	۰/۰۰۰۳۵۳۵	۰/۰۰۰۳۴۴۳	۰/۰۰۲۱۳۶	۰/۰۰۱۳۳۸	۰/۰۰۰۹۳۸	۰/۰۰۰۵	۱/۱۶۸۴	۹
B-N	۱/۰۰۹۱۳۷	۰/۰۰۱۲۰۵۵	۰/۰۰۰۷۳۶۰	۰/۰۰۰۱۳۰۳	۰/۰۰۰۲۴۵۱	۰/۰۰۱۶۸۵	۰/۰۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۵۴۶	۰/۰۰۰۵	۰/۹۰۵۶	
C-N	۱/۰۰۴۷۶۲	۰/۰۰۹۰۲۳	۰/۰۰۰۶۲۱۰	۰/۰۰۰۱۲۹۰۰	۰/۰۰۰۱۵۵۴	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۰۰۵۶۷	۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۰۰۰۸	۰/۵۷۷۹	
A-N	۰/۹۹۵۶۳۲	۰/۰۰۱۸۶۸۹	۰/۰۰۱۴۳۸۸	۰/۰۰۰۳۵۷۵	۰/۰۰۰۳۴۶۴	۰/۰۰۲۱۵۲	۰/۰۰۱۳۴۱	۰/۰۰۰۹۳۳	۰/۰۰۰۵	۲/۳۳۹۳	۱۰
B-N	۱/۰۰۹۱۳۷	۰/۰۰۱۲۰۵۵	۰/۰۰۰۷۳۶۰	۰/۰۰۰۱۳۰۲	۰/۰۰۰۲۴۵۱	۰/۰۰۱۶۸۵	۰/۰۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۵۴۶	۰/۰۰۰۴	۱/۴۰۰۹	
C-N	۱/۰۰۱۴۲۷	۰/۰۰۹۰۷۲	۰/۰۰۰۶۲۴۵	۰/۰۰۰۱۳۰۰	۰/۰۰۰۱۵۶۲	۰/۰۰۱۰۱۰	۰/۰۰۰۵۶۸	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۰۰۹	۱/۱۱۴۸	
A-N	۱/۰۰۸۲۵۷	۰/۰۰۱۸۶۸۹	۰/۰۰۱۴۳۸۸	۰/۰۰۰۳۵۷۵	۰/۰۰۰۳۴۶۴	۰/۰۰۲۱۵۲	۰/۰۰۱۳۴۱	۰/۰۰۰۹۳۳	۰/۰۰۰۵	۲/۳۹۷۵	۱۱
B-N	۱/۰۰۹۱۳۷	۰/۰۰۱۲۰۵۵	۰/۰۰۰۷۳۶۰	۰/۰۰۰۱۳۰۲	۰/۰۰۰۲۴۵۱	۰/۰۰۱۶۸۵	۰/۰۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۵۴۶	۰/۰۰۰۴	۱/۳۹۶۷	
C-N	۰/۹۹۸۱۳۹	۰/۰۰۹۰۷۹	۰/۰۰۰۶۲۴۷	۰/۰۰۰۱۳۰۰	۰/۰۰۰۱۵۶۲	۰/۰۰۱۰۱۰	۰/۰۰۰۵۶۸	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۰۰۹	۱/۱۱۵۷	
A-N	۱/۰۰۲۴۵۸	۰/۰۰۱۸۷۹۹	۰/۰۰۱۴۴۵۴	۰/۰۰۰۳۵۷۴	۰/۰۰۰۳۴۸۰	۰/۰۰۲۱۶۲	۰/۰۰۱۳۳۹	۰/۰۰۰۹۲۴	۰/۰۰۰۴	۲/۳۵۸۷	۱۲
B-N	۱/۰۰۶۱۳۷	۰/۰۰۱۲۰۵۵	۰/۰۰۰۷۳۶۰	۰/۰۰۰۱۳۰۲	۰/۰۰۰۲۴۵۱	۰/۰۰۱۶۸۵	۰/۰۰۰۶۳۸۰	۰/۰۰۰۵۴۶	۰/۰۰۰۴	۱/۳۸۵۶	
C-N	۱/۰۰۱۴۲۷	۰/۰۰۹۰۷۲	۰/۰۰۰۶۲۴۵	۰/۰۰۰۱۳۰۰	۰/۰۰۰۱۵۶۲	۰/۰۰۱۰۱۰	۰/۰۰۰۵۶۸	۰/۰۰۰۲۹۶	۰/۰۰۰۹	۱/۱۴۴۷	
A-N	۱/۰۰۰۲۵۴	۰/۰۰۱۸۵۶۷	۰/۰۰۱۴۳۰۱	۰/۰۰۰۳۵۳۵	۰/۰۰۰۳۴۴۳	۰/۰۰۲۱۳۶	۰/۰۰۱۳۳۸	۰/۰۰۰۹۳۸	۰/۰۰۰۵	۲/۳۵۸۷	۱۳
B-N	۱/۰۰۹۱۳۶	۰/۰۰۱۲۰۵۵	۰/۰۰۰۷۳۶۰	۰/۰۰۰۱۳۰۲	۰/۰۰۰۲۴۵۱	۰/۰۰۱۶۸۵	۰/۰۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۵۴۶	۰/۰۰۰۴	۱/۳۸۵۶	
C-N	۱/۰۰۴۷۵۴	۰/۰۰۹۰۲۳	۰/۰۰۰۶۲۰۹	۰/۰۰۰۱۲۹۰	۰/۰۰۰۱۵۵۴	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۰۰۵۶۶	۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۰۰۰۸	۱/۱۲۹۱	
A-N	۱/۰۲۵۱۱۴	۰/۰۰۹۰۲۷	۰/۰۰۱۴۶۱۹	۰/۰۰۰۳۶۰۰	۰/۰۰۰۳۴۷۶	۰/۰۰۲۱۴۴	۰/۰۰۱۳۵۲	۰/۰۰۰۹۵۵	۰/۰۰۰۹	۲/۳۸۴۷	۱۴
B-N	۱/۰۰۷۵۸۸	۰/۰۰۱۲۱۳۹	۰/۰۰۰۷۴۹۴	۰/۰۰۰۱۳۴۱	۰/۰۰۰۲۴۸۲	۰/۰۰۱۶۹۰	۰/۰۰۰۶۰۲	۰/۰۰۰۵۶۰	۰/۰۰۰۹	۱/۳۸۵۶	
C-N	۱/۰۰۵۲۹۰	۰/۰۰۱۸۹۱۹	۰/۰۰۰۶۲۳۰	۰/۰۰۰۱۲۸۹	۰/۰۰۰۱۵۵۶	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۰۰۵۶۴	۰/۰۰۰۲۹۷	۰/۰۰۰۹	۱/۱۲۴۷	

جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن اثر هارمونیک‌ها به کمک روش جدید ...

جدول (۸): نتایج بهینه‌سازی برای سیستم ۱۴ شینه با در نظر گرفتن اثرات هارمونیکی

مقدار خازن (کیلووار)	شینه کاندید	نقاط کاندید و مقادیر خازن‌ها
۴۰۷	۴	
۵۴۲	۱۱	
۹۴۹		مجموع خازن‌گذاری (کیلووار)
۴۱۲/۰۸۱۰۴		تلفات توان قبل از خازن‌گذاری (کیلووات)
۲۱۶۵۸۹/۷۹۴۶		هزینه سالانه تلفات انرژی قبل از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات‌ساعت/سال)
۳۲۴/۷۲۹۸		تلفات توان بعد از خازن‌گذاری (کیلووات)
۱۷۰۶۷۷/۹۸۲۸		هزینه سالانه تلفات انرژی بعد از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات‌ساعت/سال)
۲۸۴۷		هزینه خازن‌گذاری (دلار/کیلووار)
۱۷۳۵۲۴/۹۸۲۸		هزینه کل بعد از خازن‌گذاری (دلار/سال)
۴۳۰۶۴/۸۱۱۷		سود حاصله سالیانه (دلار/سال)
۰/۰۰۶ / کیلووات‌ساعت		قیمت انرژی (K_e)
۳ / کیلووار		قیمت خازن (K_c)

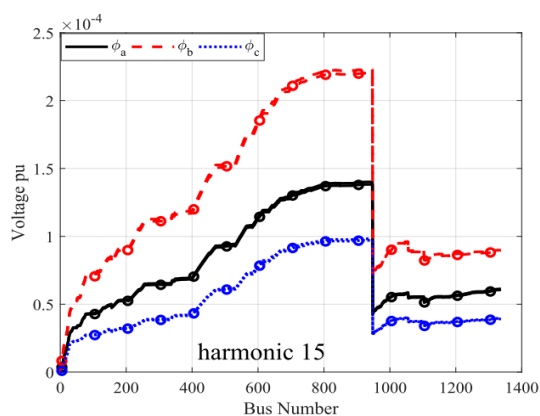
جدول (۹): نتایج بهینه‌سازی برای سیستم ۱۳۳۷ شینه بدون در نظر گرفتن اثرات هارمونیکی

مقدار خازن (کیلووار)	شینه کاندید	نقاط کاندید و مقادیر خازن‌ها
۵۰	۴۹	
۲۲۲	۲۲۲	
۸۷	۵۵۴	
۲۰۰	۶۰۵	
۲۹	۶۵۳	
۲۶۵	۹۸۰	
۸۵۳		مجموع خازن‌گذاری (کیلووار)
۲۲۲/۷۲۳۵		تلفات توان قبل از خازن‌گذاری (کیلووات)
۱۱۷۰۶۳/۴۷۱۶		هزینه سالانه تلفات انرژی قبل از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات‌ساعت/سال)
۱۸۷/۴۴۲۶		تلفات توان بعد از خازن‌گذاری (کیلووات)
۹۸۵۱۹/۸۳۰۵۶		هزینه سالانه تلفات انرژی بعد از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات‌ساعت/سال)
۲۵۵۹		هزینه خازن‌گذاری (دلار/کیلووار)
۱۰۱۰۸۷/۸۳۰۵۶		هزینه کل بعد از خازن‌گذاری (دلار/سال)
۱۵۹۷۵/۶۴۱۰۴		سود حاصله سالیانه (دلار/سال)
۰/۰۰۶ / کیلووات‌ساعت		قیمت انرژی (K_e)
۳ / کیلووار		قیمت خازن (K_c)

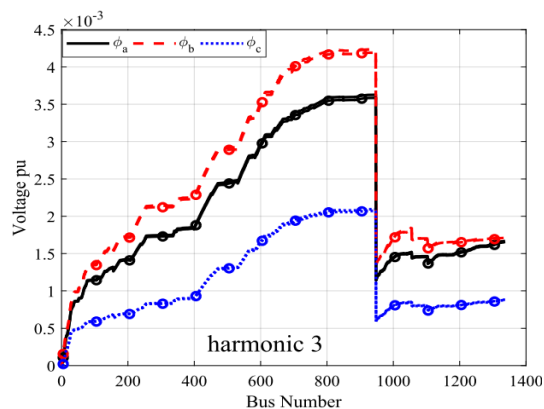
جدول (۱۰): نتایج بهینه‌سازی برای سیستم ۱۳۳۷ شینه با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک

مقدار خازن (کیلو وار)	شینه کاندید
۲۳۶	۱۵
۵۶	۶۳۳
۱۵۰	۶۵۳
۱۶۵	۹۸۰
۲۰۰	۱۲۲۰
۲۳	۱۳۳۷

۸۳۰	مجموع خازن‌گذاری (کیلووار)
۲۲۳/۵۶۳۵	تلفات توان قبل از خازن‌گذاری (کیلووات)
۱۱۷۵۰۴/۹۷۵۶	هزینه سالانه تلفات انرژی قبل از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات ساعت/سال)
۱۸۵/۹۴۰۵	تلفات توان بعد از خازن‌گذاری (کیلووات)
۹۷۷۳۰/۳۲۶۸	هزینه سالانه تلفات انرژی بعد از خازن‌گذاری (دلار/کیلووات ساعت/سال)
۲۴۹۰	هزینه خازن‌گذاری (دلار/کیلووار)
۱۰۰۲۲۰/۳۲۶۸	هزینه کل بعد از خازن‌گذاری (دلار/سال)
۱۷۲۴۸/۶۴۸۸	سود حاصله سالانه (دلار/سال)
۰/۰۶ / کیلووات ساعت	قیمت انرژی (K_e)
۳ / کیلووار	قیمت خازن (K_c)



شکل (۹): مقادیر ولتاژ در فرکانس هارمونیک مرتبه ۱۵، قبل و بعد از خازن‌گذاری در سیستم واقعی ۱۳۳۷ شینه، علامت ۰ نشان‌دهنده مقادیر بعد از خازن‌گذاری است.



شکل (۸): مقادیر ولتاژ در فرکانس هارمونیک مرتبه ۳، قبل و بعد از خازن‌گذاری در سیستم واقعی ۱۳۳۷ شینه، علامت ۰ نشان‌دهنده مقادیر بعد از خازن‌گذاری است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش پخش بار هارمونیک بازگشتی جدید برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های توزیع شعاعی و همچنین یک روش جایابی بهینه به منظور تعیین مکان و اندازه خازن‌های قدرت ارائه شده است. روش پیشنهادی روی یک شبکه توزیع ۱۴ شینه استاندارد و یک شبکه توزیع واقعی ۱۳۳۷ شینه از شبکه توزیع نیروی برق استان لرستان پیاده‌سازی شده است. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش پسر - پیش رو هارمونیک نشان می‌دهد روش پیشنهادی در عین دقیق بودن، به دلیل حذف حلقه‌های پسر - پیش رو زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد. همچنین، جایابی خازن‌ها در شبکه‌های توزیع شعاعی با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک به صورت تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این تابع هدف چندگانه علاوه بر حداقل کردن انحراف ولتاژ، تلفات اکتیو و هزینه سالیانه یک تابع هدف جدید برای جلوگیری از رخداد پدیده رزونانس معرفی و اعمال شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند در نظر گرفتن اثرات هارمونیک نقش مؤثری در مکان و سایز خازن‌های موازی در شبکه‌های توزیع می‌تواند داشته باشد.

ضمایم

جدول (۱): طیف جریان بارهای هارمونیک

نوع بار	CS	ASD	LFB	مرتبه
هارمونیک	اندازه	فاز	اندازه	فاز
۱	۱	-۴۱/۲	۱	-۳۵
۲	۰	۰	۰	۰
۳	۰/۲	۲۷۳/۴	۰/۵۴۲	۰/۷
۴	۰	۰	۰	۰/۰۰۹۵
۵	۰/۱۰۷	۳۳۹	۰/۱۵۲	۱۱۰/۸
۶	۰	۰	۰	۰
۷	۰/۰۲۱	۱۳۷/۷	۰/۰۶۹	۱۵۱/۹
۸	۰	۰	۰	۰/۰۰۵
۹	۰/۰۱۴	۲۶۳/۲	۰/۰۴۳	-۹۵
۱۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۰/۰۰۹	۳۹/۸	۰/۰۳۶	-۱۳/۹

۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۰	۰	۹۵/۲	۰/۰۲۹	۱۸۲/۴	۰/۰۰۶
۱۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۰	-۱۸۲/۷	۰/۰۲۸	۲۸۷	۰/۰۰۵

جدول (۲): مقادیر بارهای اصلی و هارمونیک برای شبکه استاندارد IEEE ۱۴ شینه

شینه	مدل بار	Ph-1 kW	Ph-1 kVAr	Ph-2 kW	Ph-2 kVAr	Ph-3 kW	Ph-3 kVAr
۷	Y-PQ Harm بدون هارمونیک	۱۶۰	۱۱۰	۱۲۰	۹۰	۱۲۰	۹۰
۸	Y-PQ Harm ٪۶۰ CS	۰	۰	۱۷۰	۱۲۵	۰	۰
۹	D-Z Harm ٪۲۰+FLB ٪۲۰+ASD CS	۰	۰	۲۳۰	۱۳۲	۰	۰
۱۴	Y-Z Harm ٪۱۰+FLB ٪۱۰+ASD CS	۱۲۸	۸۶	۰	۰	۰	۰
۴	D-PQ Harm ٪۳۰+FLB ٪۶۰+ASD CS	۳۸۵	۲۲۰	۳۸۵	۲۲۰	۳۸۵	۲۲۰
۱۱	Y-PQ Harm ٪۱۵+FLB ٪۲۰+ASD ٪۱۵ CS	۴۸۵	۱۹۰	۶۸	۶۰	۲۹۰	۲۱۲
۱۰	D-I Harm ٪۱۵+FLB ٪۲۰+ASD ٪۱۵ CS	۰	۰	۰	۰	۱۷۰	۱۵۱
۱۳	Y-I Harm ٪۱۵+FLB ٪۲۰+ASD ٪۱۵ CS	۰	۰	۰	۰	۱۷۰	۸۰
۲ به ۸	Y-PQ Harm این یک بار توزیع شده بدون محتوای هارمونیک است.	۱۷	۱۰	۶۶	۳۸	۱۱۷	۶۸

مراجع

- [1] S. Segura, R. Romero, M. J. Rider, and e. systems, "Efficient heuristic algorithm used for optimal capacitor placement in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, No. 1, pp. 71-78, 2010.
- [2] K. Devabalaji, K. Ravi, D. P. Kothari, and E. Systems, "Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using bacterial foraging optimization algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 71, pp. 383-390, 2015.
- [3] H. Ng, M. Salama, and A. Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 387-392, 2000.
- [4] S. S. Pawar, A. Deshpande, and M. Murali,

- distribution systems with non-linear loads," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 82, pp. 281-287, 2016.
- [16] J.-H. Teng and C.-Y. Chang, "Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 3, pp. 1665-1672, 2007.
- [17] I. Archundia-Aranda and R. Mota-Palomino, "Harmonic load flow method for radial distribution networks," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on*, 2010, pp. 1-5.
- [18] N.-C. Yang, M.-D. Le, and E. Systems, "Loop frame of reference based harmonic power flow for unbalanced radial distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 77, pp. 128-135, 2016.
- [19] Y. Yan, C. Chen, C. Moo, and C. Hsu, "Harmonic analysis for industrial customers," *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 30, No. 2, pp. 462-468, 1994.
- [20] M. Shakarami, H. Beiranvand, A. Beiranvand, E. Sharifipour, and E. Systems, "A recursive power flow method for radial distribution networks: Analysis, solvability and convergence," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 86, pp. 71-80, 2017.
- [21] W. H. Kersting, *Distribution system modeling and analysis*. CRC press, 2012.
- [22] A. Bonner, T. Grebe, E. Gunther, L. Hopkins, M. Marz, J. Mahseredjian, et al., "Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. 1. Concepts, models, and simulation techniques," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 452-465, 1996.
- [23] V. Tamilselvan, K. Muthulakshmi, and T. Jayabarathi, "Optimal Capacitor Placement and Sizing in A Radial Distribution System using Clonal Selection Algorithm," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 10, pp. 3304-3312, 2006.
- [24] IEEE Std. 519, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," IEEE, 2004.
- [25] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham, M. Ramalingaraju, "Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 45, No. 120, pp. 715-722, 2008.
- [26] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*, 2001, Vol. 2, pp. 908-912: IEEE.
- [27] R. Abu-Hashim, R. Burch, G. Chang, M. Grady, E. Gunther, M. Halpin, et al., "Test systems for harmonics modeling and simulation," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 14, No. 2, pp. 579-587, 1999.
- "Modelling and simulation of DSTATCOM for power quality improvement in distribution system using MATLAB Simulink tool," in *Energy Systems and Applications, 2015 International Conference on*, pp. 224-227: IEEE, 2015.
- [5] S. Udgir, L. Srivastava, and M. Pandit, "Optimal placement and sizing of SVC for loss minimization and voltage security improvement using differential evolution algorithm," in *Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2014, pp. 1-6: IEEE, 2014.
- [6] 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 Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 942-947, 2004.
- [7] S. Mekhamer, M. El-Hawary, S. Soliman, M. Moustafa, and M. A. Mansour, "New heuristic strategies for reactive power compensation of radial distribution feeders," *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 22, No. 6, pp. 1128-1135, 2002.
- [8] Abul'Wafa Ahmed R, "Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method," *Electric Power Systems Research*, Vol. 95, pp. 168-174, 2013.
- [9] H. Khodr, F. Olsina, P. De Oliveira-De Jesus, and J. M. Yusta, "Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems," *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 7, pp. 1192-1203, 2008.
- [10] J. F. Franco, M. J. Rider, M. Lavorato, R. Romero, and E. Systems, "A mixed-integer LP model for the optimal allocation of voltage regulators and capacitors in radial distribution systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst*, Vol. 48, pp. 123-130, 2013.
- [11] M. H. Haque, Transmission and Distribution, "Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction," *J. IEE Proceedings-Generation, Transmission Distribution*, Vol. 146, No. 5, pp. 501-505, 1999.
- [12] K.R. Devabalaji, K. Ravi, D.P. Kothari, "Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 71, pp. 383-390, 2015.
- [13] M. E. Baran and F. D. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Transactions on power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 725-734, 1989.
- [14] S. A. Taher, A. Karimian, M. Hasani, and Theory, "A new method for optimal location and sizing of capacitors in distorted distribution networks using PSO algorithm," *Simulation Modelling Practice Theory*, Vol. 19, No. 2, pp. 662-672, 2011.
- [15] M. S. S. Azevedo, I. P. Abril, J. C. Leite, A. B. de Medeiros, "Capacitors placement by NSGA-II in

