

ارزیابی وجود رزونانس در تخصیص بهینه بانک‌های خازنی در شبکه‌های توزیع بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی MSPSO

مسعود ایوبی، رحمت‌الله هوشمند و مهدی ترابیان اصفهانی

هدف بهبود قابلیت اعتماد نیز از جمله مواردی است که در [۴] به آن پرداخته شده است. از دیگر موارد قابل بررسی در جایابی خازن‌ها، در نظر گرفتن جایابی آنها با دیگر تجهیزات می‌باشد. به عنوان مثال، مسئله جایابی هم‌زمان خازن‌ها و ژنراتورهای تولید پراکنده بادی برای کنترل پروفیل ولتاژ در [۵] بررسی شده است. از طرفی، امروزه با توسعه سیستم‌های قدرت و افزایش تقاضای بار، استفاده از ژنراتورهای پراکنده و بانک‌های خازنی افزایش یافته است. جایابی هم‌زمان این دو تجهیز، تأثیرات مهمی بر کاهش تلفات و بهبود عملکرد شبکه دارد [۶]. در یک بررسی کامل‌تر، [۷] جایابی هم‌زمان ژنراتورهای پراکنده و بانک‌های خازنی را به همراه تجدید آرایش شبکه‌های توزیع بررسی کرده است.

از طرفی با گسترش بارهای غیر خطی در شبکه، لازم است هارمونیک‌ها به عنوان یک عامل تعیین‌کننده در برنامه‌ریزی‌های شبکه‌های توزیع از جمله در مسأله جایابی خازن‌ها در نظر گرفته شوند. به این منظور، [۸] با در نظر گرفتن قیود هارمونیک در مسأله، به جایابی بهینه خازن‌ها در شبکه برای سطوح بار مختلف پرداخته است. در کنار مطالعات حالت ماندگار جایابی خازن‌ها، [۹] روشی را برای در نظر گرفتن شرایط کلیدزنی در بانک‌های خازنی ارائه کرده است که در آن، یک تابع هدف چندمنظوره با کمک الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی می‌شود. یکی دیگر از مسائلی قابل توجه در مورد شبکه‌های توزیع هارمونیک که می‌توان با خازن‌گذاری به صورت هم‌زمان بررسی کرد، مبحث تجدید آرایش شبکه می‌باشد که در [۱۰] بررسی شده است. همچنین [۱۱] جایابی هم‌زمان بانک‌های خازنی و فیلترهای پسیو را به عنوان راهکاری برای کاهش تلفات و بهبود کیفیت توان شبکه‌های توزیع بررسی کرده است.

یکی از مشکلات هارمونیک‌ها بروز رزونانس در شبکه می‌باشد که به ندرت در جایابی خازن‌ها در نظر گرفته شده است [۱۲]. اگرچه شاخصی برای بررسی احتمال رزونانس در یک شینه ارائه شده است [۱۳] اما این شاخص برای جایابی هم‌زمان خازن‌ها در کل شبکه کارآمد نیست. لذا هدف اصلی این مقاله در وهله اول تعریف و تعیین شاخصی است که بتواند احتمال رزونانس را بررسی کند و در وهله دوم، هدف در نظر گرفتن این شاخص در جایابی بهینه خازن‌ها است.

یکی از شبکه‌های توزیع هارمونیک که برای خازن‌گذاری بهینه استفاده شده‌اند و در این مقاله نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد، شبکه توزیع ۱۸ شینه IEEE می‌باشد که با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش انتخاب بیشترین حساسیت^۱ (MSS) [۱۴]، روش انتخاب بیشترین حساسیت و تغییرات محلی^۲ (MSS-LV) [۱۵]، الگوریتم فازی (Fuzzy) [۱۶]، الگوریتم ژنتیک (GA) [۱۷] و الگوریتم ژنتیک- فازی (GA-FL) [۱۸] بررسی شده است. لازم به ذکر است که در هیچ کدام از روش‌های

چکیده: یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در شبکه‌های قدرت، وجود رزونانس در نقاطی از شبکه می‌باشد که باعث افزایش ناخواسته ولتاژ و جریان و بروز خسارت به تجهیزات می‌شود. با توجه به این که با نصب بانک خازنی در شبکه، مشخصه فرکانسی سیستم تغییر کرده و امکان رزونانس افزایش می‌آید، لازم است این نکته در تخصیص خازن‌ها در شبکه در نظر گرفته شود. در این مقاله، شاخص جدیدی برای ارزیابی وجود رزونانس ارائه شده و با استفاده از شاخص رزونانس پیشنهادی، روش جدیدی برای جایابی بهینه خازن‌ها در محیط هارمونیک ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی، ابتدا از آنالیز حساسیت استفاده شده تا شینه‌هایی که بیشترین تأثیر را بر تلفات و افت ولتاژ شبکه دارند، کاندید خازن‌گذاری شوند. پس از آن، خازن‌گذاری بر اساس سطوح بار مختلف و با استفاده از تابع شایستگی معرفی شده انجام می‌شود. در تابع شایستگی، از توابع عضویت فازی مربوط به صرفه‌جویی اقتصادی، انحراف ولتاژ، THD و قید رزونانس استفاده شده است. روش پیشنهادی با الگوریتم MSPSO، در شبکه ۱۸ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است. نتایج به دست آمده، کارامدی این روش را در مقایسه با روش‌های دیگر نشان می‌دهد.

کلیدواژه: الگوریتم MSPSO، جایابی خازن‌ها، رزونانس، فازی‌سازی، هارمونیک.

۱- مقدمه

با گسترش شبکه‌های الکتریکی، بانک‌های خازنی به طور وسیعی در شبکه‌های توزیع استفاده شده‌اند تا باعث کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، آزادسازی ظرفیت خطوط، جبران توان راکتیو و اصلاح ضریب توان شوند. بنابراین به منظور رسیدن به بیشترین بهره، جایابی خازن باید به صورت بهینه انجام شود. در مسأله جایابی خازن‌ها، هدف مسأله رسیدن به مکان و اندازه مطلوب خازن‌ها است تا هزینه تلفات شبکه و هزینه نصب بانک‌های خازنی به حداقل رسیده و قیود عملیاتی مسأله نیز ارضا شوند [۱].

اهمیت مسأله خازن‌گذاری باعث شده تا این مسأله، طیف گسترده‌ای از مطالعات را دربرگیرد. به عنوان مثال، بحث پایداری ولتاژ می‌تواند در برنامه‌ریزی برای جبران توان راکتیو لحاظ شود [۲]. یکی دیگر از موارد مهم در مسئله جایابی خازن‌ها، توجه به عدم قطعیت متغیرهای مسئله، به خصوص بارهای شبکه می‌باشد [۳]. مطالعات مربوط به جایابی خازن‌ها با

این مقاله در تاریخ ۲۱ مرداد ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۲۰ مرداد ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

مسعود ایوبی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: masoud.a1990@gmail.com)

رحمت‌الله هوشمند، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir)

مهدی ترابیان اصفهانی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اشرفی اصفهانی، اصفهان، (email: torabian_mehdi@yahoo.com)

1. Maximum Sensitivities Selection

2. Maximum Sensitivities Selection and Local Variations

۳-۱ تابع هدف استفاده شده

هدف از مسئله جایابی خازن‌ها، افزایش سود خالص سالانه $(ANB)^2$ ناشی از خازن‌گذاری در شبکه است. طبق تعریف، سود خالص سالانه با کم کردن هزینه خازن‌ها و هزینه تلفات پس از خازن‌گذاری از مجموع هزینه‌های تلفات شبکه قبل از خازن‌گذاری به دست می‌آید. لذا سود خالص سالانه به صورت زیر است

$$ANB = Cost_t - Cost \quad (3)$$

که $Cost_t$ و $Cost$ به ترتیب کل هزینه‌های سالانه شبکه قبل و پس از خازن‌گذاری است. بنابراین می‌توان تابع هدف مسئله را به صورت کاهش هزینه‌های سالانه خازن‌گذاری، تلفات انرژی و توان پس از خازن‌گذاری به صورت زیر تعریف کرد

$$\min OF = Cost = F_{loss} + F_{cost} + F_{capacity} = \sum_{t=1}^T K_E T_t P_{loss,t} + \sum_{i \in SC} K_{c_{fp}} C_{fi} + \sum_{t=1}^T K_A P_{loss,t} \quad (4)$$

که در این رابطه، سطوح بار نیز در نظر گرفته شده است. همچنین:

OF : هزینه کل خازن‌گذاری (\$/year)

F_{loss} : هزینه تلفات انرژی (\$/year)

F_{cost} : هزینه خازن‌های ثابت (\$/year)

$F_{capacity}$: هزینه ظرفیت اشغال شده از سیستم (تلفات توان) (\$/year)

T : تعداد کل دوره‌های زمانی بار

SC : مجموعه شینه‌های خازنی موجود

$P_{loss,t}$: تلفات سیستم در سطح بار t ام (MWh)

T_t : مدت زمان سطح بار t ام

K_E : هزینه تلفات انرژی (\$/MWh.year)

$K_{c_{fp}}$: هزینه هر واحد خازن با ظرفیت C_{fi} (\$/kVAr.year)

C_{fi} : ظرفیت خازن‌های استاندارد موجود (kVAr)

K_A : هزینه تلفات توان (\$/MW.year)

در (۴) F_{loss} هزینه تلفات انرژی و معادل پول پرداخت شده به ازای هر مگاوات ساعت تلفات انرژی بوده و $F_{capacity}$ بیانگر تلفات توان یا هزینه ظرفیت اشغال شده سیستم ناشی از تلفات می‌باشد. همچنین در این رابطه، توان تلفاتی در سطح بار t ام با استفاده از خروجی پخش بار هارمونیک به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$P_{loss,t} = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i^{(h,t)} V_j^{(h,t)} Y_{ij}^{(h)} \times \cos(\theta_i^{(h,t)} - \theta_j^{(h,t)} - \delta_{ij}^{(h)}) \quad (5)$$

که $V_i^{(h,t)}$ و $\theta_i^{(h,t)}$ اندازه و فاز ولتاژ هارمونیک h در سطح بار t ام، $Y_{ij}^{(h)}$ و $\delta_{ij}^{(h)}$ اندازه و فاز ادیمیتانس خط بین شینه‌های i و j در هارمونیک h ام، L بیشترین سطح هارمونیک موجود در شبکه و n تعداد شینه‌های شبکه است.

۳-۲ قیود به کار رفته

در فرمول‌بندی پیشنهادی، قیود زیر به عنوان قیود اساسی در نظر گرفته می‌شوند:

الف) قیود پخش بار: معادلات پخش بار شبکه را می‌توان در حالت کلی به صورت (۶) نشان داد

ذکر شده، مبحث رزونانس در نظر گرفته نشده است. از طرفی علاوه بر آن که نوع الگوریتم‌های بهینه‌سازی که در [۱۴] تا [۱۸] ارائه شده با روش بهینه‌سازی در این مقاله کاملاً متفاوت است، نوع و روش فازی‌سازی و توابع عضویت فازی در [۱۴] تا [۱۸] نیز دارای تفاوت‌های آشکار با روش فازی در این مقاله هستند که در بخش ۴ در مورد آنها بحث خواهد شد.

در این مقاله با تأکید بر اهمیت رزونانس در بحث جایابی خازن‌ها، روش جدیدی بر اساس توابع عضویت فازی شده برای جایابی خازن‌ها در محیط‌های هارمونیک و با در نظر گرفتن قید رزونانس با بهره‌گیری از شاخص رزونانس جدید پیشنهادی ارائه شده است. در روش پیشنهادی، الگوریتم ازدحام ذرات چندتجمعی (MSPSO) به کار گرفته شده که برای اولین بار ایده آن در [۱۹] مطرح شده است. بخش‌های بعدی این مقاله به ترتیب به مدل‌سازی هارمونیک تجهیزات، فرموله‌بندی پیشنهادی مسئله، بهینه‌سازی فازی مدل پیشنهادی، ارائه الگوریتم پیشنهادی، معرفی الگوریتم MSPSO، نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲-۲ مدل‌سازی هارمونیک تجهیزات

برای محاسبه پارامترهای الکتریکی سیستم در شرایط هارمونیک لازم است تا مدل‌سازی هارمونیک دقیق تجهیزات صورت گیرد. در این میان، مدل‌سازی بارهای خطی و غیر خطی و خازن در شبکه توزیع از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد.

الف) مدل بار خطی: برای مدل‌سازی بارهای خطی در فرکانس هارمونیک از ادیمیتانس معادل آنها در این فرکانس‌ها استفاده می‌شود. ادیمیتانس بار خطی متصل به شینه k ام در هارمونیک h ام به صورت (۱) به دست می‌آید [۲۰]

$$y_k^{(h)} = \frac{P_k^{(h)} - jQ_k^{(h)}}{|V_k^{(h)}|^2} \quad (1)$$

که $P_k^{(h)}$ ، $Q_k^{(h)}$ و $V_k^{(h)}$ به ترتیب توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ شینه k ام در فرکانس پایه است.

ب) مدل بار غیر خطی: سه نوع بار غیر خطی در شبکه‌های قدرت وجود دارد: بارهای منبع جریانی، بارهای منبع ولتاژی و بارهای ترکیبی. در مدل‌سازی بارهای غیر خطی، معمولاً از مدل‌سازی بارهای غیر خطی با منبع جریان استفاده می‌شود [۲۰].

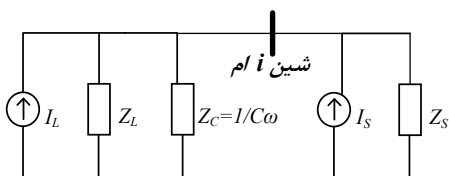
ج) مدل بانک خازنی: بانک‌های خازنی به صورت راکتانس خازنی ثابت مدل می‌شوند. مقدار این راکتانس با استفاده از مقدار توان راکتیو بانک خازنی در فرکانس پایه محاسبه می‌شود. همچنین راکتانس بانک خازنی در هارمونیک h به صورت زیر است [۲۰]

$$X_C^{(h)} = \frac{|V_C^{(h)}|^2}{Q_C^{(h)}} \quad (2)$$

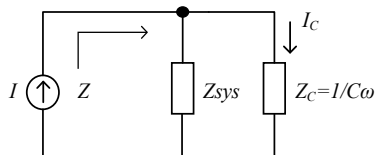
که X_C و Q_C راکتانس و توان راکتیو خازن هستند.

۳-۳ فرمول‌بندی پیشنهادی مسئله

در این بخش به معرفی تابع هدف، قیود پیشنهادی و روش آنالیز حساسیت در مسئله جایابی خازن‌ها در محیط هارمونیک پرداخته می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲: مدار معادل شبکه و خازن از دید بار غیر خطی.

$$Y_h = \left| \frac{1}{Z_{sys}(h) + Z_C(h)} \right| \quad (12)$$

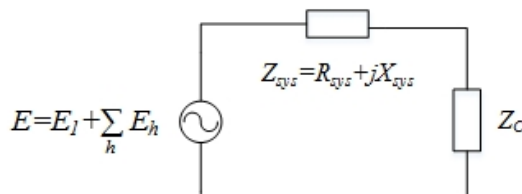
که $Z_{sys}(1)$ و $Z_{sys}(h)$ به ترتیب امپدانس معادل شبکه قبل از خازن گذاری در هارمونیک h و هارمونیک اصلی و $Z_C(1)$ و $Z_C(h)$ امپدانس خازن نصب شده در هارمونیک h و هارمونیک اصلی است. در مورد این شاخص می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

به دلیل آن که در فرایند خازن گذاری چندین خازن هم‌زمان به شبکه اضافه می‌شوند، افزودن خازن در شینه‌های دیگر می‌تواند بر مشخصه فرکانسی در شینه مذکور تأثیرگذار باشد. لذا لازم است شاخص رزونانس به نحوی تعریف گردد که اثر خازن شینه‌های دیگر نیز دیده شود. از آنجا که برای محاسبه شاخص [۱۳] از امپدانس شبکه در هر شینه قبل از خازن گذاری (Z_{sys}) استفاده می‌شود و سپس مقدار Y و RI در این شینه محاسبه می‌گردد، بنابراین در شرایطی که چندین خازن هم‌زمان در شبکه نصب شوند، این شاخص از دقت کافی برخوردار نیست.

برای محاسبه RI_{max} فقط سطح اعوجاج کلی هارمونیک شبکه در نظر گرفته شده و پارامترهایی نظیر سطح اتصال کوتاه و حداکثر جریان بار لحاظ نشده‌اند. در شبکه‌های گسترده که اختلاف سطح اتصال کوتاه و جریان بار شینه‌های مختلف زیاد است، این مورد حائز اهمیت است به طوری که در مقایسه دو بار با درصد جریان‌های هارمونیکی یکسان، باری که بزرگ‌تر است و در سطح اتصال کوتاه کمتری قرار دارد، نسبت به بار دیگر بیشتر می‌تواند ولتاژ و جریان هارمونیکی شبکه را افزایش دهد و در نتیجه باعث رزونانس شود. لذا لازم است دو پارامتر سطح اتصال کوتاه و بیشترین جریان بار در تعیین RI_{max} لحاظ شود.

شاخص رزونانس پیشنهادی: با توجه به موارد فوق، تعریف شاخص جدید رزونانسی که بتواند تا حد ممکن اشکالات شاخص قبلی را برطرف کند، ضروری به نظر می‌رسد. به این منظور، یک شینه نمونه را در نظر می‌گیریم. در حالت کلی، هر شینه دارای بار خطی (Z_L)، بار غیر خطی (I_L) و خازن (Z_C) است. اگر مدار معادل نورتن شبکه شامل امپدانس معادل (Z_S) و منبع جریان معادل (I_S) در این شینه را رسم کنیم، شکل ۲-الف به دست می‌آید که پس از ساده‌سازی به شکل ۲-ب می‌رسیم.

در شکل ۲-ب I مجموع بارهای غیر خطی (I_L) و منبع جریان معادل شبکه (I_S) در این شینه بوده و Z_{sys} امپدانس معادل شبکه به همراه بارهای خطی در این شینه می‌باشد. واضح است که Z_{sys} اثر خازن‌های دیگر در شبکه و I اثر بارهای غیر خطی در سایر شینه‌ها را نیز دربرمی‌گیرد. با توجه به شکل ۲ جریان خازن I_C برابر است با



شکل ۱: مدار معادل و خازن نصب شده.

$$H(x_i^h, u_i) = 0 \quad (6)$$

که بردار اندازه خازن و بردار متغیرهای حالت شبکه مانند دامنه ولتاژ را در سطح t و هارمونیک h مشخص می‌کند.

(ب) قید ولتاژ: اندازه ولتاژ در هر شینه باید مطابق (۷) در محدوده مشخص خود برای تمام سطوح بار باقی بماند

$$V_{min} \leq V_{i,t} \leq V_{max}, \quad \forall i \in N \quad (7)$$

که ولتاژ هر شینه شامل تمام هارمونیک‌ها می‌باشد که به صورت زیر قابل محاسبه است

$$V_{i,t} = \sqrt{\sum_{h=1}^L (V_{i,t}^h)^2}, \quad \forall i \in N \quad (8)$$

که $V_{i,t}^h$ اندازه ولتاژ هارمونیک h در شینه i و سطح بار t ام، L بیشترین هارمونیک موجود در شبکه مورد مطالعه می‌باشد.

(ج) قید اغتشاش هارمونیک کل: لازم است اغتشاش هارمونیک کلی ولتاژ هر شینه مطابق (۹) در تمام سطوح کمتر از مقدار مجاز (THD_{max}) باشد. در این رابطه، $THD_{i,t}$ اعوجاج کلی هارمونیکی شینه i ام در سطح بار t ام است

$$THD_{i,t} \leq THD_{max} \quad (9)$$

(د) قید رزونانس: رزونانس سری و موازی از مهم‌ترین عوامل مخرب در شبکه‌های توزیع می‌باشد. از آنجا که با جابجایی و نصب خازن‌های جدید در شبکه احتمال رزونانس افزایش می‌یابد لازم است در زمان جابجایی خازن‌ها به آن توجه شود. از این رو هدف و ایده اصلی این مقاله، ارائه روشی برای در نظر گرفتن امکان رزونانس در زمان خازن گذاری در شبکه می‌باشد.

به این منظور، [۱۳] شاخص رزونانسی بر اساس مدار معادل تونن سری سیستم با خازن به صورت شکل ۱ در نظر گرفته است. در این شکل، E_1 و E_h به ترتیب هارمونیک اصلی و هارمونیک h ام ولتاژ شبکه و Z_{sys} ، R_{sys} و X_{sys} به ترتیب امپدانس، مقاومت و راکتانس معادل شبکه می‌باشد.

بر این اساس، شاخص رزونانس RI برای هر شینه باید از حداکثر شاخص مجاز (RI_{max}) کمتر باشد [۱۳]

$$RI = \frac{Y_h}{Y} \leq RI_{max} \quad (10)$$

که Y_1 و Y_h به ترتیب ادmittانس معادل دیده شده از سمت منبع در هارمونیک h ام و هارمونیک اصلی می‌باشد که برابرند با

$$Y_1 = \left| \frac{1}{Z_{sys}(1) + Z_C(1)} \right| \quad (11)$$

که نسبت جریان هارمونیک n ام به هارمونیک اصلی بار است و مقدار آن را برابر با بیشترین درصد جریان مجاز بار در هارمونیک h ام (I_{HD_h}) بر اساس استاندارد ۵۱۹ IEEE Std [۲۲] در نظر می‌گیریم. این استاندارد، مقدار I_{HD_h} را بر اساس نسبت سطح اتصال کوتاه (I_{SC}) به بیشترین مقدار بار در هر شینه (I_L) ارائه کرده است. همچنین به منظور ساده‌سازی معادلات، فرض شده که RI_h برای تمام هارمونیک‌های مورد مطالعه یکسان باشد ($RI = RI_h$). در این نامساوی‌ها مقادیر h و α_h معلوم هستند. با حل نامساوی‌های فوق، چهار مقدار برای RI به دست می‌آید که کمترین مقدار به عنوان RI_{max} معرفی می‌شود.

محاسبه مقدار RI_{max} : برای محاسبه RI_{max} ، سیستمی با سطح ولتاژ کمتر از ۶۹ کیلوولت را که در آن $I_{sc}/I_L < 20$ باشد در نظر می‌گیریم و در نتیجه، مقدار α_h بر اساس استاندارد ۵۱۹ IEEE Std [۲۲] به دست می‌آید. مقدار RI_{max} وابسته به تعداد و مرتبه هارمونیک‌هایی است که در سیستم وجود دارد. جدول ۱ بیشترین شاخص رزونانس مجاز را بر اساس هارمونیک‌های مختلف نشان می‌دهد. از آنجا که مقدار RI_{max} بر اساس بیشترین سطح هارمونیک جریان مجاز محاسبه شده است این شرایط سخت‌گیرانه می‌باشد چرا که با در نظر گرفتن سطح هارمونیک جریان کمتر، مقدار RI_{max} بیشتر می‌شود. لذا در این مقاله RI_{max} به میزان ۲۰٪ بیشتر از مقدار محاسبه‌شده در نظر گرفته می‌شود. با توجه به جدول ۱ اگر در سیستمی فقط هارمونیک پنجم، هارمونیک غالب باشد، بیشترین شاخص رزونانس مجاز ۵/۲۸ است. همچنین در سیستمی که هارمونیک‌های ۵ و ۷ وجود دارد، $RI_{max} = 3$ می‌شود. مشاهده می‌شود که هرچه در شبکه‌ای، مرتبه‌های هارمونیک بیشتری وجود داشته باشد مقدار RI_{max} کمتر می‌شود.

به طور خلاصه با مقایسه شاخص رزونانس پیشنهادی با شاخص رزونانس [۱۳] می‌توان گفت که در تعریف شاخص [۱۳] از مفهوم ادمیتانس دیده‌شده از سمت منبع استفاده شده است. اشکال این نوع تعریف این است که برای این که احتمال رزونانس در یک شینه با خازن قبلاً نصب‌شده بررسی شود، لازم است ابتدا خازن از سیستم حذف شده و سپس مقدار ادمیتانس معادل در این شینه اندازه‌گیری شود. در نهایت، مقدار ادمیتانس معادل از طریق جمع‌کردن ادمیتانس خازن و ادمیتانس معادل شبکه بدون خازن، محاسبه گردد. این پروسه اگرچه برای بررسی یک شینه ممکن است دارای اهمیت نباشد اما در محث جابایی خازن‌ها که لازم است تعدادی خازن در نقاط مختلف شبکه به صورت هم‌زمان نصب شوند، زمان حل و پیچیدگی مسأله را افزایش می‌دهد چرا که در هر مرحله تکرار از الگوریتم بهینه‌سازی لازم است برای هر خازن که در هر شینه نصب می‌شود، انجام شود. این در حالی است که با نوع تعریف شاخص رزونانس پیشنهادی، مقدار شاخص رزونانس در هر شینه، پس از نصب خازن مستقیماً با استفاده از مشخصه فرکانسی سیستم در آن نقطه به دست می‌آید. در نتیجه با این نوع تعریف، مشکل فوق حل می‌شود. از طرفی در محاسبه RI_{max} برای شاخص رزونانس پیشنهادی، جزئیات بیشتری در نظر گرفته شده که به خصوص برای شبکه‌های بزرگ که وضعیت شینه‌های مختلف می‌تواند به شدت با یکدیگر متفاوت باشد، قابل توجه خواهد بود.

در نهایت می‌توان قید رزونانس را به صورت رابطه زیر در نظر گرفت

$$RI_{i,h}^t = \frac{Z_{i,h}^t}{Z_{\nu,h}^t} \leq RI_{max} \quad (25)$$

جدول ۱: بیشترین شاخص رزونانس مجاز بر اساس هارمونیک‌های موجود.

مرتبه هارمونیک‌های موجود در سیستم	۵	۷ و ۵	۷ و ۱۱ و ۵	۱۱ و ۷ و ۵	۱۳ و ۱۱ و ۷
RI_{max}	۵/۲۸	۳	۲/۴	۲	۲

$$I_C = V.C\omega = Z.C\omega I \quad (13)$$

که V اندازه ولتاژ شین خازن‌گذاری شده می‌باشد. در نتیجه، جریان هارمونیک اصلی و هارمونیک h ام خازن (I_{C_h} و I_{C_1}) بر حسب جریان هارمونیک اصلی و هارمونیک h ام بار (I_h و I_1) به صورت زیر خواهد بود

$$I_{C_1} = Z_{\nu_1}.C\omega I_1 \quad (14)$$

$$I_{C_h} = Z_h.h.C\omega I_h \quad (15)$$

که Z_{ν_1} ادمیتانس مؤلفه اصلی و Z_h ادمیتانس هارمونیک h ام معادل در این شینه است. با توجه به شکل ۲ شاخص رزونانس جدید را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$RI = \frac{Z_h}{Z_{\nu_1}} \quad (16)$$

باید توجه کرد که در حالت کلی، مقدار شاخص رزونانس جدید با شاخص رزونانس [۱۳] متفاوت بوده و فقط در شرایطی که ادمیتانس معادل شبکه، فاقد مقاومت معادل باشد ($Z_{sys} = X_{sys}$) مقدار این دو شاخص با یکدیگر برابر است. همچنین بیشترین شاخص رزونانس مجاز (RI_{max}) در این دو مورد نیز با یکدیگر متفاوت است. در ادامه به محاسبه بیشترین شاخص رزونانس مجاز می‌پردازیم.

نحوه تعیین RI_{max} : استاندارد ۱۰۳۶ IEEE Std [۲۱] قیودی را برای عملکرد ایمن بانک‌های خازنی در نظر گرفته است. این شرایط شامل حداکثر ولتاژ، جریان، پیک ولتاژ و توان خازن‌ها می‌شود. در این مقاله، معیار رزونانس بر اساس این قیود در نظر گرفته می‌شود

$$V_{rms} \leq 110\%V_1 \quad (17)$$

$$V_{peak} \leq 120\%V_{peak,1} \quad (18)$$

$$I_{crms} \leq 180\%I_{c1} \quad (19)$$

$$S_{crms} \leq 135\%S_{c1} \quad (20)$$

که V_1 و V_{rms} ولتاژ نامی و rms فعلی ولتاژ خازن، $V_{peak,1}$ و V_{peak} پیک ولتاژ نامی و پیک فعلی ولتاژ خازن، I_{c1} و I_{crms} جریان نامی و rms فعلی جریان خازن و S_{c1} و S_{crms} توان نامی و rms فعلی توان خازن هستند. لازم به ذکر است که مقدار نامی پارامترهای فوق، معادل مقدار مؤلفه اصلی‌شان در نظر گرفته شده است. با جایگذاری (۱۴) تا (۱۶) در (۱۷) تا (۲۰) و پس از ساده‌سازی خواهیم داشت

$$\sqrt{1 + \sum_h \alpha_h^{\nu} . RI^{\nu}} \leq 110\% \quad (21)$$

$$1 + \sum_h \alpha_h . RI \leq 120\% \quad (22)$$

$$\sqrt{1 + \sum_h \alpha_h^{\nu} . h^{\nu} . RI^{\nu}} \leq 180\% \quad (23)$$

$$\sqrt{1 + \sum_h \alpha_h^{\nu} . RI^{\nu}} \cdot \sqrt{1 + \sum_h \alpha_h^{\nu} . h^{\nu} . RI^{\nu}} \leq 135\% \quad (24)$$

$$ANB_t = F_{loss,t}^* + F_{capacity,t}^* - F_{loss,t} - F_{cost,t} - F_{capacity,t} \quad (28)$$

که در آن $RI_{i,h}^t$ شاخص رزونانس هارمونیک h ام در شینه i و سطح بار t ام و $Z_{i,h}^t$ و $Z_{i,h}^t$ به ترتیب امپدانس هارمونیک h ام و هارمونیک اصلی در شینه i و سطح بار t ام است.

۳-۳ آنالیز حساسیت

برای کم کردن فضای جستجوی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین افزایش سرعت در رسیدن به پاسخ، می‌توان از آنالیز حساسیت بهره برد. به این منظور برای هر شینه یک ضریب حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شود

$$SF_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta Q_i} \quad (26)$$

این رابطه که بیانگر نسبت تغییرات ولتاژ هر شینه (ΔV_i) به توان راکتیو آن شینه (ΔQ_i) است، با استفاده از معادلات ژاکوبین به دست می‌آید و مشخص می‌کند که کدام شینه‌ها با کمترین مقدار توان راکتیو، افزایش ولتاژ بیشتری دارند و به صورت غیر مستقیم می‌توانند باعث کاهش تلفات و بهبود ولتاژ بیشتر شوند. در این روش، شینه‌هایی که بیشترین ضریب حساسیت را دارند مشخص شده و کاندید خازن گذاری می‌شوند.

۴- بهینه‌سازی فازی مدل پیشنهادی

با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش قبل، مدل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی به صورت زیر است

$$\min OF = Cost = F_{loss} + F_{cost} + F_{capacity} =$$

$$\sum_{t=1}^T K_E T_t P_{loss,t} + \sum_{i \in SC} K_{cftp} C_{fi} + \sum_{t=1}^T K_A P_{loss,t}$$

Subjected to:

$$H(x_t^h, u_t) = 0 \quad (27)$$

$$V_{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{\max}, \quad \forall i \in N$$

$$THD_{i,t} \leq THD_{\max}$$

$$RI_{i,h}^t = \frac{Z_{i,h}^t}{Z_{i,h}^t} \leq RI_{\max}$$

توابع عضویت فازی از قابلیت انعطاف بالایی برخوردار هستند و می‌توان به کمک آنها، سهم هر یک از قیود و اهداف مسئله را بسته به نظر کاربر تغییر داد. از این رو در این مقاله به شکل مناسبی از توابع عضویت فازی استفاده گردیده است.

لازم به ذکر است که روش‌های متعددی برای فازی‌سازی و تعریف توابع عضویت فازی در مراجع متعدد ارائه شده که بعضاً دارای مشکلاتی می‌باشند. به عنوان مثال، تابع شایستگی [۱۶] بر اساس حاصل ضرب توابع عضویت فازی به دست می‌آید که این شکل محاسبه تابع شایستگی دارای نواقصی است. از جمله این که در تابع شایستگی که به صورت حاصل ضرب توابع عضویت تعریف شود، نمی‌توان سهم هر یک از توابع عضویت فازی را مشخص کرد. در حالی که در روش پیشنهادی در این مقاله، تابع شایستگی به صورت مجموع وزن دار هر یک از توابع عضویت بیان می‌شود و می‌توان سهم هر یک را در تابع عضویت تغییر داد. روند کار در ادامه تشریح خواهد شد.

۴-۱ تابع عضویت برای صرفه‌جویی اقتصادی

سود سالانه حاصل از خازن گذاری در t امین سطح بار در شبکه (ANB_t) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$F_{loss,t}^* + F_{capacity,t}^* - F_{loss,t} - F_{cost,t} - F_{capacity,t} > 0$$

$$\frac{F_{loss,t} + F_{cost,t} + F_{capacity,t}}{F_{loss,t}^* + F_{capacity,t}^*} < 1 \quad (29)$$

حال متغیر x_t را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$x_t = \frac{F_{loss,t} + F_{cost,t} + F_{capacity,t}}{F_{loss,t}^* + F_{capacity,t}^*} \quad (30)$$

رابطه (۲۹) نشان می‌دهد که بزرگ بودن x_t نشان‌دهنده کم بودن سود حاصل از خازن گذاری است، لذا تابع عضویت هزینه صرفه‌جویی به صورت زیر قابل بیان است

$$\mu S_t = \begin{cases} 1, & x_t \leq x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x_t}{x_{\max} - x_{\min}}, & x_{\min} < x_t < x_{\max} \\ 0, & x_t \geq x_{\max} \end{cases} \quad (31)$$

۴-۲ تابع عضویت برای حداکثر انحراف در ولتاژ گره

هدف از این تابع عضویت، حداقل ساختن انحراف ولتاژ شینه‌هاست. لذا متغیر y_t را برای سطح بار t ام به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$y_t = \max |V_s - V_{i,t}|, \quad \forall i \in N \quad (32)$$

که $V_{i,t}$ ولتاژ شینه i در سطح بار t ام و V_s ولتاژ شینه اصلی می‌باشد. با کوچک شدن انحراف ولتاژ مقدار تابع عضویت به دست آمده بزرگ می‌شود. تابع عضویت حداکثر انحراف ولتاژ گره به صورت زیر خواهد بود

$$\mu V_t = \begin{cases} 1, & y_t \leq y_{\min} \\ \frac{y_{\max} - y_t}{y_{\max} - y_{\min}}, & y_{\min} < y_t < y_{\max} \\ 0, & y_t \geq y_{\max} \end{cases} \quad (33)$$

۴-۳ تابع عضویت برای حداکثر اعوجاج کلی هارمونیک

ولتاژ در هر گره

هدف از این تابع عضویت، حداقل کردن حداکثر اعوجاج کلی هارمونیک ولتاژ شینه‌ها است. مقدار THD_t و تابع عضویت در ادامه آمده است

$$THD_t = \max(THD_{i,t}), \quad \forall i \in N \quad (34)$$

$$\mu THD_t =$$

$$\begin{cases} 1, & THD_t \leq THD_{\min} \\ \frac{THD_{\max} - THD_t}{THD_{\max} - THD_{\min}}, & THD_{\min} < THD_t < THD_{\max} \\ 0, & THD_t \geq THD_{\max} \end{cases} \quad (35)$$

که $THD_{i,t}$ اعوجاج کلی هارمونیک ولتاژ شینه i در سطح بار t ام و THD_t بیشترین اعوجاج کلی هارمونیک شینه‌ها در سطح بار t ام را نشان می‌دهد.

که RI_{min} بر اساس بیشترین مقدار شاخص رزونانس مجاز برای دو هارمونیک پنجم و هفتم و RI_{max} بر اساس بیشترین مقدار شاخص رزونانس در شرایطی که هارمونیک پنجم در شبکه وجود دارد، انتخاب می‌شوند. با توجه به جدول ۱، RI_{min} و RI_{max} به ترتیب ۳ و ۵/۲۸ در نظر گرفته می‌شوند.

۴-۵ بیان مسئله با اهداف فازی

بر اساس مطالب گفته‌شده، هدف مسئله بهینه‌سازی اهداف مختلف مسئله از قبیل صرفه‌جویی اقتصادی، انحراف از دامنه و THD ولتاژ و همچنین عدم رزونانس ارائه شده است. یکی از راه‌های اساسی در حل مسایل چندهدفه، استفاده از وزن‌دهی توابع هدف و ارائه آن در قالب یک تابع هدف مطابق تابع شایستگی (۳۷) می‌باشد. البته به خاطر رفع خطاهای احتمالاتی در تعیین این ضرایب، در این مقاله از ضرایب وزن‌دار فازی استفاده شده است

$$F_t = W_1 \cdot \mu S_t + W_2 \cdot \mu V_t + W_3 \cdot \mu THD_t + W_4 \cdot \mu RI_t \quad (38)$$

ضرایب وزنی W_1, W_2, W_3, W_4 و W_5 به منظور تعیین سهم هر یک از توابع استفاده می‌شوند، با توجه به نظر اپراتور قابل تغییر می‌باشند و ضروری است که مجموع این ضرایب برابر یک باشد. در نهایت باید تابع ارزیابی (۳۷) برای تمام سطح بار ماکسیمم شود تا هزینه سیستم حداقل گردد. بنابراین می‌توان مجموع تابع ارزیابی (۳۷) را به عنوان تابع ارزیابی نهایی (F) تعریف کرد

$$\max F = \sum_{t=1}^T F_t \quad (39)$$

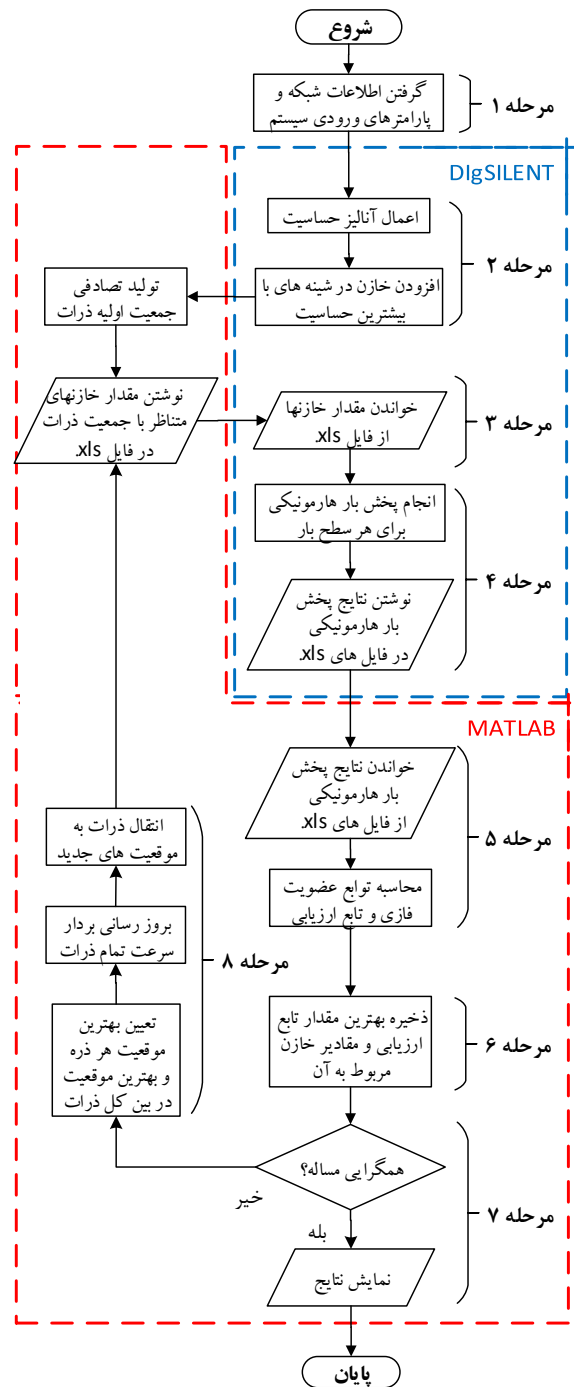
که T تعداد سطوح بار می‌باشد. لازم به ذکر است که الگوریتم MSPSO یک الگوریتم مینیمم‌یاب است لذا از معکوس تابع هدف به دست آمده در این رابطه استفاده می‌شود.

۵- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی حل مسئله جایابی خازن‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، مدل‌سازی شبکه و انجام پخش بار و آنالیز حساسیت در نرم‌افزار DigSILENT انجام شده و مراحل بهینه‌سازی مسئله بر عهده نرم‌افزار MATLAB گذاشته شده است.

روند این الگوریتم به شرح زیر است:

- ۱) **تعریف پارامترها و متغیرهای شبکه:** در مرحله اول، پارامترهای مورد نیاز برای مسئله تعریف می‌شود.
- ۲) **آنالیز حساسیت:** با انجام آنالیز حساسیت، شینه‌های کاندید برای خازن‌گذاری مشخص می‌شوند.
- ۳) **مقداردهی اولیه خازن‌ها:** نرم‌افزار MATLAB خازن‌ها را بر اساس ظرفیت‌های استاندارد موجود در بازار، به صورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌کند.
- ۴) **انجام پخش بار:** برای تمام سطوح بار، پخش بار هارمونیک انجام شده و نتایج آن ذخیره می‌شود.
- ۵) **محاسبه توابع عضویت فازی و تابع ارزیابی:** با استفاده از نتایج پخش بار، توابع عضویت فازی و تابع شایستگی محاسبه می‌شود.
- ۶) **ذخیره بهترین مقادیر:** در هر مرحله بهترین مقدار تابع ارزیابی و مقادیر و مکان خازن مربوط به آن ذخیره می‌شود.
- ۷) **بررسی همگرایی مسئله:** همگرایی مسئله بررسی شده و در صورت همگرایی، نتایج نمایش داده می‌شود.



شکل ۳: روندنمای پیشنهادی حل مسئله جایابی خازن‌ها.

۴-۴ عضویت تابع شاخص رزونانس پیشنهادی

برای قرارگرفتن در شرایط رزونانس، تابع عضویت شاخص رزونانس (RI_t) برای سطح بار t م به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$RI_t = \max(RI_{i,t}) \quad , \quad \forall i \in N \quad (36)$$

که $RI_{i,t}$ مقدار شاخص رزونانس شینه i در سطح بار t م و RI_t بیشترین شاخص رزونانس در بین شینه‌های شبکه در سطح بار t م می‌باشد. در نتیجه تابع عضویت شاخص رزونانس به صورت زیر خواهد بود

$$\mu RI_t = \begin{cases} 1 & , RI_t \leq RI_{min} \\ \frac{RI_{max} - RI_t}{RI_{max} - RI_{min}} & , RI_{min} < RI_t < RI_{max} \\ 0 & , RI_t \geq RI_{max} \end{cases} \quad (37)$$

جدول ۲: هزینه سالانه خازن‌ها [۲۰].

K_{eff} (\$/kVAr)	Q_p (kVAr)	K_{eff} (\$/kVAr)	Q_p (kVAr)	K_{eff} (\$/kVAr)	Q_p (kVAr)
۰,۱۸۹	۲۵۵۰	۰,۲۰۷	۱۳۵۰	۰,۵	۱۵۰
۰,۱۸۷	۲۷۰۰	۰,۲۰۱	۱۵۰۰	۰,۳۵	۳۰۰
۰,۱۸۳	۲۸۵۰	۰,۱۹۳	۱۶۵۰	۰,۲۵۳	۴۵۰
۰,۱۸	۳۰۰۰	۰,۱۸۷	۱۸۰۰	۰,۲۲	۶۰۰
۰,۱۹۵	۳۱۵۰	۰,۲۱۱	۱۹۵۰	۰,۲۷۶	۷۵۰
۰,۱۷۴	۳۳۰۰	۰,۱۷۶	۲۱۰۰	۰,۱۸۳	۹۰۰
۰,۱۸۸	۳۴۵۰	۰,۱۹۷	۲۲۵۰	۰,۲۲۸	۱۰۵۰
۰,۱۷	۳۶۰۰	۰,۱۷	۲۴۰۰	۰,۱۷	۱۲۰۰

در الگوریتم MSPSO فضای جستجو به چهار زیرذره^۱ از ذرات تقسیم می‌گردد و هر یک از این زیرذره‌ها در تعیین جواب نهایی از طریق به مشارکت گذاشتن اطلاعات خود، نقش خواهند داشت. دو عدد از آنها تحت عنوان زیرذره اصلی S_1 و S_2 به جستجو اختصاص داده شده و دوتای دیگر شامل زیرذره اصلی S_3 ، تحت عنوان تطبیقی و دیگری S_4 و تحت عنوان اکتشافی نام‌گذاری شده‌اند. زیرذره تطبیقی از اطلاعات زیرذره‌های اصلی برای تنظیم مسیر پرواز به صورت تطبیقی استفاده می‌کند و زیرذره اکتشافی نیز از اطلاعات مسیر پرواز زیرذره‌های دیگر برای ایجاد نواحی جدید برای جستجو بهره می‌گیرد. روابط مربوط به زیرذرات در پیوست ب ارائه شده است [۲۳].

۷- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی برای حل مسئله جایابی خازن‌ها در محیط‌های هارمونیک، این الگوریتم در شبکه ۱۸ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها با رایانه شخصی با پردازنده Core ۲ Duo ۲/۵ GHZ و ۴ گیگابایت RAM انجام شده است.

۷-۱ مشخصات شبکه ۱۸ شینه IEEE

در شبکه ۱۸ شینه IEEE مطابق شکل ۴ از میدل‌پالسه در شینه ۵ به عنوان منبع هارمونیک استفاده شده است. این شبکه به طور پیش‌فرض دارای ۱۰ خازن می‌باشد که اطلاعات آن در [۲۴] ارائه شده است. به منظور مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های ارائه‌شده در [۱۴] تا [۱۸] هزینه سالانه خازن‌ها مطابق با جدول ۲ انتخاب شده است. پارامترهای Q_p و K_{eff} ظرفیت خازن‌های استاندارد موجود و هزینه آنها می‌باشد. لازم به ذکر است که مراجع مذکور از روش پخش بار هارمونیک نیوتن-رافسون استفاده کرده‌اند که مشابه روش مورد استفاده در نرم‌افزار DIgSILENT می‌باشد.

همچنین قیود و پارامترهای به کار رفته در شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده است.

۷-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با دیگر روش‌ها- بدون

قید رزونانس

برای مقایسه الگوریتم‌های مختلف با یکدیگر، یک سطح بار برای تمام بارها در بازه زمانی یک سال در نظر گرفته شده است. جدول ۴ مقایسه بین نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی با الگوریتم‌های MSPSO و PSO را با نتایج [۱۴] تا [۱۸] نشان می‌دهد. تمام نتایج با وضعیت شبکه قبل از

جدول ۳: قیود و پارامترهای به کار رفته در شبیه‌سازی.

حداقل ولتاژ (V_{min})	۰,۹ (pu)
حداکثر ولتاژ (V_{max})	۱,۱ (pu)
حداکثر اعوجاج هارمونیک کلی ولتاژ (THD)	۵ (%)
حداکثر شاخص رزونانس مجاز	۵,۲۸
هزینه تلفات انرژی (K_E) [۱۷]	۵۰ (\$/MWh/year)
هزینه‌ها صرفه‌جویی برای کاهش تلفات توان (K_A) [۱۷]	۱۲۰۰۰۰ (\$/MW/year)

۸ اصلاح مقدار خازن‌ها: در صورتی که شرایط همگرایی تعریف‌شده

برای مسئله برقرار نبود، الگوریتم بهینه‌سازی اجرا می‌شود و مقدار خازن‌ها اصلاح می‌گردد. به این صورت که ابتدا سرعت ذرات با استفاده از بهترین موقعیت هر ذره و بهترین موقعیت در بین کل ذرات اصلاح شده و سپس، موقعیت مکانی هر ذره نیز با توجه به سرعت آن ذره تغییر می‌کند. در نهایت مقدار خازن متناظر با موقعیت ذرات مشخص می‌شود. این روند تا همگراشدن پاسخ‌ها تکرار می‌گردد.

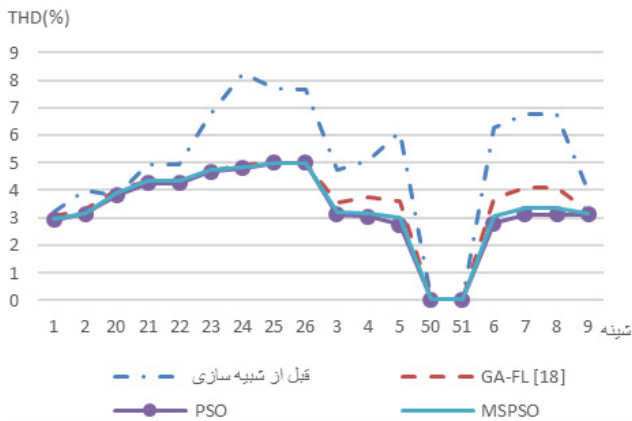
۶- الگوریتم MSPSO

الگوریتم PSO مانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، از عملگرهای تکاملی برای ذرات استفاده می‌کند. در PSO هر ذره در فضای جستجو با سرعت حرکت می‌کند. حرکت ذره به صورت دینامیکی و بر اساس تجربه حرکت این ذره و ذرات دیگر تعیین می‌شود. این حرکت ذرات تا رسیدن به پاسخ بهینه با کمترین مقدار ادامه می‌یابد. روابط مربوط به الگوریتم پایه PSO به صورت زیر می‌باشد [۲۳]

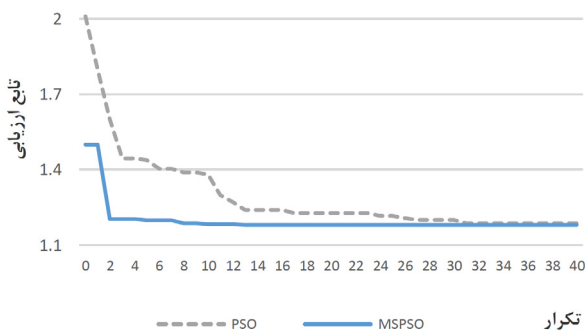
$$V_i(k+1) = \omega V_i(k) + C_1 R_1 [P_i - x_i(k)] + C_2 R_2 [P_g - x_i(k)] \quad (40)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + V_i(k+1) \quad (41)$$

که در این رابطه $V_i(k)$ و $x_i(k)$ به ترتیب مکان و سرعت ذره i ام در تکرار k ام می‌باشد و بنابراین $V_i(k+1)$ سرعت ذره i ام در تکرار $k+1$ خواهد بود. در (۳۹) ضرایب C_1 و C_2 دو عدد مثبت و R_1 و R_2 دو بردار شامل اعداد تصادفی در $[0,1]$ می‌باشند. به همین ترتیب P_i و P_g به ترتیب بهترین مکان ذره i ام و بهترین مکان در کل ذرات می‌باشند. یکی از محدودیت‌های الگوریتم PSO، احتمال گیرافتادن در یک بهینه محلی با توجه به شباهت بین اقدامات بعدی در یک ذره است [۲۳].



شکل ۶: THD شینه‌های شبکه ۱۸ شینه، قبل و پس از شبیه‌سازی با الگوریتم‌های مختلف.



شکل ۷: نمودار همگرایی تابع ارزیابی پیشنهادی با MSPSO و PSO.

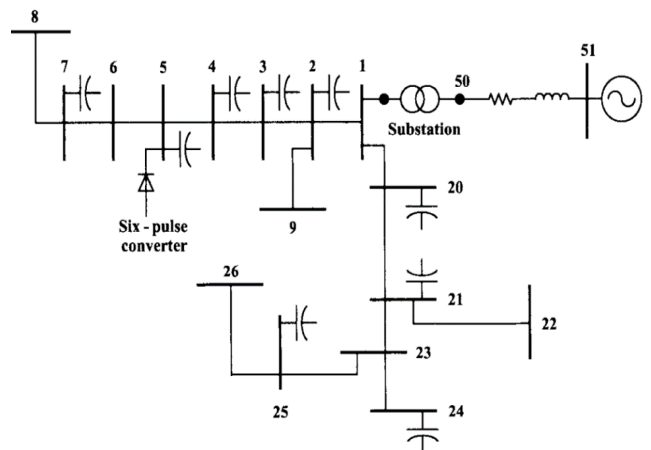
و PSO در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل، سرعت همگرایی الگوریتم MSPSO در مقایسه با PSO بیشتر است.

۳-۷ نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن قید رزونانس

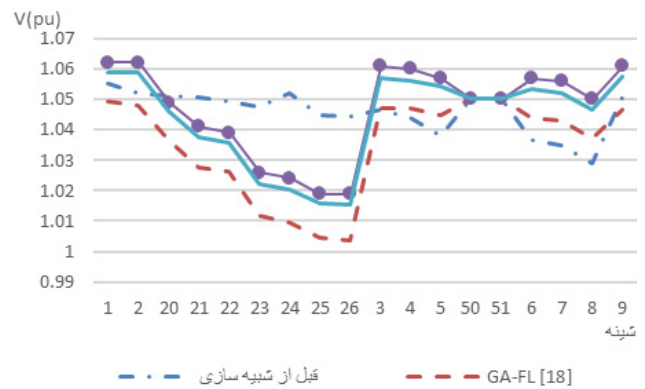
جدول ۵ مقایسه‌ای را بین نتایج قبل از شبیه‌سازی در شبکه پایه، نتایج شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن قید رزونانس و نتایج شبیه‌سازی با قید رزونانس نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن قید رزونانس، در مقایسه با شبیه‌سازی بدون قید رزونانس، سود حاصل در حدود ۵۷۸۸ دلار بر سال کاهش یافته که این کاهش سود، صرف بهبود شاخص رزونانس در شبکه می‌شود به طوری که در شبیه‌سازی بدون قید رزونانس، بیشترین شاخص رزونانس در شبکه ۸/۹ می‌باشد که پس از در نظر گرفتن قید رزونانس به میزان ۳/۷ واحد کمتر شده و به ۵/۲ رسیده است. همچنین پس از شبیه‌سازی، مقدار دامنه ولتاژ و THD در حد مجاز می‌باشد.

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که علی‌رغم این که سود حاصل از جابجایی خازن‌ها در نظر گرفتن شاخص رزونانس در مقایسه با حالت پایه شبکه، مثبت بوده، ولی ممکن است کاهش سود نهایی در مقایسه با زمانی که قید رزونانس در نظر گرفته نشود، مطلوب بهره‌بردار نباشد. در این موارد لازم است از روش‌های دیگر برای بهبود شرایط رزونانس استفاده شود که از جمله این موارد می‌توان به جابجایی بهینه خازن در کنار فیلترهای پسیو در شبکه اشاره کرد.

مقایسه شاخص‌های رزونانس: به منظور بررسی کارایی شاخص رزونانس پیشنهادی، جدول ۶ مقایسه‌ای بین شاخص معرفی شده در این مقاله و شاخص رزونانس [۱۳]، در شبکه پایه (قبل از شبیه‌سازی) انجام داده است. در اینجا RI_{max} برای هر دو هارمونیک پنجم و هفتم یکسان در نظر گرفته شده است اگرچه می‌توان برای هر هارمونیک، مقدار



شکل ۴: دیاگرام تک‌خطی شبکه ۱۸ شینه IEEE [۲۴].



شکل ۵: ولتاژ شینه‌های شبکه ۱۸ شینه، قبل و پس از شبیه‌سازی با الگوریتم‌های مختلف.

شبیه‌سازی مقایسه شده است. لازم به ذکر است که برای پیاده‌سازی هر یک از الگوریتم‌ها، در ابتدا مقدار خازن‌هایی که قبل از شبیه‌سازی در شبکه وجود دارند حذف می‌شوند و شبیه‌سازی با خازن‌های بهینه‌شده در این شینه‌ها انجام می‌شود.

با توجه به جدول ۴، در شبیه‌سازی روش پیشنهادی با الگوریتم PSO، اگرچه مقدار خازن افزوده شده به شبکه و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر نظیر GA-FL [۱۸] افزایش یافته، اما به دلیل کاهش تلفات، مجموع هزینه‌ها کاهش یافته و سود حاصل نیز بیشتر شده است. همچنین میزان تلفات شبکه پس از پیاده‌سازی روش پیشنهادی با الگوریتم MSPSO، در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر از جمله GA-FL [۱۸] در حدود ۱/۷ کیلووات کمتر می‌باشد به طوری که سود حاصل از روش MSPSO در مقایسه با GA-FL [۱۸] در حدود ۹۳۸ دلار بر سال و در مقایسه با PSO در حدود ۱۳۹ دلار بر سال بیشتر است.

شکل ۵ سطوح ولتاژ شینه‌های شبکه ۱۸ شینه، قبل و پس از شبیه‌سازی با الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، سطح ولتاژ تمام شینه‌ها پس از شبیه‌سازی در بازه استاندارد قرار دارند.

شکل ۶ THD شینه‌های شبکه ۱۸ شینه، قبل و پس از شبیه‌سازی با الگوریتم‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده است. همان طور که مشاهده می‌شود قبل از شبیه‌سازی، اعوجاج هارمونیک ولتاژ شینه‌های ۵، ۶، ۷، ۸، ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۶ از حد استاندارد (۵٪) فراتر رفته که پس از شبیه‌سازی این مقادیر به شدت کاهش یافته است.

نمودار همگرایی روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های MSPSO

جدول ۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم‌های مختلف.

مقدار خازن هر شینه در شبیه‌سازی‌های مختلف (MVar)							قبل از شبیه‌سازی	شماره شینه خازن گذاری
Proposed MSPSO	Proposed PSO	[۱۸] GA-FL	[۱۷] GA	[۱۶] Fuzzy	[۱۵] MSS-LV	[۱۴] MSS		
۱٫۶۵	۱٫۸	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۱۵	۱٫۲	۰٫۳	۱٫۰۵	۲
۰٫۴۵	۰٫۹	.	.	۰٫۳	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۶	۳
۰٫۹	۰٫۹	۱٫۹۵	۱٫۶۵	۰٫۶	۱٫۸	۱٫۸	۰٫۶	۴
۳٫۳	۲٫۸۵	۳	۳٫۳	۲٫۴	۲٫۴	۲٫۴	۱٫۸	۵
۰٫۹	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۱٫۰۵	۲٫۱	۱٫۲	۱٫۲	۰٫۶	۷
۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۶	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۶	۲۰
۰٫۶	۰٫۶	۰٫۷۵	۰٫۹	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۲	۲۱
۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۵	.	.	.	۱٫۵	۲۴
۰٫۳	۰٫۳	۰٫۱۵	۰٫۱۵	.	.	۰٫۳	۰٫۹	۲۵
.	۰٫۹	.	۰٫۳	.	.	.	۱٫۲	۵۰
۹٫۱۵	۱۰٫۳۵	۸٫۲۵	۸٫۴	۷٫۶۵	۹٫۳	۹	۱۰٫۰۵	مجموع خازن (MVar)
۱٫۰۱۵	۱٫۰۱۹	۱٫۰۰۵	۱٫۰۰۳	۰٫۹۹۸	۱٫۰۱۳	۱٫۰۱۶	۱٫۰۲۹	V_{min} (pu)
۱٫۰۵۹	۱٫۰۶۲	۱٫۰۵۰	۱٫۰۵۰	۱٫۰۵۰	۱٫۰۵۹	۱٫۰۵۶	۱٫۰۵۵	V_{max} (pu)
۵٫۰	۴٫۹۹	۴٫۹۸۲	۴٫۸۸۳	۴٫۸۹۹	۴٫۷۲	۶٫۳۷	۸٫۴۸۶	THD_{max} (%)
۲۴۶٫۵۱	۲۴۶٫۳	۲۴۸٫۱۸	۲۴۹٫۳۱	۲۵۷٫۴۶	۲۵۰٫۳۷	۲۴۶٫۴۳	۲۸۲٫۹۳	P_{loss} (kW)
۱۴۱٫۳	۲۶۹	-	۲۷۸۰	۴۸	۱۴۱	۹۶	-	زمان اجرا (s)
۱۸۱۲٫۶	۲۰۶۸٫۳	۱۸۱۷٫۵۵	۱۷۸۸٫۷۵	۱۴۵۸٫۳	۲۲۰۶٫۸	۱۶۹۲٫۰	۱۹۷۸٫۲۰	هزینه خازن‌ها (\$)
۱۳۹۳۶۵	۱۳۹۵۰۴	۱۴۰۳۰۳	۱۴۰۹۰۴	۱۴۵۱۲۱	۱۴۱۹۱۳	۱۳۹۲۰۰	۱۵۹۸۵۳	مجموع هزینه (\$)
۲۰۴۸۸	۲۰۳۴۹	۱۹۵۵۰	۱۸۹۴۹	۱۴۷۳۲	۱۷۹۴۰	۲۰۶۵۳	-	سود حاصل (\$)

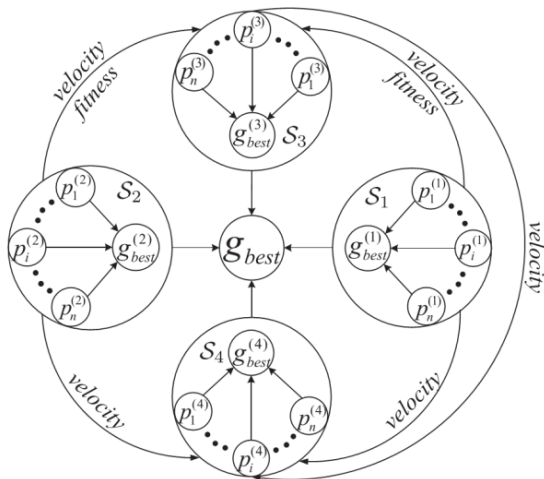
جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی با و بدون در نظر گرفتن قید رزونانس.

مقدار خازن هر شینه در شبیه‌سازی‌های مختلف (MVar)		قبل از شبیه‌سازی	شماره شینه خازن گذاری
Proposed MSPSO بدون قید رزونانس	Proposed MSPSO با قید رزونانس		
۱٫۹۵	۱٫۶۵	۱٫۰۵	۲
.	۰٫۴۵	۰٫۶	۳
۱٫۵	۰٫۹	۰٫۶	۴
۲٫۱	۳٫۳	۱٫۸	۵
۱٫۰۵	۰٫۹	۰٫۶	۷
۱٫۸	۰٫۹	۰٫۶	۲۰
.	۰٫۶	۱٫۲	۲۱
۰٫۱۵	۰٫۱۵	۱٫۵	۲۴
.	۰٫۳	۰٫۹	۲۵
۲٫۵۵	.	۱٫۲	۵۰
۱۱٫۱	۹٫۱۵	۱۰٫۰۵	مجموع خازن (مگاوار)
۱٫۰۰۲	۱٫۰۱۵	۱٫۰۲۹	V_{min} (pu)
۱٫۰۵۳	۱٫۰۵۹	۱٫۰۵۵	V_{max} (pu)
۴٫۸	۵٫۰	۸٫۴۸۶	THD_{max} (%)
۲۵۶٫۱۶	۲۴۶٫۵۱	۲۸۲٫۹۳	P_{loss} (kW)
۵٫۲	۸٫۹	۷٫۶	max RI
۵۹۰	۱۴۱	-	زمان اجرا (ثانیه)
۲۲۱۵٫۵	۱۸۱۲٫۶	۱۹۷۸٫۲۰	هزینه خازن‌ها (\$/year)
۱۴۵۱۵۲٫۷۸	۱۳۹۳۶۵٫۱۸	۱۵۹۸۵۳٫۱۴	مجموع هزینه (\$/year)
۱۴۷۰۰٫۳۶	۲۰۴۸۷٫۹۶	-	سود حاصل (\$/year)

RI_{max} جداگانه در نظر گرفت.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط یکسان، بر اساس شاخص رزونانس پیشنهادی، احتمال رزونانس در شینه‌هایی از شبکه وجود دارد در حالی که شاخص [۱۳]، این احتمال را پیش‌بینی نمی‌کند. به عبارت دیگر، علی‌رغم این که بیشترین مقدار RI در بین شینه‌های شبکه برای هر دو شاخص تقریباً یکسان است ولی بیشترین شاخص رزونانس مجاز

نتایج نشان می‌دهد که مقدار RI پیشنهادی در شینه‌های ۴، ۵ و ۷ برای هارمونیک هفتم بیشتر از مقدار مجاز (۵/۲۸) می‌باشد و این در حالی است که مقدار RI [۱۳] برای هارمونیک‌های ۵ و ۷ در تمام شینه‌های ۲۳ کیلوولت خازن گذاری شده کمتر از مقدار مجاز آن (۲۹/۲۲) است.



شکل ۸: ساختار MSPSO دارای چهار زیرذره [۲۳].

مقدار یک در نظر می‌گیریم. به طور مشابه $y_{max} = 0.1$ به معنای حداقل ولتاژ سیستم برابر با ۰.۹ (و حداکثر آن ۱/۰۵) پریونیت می‌باشد که در صورتی که ولتاژ از این مقدار کوچک‌تر گردد، تابع عضویت با مقدار صفر در نظر گرفته می‌شود.

پ-۱-۳ تابع عضویت برای حداکثر اعوجاج کلی هارمونیک ولتاژ در هر گره

مقادیر THD_{min} و THD_{max} با توجه به استاندارد ۵۱۹ IEEE Std [۲۲] به ترتیب برابر با ۰.۰۳ و ۰.۰۵ در نظر گرفته شده است.

پ-۲ روابط الگوریتم MSPSO

بر اساس شکل ۸ در الگوریتم MSPSO، مسیرهای S_1 و S_2 به صورت زیر به روز رسانی می‌گردند [۲۳]

$$V_i^{(t)(\tau)}(k+1) = \omega V_i^{(t)(\tau)}(k) + C_1 R_1 [P_i^{(t)(\tau)} - X_i^{(t)(\tau)}(k)] + C_2 R_2 [P_g - X_i^{(t)(\tau)}(k)] \quad (1-p)$$

که اندیس n در $V_i^n(k)$ و $X_i^n(k)$ ، مربوط به دو زیرذره اصلی ۱ و ۲ می‌باشد. در زیرذره S_2 ، سرعت ذره i ام به کمک (۴۲) به روز رسانی می‌گردد و در این به روز رسانی از مقادیر شایستگی دو زیرذره اصلی استفاده می‌شود [۲۳]

$$V_i^{(\tau)}(k+1) = \omega \left[\frac{\lambda}{\lambda} V_i^{(1)}(k+1) + \frac{\lambda}{\lambda} V_i^{(\tau)}(k+1) + V_i^{(\tau)}(k) \right] + C_1 R_1 [P_i^{(\tau)} - X_i^{(\tau)}(k)] + C_2 R_2 [P_g - X_i^{(\tau)}(k)] \quad (2-p)$$

که λ_1 و λ_2 به ترتیب مقادیر شایستگی ذرات در زیرذرات S_1 و S_2 ، λ برابر با مجموع دو مقدار λ_1 و λ_2 و R_1 و R_2 نیز بردارهای مقادیر تصادفی در $[0, 1]$ می‌باشند. سرعت ذره i ام در زیرذره S_2 برابر است با

$$V_i^{(\tau)}(k+1) = V_i^{(1)}(k+1) + V_i^{(\tau)}(k+1) - V_i^{(\tau)}(k+1) \quad (3-p)$$

همچنین برای بهبود توانایی جستجو، مکان ذره i ام در S_2 به صورت زیر تغییر داده می‌شود

$$X_i^{(\tau)}(k+1) = \alpha_i X_i^{(\tau)}(k) + \alpha_\tau P_i^{(\tau)} + \alpha_\tau P_g + V_i^{(\tau)}(k+1) \quad (4-p)$$

که در این رابطه، مجموع ضرایب α_i برابر با ۱ می‌باشد [۲۳].

جدول ۶: مقایسه شاخص RI [۱۳] و RI پیشنهادی برای هارمونیک‌های ۵ و ۷.

Proposed RI	[۱۳] RI		خازن نصب شده (MVar)	شماره شینه خازن گذاری
	RI_v	RI_s		
۲,۴۲	۱,۱۹	۵,۷۶	۴,۹	۲
۴,۶۱	۱,۶	۵,۴۳	۵,۰۶	۳
۵,۶	۱,۸۹	۴,۹۷	۵,۱۵	۴
۷,۶۲	۲,۷۶	۳,۹۴	۶,۲۹	۵
۶,۲۲	۳,۱۶	۳,۸۳	۵,۶۷	۷
۰,۶۴	۱,۴۶	۷,۱۶	۴,۶۹	۲۰
۰,۸۳	۱,۴	۶,۲۹	۴,۲۶	۲۱
۴,۳۴	۰,۸۱	۲,۸۸	۵,۰۲	۲۴
۳,۰۹	۰,۸۴	۳,۶	۵,۱۴	۲۵
۵,۲۸	۲۹,۲۲	(RI_{max}) مجاز		

(RI_{max}) برای شاخص رزونانس پیشنهادی (برابر با ۵,۲۸) به مراتب کمتر از بیشترین شاخص رزونانس مجاز برای شاخص [۱۳] (برابر با ۲۹,۲۲) می‌باشد. لذا می‌توان گفت که حد ماکسیمم شاخص رزونانس پیشنهادی کمتر بوده و این به معنای سخت‌گیرانه بودن این شاخص در مقایسه با شاخص دیگر می‌باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی برای جابجایی خازن‌ها در محیط‌های هارمونیکی پیشنهاد شد که علاوه بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تلفات و قیود دامنه و THD ولتاژ، شاخص رزونانس جدیدی نیز در مسئله جابجایی در نظر گرفته شده است. سپس روش پیشنهادی با الگوریتم MSPSO بر روی شبکه ۱۸ شینه IEEE اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که بدون در نظر گرفتن قید رزونانس، شاخص رزونانس در شینه‌هایی از شبکه بیشتر از حد مجاز می‌باشد که احتمال بروز رزونانس در این شینه‌ها را افزایش می‌دهد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بدون و با در نظر گرفتن قید رزونانس نشان می‌دهد که افزودن قید رزونانس به شبکه می‌تواند هزینه‌های خازن گذاری را افزایش دهد. این افزایش هزینه، صرف کاهش شاخص رزونانس و در نتیجه کاهش احتمال رزونانس در شینه‌های شبکه می‌شود.

پیوست

پ-۱ مقادیر پارامترهای توابع عضویت فازی

پ-۱-۱ تابع عضویت برای صرفه‌جویی اقتصادی

در این مقاله، مقادیر x_{min} و x_{max} به ترتیب برابر با ۰.۵ و ۱ در نظر گرفته شده که مقدار $x_{min} = 0.5$ به این معناست که میزان صرفه‌جویی برابر با ۵۰٪ و یا بیشتر بوده و تابع عضویت دارای مقدار یک است. همچنین $x_{max} = 1$ به معنی صفر بودن تابع عضویت است که در صورت صفر یا منفی بودن سود حاصل، ایجاد می‌گردد [۲۵].

پ-۱-۲ تابع عضویت برای حداکثر انحراف در ولتاژ گره

مقادیر y_{min} و y_{max} به ترتیب برابر با ۰.۵ و ۰.۱ در نظر گرفته شده که مقدار $y_{min} = 0.5$ به این معناست که در صورتی که ولتاژ شینه اصلی برابر با یک پریونیت باشد، آن گاه حداقل ولتاژ شبکه بایستی برابر با ۰.۹۵ (و حداکثر آن بایستی ۱/۰۵) پریونیت باشد. در صورتی که حداقل ولتاژ شبکه نیز بزرگ‌تر یا مساوی ۰.۹۵ پریونیت باشد تابع عضویت را با

مراجع

- [16] M. A. 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 Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 822-829, Apr. 2004.
- [17] M. A. 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 Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1794-1801, Oct. 2004.
- [18] M. Ladjevardi and M. A. Masoum, "Genetically optimized fuzzy placement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 1, pp. 449-456, Dec. 2008.
- [19] J. J. Liang and P. N. Suganthan, "Dynamic multi-swarm particle swarm optimizer," in *Proc. IEEE Swarm Intelligence Symp., SIS'05*, 6 pp., Aug. 2005.
- [20] E. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Academic Press, 2011.
- [21] IEEE Power Energy Society, *IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors*, 2010.
- [22] IEEE Power Energy Society, *IEEE 519: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, 2014.
- [23] N. J. Cheung, X. M. Ding, and H. B. Shen, "OptiFel: a convergent heterogeneous particle swarm optimization algorithm for takagi-sugeno fuzzy modeling," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 919-933, Aug. 2014.
- [24] W. M. Grady, M. J. Samoty, and A. H. Noyola, "The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 3, pp. 1379-1386, Jul. 1992.
- [25] H. Mohkami, R. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Fuzzy optimal placement of capacitors in the presence of nonlinear loads in unbalanced distribution networks using BF-PSO algorithm," *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 4, pp. 3634-3642, Jun. 2011.
- مسعود ایوبی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ در دانشگاه‌های صنعتی اصفهان و اصفهان به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع، کاربرد هوش مصنوعی در صنعت برق، کیفیت توان و انرژی‌های تجدیدپذیر.
- رحمت‌الله هوشمند** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۰ از دانشگاه فردوسی مشهد و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق - قدرت در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده فنی مهندسی دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره برداری از سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع، کاربرد سیستم‌های هوشمند در مسائل بهینه‌سازی، و سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته.
- مهدی ترابیان اصفهانی** مقطع دکتری خود را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه امیر کبیر به پایان رسانده است. او هم‌اکنون استادیار دانشگاه شهید اشرفی اصفهانی بوده و با شرکت برق منطقه‌ای اصفهان همکاری می‌نماید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل مطالعات سیستم قدرت، کیفیت توان، حالت گذرا، کاربرد هوش مصنوعی در صنعت برق می‌باشد.
- [1] A. Askarzadeh, "Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: a new methodology," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 14, pp. 1-8, Oct. 2016.
- [2] A. R. AbulWafa, "Optimal capacitor placement for enhancing voltage stability in distribution systems using analytical algorithm and fuzzy-real coded GA," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 246-252, Feb. 2014.
- [3] M. Mukherjee and S. K. Goswami, "Solving capacitor placement problem considering uncertainty in load variation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 90-94, Nov. 2014.
- [4] A. Kavousi Fard and T. Niknam, "Optimal stochastic capacitor placement problem from the reliability and cost views using firefly algorithm," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 260-269, Sep. 2014.
- [5] H. S. Ramadan, A. F. Bendary, and S. Nagy, "Particle swarm optimization algorithm for capacitor allocation problem in distribution systems with wind turbine generators," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 84, pp. 143-152, Jan. 2017.
- [6] M. H. Moradi, A. Zeinalzadeh, Y. Mohammadi, and M. Abedini, "An efficient hybrid method for solving the optimal siting and sizing problem of DG and shunt capacitor banks simultaneously based on imperialist competitive algorithm and genetic algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 101-111, Jan. 2014.
- [7] K. Muthukumar and S. Jayalalitha, "Integrated approach of network reconfiguration with distributed generation and shunt capacitors placement for power loss minimization in radial distribution networks," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 52, pp. 1262-1284, Mar. 2017.
- [8] J. Vuletic and M. Todorovski, "Optimal capacitor placement in distorted distribution networks with different load models using penalty free genetic algorithm," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, pp. 174-182, Jun. 2016.
- [9] M. S. Javadi, A. Esmaeel Nezhad, P. Siano, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalao, "Shunt capacitor placement in radial distribution networks considering switching transients decision making approach," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 92, pp. 167-180, Nov. 2017.
- [10] F. Sayadi, S. Esmaeili, and F. Keynia, "Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 10, pp. 2316-2326, Jul. 2016.
- [11] J. Cabral, I. Perez, and S. Manoel, "Capacitor and passive filter placement in distribution systems by nondominated sorting genetic algorithm-II," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 143, pp. 482-489, Feb. 2017.
- [12] S. Segura, L. C. da Silva, R. Romero, and D. Salles, "Strategic capacitor placement in distribution systems by minimisation of harmonics amplification because of resonance," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 7, pp. 646-656, Jul. 2012.
- [13] Z. Huang, W. Xu, and V. R. Dinavahi, "A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 4, pp. 1382-1387, Oct. 2003.
- [14] M. A. Masoum, M. Ladjevardi, E. F. Fuchs, and W. M. Grady, "Optimal placement and sizing of fixed and switched capacitor banks under nonsinusoidal operating conditions," *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet.*, vol. 2, pp. 807-813, Jul. 2002.
- [15] M. A. Masoum, M. Ladjevardi, E. F. Fuchs, and W. M. Grady, "Application of local variations and maximum sensitivities selection for optimal placement of shunt capacitor banks under nonsinusoidal operating conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 26, no. 10, pp. 761-769, Dec. 2004.