

## مکان‌یابی بهینه خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه‌های توزیع هارمونیک جهت کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ با استفاده از الگوریتم CSA

احسان اکبری<sup>۱\*</sup>

\* ۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، akbari.ieee@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۴

چکیده: امروزه در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی بارهای غیرخطی و هارمونیک‌زا بشدت توسعه یافته است. بارهای غیرخطی باعث ایجاد هارمونیک در شبکه‌های توزیع می‌گردند. هنگام خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع باید هارمونیک‌های جریان تزریقی را در نظر گرفت، تا اطمینان حاصل شود که خازن‌های استفاده شده باعث افزایش اعوجاج هارمونیک و نتیجتاً افزایش تلفات ناشی از هارمونیک‌ها نشوند. در این مقاله، به مکان‌یابی بهینه خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه‌های توزیع هارمونیک با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) پرداخته می‌شود و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی محل بهینه خازن‌ها جهت کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در دو شبکه توزیع نمونه ۱۵ و ۳۴ شینه استاندارد IEEE تعیین می‌گردد و نتایج حاصل از الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش با نتایج سایر الگوریتم‌های موجود در مراجع از قبیل زنبور عسل مصنوعی (ABC)، گرده افشانی گل (FPA)، کرم شب‌تاب (FA) و شبیه‌سازی رشد گیاه (PGSA) مقایسه شده و مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر کارایی و برتری الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم جستجوی کلاغ، بهبود پروفیل ولتاژ، خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده، کاهش تلفات، هارمونیک.

### ۱- مقدمه

بهره‌برداری آسان از خازن‌ها نسبت به سایر تجهیزات دانست. خازن‌ها، ادواتی هستند که با تزریق توان راکتیو به شبکه توزیع علاوه بر بهبود پروفیل ولتاژ، قسمتی از ظرفیت شبکه را آزاد و علاوه بر آن باعث کاهش تلفات می‌شوند. از جمله مزایای خازن‌ها می‌توان به کاهش تلفات اکتیو و راکتیو، آزادسازی ظرفیت خطوط و ترانس‌ها، بهبود ضریب توان و حفظ ولتاژ در محدوده مجاز اشاره کرد. برای بهره‌مندی از موارد مطرح شده باید خازن‌ها در مکان بهینه استفاده شوند. بنابراین پیدا کردن محل بهینه‌ی نصب خازن در شبکه توزیع بسیار مهم و ضروری می‌باشد. تا کنون روش‌های متعددی برای مکان‌یابی بهینه خازن‌ها در شبکه توزیع مورد استفاده قرار گرفته است، ولی بطور کلی روش‌های مکان‌یابی خازن‌ها در شبکه‌های توزیع به چهار گروه اصلی تحلیلی، برنامه‌ریزی عددی، ابتکاری و هوش مصنوعی دسته‌بندی می‌شوند [۲]. با توجه به مطالب گفته شده میزان جبران‌سازی تا حد

شبکه‌های توزیع بیشترین میزان تلفات را در سیستم‌های قدرت دارند، بطوریکه مطالعات نشان می‌دهد حدود ۱۳ درصد از توان تولید شده در سیستم قدرت بصورت تلفات اهمی در بخش توزیع تلف می‌گردد. تلفات در شبکه‌های توزیع نه تنها باعث هدر رفتن انرژی الکتریکی می‌شود، بلکه باعث اشغال ظرفیت ترانس‌ها و خطوط نیز می‌شود. بدین منظور شرکت‌های توزیع برق جهت جبران‌سازی و کاهش تلفات مبادرت به نصب خازن در شبکه‌های توزیع می‌نمایند. نصب خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده از دیر باز به عنوان جذاب‌ترین روش در کنترل ولتاژ و توان راکتیو شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی در جهت بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان و انرژی بوده است [۱]. عمده‌ترین دلیل این جذابیت را می‌توان مسائل اقتصادی و

جستجوی کلاغ (CSA) شرح داده می‌شود. سپس در بخش پنجم مسئله خازن‌گذاری برای دو شبکه آزمون ۱۵ و ۳۴ شینه IEEE با سطح هارمونیکی مشخص حل گردیده و نتایج ارائه شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج سایر الگوریتم‌های موجود در مراجع مورد مقایسه قرار گرفته است، در نهایت نیز نتیجه‌گیری کلی بیان می‌شود.

## ۲- ضرورت بهره‌گیری از خازن‌ها در شبکه‌های توزیع الکتریکی

تولید توان راکتیو از دو طریق کلی می‌تواند انجام پذیرد: ۱- توسط نیروگاه‌ها در بخش تولید ۲- توسط خازن‌ها، جبران‌سازهای سنکرون و کندانسورهای سنکرون در بخش توزیع و انتقال. وجود منابع توان راکتیو در نزدیکی مصارف مربوطه، علاوه بر کاهش هزینه، از ظرفیت شبکه و تلفات نیز می‌کاهد. بهره‌گیری از بانک‌های خازنی موجب آزاد شدن ظرفیت نیروگاه‌ها و خطوط شده و توانایی تولید توان اکتیو توسط ژنراتورها و انتقال آن توسط رده‌های بالای ولتاژی را افزایش می‌دهد. بطور کلی نکاتی را که لازم است در انتخاب منابع جبران توان راکتیو در نظر داشت، می‌توان به صورت زیر لیست نمود [۶]:

۱- قابلیت اطمینان تجهیزات

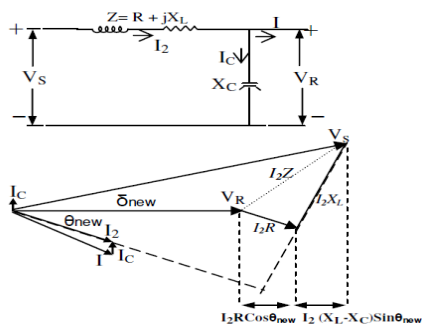
۲- عمر احتمالی

۳- هزینه‌های (خرید، نصب و نگهداری)

۴- مدت زمان لازم برای نصب و راه‌اندازی

۵- سهولت در بهره‌برداری

هر کدام از روش‌های تولید توان راکتیو دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود بوده و در شرایطی می‌توانند در اولویت انتخاب قرار گیرند؛ اما در کل، بررسی‌ها و تجربیات نشان می‌دهد که خازن‌ها دارای هزینه‌های اولیه و نگهداری کمتری بوده، راندمان بالایی داشته، فشرده و قابل اطمینان بوده، تلفات کمی داشته، به راحتی نصب شده و قابلیت اتوماتیک شدن در شبکه را داراست. همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، نصب خازن در طول یک فیذر توزیع، اندازه جریان منبع را کاهش می‌دهد، ضریب قدرت را اصلاح می‌کند و افت ولتاژ فیذر را کاهش می‌دهد.



شکل (۱): دیاگرام برداری ولتاژ با نصب خازن در فیذر توزیع [۲]

بسیار زیادی به مکان خازن در شبکه توزیع وابسته است. تا کنون تکنیک‌های بسیار با نگرش‌های گوناگون برای حل مسئله، مطرح شده است. در اکثر تکنیک‌ها، مکان‌یابی خازن با فرض شرایط سینوسی و صرف نظر از تاثیر هارمونیک‌ها انجام شده و حضور بارهای غیرخطی (شرایط هارمونیکی) نادیده گرفته شده است. اما باید توجه کرد که این فرض در زمان کنونی به هیچ عنوان صحت ندارد. با افزایش کاربرد بارهای غیرخطی 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. مطالعات اخیر شبکه‌های توزیع برق، 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 خازن‌ها درست تعیین نگردد؛ خازن‌ها می‌توانند حتی منجر به تقویت ولتاژ و جریان هارمونیکی شوند چرا که امکان تشدید در یکی از فرکانس‌های هارمونیکی متعدد وجود دارد. این شرایط می‌تواند، 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. لذا در شبکه‌های هارمونیکی کنونی در نظر گرفتن مسئله هارمونیک‌ها برای تعیین مکان بهینه خازن‌ها 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 بحساب آمده است. در [۳] مدلسازی و روش مکان‌یابی خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده مطرح و روی یک شبکه نمونه پیاده سازی شده است. در مراجع [۵] و [۷] بترتیب برای مکان‌یابی بهینه خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه هارمونیکی از الگوریتم گرده افشانی گل (FPA) و کرو شب‌تاب (FA) استفاده شده است. در مراجع [۳] و [۴] از الگوریتم شبیه‌سازی رشد گیاه (PGSA) و زنبور عسل مصنوعی (ABC) برای حل مسئله مکان‌یابی خازن‌ها بهره گرفته شده است. هر یک از مراجع دیدگاه‌های متفاوتی را در حل مسئله، مورد توجه قرار داده‌اند به عنوان مثال در مرجع [۷] هدف افزایش پایداری ولتاژ و کنترل توان راکتیو می‌باشد. در مراجع [۴] و [۵] کاهش تلفات و هزینه خازن‌گذاری مورد بحث قرار گرفته است.

در این مقاله تعیین مکان بهینه خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شرایط هارمونیکی، با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. مدل ریاضی مسئله دارای ماهیت پیچیده و غیر خطی است که برای حل آن از الگوریتم جستجوی کلاغ CSA استفاده شده است. ساختار مقاله حاضر به این صورت است که بعد از مقدمه در بخش دوم ضرورت بهره‌گیری از خازن‌ها در شبکه‌های توزیع بیان می‌شود. در بخش سوم فرمول‌بندی ریاضی مسئله با ارائه مدل بار، بیان قیود استفاده شده، مدل کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ و محاسبات پخش بار در شرایط هارمونیکی ارائه می‌گردد. در بخش چهارم روش بهینه‌سازی استفاده شده بر اساس الگوریتم

### ۳- مدل سازی و فرمول بندی مسئله

در این قسمت مدل بار و فرمول بندی مسئله شامل تابع هدف، قیود مسئله و محاسبات پخش بار ارائه می گردد.

#### ۳-۱- مدل بار

ابتدا منحنی بار در تعداد مشخصی از سطح بار تقریب زده می شود. برای حل، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

(۱) سیستم متعادل است.

(۲)  $k$  امین سطح بار در  $i$  امین باس به صورت ضریبی از پیک بار

بیان می شود:  $(P_{ik}, Q_{ik}) = x_k (P_{il}, Q_{il})$  بگونه ای که  $x_k \leq 1$  می باشد.

(۳) در هر سطح بار، بارهای اکتیو و راکتیو مورد تقاضا با توان های حاصله در فرکانس اصلی تامین می شود. این فرض قابل قبول است زیرا توان های اضافی در هارمونیک های دیگر قابل صرف نظر می باشند.

(۴) بار در باس  $i$  ام به دو بخش بار غیر خطی  $w_i$  و بار خطی

$(1-w_i)$  تقسیم می شود. این تقسیم بندی با انجام آزمایشات دقیقی

برای هر بار به منظور تعیین نوع ترکیبات خطی و غیر خطی بارها و نسبت توان هایشان انجام می شود.

(۵) برای سادگی فرض می شود در هر باس هر دوی بارهای خطی و غیر خطی ضریب یکسانی دارند.

(۶)  $n$  امین هارمونیک جریان تزریق شده در باس  $i$  ام در  $k$  امین سطح بار به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I_{ik}^n = \frac{w_i I_{ik}^1}{n}, n = 3, 5, 7, \dots, N \quad (7)$$

$$I_{ik}^1 = \frac{P_{ik} - jQ_{ik}}{(V_{ik}^1)^*}$$

که در آن،  $N$  بالاترین مرتبه هارمونیک مورد نظر و  $I_{ik}^1$  جریان هارمونیک اصلی و  $(V_{ik}^1)^*$  مزدوج مختلط هارمونیک اصلی ولتاژ است. رابطه فرض شده برای اندازه هارمونیک ها به این صورت است که جریان های هارمونیکی تزریق شده توسط بارهای غیر خطی با نسبت عکس مرتبه شان کاهش می یابند.

#### ۳-۲- تابع هدف مسئله

##### ۳-۲-۱- کمینه سازی تلفات

هدف از خازن گذاری بهینه، کمینه سازی تلفات و هزینه خازن گذاری است که طبق تابع هدف  $F_1$  تعریف می گردد:

با توجه به شکل (۱)، افت ولتاژ در یک فیدر توزیع از رابطه

زیر محاسبه می شود:

$$\Delta V = I_R R + I_x X_L \quad (1)$$

$$I_R = I \cos \theta$$

$$I_x = I \sin \theta$$

که  $I_x$  و  $I_R$  به ترتیب مولفه های اکتیو و راکتیو جریان بار می باشند. پس از نصب خازن، افت ولتاژ برابر:

$$\Delta V' \approx I_R R + (I_x - I_C) X_L = \Delta V - X_L I_C \quad (2)$$

در این رابطه  $I_C$ ، جریان خازن می باشد. در نتیجه تغییرات ولتاژ ناشی از نصب خازن بصورت رابطه (۳) بیان می شود:

$$\Delta V_C = I_C X_L \quad (3)$$

تلفات توان اهمی فیدر قبل از نصب خازن برابر:

$$P_L = I_L^2 R = (I_L \cos \theta)^2 R + (I_L \sin \theta)^2 R \quad (4)$$

پس از نصب خازن

$$P_{Lc} = I_L^2 R = (I_L \cos \theta)^2 R + (I_L \sin \theta - I_C)^2 R \quad (5)$$

به این ترتیب تغییر در تلفات توان، با نصب خازن از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta P_L = P_{Lc} - P_L = 2(I_L \sin \theta) I_C R - I_C^2 R \quad (6)$$

از رابطه (۶) ملاحظه می شود که تغییر در میزان تلفات،

تابعی از جریان راکتیو بار  $(I_L \sin \theta)$  است و جریان اکتیو بار  $(I_L \cos \theta)$  نقشی در کاهش تلفات ندارد. بنابراین می توان

نتیجه گرفت که نصب خازن تاثیری بر تلفات ناشی از جریان اکتیو فیدر ندارد و فقط بر تلفات ناشی از جریان راکتیو فیدر تاثیرگذار است. از این رو در مسئله خازن گذاری، کمینه سازی تلفات فیدر، با کمینه سازی تلفات راکتیو فیدر متناظر است. استفاده از خازن در شبکه های توزیع انرژی الکتریکی، می تواند با اهداف مختلفی انجام پذیرد و در عین حال با توجه به محل نصب، شرایط نصب و ظرفیت آن نتایج و پیامدهایی متفاوت داشته باشد. به طور عموم، کاربردها و اثرات مثبت خازن گذاری را می توان به صورت زیر لیست نمود [۹]:

(۱) تامین ولت آمپر راکتیو

(۲) افزایش ظرفیت سیستم

(۳) کاهش تلفات سیستم

(۴) اصلاح ضریب قدرت الکتریکی

(۵) اصلاح پروفیل حالت دایم ولتاژ

(۶) متعادل سازی سلفاز در یک فیدر.

$$THD_v^i = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1}^H (V_i^h)^2}}{V_i^1} * 100 \quad (12)$$

$$Max (THD_v^i \%) \leq THD_{V_{max}}$$

حال تابع هدف دوم مسئله به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$F_2 = F_{\Delta V} + F_{THD} \quad (13)$$

از ترکیب دو تابع هدف بیان شده، تابع هدف کلی تعیین مکان بهینه خازن‌ها طبق رابطه زیر استخراج می‌گردد:

$$F_{Total} = \psi_1 F_{1,pu} + \psi_2 F_{2,pu} \quad (14)$$

پارامترهای  $\psi_1$  و  $\psi_2$  ضرایب وزنی می‌باشند که نشانگر اهمیت نسبی آنها می‌باشد.

### ۳-۳-۳- قیود مسئله بهینه‌سازی

#### ۳-۳-۱- قید تعادل توان اکتیو در شبکه

برای حفظ تعادل بین توان تولیدی شبکه و مصرفی آن باید رابطه زیر برقرار باشد.

$$Q_{sys} + Q_{cap} = Q_d + Q_{loss} \quad (15)$$

که  $Q_{sys}$  توان اکتیوی که شبکه بالا دست در اختیار شبکه توزیع مورد نظر قرار می‌دهد.  $Q_{cap}$  توان راکتیو تزریقی خازن به شبکه توزیع،  $Q_d$  توان راکتیو بارهای شبکه و  $Q_{loss}$  توان راکتیو تلف شده هستند.

#### ۳-۳-۲- قید توان راکتیو

قید توان راکتیو طبق رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$Q_{cap_i}^{\min} \leq Q_{cap_i} \leq Q_{cap_i}^{\max} \quad (16)$$

#### ۳-۳-۳- قید پخش بار

تمامی معادلات پخش بار در فرکانس اصلی سیستم را می‌توان بصورت رابطه (۱۷) نشان داد.

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (17)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

#### ۳-۳-۴- قید تلفات

مقدار تلفات پس از خازن‌گذاری بهتر از حالت قبل از نصب است.

$$F_1 = \sum_{i=1}^{nb} k_p \cdot P_{loss}^i + \sum_{j=1}^{nc} k_c \cdot Q_c^j + \sum_{j=1}^{nc} k_e \cdot Q_{cs}^j \quad (8)$$

در این رابطه،  $P_{loss}^i$  نشان دهنده تلفات سکشن  $i$ ام،  $nb$  تعداد سکشن‌های شبکه،  $Q_c^j$  هزینه خازن ثابت  $j$ ام،  $nc$  تعداد نقاط خازن‌گذاری شده و  $Q_{cs}^j$  هزینه خازن سوئیچ شونده  $j$ ام،  $k_p$  هزینه هر کیلووات تلفات،  $k_c$  هزینه خازن ثابت بر کیلووار و  $k_e$  هزینه خازن سوئیچ شونده بر کیلووار را نشان می‌دهد. تابع تلفات خود از دو بخش تشکیل شده است، تلفات توان و تلفات انرژی پس ترم اول تابع  $F_1$  به صورت  $k_i TP_{loss} + k_d P_{loss}$  در می‌آید. که قسمت اول تلفات انرژی و قسمت دوم تلفات توان را تشکیل می‌دهند. حال با تعمیم رابطه (۸) در شرایط هارمونیک  $P_{loss}$  در تابع هدف  $F_1$  به صورت رابطه (۹) تغییر می‌کند.

$$P_{loss} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M \frac{r_{ij}^h}{Z_{ij}^h} |V_i^h - V_j^h|^2 \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $H$  بالاترین مرتبه هارمونیک،  $M$  تعداد باس‌های شبکه توزیع و  $r_{ij}^h$  و  $Z_{ij}^h$  به ترتیب، مقاومت و امپدانس شاخه بین باس  $i$  و  $j$  در هارمونیک  $h$  است.

### ۳-۲-۲- کمینه‌سازی انحراف ولتاژ و انحرافات هارمونیک هر باس

در بهبود پروفیل ولتاژ سعی بر این است که انحراف ولتاژ باس‌ها از یک مقدار مشخص تجاوز نکنند. میزان انحراف با توجه به ولتاژ نامی (یک پریونیت) سنجیده می‌شود و می‌توان آن را در قالب هدف دوم مسئله مکان‌یابی خازن به صورت روابط ریاضی زیر نشان داد:

$$\Delta V_i = |1 - V_{i,rms}| \quad (10)$$

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 و دامنه آن طبق رابطه (۱۱) استخراج می‌گردد

$$V_{i,rms}^{L_i} = \sqrt{|V_i^{L_i}(f_1)|^2 + \sum_{h=1}^H |V_i^{L_i}(f_h)|^2} \quad (11)$$

$$L_i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, M$$

در این رابطه  $V_i^{L_i}$  میزان انحراف ولتاژ باس  $i$ ام در هارمونیک اصلی و  $h$ ام می‌باشد. همچنین اعوجاج هارمونیک کلیه باس‌ها توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

می‌شود. ولتاژ باس در هر سه فاز در  $k$ امین تکرار پخش بار با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود [۹]:

$$[V]^k = [V_0] - [BIBC]^T [Z][BIBC][I]^{(k)} \quad (23)$$

که  $[V]^k$ : برداری از ولتاژ باس،  $[V_0]$ : برداری از ولتاژ باس اسلک،  $[BIBC]$ : ماتریس جریان تزریقی از باس به شاخه،  $[Z]$ :

ماتریس امپدانس اولیه و  $[I]^{(k)}$ : بردار جریان بار می‌باشد. در فرکانس‌های بالاتر، به دلیل اینکه مولفه‌های امپدانس سیستم قدرت با مرتبه هارمونیک تغییر می‌کند، ماتریس ادmittانس در هر مرتبه هارمونیک اصلاح می‌شود.

اگر از اثر پوستی صرف‌نظر کنیم به ترتیب، ادmittانس بار، ادmittانس خازن و ادmittانس فیذر در  $h$ امین فرکانس هارمونیک در باس  $i$ ام عبارت است از:

که  $P_{li}$  و  $Q_{li}$  به ترتیب، توان اکتیو و راکتیو بارهای غیرخطی باس  $i$ ام

$$Y_{li}^h = \frac{P_{li}}{|V_i^1|^2} - j \frac{Q_{li}}{h|V_i^1|^2}$$

$$Y_{ci}^h = hY_{ci}^1 \quad (24)$$

$$Y_{i,i+1}^h = \frac{1}{R_{i,i+1} + jhX_{i,i+1}}$$

را نشان می‌دهند. بارهای خطی از یک مقاومت موازی با یک راکتانس تشکیل شده‌اند.

بارهای غیرخطی به صورت منابع جریان رفتار می‌کنند، بنابراین جریان تزریقی هارمونیک توسط بارهای غیرخطی در باس  $i$ ام از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$I_i^1 = \left[ \frac{P_{hi} + Q_{hi}}{V_i^1} \right]^* \quad (25)$$

$$I_i^h = C(h)I_i^1 \quad (26)$$

که  $P_{hi}$  و  $Q_{hi}$  به ترتیب، توان اکتیو و راکتیو بارهای غیرخطی باس  $i$ ام را نشان می‌دهند.  $C(h)$  از تست میدان و تحلیل فوریه تمام مصرف کننده‌های فیذر حاصل می‌شود و مقدار آن  $C(h) = 1/h$  می‌باشد. ولتاژهای هارمونیک با حل معادله پخش بار (۲۷) محاسبه می‌شوند که از معادلات گره استخراج می‌شود.

$$[Y(\hat{k})][V(\hat{k})] = [I(\hat{k})] \quad (27)$$

که  $[Y(h)]$ ،  $[V(h)]$  و  $[I(h)]$  به ترتیب، ماتریس ادmittانس، بردار ولتاژ باس و بردار جریان تزریقی در  $h$ امین مرتبه هارمونیک هستند.

$$\sum P_{loss} (with -cap) \leq \sum P_{loss} (without -cap) \quad (18)$$

### ۳-۳-۵- قید مقدار موثر ولتاژ در هر باس

کل مقدار موثر ولتاژ (مولفه اصلی و هارمونیک) در گره  $j$ ام و سطح بار  $i$ ام بایستی بین مقادیر حداقل ( $V_{min}$ ) و حداکثر ( $V_{max}$ ) مطابق رابطه زیر محدود گردد:

$$V_{min} \leq |V_{i,j}| = \sqrt{|V_{i,j}^1|^2 + \sum_{h \neq 1}^{Nh} |V_{i,j}^h|^2} \leq V_{max} \quad (19)$$

### ۳-۳-۶- قید ظرفیت خطوط

تمامی خطوط موجود در شبکه از نظر حرارتی محدودیتی دارند. در واقع جریان عبوری از خطوط نباید از مقدار مجاز حرارتی آن بیشتر باشد.

$$|I_i| \leq |I_i^{rated}| \quad (20)$$

### ۳-۳-۷- قید ظرفیت مجاز خازن‌ها

حداکثر اندازه مجاز خازن‌ها (شامل خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده) برابر:

$$\sum (Cap_{(c)} + Cap_{(s)}) \leq Cap_{Max} \quad (21)$$

در این رابطه  $Cap_{(c)}$ ،  $Cap_{(s)}$  و  $Cap_{Max}$  به ترتیب ظرفیت خازن ثابت، سوئیچ شونده و حداکثر ظرفیت خازن قابل نصب می‌باشند.

### ۳-۳-۸- قید انحرافات هارمونیک

کل انحراف هارمونیک ولتاژ در گره  $j$ ام و سطح بار  $i$ ام بایستی به میزان حداکثر  $THD_{max}$  محدود گردد:

$$THD_{i,j}(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1}^{Nh} |V_{i,j}^h|^2}}{|V_{i,j}^1|} \leq THD_{max} \quad (22)$$

### ۳-۳-۴- محاسبات پخش بار در شرایط هارمونیک

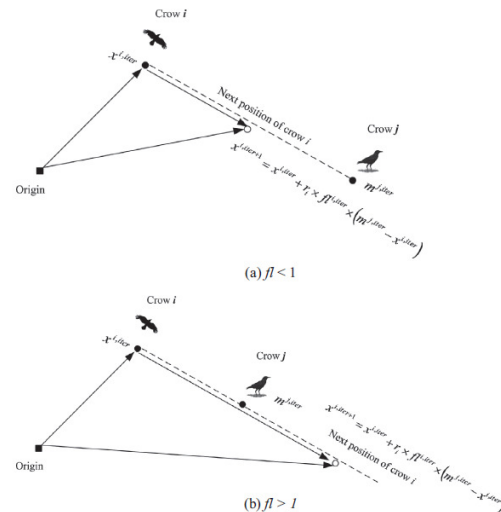
برای شبکه توزیع، یک الگوریتم پخش بار برای تعیین تلفات و ولتاژ باس‌ها در فرکانس اصلی نیاز است. در این مقاله از روش مکمل پسر - پیشرو استفاده شده است. بنابراین ابتدا یک ماتریس جریان تزریقی از باس به شاخه BIBC سه فاز بر پایه ساختار شبکه توزیع برای تعیین ارتباط بین جریان باس‌ها و شاخه‌ها تشکیل می‌شود. ولتاژ همه باس‌ها، طی فرآیند تکراری با استفاده از ماتریس BIBC محاسبه

#### ۴- معرفی الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA)

الگوریتم جستجوی کلاغ الهام گرفته از رفتار هوشمندانه کلاغ می باشد که در سال ۲۰۱۶ ارائه گردیده است [۸]. اصول الگوریتم CSA مبتنی بر چهار رفتار اساسی کلاغها می باشد:

- (۱) کلاغها در قالب گله زندگی می کنند.
- (۲) کلاغها موقعیت مکانهای مخفی خود را به یاد می آورند.
- (۳) کلاغها یکدیگر را به منظور انجام سرقت دنبال می کنند.
- (۴) کلاغها انبارهای خود را در مقابل احتمال یک سرقت محافظت می کنند.

فرض می شود در یک مسئله بهینه سازی d بهدی (d تعداد متغیرها)، تعداد کلاغها N و موقعیت کلاغ (پاسخ)  $\lambda_m$  در فضای جستجو و در لحظه (تکرار)  $iter$ ، به عنوان یک راه حل قابل قبول در مسئله بهینه سازی با  $X^{i,iter}$  نشان داده شود که  $X^{i,iter}$  موقعیت کلاغ  $\lambda_m$  می باشد و  $iter = 1, \dots, iter_{max}$  و  $i = 1, \dots, N$ . همچنین،  $iter_{max}$  بیشترین تعداد تکرار می باشد. هر کلاغ یک حافظه دارد که موقعیت مخفیگاه آن در آن ذخیره شده است. در تکرار  $iter$ ام، موقعیت مخفیگاه کلاغ  $\lambda_m$  با  $m^{i,iter}$  نشان داده می شود و بهترین موقعیتی است که کلاغ  $\lambda_m$  تاکنون کسب کرده است. در واقع در حافظه هر کلاغ، بهترین تجربه آن ذخیره شده است. کلاغها در فضای جستجو برای رسیدن به موقعیت های بهتر با منابع غذایی بیشتر (مخفیگاه بهتر) حرکت می کنند. فرض کنید در تکرار  $iter$ ، کلاغ  $j$  ام می خواهد به موقعیت مخفیگاه خود  $m^{j,iter}$  سر بزند. در این تکرار، کلاغ  $i$  ام تصمیم می گیرد کلاغ  $j$  ام را دنبال کند تا به مخفیگاه کلاغ  $j$  ام برسد. شکل (۲) ساختار عملکرد الگوریتم جستجوی کلاغ را نشان می دهد.



شکل (۲): نحوه عملکرد الگوریتم جستجوی کلاغ [۸]

در این صورت دو حالت ممکن است رخ دهد:

حالت ۱: کلاغ  $j$  ام نمی داند که کلاغ  $i$  ام آن را دنبال می کند، در نتیجه کلاغ  $i$  ام به موقعیت مخفیگاه کلاغ  $j$  ام می رسد، در این حالت موقعیت جدید کلاغ  $i$  ام به صورت زیر بدست می آید:

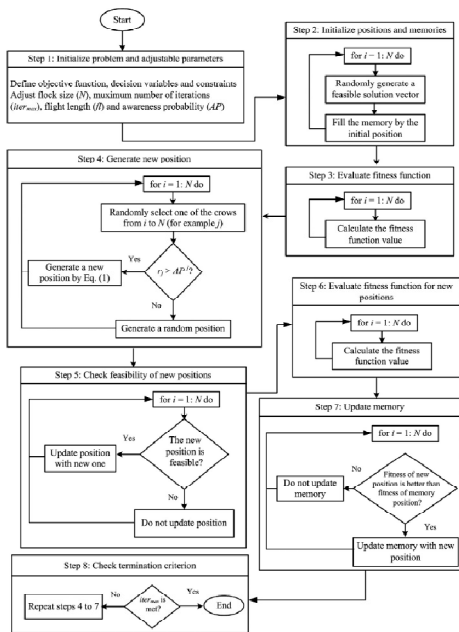
$$X^{i,iter+1} = X^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{i,iter} - X^{i,iter}) \quad (28)$$

که  $r_i$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک می باشد. همچنین  $fl^{i,iter}$  طول پرواز کلاغ  $i$  ام در تکرار  $iter$  را نشان می دهد. مقادیر کوچک  $fl$  منجر به جستجوی محلی در مجاورت  $X^{i,iter}$  و مقادیر بزرگ آن منجر به جستجوی کلی دور از  $X^{i,iter}$  می شود.

حالت ۲: کلاغ  $j$  ام می داند که کلاغ  $i$  ام آن را دنبال می کند در نتیجه کلاغ  $j$  ام به منظور جلوگیری از سرقت مخفیگاه خود توسط کلاغ  $i$  ام، به سوی موقعیت دیگری از فضای جستجو پرواز می کند. بطور کلی حالت های ۱ و ۲ را می توان به صورت رابطه زیر بیان نمود.

$$X^{i,iter+1} = \begin{cases} X^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{i,iter} - X^{i,iter}) & r_i \geq AP^{i,iter} \\ a \text{ random position} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

که  $r_i$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک می باشد. همچنین  $AP^{i,iter}$  احتمال آگاهی کلاغ  $j$  ام در تکرار  $iter$  را نشان می دهد. با کاهش پارامتر احتمال آگاهی، الگوریتم CSA فرایند جستجو را به سمت جستجوی محلی هدایت می کند. از طرفی با افزایش پارامتر  $AP$ ، فرایند جستجوی کلی انجام شده و فضای وسیعتری جستجو می شود. لذا در این حالت تنوع جمعیتی و فضای جستجو به وجود می آید که از همگرایی زودرس الگوریتم جلوگیری می کند. شکل (۳) فلوجارت عملکرد الگوریتم جستجوی کلاغ را گام به گام نمایش می دهد.



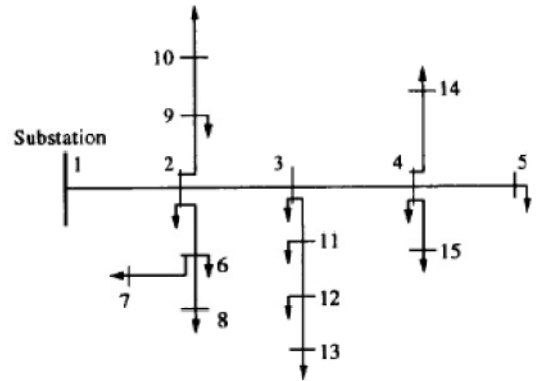
شکل (۳): فلوجارت عملکرد الگوریتم جستجوی کلاغ [۸]

## ۵- مطالعات عددی و تحلیل نتایج

در این بخش، الگوریتم جستجوی کلاغ (پیشنهادی) بر روی دو شبکه آزمون ۱۵ و ۳۴ شینه استاندارد IEEE پیاده سازی شده است.

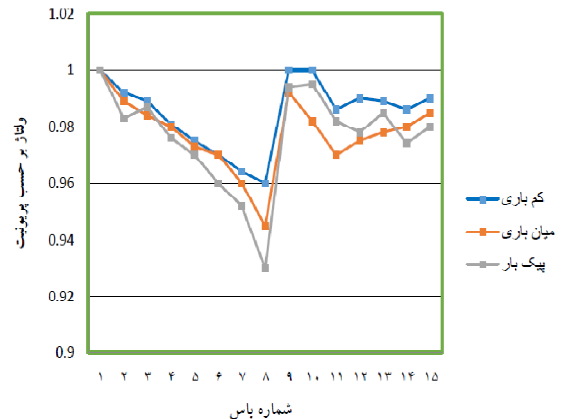
### ۱-۵ نتایج مکان‌یابی خازن‌ها در شبکه آزمون ۱۵ شینه

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی، بر روی شبکه ۱۵ شینه استاندارد IEEE پیاده‌سازی شده است. این شبکه نمونه شامل ۱۵ شین بوده که نمودار تک‌خطی در شکل (۴) نمایش داده شده است [۵]، در این شبکه توان و ولتاژ مبنا و حداکثر ظرفیت خطوط به ترتیب  $8.5MVA$ ،  $12kV$  و  $320A$  می‌باشد. بار این شبکه به صورت متغیر در نظر گرفته شده، به گونه‌ای که بار شبکه در حالت پیک  $1/0.8$  برابر حالت میان‌باری و در حالت کم‌باری  $0.85$  درصد بار میان‌باری است. کم‌باری مربوط به ساعات آخر شب تا اوایل صبح، میان‌باری مربوط به ساعات روز تا قبل از تاریکی و پیک‌بار مربوط به ساعات اولیه تا انتهای شب می‌باشد.

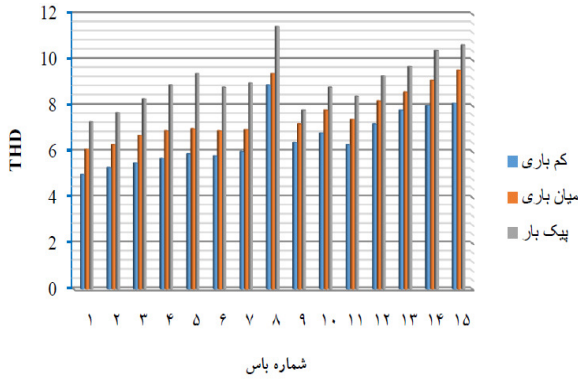


شکل (۴): شبکه ۱۵ شینه مورد مطالعه [۵]

پروفیل ولتاژ و انحرافات هارمونیک در سه سطح بار در حالت بدون خازن‌گذاری در شکل (۵) و (۶) نشان داده شده است.

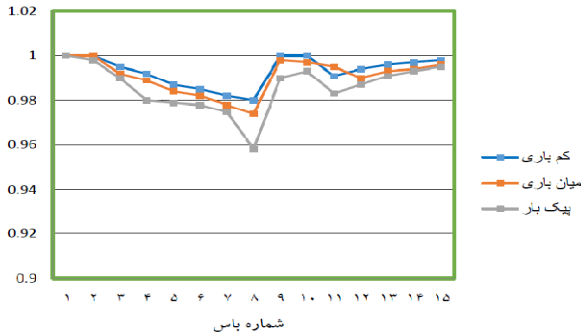


شکل (۵): پروفیل ولتاژ شبکه ۱۵ شینه در حالت بدون خازن‌گذاری

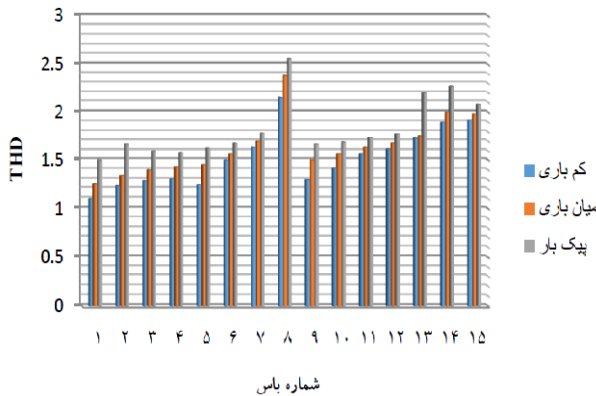


شکل (۶): پروفیل هارمونیک شبکه ۱۵ شینه در حالت بدون خازن‌گذاری

پروفیل ولتاژ و انحرافات هارمونیک در سه سطح بار در حالت خازن‌گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA) در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.



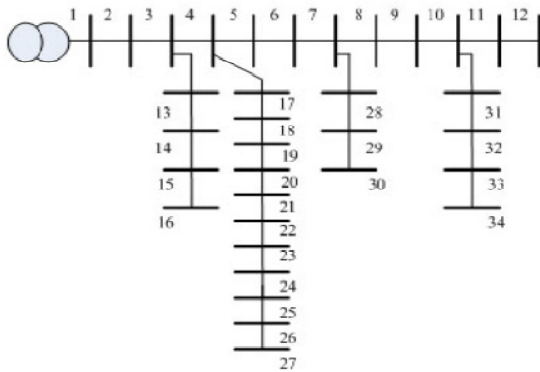
شکل (۷): پروفیل ولتاژ شبکه ۱۵ شینه در حالت خازن‌گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA)



شکل (۸): پروفیل هارمونیک شبکه ۱۵ شینه در حالت خازن‌گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA)

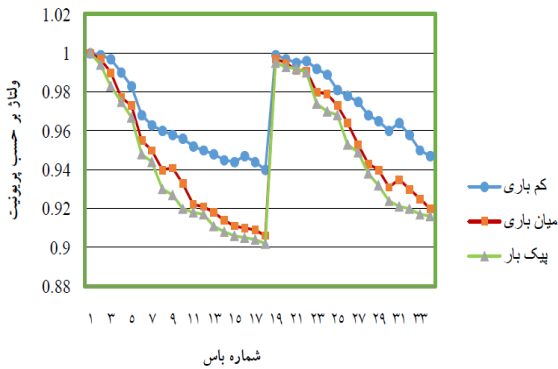
نتایج اجرای الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) بر روی شبکه ۱۵ شینه در جدول (۱) نشان داده شده است.

صبح، میان‌باری مربوط به ساعات روز تا قبل از تاریکی و پیک‌بار مربوط به ساعات اولیه تا انتهای شب می‌باشد.

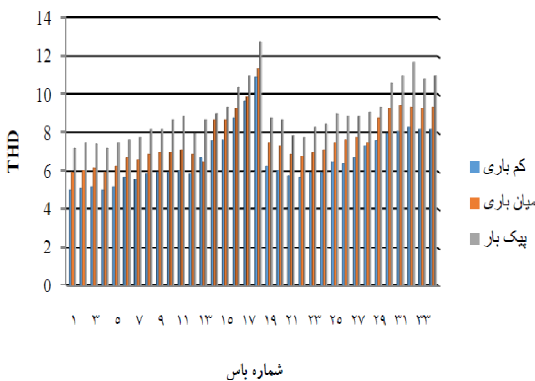


شکل (۱۰): شبکه ۳۴ شینه مورد مطالعه [۷]

پروفیل ولتاژ و انحرافات هارمونیک در سه سطح بار در حالت خازن‌گذاری با الگوریتم جستجوی کلان (CSA) در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۴ شینه در حالت بدون خازن‌گذاری



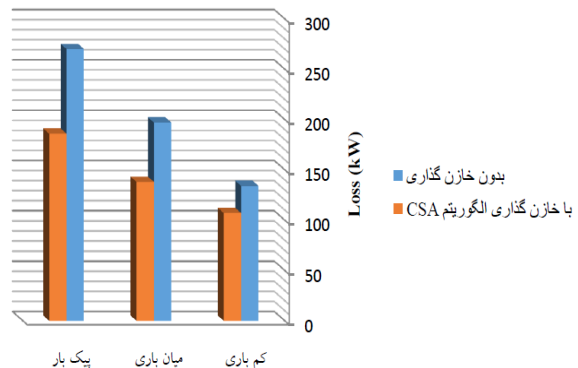
شکل (۱۲): پروفیل هارمونیک شبکه ۳۴ شینه در حالت بدون خازن‌گذاری

پروفیل ولتاژ و انحرافات هارمونیک در سه سطح بار در حالت خازن‌گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA) در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.

جدول (۱): نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی (CSA) بر روی شبکه ۱۵ شینه

مقادیر	قبل از خازن‌گذاری	بعد از خازن‌گذاری
تلفات در کم‌باری (kW)	۱۳۴	۱۰۷
تلفات در میان‌باری (kW)	۱۹۷	۱۳۸
تلفات در پیک‌بار (kW)	۲۷۰	۱۸۶
هزینه تلفات (\$/ year)	۱۳۷۵۲۳/۷	۱۰۳۳۲۷/۳
مکان خازن‌ها	-----	۵،۹،۱۲
مقدار خازن‌ها (n × 215k var)	-----	۲،۴،۷
هزینه خازن (\$/ year)	-----	۳۴۷/۸
%THD <sub>Max</sub>	۱۱/۴۵	۲/۵۶

شکل (۹) تغییرات تلفات شبکه را قبل و بعد از خازن‌گذاری با الگوریتم CSA نمایش می‌دهد.

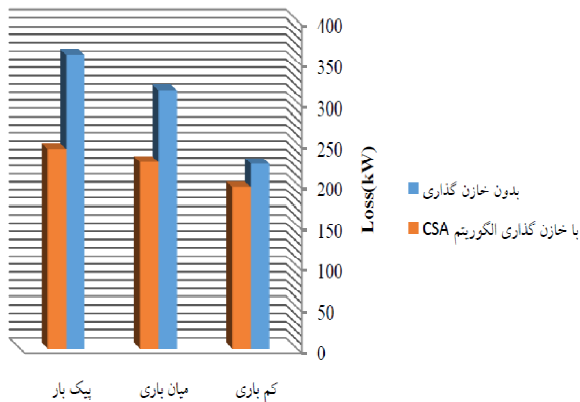


شکل (۹): تغییرات تلفات شبکه ۱۵ شینه قبل و بعد از خازن‌گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA)

## ۵-۲- نتایج مکان‌یابی خازن‌ها در شبکه آزمون ۳۴ شینه

در این بخش، الگوریتم پیشنهادی، بر روی شبکه ۳۴ شینه استاندارد IEEE پیاده‌سازی شده است. این شبکه نمونه شامل ۳۴ شین بوده که نمودار تک‌خطی در شکل (۱۰) نمایش داده شده است [۷]. بار این شبکه به صورت متغیر در نظر گرفته شده، به گونه‌ای که بار شبکه در حالت پیک ۱/۰۸ برابر حالت میان‌باری و در حالت کم‌باری ۰/۸۵ درصد بار میان‌باری است. کم‌باری مربوط به ساعات آخر شب تا اوایل

شکل (۱۵) تغییرات تلفات شبکه را قبل و بعد از خازن گذاری با الگوریتم پیشنهادی CSA نمایش می دهد.



شکل (۱۵): تغییرات تلفات شبکه ۳۴ شینه قبل و بعد از خازن گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA)

جدول (۳) نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی (CSA) در این مقاله را در مقایسه با سایر روش های ارائه شده در دیگر پژوهش ها در شرایط یکسان را نشان می دهد.

جدول (۳): مقایسه نتایج مکان یابی خازن ها در این مقاله یا سایر روش ها

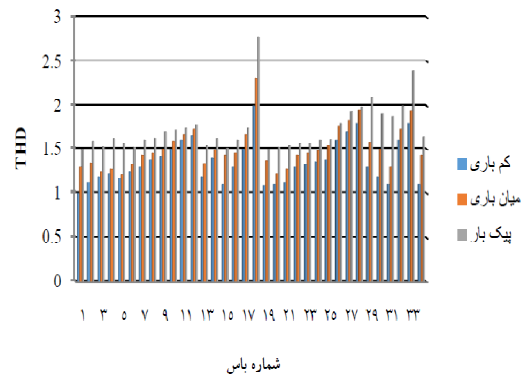
مراجعه	درصد کاهش تلفات شبکه در میان باری	میتیم ولتاژ (pu) شبکه در میان باری
[۴] الگوریتم زنیور عمل مصتوعی ABC	٪۳۳/۵	۰/۹۸۹۵
[۵] الگوریتم گرده افشانی FPA	٪۲۹/۸	۰/۹۹۱۴
[۷] الگوریتم گرم شیتاب FA	٪۲۸	۰/۹۸۶۴
[۳] الگوریتم رشد گیاه PGSA	٪۲۳	۰/۹۷۴۱
الگوریتم جستجوی کلاغ (الگوریتم پیشنهادی)	٪۳۳	۰/۹۹۶۶

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، جایابی بهینه خازن های ثابت و سوئیچ شونده در دو شبکه توزیع هارمونیک ۱۵ و ۳۴ شینه با استفاده از الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) مورد بررسی قرار گرفت و در سطوح مختلف بار تحلیل گردید و سطح ولتاژ و اعوجاج هارمونیک ولتاژ، مطابق استاندارد IEEE-519 محدود شد. برنامه پخش بار در شرایط هارمونیک با روش بهینه سازی پیشنهادی متحد و منجر به ارضای کامل قیود در کلیه سطوح بار گردید. در فرمول بندی مسئله، تابع هدف بر اساس کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی نشان می دهد که خازن گذاری بهینه منجر به کاهش تلفات توان در کلیه سطوح بار و در نتیجه کاهش هزینه های شبکه گردیده است؛ ضمن اینکه با توجه به



شکل (۱۳): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۴ شینه در حالت خازن گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA)



شکل (۱۴): پروفیل هارمونیک شبکه ۳۴ شینه در حالت خازن گذاری با الگوریتم پیشنهادی (CSA)

نتایج اجرای الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA) بر روی شبکه ۳۴ شینه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی (CSA) بر روی شبکه ۳۴ شینه

مقادیر	قبل از خازن گذاری	بعد از خازن گذاری
تلفات در کم باری (kW)	۲۲۵	۱۹۶
تلفات در میان باری (kW)	۳۱۵	۲۲۷
تلفات در پیک بار (kW)	۳۵۸	۲۴۳
هزینه تلفات (\$/year)	۱۴۷۶۴۳/۴	۱۱۵۸۴۲/۷
مکان خازن ها	-----	۱۲، ۱۸، ۲۰، ۲۴
مقدار خازن ها (n × 215k var)	-----	۷، ۶، ۳، ۴
هزینه خازن (\$/year)	-----	۵۶۴/۴
%THD <sub>Max</sub>	۱۲/۶۸	۲/۷۳

احتساب هارمونیکی بودن شبکه، اطمینان خاطر حاصل می‌شود که تشدید در فرکانس‌های متعدد هارمونیکی رخ نخواهد داد. همچنین با مقایسه نتایج استخراج شده از مقاله با سایر مراجع در شرایط یکسان (مطابق جدول (۳))، دقت، سرعت بالا و عملکرد عالی الگوریتم پیشنهادی (CSA) نسبت به سایر روش‌ها (دیگر مراجع) نشان داده شده است.

## مراجع

- [1] M. J. Wang, and A. Zhong "A novel method for capacitor optimal placement considering voltage profiles", IEEE Trans. power delivery, Vol. 11, No. 4, 2011.
- [2] M. S. Masouma, and W. Gradyd "Optimal sizing and Placement of Fixed and Switched Capacitor Bank under Nonsinusoidal Operating Conditions", IEEE Trans. power delivery, Vol. 26, No. 10, 2010.
- [3] R. S. Rao, and T. Kenje "Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm", IEEE Trans. power delivery, Vol. 7, No. 11, 2012.
- [4] A. J. Fergany, and Y. Abdelaziz "Artificial bee colony algorithm to allocate fixed and switched static shunt capacitors in radial distribution networks", IEEE Trans. power delivery, Vol. 23, No. 8, 2015.
- [5] X. J. Yang, "Flower pollination algorithm for global optimization", IEEE Trans. power delivery, Vol. 26, No. 3, 2013.
- [6] C. J. Carlisle, and A. Keib "A graph search algorithm for optimal placement of fixed and switched capacitors on radial distribution systems", IEEE Trans. power delivery, Vol. 15, No. 1, 2011.
- [7] H. D. Pahwa, "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using FA", IEEE Trans. power delivery, Vol. 3, No. 2, 2015.
- [8] A. S. Askarzadeh, "A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems Crow Search Algorithm", Computers and Structures, Vol. 16, No. 9, 2016.
- [9] Y. J. Baghzouz, "Effects of nonlinear loads on optimal capacitor placement in radial feeders", IEEE Trans. power delivery, Vol. 6, No. 1, 2013.
- [10] D. J. Das, "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method", IEEE Trans. power delivery, Vol. 25, No. 3, 2014.



**احسان اکبری** در بروجرد متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه مازندران (۱۳۸۹)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت در دانشگاه علوم و فنون مازندران (۱۳۹۲) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان الکتریکی، الکترونیک قدرت و کاربرد آن در سیستم‌های قدرت، تولیدات پراکنده و شبکه‌های توزیع هوشمند می‌باشد.

## Optimal Placement of Fixed and Switched Capacitor in harmonic distribution networks for power loss minimization and voltage profile improvement using Crow Search Algorithm

Ehsan Akbari<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

### Abstract

Today, nonlinear and harmonic loads have been extensively developed in electrical energy distribution grids. Nonlinear loads create harmonics in distribution grids. When condensing in distribution grids, we need to consider the inkjet flow harmonics to ensure that the capacitors used do not increase the harmonic distortion and consequently do not increase the losses caused by the harmonics. In this paper, the optimal location of fixed and switchable capacitors in harmonic distribution grids using the Crow Search algorithm (CSA) is investigated. Using the proposed algorithm, optimal location of capacitors to reduce losses and Improvement of the voltage profile is determined in two distribution networks of 15 and 34 bus standards of IEEE. The results of the algorithm used in this study are based on the results of other algorithms in references such as artificial bee colony (ABC), flower pollination algorithm (FPA), FA, and plant growth simulation algorithm (PGSA), and it is found that the results of the simulation indicate the efficiency and superiority of the pattern. The proposed irritation is in comparison with other methods.

\*Corresponding author: akbari.ieee@gmail.com

**Keywords:** Crow Search Algorithm (CSA), Fixed and Switched Capacitor, voltage profile improvement, power loss minimization, harmonic.