

Optimization of Smart Distribution Networks Using FACTS Devices by the Novel GA-PSO Hybrid Algorithm

Mohsen Zangane¹, Mahmoud Samiei Moghaddam^{2,*}, Azita Azarfar¹, Mojtaba Vahedi¹, Nasrin Salehi³

1 Department of Electrical Engineering, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

2- Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran
Samiei352@yahoo.com, (Corresponding author)

3- Department of Basic Sciences, Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

Abstract

This paper presents a model for distribution network optimization considering a high penetration of photovoltaic (PV) sources and electric vehicle charging stations (EVCSs) based on on-load tap changing transformers (OLTC) and step voltage regulator (SVR), shunt capacitor (SC), and shunt reactor (ShR). The purpose is to prevent overvoltage due to power injection by PV sources and voltage drop due to EV charging in distribution networks. The proposed model is solved using a new hybrid algorithm called PSO-GA. Relevant studies show that with the increasing number of PSO replications, particle population variability is easily eliminated and placed in local optimization. The idea of combining GA is based on the PSO introduced in this study. Crossover and mutations of GA are performed on the PSO population, which is useful for improving the overall optimal ability of particles and causing the algorithm to deviate from the local optimal point. Two different IEEE standard test networks are tested under different load scenarios to analyze the proposed model. The results reveal the performance of the proposed model.

Keywords:

Distribution network, photovoltaic, electric vehicle charging station, evolutionary algorithm, optimization.

Submit date: 2022/08/09

Accepted date: 2023/02/27

Corresponding author Name: Mahmoud Samiei Moghaddam

Corresponding author address: Department of Electrical engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع هوشمند با استفاده از ادوات FACTS توسط الگوریتم ترکیبی جدید GA-PSO

محسن زنگانه^۱، دانشجو دکتری، محمود سمیعی مقدم^{۲*}، استادیار، آزیتا آذر فر^۱، استادیار، مجتبی واحدی^۱، استادیار، نسرين صالحی^۳،
دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

۳- دانشکده علوم پایه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده: در این مقاله مدلی برای بهینه‌سازی شبکه توزیع با در نظر گرفتن نفوذ بالای منابع فتوولتائیک (PV) و ایستگاه شارژ وسایل نقلیه الکتریکی (EVCSs) بر اساس ترانسفورماتورهای تغییر تپ (OLTC) و تنظیم‌کننده ولتاژ پله (SVR)، خازن شنت (SC) و راکتور شنت (ShR) ارائه می‌کند. هدف در نظر گرفته شده جلوگیری از اضافه ولتاژ ناشی از تزریق توان توسط منابع PV و افت ولتاژ ناشی از شارژ EV در شبکه‌های توزیع می‌باشد. مدل پیشنهادی با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی جدید بنام PSO-GA حل می‌شود. مطالعات مربوطه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تکرارهای PSO، تنوع جمعیت ذرات به راحتی از بین می‌رود و در یک بهینه محلی قرار می‌گیرد. ایده ترکیب GA بر اساس PSO معرفی شده در این مطالعه، عملیات متقاطع و جهش GA روی جمعیت PSO انجام می‌شود که برای بهبود توانایی بهینه سراسری ذرات مفید و باعث می‌شود الگوریتم از نقطه بهینه محلی خارج شود. دو شبکه آزمایشی استاندارد IEEE مختلف تحت سناریوهای بار متفاوت برای تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی مورد آزمایش قرار گرفته است که کارایی مدل پیشنهادی را آشکار می‌کند.

واژه های کلیدی: کنترل ولتاژ شبکه توزیع، فتوولتائیک، ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی، الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دامغان-بلوار چشمه علی-دانشگاه آزاد دامغان

لغتنامه

پارامترها

مقدار ضرایب وزنی برای تابع انحراف ولتاژ و تلفات.	ω_v, ω_p
حداقل و حداکثر توان تزریقی توسط خازن شنت در باس \bar{A}_m .	$q_{i,min}^{SC}, q_{i,max}^{SC}$
حداقل و حداکثر توان دریافتی توسط راکتور شنت در باس \bar{A}_m .	$q_{i,min}^{ShR}, q_{i,max}^{ShR}$
حداقل و حداکثر تپ ترانس OLTC در باس \bar{A}_m . در اینجا \bar{A}_m برابر با باس مرجع می‌باشد.	$T_{i,min}^{oltc}, T_{i,max}^{oltc}$
حداقل و حداکثر نسبت تپ تنظیم‌کننده ولتاژ SVR در خط ij شبکه توزیع.	$T_{ij,min}^{svr}, T_{ij,max}^{svr}$
حداقل و حداکثر ولتاژ باس \bar{A}_m شبکه توزیع.	v_i^{min}, v_i^{max}
توان حقیقی منبع PV در باس \bar{A}_m .	p_i^{pv}
توان اکتیو و راکتیو بار در باس \bar{A}_m شبکه توزیع.	p_i^d, q_i^d
توان ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی در باس \bar{A}_m .	p_i^{ev}
امپدانس سری شاخه ij	z_{ij}
حداکثر تعداد تغییرات تپ OLTC.	u
تابع توزیع PV و ایستگاه‌های شارژ خودرو برقی.	$\sigma_{\Omega}^{pv}, \sigma_{\Omega}^{ev}$
ضریب جریمه.	ϕ_k
تعداد تکرار در الگوریتم PSO.	k
ضریب وزنی در الگوریتم PSO.	w
فاکتور آموزش مولفه جمعی.	c_1
فاکتور آموزش مولفه فردی.	c_2
اعداد تصادفی بین صفر و یک.	r_1, r_2
فضای جستجو.	SS

متغیرها

اندازه دامنه ولتاژ باس \bar{A}_m .	v_i
اندازه زاویه ولتاژ باس \bar{A}_m .	δ_i
تلفات حقیقی و راکتیو خط ij .	p_{ij}^l, q_{ij}^l
توان راکتیو تزریقی خازن شنت در باس \bar{A}_m .	q_i^{SC}
توان راکتیو دریافتی راکتور شنت در باس \bar{A}_m .	q_i^{ShR}
اندازه تپ OLTC.	T_i^{oltc}
اندازه تپ تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای SVR.	T_j^{svr}
توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس \bar{A}_m .	p_i, q_i
جریان خط ij .	I_{ij}
متغیر باینری برای وضعیت خازن و راکتور سنت.	$\alpha_{\Omega}^{SC}, \alpha_{\Omega}^{ShR}$
متغیر باینری برای تعداد تغییرات تپ OLTC.	α_{Ω}^{oltc}
جریان گره \bar{A}_m .	I_i
بعد m بهترین ذره n در جمعیت در تکرار k .	D_{mn}^k
بعد m موقعیت ذره n در تکرار k .	X_{mn}^k
بعد m سرعت ذره n در تکرار k .	V_{mn}^k
بعد m بهترین موقعیت ذره n تا تکرار k .	P_{mn}^k

مجموعه و شاخص

مجموعه باس‌های شبکه.	\mathcal{N}
مجموعه خطوط شبکه.	\mathcal{B}
شاخص شمارش خط.	ij
شاخص شمارش باس (ارسالی)	i
شاخص شمارش باس (دریافتی)	j
شاخص سناریو	Ω

۱- مقدمه

در شبکه‌های برق آینده، ولتاژ شبکه‌های توزیع به دلیل افزایش نفوذ منابع فتوولتائیک (PV) و ایستگاه‌های شارژ و سایل نقلیه الکتریکی (EVCS) دستخوش تغییرات متعددی می‌شود. تزریق توان توسط منابع PV نیز ممکن است ولتاژ باس این شبکه‌ها را افزایش دهد، علاوه بر این، در باسی که EVCS قرار دارد ممکن است افت ولتاژ را تجربه کند. از این رو، در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی برای کاهش انحراف ولتاژ شبکه در حضور منابع PV و EVCS پیشنهاد شده است. از آنجایی که توان تزریق شده توسط منابع PV توسط تابش خورشید و عواملی مثل دما و حرارت تعیین می‌شود و توان شارژ EVCS توسط صاحبان خودرو، کنترل متمرکز هم‌ماهنگ با منابع PV و EVCS یا استفاده از جبران‌کننده‌ها برای کاهش انحراف ولتاژ و به حداقل رساندن اتلاف انرژی توصیه شده است. در این مقاله به‌جود ولتاژ و تلفات سیستم توزیع با در نظر گرفتن خازن (SC) و راکتور شنت (ShR)، تراز سفورماتورهای تغییردهنده (OLTC) و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ پله‌ای (SVR) با در نظر گرفتن سطوح مختلف نفوذ منابع PV و EVCS و سطح بار شبکه با استفاده از یک الگوریتم تکاملی ترکیبی جدید بنام PSO-GA که اخیراً معرفی شده است پیشنهاد می‌شود.

۱-۱- مرور ادبیات

مروری بر مقالات قبلی در مورد کنترل ولتاژ شبکه توزیع در این بخش ارائه می‌شود. به طور کلی، راه‌حل‌های عملی برای بهبود ولتاژ شبکه توزیع شامل تخصیص منابع تولید پراکنده (DG)، تخصیص جبران‌کننده‌های توان راکتیو، پیکربندی مجدد شبکه یا بازآرایی و کنترل تپ ترانسفورماتورها و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ می‌باشد. در (Sultana et al., 2016) بهینه‌سازی اندازه و مکان منابع DG در شبکه‌های توزیع را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاک‌ستری برای کاهش انحراف ولتاژ و تلفات توان در شبکه‌های توزیع پیشنهاد کردند. در (Jamil et al., 2016)، مکان بهینه و اندازه PV برای دو سیستم مختلف IEEE برای بهبود ولتاژ و کاهش تلفات شبکه توزیع تعیین شده است. در (Kim, 2018)، ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی با منابع PV از طریق تجزیه و تحلیل حساسیت برای کاهش یک تابع چند هدفه، انحراف ولتاژ، هزینه‌های عملیاتی و تلفات تعیین شده است. در (Yong et al., 2017) طراحی و توسعه یک مدل پایه سه فاز از شارژ وسایل نقلیه الکتریکی را برای تنظیم ولتاژ در شبکه‌های توزیع پیشنهاد کردند. در (Karimianfard & Haghghat, 2019)، شاخصی برای بهینه‌سازی مکان منابع DG و جبران‌کننده‌های توان راکتیو (خازن‌ها) در شبکه‌های توزیع در مقیاس بزرگ به منظور کاهش تلفات و به‌جود مشخصات ولتاژ پیشنهاد شده است. در

(Chamana & Chowdhury, 2018) یک بهره‌برداری چند مرحله‌ای مبتنی بر ترانسفورماتورهای OLTC آبشاری، بانک‌های خازن و SVR در حضور منابع PV پیشنهاد شده است، همچنین الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی برای تنظیم شبکه توزیع ولتاژ پیشنهاد شده است. در (Elkhatib et al., 2010) یک بهینه‌سازی خطی عدد صحیح برای کنترل بهینه تنظیم‌کننده‌های ولتاژ پیشنهاد شده است که تنظیم فیدرهای توزیع متعددی را که دارای بارهای متنوع با استفاده از آنها یک تنظیم‌کننده هستند، ممکن می‌سازد. در (Augugliaro et al., 2014) یک الگوریتم اکتشافی مبتنی بر GA و مجموعه فازی برای کنترل بهینه بانک‌های SC و تعویض‌کننده‌های فشار زیر بار (ULTC) واقع در پست‌های ولتاژ بالا (HV) و ولتاژ متوسط (MV) برای به حداقل رساندن تلفات و افت ولتاژ پیشنهاد شد. در (Giannitrapani et al., 2017) مکان‌ها، اندازه‌ها و تعداد سیستم‌های ذخیره انرژی (ESS) بهینه برای کنترل ولتاژ بهینه در سیستم‌های توزیع ولتاژ پایین (LV) توسط الگوریتم خوشه‌بندی و تحلیل حساسیت (CSA) پیشنهاد شده است. در (Senjyu et al., 2008) الگوریتم GA را برای کنترل ولتاژ توزیع بهینه با هماهنگی کنترل شیر LRT و SVR و راکتور شنت (ShR) پیشنهاد کردند. در (Agalgaonkar et al., 2014) کنترل ولتاژ توزیع بهینه را با در نظر گرفتن تأثیر PV و OLTC و تنظیم‌کننده‌های مستقل برای به حداقل رساندن تعداد عملیات تپ پیشنهاد شده است. در (Bedawy et al., 2020) نویسندگان یک استراتژی کنترل موثر برای تنظیم‌کننده‌های ولتاژ در سیستم توزیع نامتعادل بر اساس حساسیت ولتاژ با استفاده از معماری سیستم چند عاملی با در نظر گرفتن منابع PV پیشنهاد کرده‌اند. در (Abad & Ma, 2021) یک استراتژی عملیاتی مبتنی بر قابلیت‌های کنترل توان اکتیو و راکتیو سیستم‌های PV و تعویض بار روی بار ترانسفورماتورها در فیدرهای توزیع ولتاژ پایین برای تعیین قابلیت‌های کنترل ولتاژ پیشنهاد شده است. در (Guo et al., 2020) یک طرح کنترل ولتاژ هماهنگ در مقیاس زمانی دوگانه در سیستم‌های توزیع با ژنراتورهای توزیع شده بر اساس کنترل پیش‌بینی به عنوان یک برنامه-ریزی درجه دوم اعداد صحیح مختلط برای تنظیم مشخصات ولتاژ در سراسر یک شبکه پیشنهاد شده است. در (Ranamuka et al., 2020) یک سیستم کنترل جریان برق متناوب انعطاف‌پذیر برای کنترل منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی باتری برای به‌جود ولتاژ سیستم توزیع ولتاژ متوسط پیشنهاد شد. در (Mahmoud et al., 2020) نویسندگان یک روش کنترل ولتاژ چند هدفه را برای شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن تعداد تغییر تپ ترانسفورماتور و کاهش توان واقعی منابع PV با استفاده از الگوریتم گرگ خاک‌ستری پیشنهاد کردند. در (Liu et al., 2019) یک روش بهینه‌سازی کاملاً توزیع شده برای به حداقل رساندن هزینه کل تلفات توان اکتیو و انحراف ولتاژ با در نظر گرفتن منابع PV، جبران‌کننده‌های توان راکتیو و تنظیم-

مدل الگوریتم ترکیبی پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌های قبلی سرعت و دقت بالاتری دارد.

۲- از نظر مدل‌سازی، ارائه مدل‌سازی شبکه توزیع با در نظر گرفتن یک تابع چندهدفه شامل کاهش تلفات توان و انحراف ولتاژ با در نظر گرفتن نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر PV و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به همراه ادواتی FACTS شامل ترانس تغییر تپ ترانس OLTC، تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای SVR و همچنین جبران‌کننده‌های توان راکتیو خازن و راکتور شنت.

۳-۱- سازماندهی مقاله

در بخش بعدی مدل‌سازی پیشنهادی ارائه شده و سپس الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شده نیز تشریح می‌شود. در بخش سوم سیستم‌های استاندارد در نظر گرفته شده معرفی و نتایج شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شود و در بخش نهایی نتیجه گیری از مقاله ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی و الگوریتم پیشنهادی

در این بخش ابتدا مدل‌سازی پیشنهادی شامل توابع هدف و قیود مرتبط با مسئله ارائه شده و در آخر الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود.

۱-۲- مدل‌سازی پیشنهادی

معادلات (۱) الی (۱۸) نشان‌دهنده مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در نظر گرفته شده می‌باشد. مدل پخش بار در نظر گرفته شده بر اساس مدل پخش بار AC نیوتن رافسون استخراج شده از (Karimianfard & Haghghat 2019) می‌باشد.

$$\min f = \omega_v \sum_{i \in \mathcal{N}} |1 - v_i| + \omega_p \sum_{ij \in \mathcal{B}} p_{ij}^l \quad \forall \mathcal{N}, \mathcal{B} \quad (1)$$

$$s.t \quad \omega_v + \omega_p = 1 \quad (2)$$

$$\alpha_{\Omega}^{SC} q_{i,min}^{SC} \leq q_i^{SC} \leq q_{i,max}^{SC} \alpha_{\Omega}^{SC} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \Omega \in \mathcal{T} \quad (3)$$

$$\alpha_{\Omega}^{SHR} q_{i,min}^{SHR} \leq q_i^{SHR} \leq q_{i,max}^{SHR} \alpha_{\Omega}^{SHR} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \Omega \in \mathcal{T} \quad (4)$$

$$\alpha_{\Omega}^{SC} + \alpha_{\Omega}^{SHR} = 1 \quad \forall \Omega \in \mathcal{T} \quad (5)$$

$$\alpha_{\Omega}^{oltc} T_{i,min}^{oltc} \leq T_i^{oltc} \leq T_{i,max}^{oltc} \alpha_{\Omega}^{oltc} \quad \forall i \in \mathcal{N}, \Omega \in \mathcal{T} \quad (6)$$

$$\sum_{\Omega \in \mathcal{T}} \alpha_{\Omega}^{oltc} \leq u \quad \forall \mathcal{T} \quad (7)$$

$$T_{ij,min}^{svr} \leq T_{ij}^{svr} \leq T_{ij,max}^{svr} \quad \forall ij \in \mathcal{B} \quad (8)$$

$$v_i^{min} \leq v_i \leq v_i^{max}, I_{ij} \leq I_{ij}^{max} \quad \forall i \in \mathcal{N}, ij \in \mathcal{B} \quad (9)$$

$$-\pi \leq \delta_i \leq \pi \quad \forall i \in \mathcal{N} \quad (10)$$

$$p_i + p_i^{pv} = \sum_{ij \in \mathcal{B}} p_{ij} + p_i^d + p_i^{ev} \quad \forall i \in \mathcal{N}, ij \in \mathcal{B} \quad (11)$$

$$q_i + q_i^{SC} = \sum_{ij \in \mathcal{B}} q_{ij} + q_i^d + q_i^{SHR} \quad \forall i \in \mathcal{N}, ij \in \mathcal{B} \quad (12)$$

کننده‌های ولتاژ پله پیشنهاد شده است. در (Karimianfard & Haghghat, 2019) یک مدل کلاسیک از الگوریتم PSO برای به حداقل رساندن تلفات برق و بهبود ولتاژ در سیستم‌های توزیع پیشنهاد کرد. در (Eminoglu & Hocaoglu, 2008) یک مدل پخش بار رفت و برگشتی برای مطالعه شبکه‌های توزیع پیشنهاد شده است که قابلیت همگرایی بالایی را در شبکه‌های توزیع بزرگ دارد. در (Selvakumar & Thanushkodi, 2007) یک مدل جدید از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسائل غیر محدب سخت پیشنهاد شده است. در (Beromi et al., 2007) نویسندگان الگوریتم ژنتیک را برای بهینه‌سازی تلفات و ولتاژ سیستم توزیع پیشنهاد کردند. در (Baran & Wu, 1989) بازآرایی سیستم توزیع توسط نویسندگان برای به وجود ولتاژ و کاهش تلفات سیستم توزیع پیشنهاد شده است. در (Azzouz et al., 2015) یک مدل بر خط زمان واقعی برای کاهش تغییرات ولتاژ در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در (Huang et al., 2020) یک مدل جدید از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی مسائل غیر خطی پیشنهاد شده است. در (Lu et al., 2018) یک مدل تصادفی از شارژ و دشارژ خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع به منظور تعادل بار در شبکه‌های توزیع جزیره‌ای شده پیشنهاد شده است. در (He et al., 2022) یک الگوریتم تکاملی ترکیبی برای پایداری شبکه‌های توزیع توسط جبران‌سازهای استاتیک در حضور منابع انرژی بادی و خورشیدی پیشنهاد شده است. در (Hajjabadi et al., 2022) نویسندگان الگوریتم بهینه‌سازی یافته ژنتیک را برای مکان‌یابی بهینه ادوات حفاظتی در شبکه‌های توزیع به منظور بهبود قابلیت اطمینان پیشنهاد کردند. در (Haghshenas et al., 2022) نویسندگان یک مدل بهینه‌سازی برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های توزیع در حضور شرایط جوی نامناسب را پیشنهاد نمودند.

با توجه به مراجع بررسی شده شکاف مطالعاتی را می‌توان در ارائه یک مدل بهینه‌سازی کارآمد در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر، خودروهای برقی و همچنین ادوات FACTS مانند ترانس‌های هوشمند و خازن و راکتورهای شنت دانست. از طرفی دیگر ارائه یک الگوریتم تکاملی کارآمد برای رسیدن به جواب‌های بهینه سراسری در مسائل بهینه‌سازی سخت را می‌توان از خلاهای مطالعاتی دیگر در این زمینه عنوان نمود.

۲-۱- نوآوری

نوآوری این مقاله را می‌توان به دو بخش مجزا نوآوری در الگوریتم حل و نوآوری در مدل به شرح زیر عنوان نمود:

۱- از نظر الگوریتم، ارائه یک الگوریتم تکاملی ترکیبی جدید به نام GA-PSO در حل مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، که سبب همگرایی سریع و دستیابی به جواب‌های بهینه سراسری می‌شود. در واقع این

طبق مرجع (Lu et al., 2018) از طریق تابع توزیع نرمال بدست می-آید.

ولتاژ باس مرجع برابر با $v_1 = 1 \times T_1^{oltc}$ می‌باشد که تحت تأثیر تغییرات تپ OLTC خواهد بود. این متغیر تصمیم‌گیری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی پی‌شنهادی محاسبه می‌شود. ولتاژ در باس دریافت‌کننده (v_j) از طریق $v_j = T_{ij}^{svr} \times v_i - z_{ij} \times I_{ij}$ می‌شود تا تغییرات تپ SVR در خط ij بین ولتاژ در باس دریافت‌کننده و ارسال‌کننده فرموله شود. معادلات (۱۳) و (۱۴) شار توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهند. رابطه (۱۵) تلفات توان واقعی است که به صورت مجموع شار توان مستقیم و معکوس محاسبه می‌شود (Karimianfard & Haghghat 2019). محدودیت جریان توان در شاخه‌ها توسط (۱۶) مدل شده است.

با توجه به اینکه متغیرهای تپ OLTC و SVR به صورت گسسته می‌باشد و می‌بایست از یک مجموعه ناپیوسته انتخاب گردد، به کمک روابط (۱۷) و (۱۸) بدست می‌آید. شایان ذکر است که حداقل و حداکثر تغییرات تپ OLTC و SVR به ترتیب طبق بازه $\{2, 4\}$ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که اگر حداقل بازه یعنی ۲- نظر انتخاب شود تپ OLTC و یا SVR برابر با ۰.۹ پریونیت خواهد بود، به همین ترتیب اگر عدد ۴ یعنی حداکثر بازه انتخاب شود مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) تپ OLTC و SVR برابر با ۱.۲ پریونیت خواهد بود. به همین ترتیب با توجه به دستور $floor$ هر عدد پیوسته که بدست آید به عدد صحیح تبدیل می‌شود. در نهایت بازه بدست آمده با گام ۰.۰۵ درصد بین ۰.۹ الی ۱.۲ پریونیت بدست می‌آید.

$$T_i^{oltc} = 1 + 0.05 \times floor \left(\begin{matrix} T_{i,max}^{oltc} \\ T_{i,min}^{oltc} \end{matrix} \right) \quad (17)$$

$$T_{ij}^{svr} = 1 + 0.05 \times floor \left(\begin{matrix} T_{ij,max}^{svr} \\ T_{ij,min}^{svr} \end{matrix} \right) \quad (18)$$

۲-۲- الگوریتم GA-PSO پیشنهادی

الگوریتم PSO الگوریتمی برگرفته از شبیه‌سازی رفتار شکار پرندگان است که توانایی جستجوی راه حل بهینه سراسری مسائل پیچیده را دارد. هر ذره به عنوان یک ذره بدون حجم و جرم در فضای d بعدی در نظر گرفته می‌شود، پرواز با سرعت معین در فضای جستجو و تنظیم دینامیکی این سرعت با توجه به تحلیل جامع تجربه پرواز فردی و جمعی و سپس به روز رسانی مکان فعلی جستجوی سراسری را تحت شرایط تناسب فردی انجام می‌دهد و با تولید مجموعه‌ای از ذرات با سرعت‌ها و موقعیت‌های تصادفی مقادری اولیه می‌شود. در فرآیند جستجو، PSO باید به طور مداوم سرعت و موقعیت هر ذره را برآورد بهترین تجربه فردی و جمعی آن به روز کند که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_{mn}^k = 0, X_{mn}^k = rand\{ss\} \quad (19)$$

$$p_{ij} = y_{Lij} v_i^2 \cos(\theta_{Lij}) \quad (13)$$

$$- y_{Lij} v_i v_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{Lij}) + \frac{1}{2} y_{sij} v_i^2 \cos(\theta_{sij}) \quad \forall ij \in B$$

$$q_{ij} = -y_{Lij} v_i^2 \sin(\theta_{Lij}) \quad (14)$$

$$- y_{Lij} v_i v_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{Lij}) - \frac{1}{2} y_{sij} v_i^2 \sin(\theta_{sij}) \quad \forall ij \in B$$

$$p_{ij}^l = p_{ij} + p_{ji} \quad (15)$$

$$p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq z_{ij} (s_{ij}^{max})^2 \quad (16)$$

تابع چند هدفه از طریق رابطه (۱) بیان می‌شود. از آنجایی که در شبکه‌های توزیع، تلفات توان و همچنین انحرافات ولتاژ بیشتر می‌باشد، بهینه‌سازی این دو شاخص از مهمترین شاخص‌هایی می‌باشد که در شبکه توزیع می‌بایست بهینه گردد، لذا در این مطالعه به آن پرداخته شده است. معادله (۱) نشان‌دهنده کمینه کردن تابع انحراف ولتاژ و تلفات توان اکتیو می‌باشد. با توجه به اینکه ممکن است تولید توان با نفوذ بالای منابع PV در شبکه توزیع بالا رفته و سبب افزایش ولتاژ در باس‌هایی که این منابع در آن وجود دارد شود و همچنین بلع کس در باسی که ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی وجود دارد سبب کاهش ولتاژ شود، لذا ولتاژ باس‌های شبکه توزیع در حضور این منابع و ایستگاه‌ها سبب افزایش و کاهش ولتاژ می‌شود. طبق رابطه (۱) تغییرات ولتاژ می‌بایست به صفر نزدیک گردد و این مهم توسط خازن-ها و راکتورهای شنت و ترانس‌های هوشمند در نظر گرفته شده در شبکه انجام می‌شود که در معادلات (۳)، (۴) و (۱۱)، (۱۲) نشان داده شده است. در این مطالعه ضریب وزن تابع انحراف ولتاژ ۰.۹ و ضریب وزن تلفات ۰.۱ برای تعادل بین اندازه تابع تلفات و انحراف ولتاژ تنظیم شده است، توجه شود که مجموع دو وزن در نظر گرفته شده طبق رابطه (۲) باید برابر با یک باشد. محدودیت‌های (۳) الی (۴) به ترتیب محدودیت‌های بهره‌برداری خازن (SC) و راکتور شنت (ShR) را نشان می‌دهد. رابطه (۵) تضمین می‌کند که فقط SC یا ShR در هر سناریو استفاده می‌شود. اگر SC روشن است و توان راکتیو را به گره خود تزریق می‌کند، ShR باید خاموش باشد و اگر ShR توان راکتیو را در سناریوی Ω جذب کند، SC باید خاموش شود.

رابطه (۶) محدودیت تغییرات تپ OLTC را نشان می‌دهد. رابطه (۷) تضمین می‌کند که تپ OLTC تنها u بار در سناریوی Ω تغییر می‌کند، در این مقاله حداکثر تغییر تپ OLTC در هر سناریو یک بار در نظر گرفته شده است. رابطه (۸) نشان‌دهنده محدودیت‌های SVR را نشان می‌دهد. محدودیت ولتاژ گره و جریان خط از طریق رابطه (۹) بیان می‌شود و محدودیت زاویه ولتاژ باس با (۱۰) نشان داده شده است. معادلات تعادل توان اکتیو و راکتیو نیز به ترتیب با معادلات (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. مدل‌سازی توان ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی و همچنین مدل توان PV در یک دوره ۲۴ ساعته

- (۲) تابع هدف (۱) ارزیابی می‌شود.
 (۳) جمعیت مکان و جمعیت سرعت ذرات بر اساس (۲۰)، (۲۱) و تابع هدف (۱) به روز می‌شود.
 (۴) عملیات متقاطع روی موقعیت ذرات انجام می‌شود.
 (۵) عملیات جهش انجام می‌شود.
 (۶) اطمینان از این که موقعیت ذرات در محدوده پارامترها قرار دارد.
 (۷) تکرار = تکرار + ۱.
 (۸) هنگامی که الگوریتم به حداکثر تعداد تکرارها رسید، فرآیند متوقف می‌شود. در غیر این صورت، به مرحله ۲ می‌رود.
 در این بخش مدل‌سازی و الگوریتم پیشنهادی معرفی شد، در بخش بعدی شبکه‌های مورد مطالعه و نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله دو شبکه توزیع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه اول بخشی از شبکه توزیع ۱۳ گرهی تهران (Beromi et al., 2007) و شبکه دوم نیز شبکه ۳۳ گره IEEE است (Baran & Wu, 1989). شبیه‌سازی در MATLAB ۲۰۱۴ در ویندوز ۸ با استفاده از پردازنده فرکانس ۱.۸ گیگاهرتز با ۶ گیگابایت رم انجام شده است.

۳-۱- داده‌ها

در این بخش، پارامترهای منابع PV و EVCS ارائه می‌شود. جدول (۱) و (۲) ظرفیت‌های منابع PV، SC، ShR و EVCS را به ترتیب در یک شبکه ۱۳ و ۳۳ باس نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در جدول (۱)، منبع PV7 در باس شماره ۷ شبکه ۱۳ باس قرار دارد و ظرفیت آن بین حداقل و حداکثر ۰ تا ۳۰۰ کیلووات می‌باشد. از این رو، در جدول (۲)، خازن و راکتور شنت SC14 و ShR14 روی باس ۱۴ شبکه ۳۳ باس شماره قرار دارند، با حداکثر ظرفیت ۵۰ کیلووات برای راکتور و ۲۰۰ کیلووات برای خازن. جدول (۳) تغییرات تپ OLTC و SVR و مکان آن‌ها در شبکه‌های توزیع ۱۳ و ۳۳ باس نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده شد، OLTC روی باس مرجع قرار دارد و تپ آن بین حداقل و حداکثر ۰.۹ و ۱.۱ p.u می‌باشد. به طور مشابه، SVR در خط متصل به باس شماره ۴-۵ قرار دارد. شکل (۱) تابع توزیع PV و EVCS را نشان می‌دهد.

جدول (۱) پارامترهای شبکه ۱۳ باس

باس	اندازه SC و ShR به (kVAr)	باس	اندازه PV به (kW)
۷	SC ₇ , ShR ₇ ۰~۱۰۰, ۴۰۰۰۰	۷	PV ₇ ۳۰۰۰۰
۹	SC ₉ , ShR ₉ ۰~۱۰۰, ۴۰۰۰۰	۹	PV ₉ ۵۰۰۰۰
۱۲	SC ₁₂ , ShR ₁₂ ۰~۱۰۰, ۴۰۰۰۰	۱۲	PV ₁₂ ۴۰۰۰۰
اندازه EVCS به (kW)			
۸	EVCS ₈ ۶۰۰۰	۲	EVCS ₂ ۲۰۰۰
۱۳	EVCS ₁₃ ۱۲۰۰۰	۵	EVCS ₅ ۳۰۰۰

$$\mathcal{F}_{mn}^{k+1} = w\mathcal{F}_{mn}^k + c_1^g r_1 (A_{mn}^k - X_{mn}^k) + c_2^b r_2 (X_{mn}^k - B_{mn}^k) + c_3^d r_3 (D_{mn}^k - X_{mn}^k) \quad (20)$$

$$X_{mn}^{k+1} = X_{mn}^k + \mathcal{F}_{mn}^{k+1} \quad (21)$$

$$w = \begin{cases} w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \times l_1(t), & t < k \\ 2w_{min} + 2(d - w_{min}) \times l_2(t), & t \geq k \end{cases} \quad (22)$$

$$l_1(t) = e^{-30 \times (t/t_{max})^{15}} \quad (23)$$

$$l_2(t) = -\frac{t}{t_{max}} \quad (24)$$

$$c_1^g(t) = (c_{1,start}^g - c_{1,end}^g) \times \tan\left(0.875 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.6}\right)\right) + c_{1,end}^g \quad (25)$$

$$c_2(t) = (c_{2,start} - c_{2,end}) \times \arctan\left(2.8 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.4}\right)\right) + c_{2,end} \quad (26)$$

$$c_2(t) = (c_{2,start} - c_{2,end}) \times \arctan\left(2.8 \times \left(1 - \left(\frac{t}{N}\right)^{0.4}\right)\right) + c_{2,end}$$

رابطه (۱۹) مقدار اولیه سرعت ذره n و بعد m را در تکرار جریان k نشان می‌دهد. برای k=1، سرعت اولیه مطابق رابطه (۱۹) صفر است و موقعیت اولیه به طور تصادفی از فضای جستجو (SS) انتخاب می‌شود. رابطه (۲۰) رابطه به روز رسانی سرعت در تکرار k+1 است. رابطه (۲۱) نیز موقعیت جدید ذرات را در تکرار k+1 نشان می‌دهد. در رابطه (۲۰)، عدد تصادفی در محدوده {۰، ۱} می‌باشد. وزن اینرسی w از (۲۲) و روابط غیرخطی (۲۳) و (۲۴) محاسبه می‌شود، که t_{max} حداکثر تعداد تکرار می‌باشد. پارامترهای c₁^g(t) و c₂(t) به صورت پویا با استفاده از تابع مماس (۲۵) و (۲۶) تنظیم می‌شوند تا بین جستجوهای سراسری و محلی تعادل بهتری برقرار شود (Huang et al., 2020).

با این حال، مطالعات مربوطه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تکرار PSO، تنوع جمعیت ذرات به راحتی از بین می‌رود و در یک بهینه نه محلی قرار می‌گیرد. در این مقاله ایده ترکیب الگوریتم ژنتیک (GA) بر اساس الگوریتم (PSO) برای حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی در نظر گرفته است، تا عملیات متقاطع (cross) و جهش (mutation) را روی جمعیت انجام دهد که برای بهبود توانایی بهینه‌سازی سراسری ذرات در PSO مفید می‌باشد و باعث می‌شود الگوریتم از نقطه بهینه محلی خارج شود، GA مسئله‌ای را که با یک کروموزوم رمزگذاری می‌کند و با بهینه‌سازی عملیات انتخاب، متقاطع و جهش کروموزوم، راه حل بهینه را به دست می‌آورد. الگوریتم ترکیبی GA-PSO تصادفی بودن GA و مزایای PSO را در جستجوی دقیق نزدیک به ذره بهینه ترکیب می‌کند تا توانایی بهینه‌سازی سراسری را افزایش دهد. الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

فرآیند الگوریتم پیشنهادی

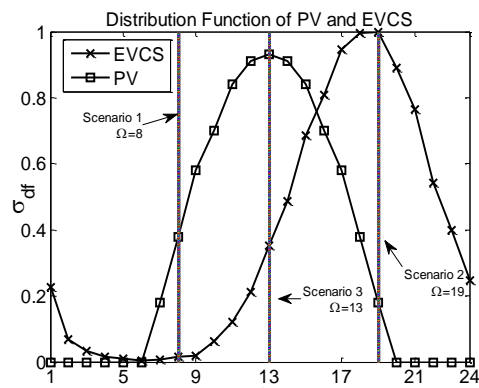
(۱) تولید جمعیت اولیه هر ذره با سرعت و موقعیت تصادفی، مقداردهی اولیه می‌شود.

جدول (۲) پارامترهای شبکه ۳۳ باس

باس	اندازه SC و ShR به (kVAr)	باس	اندازه PV به (kW)	باس	اندازه EVCS به (kW)
۷	SC ₇ , ShR ₇ ۰~۱۰۰, ۳۰۰~۰	۷	PV ₇ ۲۰۰~۰	۲۳	EVCS ₂₃ ۲۷۰~۰
۸	SC ₈ , ShR ₈ ۰~۱۰۰, ۳۰۰~۰	۸	PV ₈ ۲۰۰~۰	۲۸	EVCS ₂₈ ۳۲۰~۰
۱۴	SC ₁₄ , ShR ₁₄ ۰~۵۰, ۱۰۰~۰	۱۴	PV ₁₄ ۵۰۰~۰	۳۲	EVCS ₃₂ ۳۱۰~۰
۲۲	SC ₂₂ , ShR ₂₂ ۰~۱۵۰, ۴۰۰~۰	۲۲	PV ₂₂ ۳۵۰~۰	-	-
۲۵	SC ₂₅ , ShR ₂₅ ۰~۱۵۰, ۴۰۰~۰	۲۵	PV ₂₅ ۳۰۰~۰	-	-
۳۰	SC ₃₀ , ShR ₃₀ ۰~۷۵, ۲۰۰~۰	۳۰	PV ₃₀ ۱۵۰~۰	-	-
۳۲	SC ₃₂ , ShR ₃₂ ۰~۷۵, ۲۰۰~۰	۳۲	PV ₃₂ ۱۵۰~۰	-	-

جدول (۳) داده‌های OLTC و SVR

شبکه ۱۳ باس		
پریونیت	باس-باس	
۱.۱~۰.۹	۱-۱	OLTC
۱.۱~۰.۹	۴-۵	SVR
شبکه ۳۳ باس		
۱.۱~۰.۹	۱-۱	OLTC
۱.۱~۰.۹	۴-۵	SVR



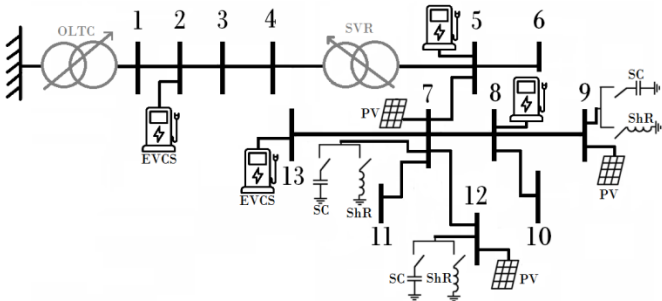
شکل (۱) تابع توزیع برای PV و EVCS

۳-۲- نتایج شبکه ۱۳ باس

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه ۱۳ باس ارائه می‌شود. این شبکه دارای ۱۳ باس و ۱۲ خط می‌باشد (Beromi et al., 2007). شماتیک این شبکه و تجهيزات آن در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده شد، چهار EVCS در باس‌های شماره ۸، ۵، ۲، و ۱۳ وجود دارد، در حالی که منابع PV و SC/ShR در باس‌های شماره ۷، ۹، و ۱۲ می‌باشد. جدول (۴) نتایج شبیه‌سازی شبکه ۱۳ باس با فرض سطح بار ۱ ارائه می‌کند. سه حالت کنترل مختلف تحت هر سناریو مقایسه و تجزیه و تحلیل شده است. در جدول (۴)، هنگامی که OLTC+SVR+SC+ShR حالت کنترلی می‌باشد، متغیرهای تصمیم‌برابر با اندازه‌های SC و ShR و تپ OLTC و

SVR می‌باشد. از این رو، مقادیر حاصل از شبیه‌سازی در ستون مربوط به این حالت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این مورد، اندازه‌های بهینه‌ساز به ترتیب برابر ۱۵۰، ۴۰۰ و ۳۰۰ کیلووار و تپ‌های SVR و OLTC به ترتیب ۱.۰۵ و ۱.۰۳ پریونیت می‌باشد. قابل ذکر است که اندازه PV و اندازه EVCS در هر حالت باید برابر باشد تا بتوان نتایج کنترل را با هم مقایسه نمود. در حالت کنترل OLTC+SVR+SC+ShR، میانگین ولتاژ ۱.۰۱ پریونیت می‌باشد. در جدول (۴)، در مورد کنترل OLTC+SVR، اندازه‌های خازن‌های SC برابر با حداکثر ظرفیت آن‌ها برای تزریق حداکثر توان راکتیو به شبکه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، ولتاژ متوسط برابر با ۱.۰۲ پریونیت شده است، که نشان می‌دهد متوسط ولتاژ باس‌های شبکه بیشتر از حالت کنترلی قبل می‌باشد، که نشان از اضافه‌ولتاژ بالاتر نسبت به حالت قبل است. به طور مشابه، در مورد غیرکنترلی، تپ OLTC و SVR برابر با ۱ است و SCها با ظرفیت کامل کار می‌کنند. علاوه بر این، در این مورد، ولتاژ متوسط شبکه برابر با ۰.۹۳۸ پریونیت می‌باشد، که منعکس‌کننده افت ولتاژ در شبکه خواهد بود. در جدول (۴)، مجموع ظرفیت SC در حالت OLTC+SVR+SC برابر با ۸۵۰ کیلووار است، در حالی که ظرفیت SC در سایر موارد ۱۲۰۰ کیلووار می‌باشد. در همین راستا تلفات توان حقیقی به ترتیب در حالت کنترلی متفاوت برابر با ۵۸۰ و ۵۵۹ کیلووات می‌باشد، این در حالی است که تلفات توان بدون کنترل برابر با ۶۴۷ کیلووات است.

به طور مشابه، جداول (۵) و (۶) نتایج به دست آمده با استفاده از ضرایب بار ۱.۱ و ۱.۲ را با تابع توزیع متفاوت برای PV و EVCS نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده شد بهترین حالت کنترل در این جداول حالت کنترل OLTC+SVR+SC+ShR است که از اضافه‌ولتاژ یا افت ولتاژ در شبکه توزیع جلوگیری می‌کند. مقایسه ولتاژ باس‌های سیستم ۱۳ باس به ترتیب برای ضرایب بار ۱، ۱.۱ و ۱.۲ در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده شد، حالت کنترل OLTC+SVR+SC+ShR بهترین گزینه می‌باشد. است زیرا در این حالت انحراف ولتاژ نسبت به حالت‌های دیگر تمام سناریوها کمینه‌ترین حالت می‌باشد و به ۱ پریونیت نزدیک‌تر می‌باشد.

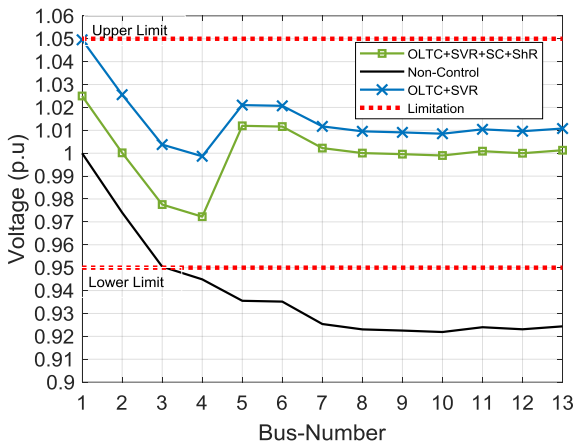


شکل (۲) شبکه ۱۳ باس در نظر گرفته شده

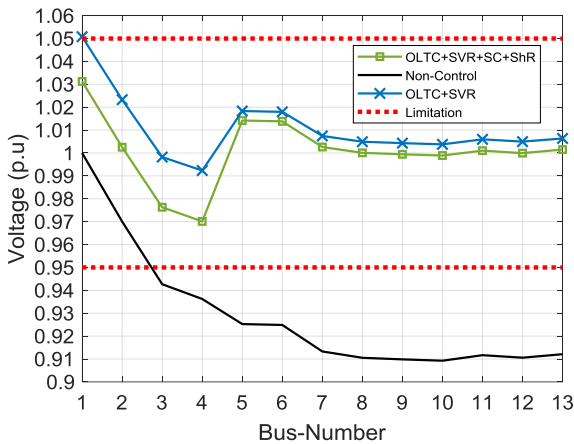
جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی شبکه ۱۳ باس در سناریو اول

کنترل	OLTC+SVR	OLTC+SVR+SC+ShR	حالت کنترل
SC ₇ (kVAr)	۱۵۰	۴۰۰	۴۰۰

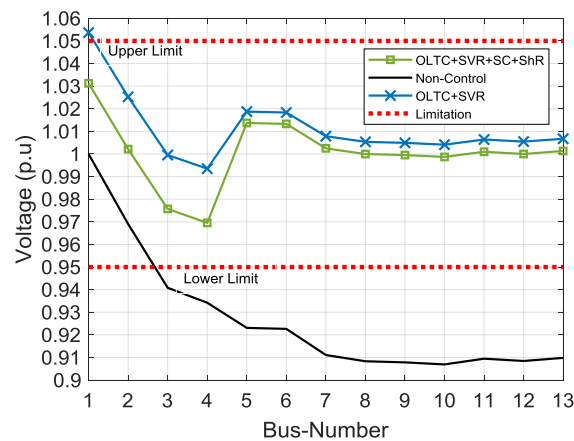
EVCS ₁₃ (kW)	۴۲	۴۲	۴۲
SVR (p.u)	۱.۰۶	۱.۰۳	۱
OLTC (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۵	۱
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۶۹	۰.۹۹۳	۰.۹۰۶۵
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۵	۱
متوسط ولتاژ (p.u)	۱.۰۰۰۷	۱.۰۱	۰.۹۲۷۰
تلفات (kW)	۷۷۹	۷۵۲	۹۰۲



شکل (۳) مقایسه ولتاژ شبکه ۱۳ باس در سناریو اول



شکل (۴) مقایسه ولتاژ شبکه ۱۳ باس در سناریو دوم



SC ₉ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₁₂ (kVAr)	۳۰۰	۴۰۰	۴۰۰
مجموع خازن	۸۵۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
PV ₇ (kW)	۱۱۴	۱۱۴	۱۱۴
PV ₉ (kW)	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰
PV ₁₂ (kW)	۱۵۲	۱۵۲	۱۵۲
EVCS ₂ (kW)	۰.۳۱۶	۰.۳۱۶	۰.۳۱۶
EVCS ₅ (kW)	۰.۴۷۴	۰.۴۷۴	۰.۴۷۴
EVCS ₈ (kW)	۰.۹۴۸	۰.۹۴۸	۰.۹۴۸
EVCS ₁₃ (kW)	۱.۸۹۶	۱.۸۹۶	۱.۸۹۶
SVR (p.u)	۱.۰۵	۱.۰۲	۱
OLTC (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۴	۱
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۷۲	۰.۹۹۸	۰.۹۲۱
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۵	۱
متوسط ولتاژ (p.u)	۱.۰۱	۱.۰۲	۰.۹۳۸۸
تلفات (kW)	۵۸۰	۵۵۹	۶۴۷

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی شبکه ۱۳ باس در سناریو دوم

حالت کنترل	OLTC+SVR+SC+ShR	OLTC+SVR	بدون کنترل
SC ₇ (kVAr)	-۵۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₉ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₁₂ (kVAr)	۲۵۰	۴۰۰	۴۰۰
مجموع خازن	-۵۰, ۶۵۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
PV ₇ (kW)	۵۴	۵۴	۵۴
PV ₉ (kW)	۹۰	۹۰	۹۰
PV ₁₂ (kW)	۷۲	۷۲	۷۲
EVCS ₂ (kW)	۲۰	۲۰	۲۰
EVCS ₅ (kW)	۳۰	۳۰	۳۰
EVCS ₈ (kW)	۶۰	۶۰	۶۰
EVCS ₁₃ (kW)	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
SVR (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۴	۱
OLTC (p.u)	۱.۰۵	۱.۰۶	۱
کمترین ولتاژ (p.u)	۰.۹۷	۰.۹۹۲	۰.۹۱۰
بیشترین ولتاژ (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۵	۱
متوسط ولتاژ (p.u)	۱.۰۰۰۹	۱.۰۰۱۰	۰.۹۳
تلفات (kW)	۷۴۲	۷۲۷	۸۸۱

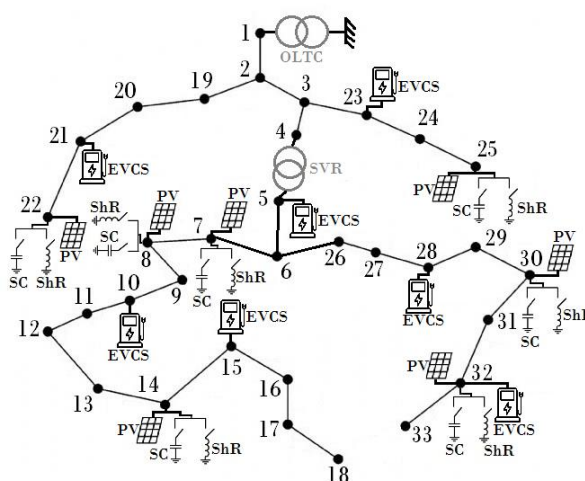
جدول (۶): نتایج بهینه‌سازی شبکه ۱۳ باس در سناریو سوم

حالت کنترل	OLTC+SVR+SC+ShR	OLTC+SVR	بدون کنترل
SC ₇ (kVAr)	۳۵۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₉ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₁₂ (kVAr)	۱۷۵	۴۰۰	۴۰۰
مجموع خازن	۹۲۵	۱۲۰۰	۱۲۰۰
PV ₇ (kW)	۲۷۹	۲۷۹	۲۷۹
PV ₉ (kW)	۴۶۵	۴۶۵	۴۶۵
PV ₁₂ (kW)	۳۷۲	۳۷۲	۳۷۲
EVCS ₂ (kW)	۷	۷	۷
EVCS ₅ (kW)	۱۱	۱۱	۱۱
EVCS ₈ (kW)	۲۱	۲۱	۲۱

شکل (۵) مقایسه ولتاژ شبکه ۱۳ باس در سناریو سوم

۳-۳- نتایج شبکه ۳۳ باس

این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی شبکه ۳۳ باس (Baran & Wu, 1989) ارائه می شود، که دارای ۳۳ باس و ۳۲ خط می باشد. شماتیک این شبکه و تجهیزات آن در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، هفت EVCS در باس های شماره ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۱، ۲۳، ۲۸ و ۳۲ وجود دارد. منابع PV و SC/ShR در باس های ۸، ۱۴، ۲۲، ۲۵، ۳۰ و ۳۲ نصب شده اند.



شکل (۶) شبکه ۳۳ باس در نظر گرفته شده

جدول (۷) نتایج حاصل از شبیه سازی را با استفاده از شبکه ۳۳ باس با فرض سطح بار ۱ ارائه می دهد. همانطور که مشاهده می شود، ضریب تابع توزیع برای منابع PV و EVCS به ترتیب برابر با ۰.۳۸ و ۰.۱۵۸ است. در حالت اول، اندازه های بهینه خازن شنت برابر ۱۲۵، ۱۷۵، ۱۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰ و ۲۰۰ کیلووار و اندازه بهینه راکتور شنت برابر ۷۵- کیلووار می باشد، تپ OLTC و SVR به ترتیب ۱.۰۴ و ۱.۰۱ پریونیت می باشد. در حالت اول، میانگین ولتاژ ۱.۰۰۱ پریونیت می باشد. تلفات در سناریو اول به ترتیب برابر ۹۱، ۸۶ و ۹۴ کیلووات شده است. به همین ترتیب جداول (۸) و (۹) نتایج هر حالت کنترلی را برای سناریوهای ضریب بار ۱.۱ و ۱.۲ نشان می دهد. می توان مشاهده نمود که کمترین از جراف ولتاژ در هر سناریو متعلق به حالت کنترلی (OLTC+SVR+SC+ShR) می باشد.

جدول (۷): نتایج بهینه سازی شبکه ۳۳ باس در سناریو اول

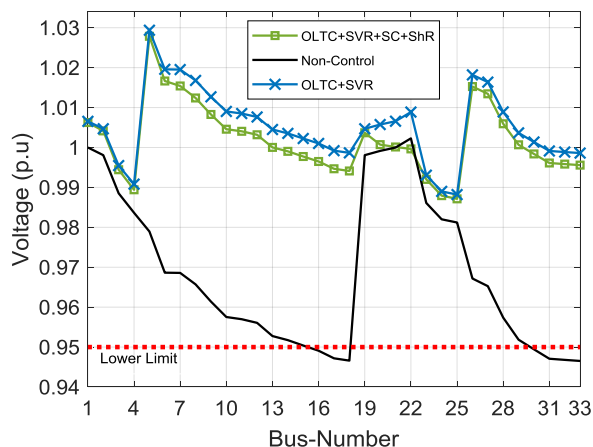
بدون کنترل	OLTC+SVR	OLTC+SVR+SC+ShR	حالت کنترل
SC ₇ (kVAr)	۳۰۰	۱۷۵	۳۰۰
SC ₈ (kVAr)	۳۰۰	۱۲۵	۳۰۰
SC ₁₄ (kVAr)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
SC _{22,ShR₂₂} (kVAr)	۴۰۰	-۷۵	۴۰۰
SC ₂₅ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₃₀ (kVAr)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
SC ₃₂ (kVAr)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰

Total SC, ShR	-۷۵, ۱۲۰۰	۰, ۱۹۰۰	۰, ۱۹۰۰
PV ₇ (kW)	۷۶	۷۶	۷۶
PV ₈ (kW)	۷۶	۷۶	۷۶
PV ₁₄ (kW)	۱۹۰	۱۹۰	۱۹۰
PV ₂₂ (kW)	۱۳۳	۱۳۳	۱۳۳
PV ₂₅ (kW)	۱۱۴	۱۱۴	۱۱۴
PV ₃₀ (kW)	۵۷	۵۷	۵۷
PV ₃₂ (kW)	۵۷	۵۷	۵۷
EVCS ₅ (kW)	۵.۵	۵.۵	۵.۵
EVCS ₁₀ (kW)	۶	۶	۶
EVCS ₁₅ (kW)	۳.۹	۳.۹	۳.۹
EVCS ₂₁ (kW)	۴.۲	۴.۲	۴.۲
EVCS ₂₃ (kW)	۴.۲	۴.۲	۴.۲
EVCS ₂₈ (kW)	۵	۵	۵
EVCS ₃₂ (kW)	۵	۵	۵
SVR (p.u)	۱.۰۴	۱.۰۴	۱
OLTC (p.u)	۱.۰۱	۱.۰۱	۱
Min Voltage (p.u)	۰.۹۸۷	۰.۹۸۸	۰.۹۴۶
Max Voltage (p.u)	۱.۰۳	۱.۰۳	۱.۰۰۲
Mean Voltage (p.u)	۱.۰۰۱	۱.۰۰۵	۰.۹۶۸
Loss (kW)	۹۱	۸۶	۹۴

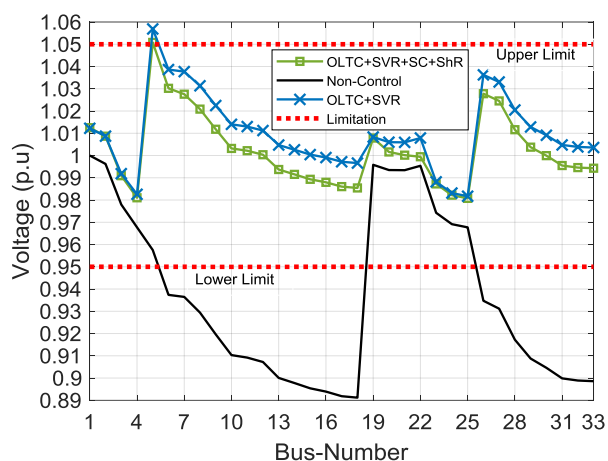
جدول (۸): نتایج بهینه سازی شبکه ۳۳ باس در سناریو دوم

بدون کنترل	OLTC+SVR	OLTC+SVR+SC+ShR	حالت کنترل
SC ₇ (kVAr)	۳۰۰	۲۵	۳۰۰
SC ₈ (kVAr)	۳۰۰	۱۵۰	۳۰۰
SC ₁₄ (kVAr)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
SC _{22,ShR₂₂} (kVAr)	۴۰۰	-۵۰	۴۰۰
SC ₂₅ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
SC ₃₀ (kVAr)	۲۰۰	۱۷۵	۲۰۰
SC ₃₂ (kVAr)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
Total SC, ShR	۱۹۰۰	-۵۰, ۱۰۵۰	۱۹۰۰
PV ₇ (kW)	۳۶	۳۶	۳۶
PV ₈ (kW)	۳۶	۳۶	۳۶
PV ₁₄ (kW)	۹۰	۹۰	۹۰
PV ₂₂ (kW)	۶۳	۶۳	۶۳
PV ₂₅ (kW)	۵۴	۵۴	۵۴
PV ₃₀ (kW)	۲۷	۲۷	۲۷
PV ₃₂ (kW)	۲۷	۲۷	۲۷
EVCS ₅ (kW)	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰
EVCS ₁₀ (kW)	۳۸۰	۳۸۰	۳۸۰
EVCS ₁₅ (kW)	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
EVCS ₂₁ (kW)	۲۷۰	۲۷۰	۲۷۰
EVCS ₂₃ (kW)	۲۷۰	۲۷۰	۲۷۰

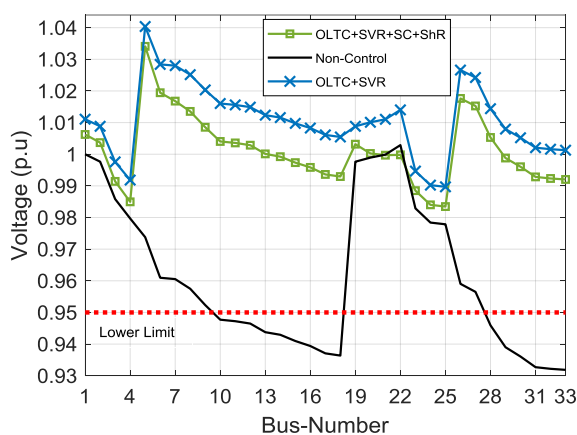
شده است. مشاهده می‌شود که حالت کنترل‌لی (OLTC+SVR+SC+ShR) بهترین حالت ممکنه می‌باشد، زیرا در هر سه سناریو به ۱ پیرونیته در تمام باس‌ها نسبت به دیگر حالت‌ها نزدیک‌تر است.



شکل (۷) مقایسه ولتاژ شبکه ۳۳ باس در سناریو اول



شکل (۸) مقایسه ولتاژ شبکه ۳۳ باس در سناریو دوم



شکل (۹) مقایسه ولتاژ شبکه ۳۳ باس در سناریو سوم

EVCS ₂₈ (kW)	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰
EVCS ₃₂ (kW)	۳۱۰	۳۱۰	۳۱۰
SVR (p.u)	۱.۰۸	۱.۰۸	۱
OLTC (p.u)	۱.۰۲	۱.۰۲	۱
Min Voltage (p.u)	۰.۹۸	۰.۹۸۱	۰.۸۹۱
Max Voltage (p.u)	۱.۰۵	۱.۰۵	۱
Mean Voltage (p.u)	۱.۰۰۲	۱.۰۰۱	۰.۹۳۶
Loss (kW)	۳۳۷	۳۲۱	۳۸۸

جدول (۹): نتایج بهینه‌سازی شبکه ۳۳ باس در سناریو سوم

حالت کنترل	بدون کنترل	OLTC+SVR	OLTC+SVR+SC+ShR
SC ₇ (kVAr)	۳۰۰	۳۰۰	۱۷۵
SC ₈ (kVAr)	۳۰۰	۳۰۰	۲۷۵
SC ₁₄ (kVAr)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
SC ₂₂ , ShR ₂₂ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	-۱۲۵
SC ₂₅ (kVAr)	۴۰۰	۴۰۰	۳۷۵
SC ₃₀ (kVAr)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
SC ₃₂ (kVAr)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
Total SC, ShR	۱۹۰۰	۱۹۰۰	-۱۲۵, ۱۳۲۵
PV ₇ (kW)	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۶
PV ₈ (kW)	۱۸۶	۱۸۶	۱۸۶
PV ₁₄ (kW)	۴۶۵	۴۶۵	۴۶۵
PV ₂₂ (kW)	۳۲۵	۳۲۵	۳۲۵
PV ₂₅ (kW)	۲۷۹	۲۷۹	۲۷۹
PV ₃₀ (kW)	۱۳۹	۱۳۹	۱۳۹
PV ₃₂ (kW)	۱۳۹	۱۳۹	۱۳۹
EVCS ₅ (kW)	۱۲۳	۱۲۳	۱۲۳
EVCS ₁₀ (kW)	۱۳۴	۱۳۴	۱۳۴
EVCS ₁₅ (kW)	۸۸	۸۸	۸۸
EVCS ₂₁ (kW)	۹۵	۹۵	۹۵
EVCS ₂₃ (kW)	۹۵	۹۵	۹۵
EVCS ₂₈ (kW)	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲
EVCS ₃₂ (kW)	۱۰۹	۱۰۹	۱۰۹
SVR (p.u)	۱	۱.۰۶	۱.۰۵
OLTC (p.u)	۱	۱.۰۲	۱.۰۱
Min Voltage (p.u)	۰.۹۳	۰.۹۹۰	۰.۹۸۳
Max Voltage (p.u)	۱.۰۰۲	۱.۰۴۰	۱.۰۳۴
Mean Voltage (p.u)	۰.۹۶۱	۱.۰۰۱	۱.۰۰۱
Loss (kW)	۱۳۴	۱۱۹	۱۲۵

شکل‌های (۷) الی (۹) به ترتیب نشان‌دهنده پروفیل ولتاژ در شبکه ۳۳ باس در سناریو بار ۱، ۱.۱ و ۱.۲ می‌باشد. در این شکل‌های مقایسه‌ای بین تاثیر هر یک از حالت‌های کنترلی بر روی ولتاژ شبکه نشان داده

۳-۴ - مقایسه

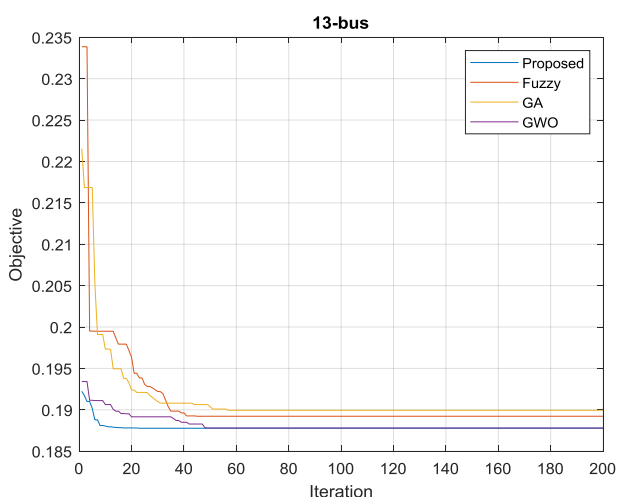
در نهایت شکل‌های (۱۰) و (۱۱) عملکرد بهتر الگوریتم پیه‌شنهادی را در سرعت و دقت نسبت به روش‌های مشابه نشان می‌دهد.

جدول (۱۰): مقایسه الگوریتم پیه‌شنهادی

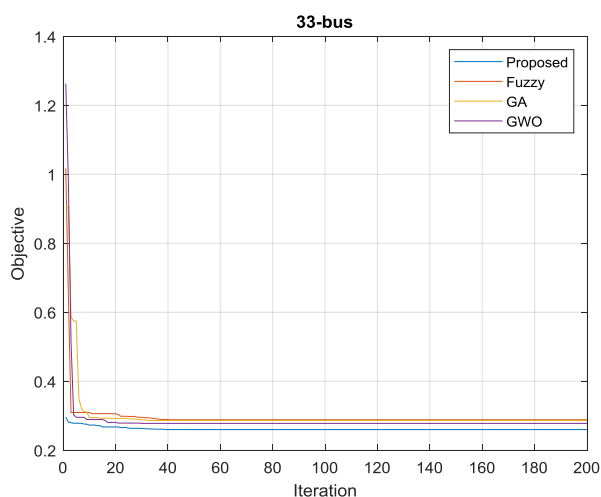
تعداد تکرار	تابع هدف	زمان (s)	روش
۱۳-باس			
۲۰	۰.۱۸۷۷۷	۹۸	پیشنهادی
۴۰	۰.۱۸۹۲۲	۲۸۵	Fuzzy
۵۰	۰.۱۸۹۹۴	۳۱۶	GA
۵۰	۰.۱۸۷۸۰	۱۰۶	GWO
۳۳-باس			
۳۸	۰.۲۵۹۸۷	۳۱۴	پیشنهادی
۴۰	۰.۲۸۸۳۹	۸۵۵	Fuzzy
۴۰	۰.۲۸۶۱۷	۱۰۲۵	GA
۳۰	۰.۲۷۷۸۴	۳۴۰	GWO

در این بخش برای نشان دادن عملکرد الگوریتم پیه‌شنهادی (GA-) در زمان همگرایی و حل مسئله، سه الگوریتم تکاملی دیگر با الگوریتم پیه‌شنهادی مقایسه شده است. در (Mahmoud et al., 2020) نویسندگان یک مدل اصلاح شده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) برای کنترل ولتاژ بهینه در سیستم‌های توزیع پیه‌شنهادی کردند، همچونین در (Senjyu et al., 2008) از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است و در (Augugliaro et al., 2014) نویسندگان تئوری مجموعه فازی را برای تنظیم ولتاژ در شبکه‌های توزیع پیه‌شنهادی کردند. در این مقاله الگوریتم‌های ذکر شده برای بررسی و مقایسه با الگوریتم پیه‌شنهادی در نظر گرفته شده است. جدول (۱۰) نتایج مقایسه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج مقایسه شامل زمان حل، مقدار تابع هدف و تعداد تکرار همگرایی در سیستم‌های ۱۳ و ۳۳ باس در سناریو سوم می‌باشد. توجه داشته باشید که حالت کنترل "OLTC+SVR+SC+ShR" در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، به‌ترین عملکرد در سیستم ۱۳ باس مربوط به روش پیه‌شنهادی است، زیرا دارای کوتاه‌ترین زمان حل، بهترین مقدار تابع هدف و همچنین تکرارهای کمتر برای دستیابی به بهترین همگرایی است. به عنوان مثال، نتایج به دست آمده از سیستم ۱۳ باس در سناریو سوم با حالت کنترل (OLTC+SVR+SC+ShR) ۹۸ ثانیه طول کشیده است تا مسئله حل شود که کم‌ترین زمان در مقایسه با روش‌های دیگر است. همچنین مقدار تابع هدف و تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به همگرایی نهایی به ترتیب ۰/۱۸۷۷۷ و ۲۰ تکرار می‌باشد که به‌ترین نتیجه در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها است. همانطور که از جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، روش پیه‌شنهادی در سیستم ۳۳ باس، هم از نظر زمان حل مسئله و هم از نظر مقدار تابع هدف، به‌ترین نتایج را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد. شکل (۱۰) و (۱۱) روند همگرایی تابع هدف را به ترتیب در سیستم‌های ۱۳ و ۳۳ باس نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد الگوریتم پیه‌شنهادی (خط آبی رنگ) تنها در ۲۰ تکرار به جواب بهینه سری رسیده است، این در حالی است که دیگر الگوریتم‌ها پس از ۴۰ و ۵۰ بار تکرار به جواب‌های بهینه رسیده‌اند. این نشان می‌دهد که الگوریتم پیه‌شنهادی سرعت بالاتری در رسیدن به جواب بهینه دارد که می‌تواند برای شبکه‌های بزرگتر و همچنین مدل‌های برخط (آنلاین) استفاده گردد.

همانطور که مشاهده می‌شود طبق شکل (۱۱) تابع هدف در الگوریتم پیه‌شنهادی که با خط آبی رنگ نشان داده شده است نسبت به دیگر الگوریتم‌ها در سطح پایین‌تری قرار دارد. این نشان‌دهنده این است که الگوریتم پیه‌شنهادی به جواب‌های بهینه‌تری نسبت به روش‌های مشابه دست یافته است. که این نشان از برتری الگوریتم پیه‌شنهادی می‌باشد.



شکل (۱۰) مقایسه همگرایی تابع هدف در شبکه ۱۳ باس



شکل (۱۱) مقایسه همگرایی تابع هدف در شبکه ۳۳ باس

Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 59, pp. 1-20, December 2024 (in Persian).

M. E. Elkhatabi, R. El Shatshat, M. M. A. Salama. (2010). Optimal Control of Voltage Regulators for Multiple Feeders. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2670-2675.

A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Favuzza, E. R. Sanseverino. (2014). Voltage Regulation and Power Losses Minimization in Automated Distribution Networks by an Evolutionary Multiobjective Approach. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1516-1527.

A. Giannitrapani, S. Paoletti, A. Vicino, D. Zarrilli. (2017). Optimal Allocation of Energy Storage Systems for Voltage Control in LV Distribution Networks. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2859-2870.

T. Senjyu, Y. Miyazato, A. Yona, N. Urasaki, T. Funabashi. (2008). Optimal Distribution Voltage Control and Coordination With Distributed Generation. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, no. 2, pp. 1236-1242.

Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal, R. A. Jabr. (2014). Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 182-192.

A. Bedawy, N. Yorino, K. Mahmoud, Y. Zoka and Y. Sasaki. (2020). Optimal Voltage Control Strategy for Voltage Regulators in Active Unbalanced Distribution Systems Using Multi-Agents. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 2, pp. 1023-1035.

M. S. S. Abad and J. Ma. (2021). Photovoltaic Hosting Capacity Sensitivity to Active Distribution Network Management. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 1, pp. 107-117.

Y. Guo, Q. Wu, H. Gao, S. Huang, B. Zhou and C. Li. (2020). Double-Time-Scale Coordinated Voltage Control in Active Distribution Networks Based on MPC. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 1, pp. 294-303.

D. Ranamuka, K. M. Muttaqi and D. Sutanto. (2020). Flexible AC Power Flow Control in Distribution Systems by Coordinated Control of Distributed Solar-PV and Battery Energy Storage Units. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2054-2062.

K. Mahmoud, M. M. Hussein, M. Abdel-Nasser and M. Lehtonen. (2020). Optimal Voltage Control in Distribution Systems With Intermittent PV Using Multiobjective Grey-Wolf-Lévy Optimizer. *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 760-770.

Y. Liu, L. Guo, C. Lu, Y. Chai, S. Gao and B. Xu. (2019). A Fully Distributed Voltage Optimization Method for Distribution Networks Considering Integer Constraints of Step Voltage Regulators. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 60055-60066.

Hossein Karimianfard, Hossein Haghghat. (2019). An initial-point strategy for optimizing distribution system reconfiguration. *Electric Power Systems Research*, Volume 176, 105943.

Sattar, Mahroo & Samiei Moghaddam, Mahmoud & Azarfar, Azita & Salehi, Nasrin & Vahedi, Mojtaba. (2023). Co-optimization of integrated energy systems in the presence of renewable energy, electric vehicles, power-to-gas systems and energy storage systems with demand-side management. *Clean Energy*. 7. 426-435. 10.1093/ce/zkad011.

A. Immanuel Selvakumar, K. Thanushkodi. (2007). A New Particle Swarm Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems. *IEEE Trans. Power System*, vol. 22, no. 1, pp. 42-51.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله مدلی مبتنی بر کنترل LRT, SVR, ShR و SC برای بهبود ولتاژ در شبکه‌های توزیع ارائه کرد. در مدل پیشنهادی، توان راکتیو SC, ShR و تب OLTC و SVR برای کاهش انحراف ولتاژ شبکه توزیع با توجه به نقش منابع PV و EVCS در نظر گرفته شد. سناریوهای مختلفی برای بررسی اثر منابع PV و EVCS با استفاده از توابع مختلف توزیع اعمال شد. یک الگوریتم تکاملی به نام GA-PSO برای حل مسئله پیشنهادی در نظر گرفته شد که نتایجی دقیق و بهینه را ارائه می‌کند. شبکه ۱۳ باس و شبکه ۳۳ باس IEEE برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با سایر الگوریتم‌های تکاملی مقایسه شد که نشان داد روش پیشنهادی کارایی بهتری در حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی دارد. نتایج عددی حاصل از دو شبکه در نظر گرفته شده تحت مورد های مطالعاتی مختلف نشان داد که مدل پیشنهادی به ترتیب می‌تواند ۱۱ و ۶ درصد در بهبود تلفات توان و ولتاژ شبکه توزیع موثر واقع شود. همچنین الگوریتم پیشنهادی طبق مقایسه‌های انجام شده نزدیک به دو برابر سریع‌تر از روش‌های مشابه در رسیدن به جواب‌های بهینه می‌باشد. برای مطالعات آتی می‌توان توجه به فزاینده شدن شبکه مانند رله‌های اضافه ولتاژ و جریان را به مدل پیشنهادی اضافه کرد و نتایج را با ایجاد خطاهای گذرا بررسی نمود. همچنین می‌توان عملکرد مدل و الگوریتم پیشنهادی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر تجزیه و تحلیل نمود.

مراجع

U. Sultana, Azhar B. Khairuddin, A.S. Mokhtar, N. Zareen, Beenish Sultana, (2016). Grey wolf optimizer based placement and sizing of multiple distributed generation in the distribution system. *Energy*, vol. 111, pp. 525-536.

Majid Jamil, Ahmed Sharique Anees. (2016). Optimal sizing and location of SPV (solar photovoltaic) based MLDG (multiple location distributed generator) in distribution system for loss reduction, voltage profile improvement with economical benefits. *Energy*, vol. 103, pp. 231-239.

Insu Kim. (2018). Optimal capacity of storage systems and photovoltaic systems able to control reactive power using the sensitivity analysis method. *Energy*, vol. 150, pp. 642-652.

Jia Ying Yong, Seyed Mahdi Fazeli, Vigna K. Ramachandaramurthy, Kang Miao Tan. (2017). Design and development of a three-phase off-board electric vehicle charger prototype for power grid voltage regulation. *Energy*, vol. 133, pp. 128-141.

H. Karimianfard, H. Haghghat. (2019). Generic resource allocation in distribution grid. *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 810-813.

R. Tamizkar, M. Samiei-Moghaddam, A. Azarfar, M. Hoseini-Abardeh, M. Vahedi, "Bi-level optimization model for coordinated management of integrated transmission and distribution systems", *Journal of*

- Alinejad-Beromi, Y.Sedighzadeh, M. Bayat, M.R. Khodayar, M.E. (2007). Using genetic algorithm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile. *Universities Power Engineering Conference 2007.UPEC 2007,42nd International*, pp.954-959.
- M. E. Baran and F. Wu. (1989). Network reconfiguration in distribution system for loss reduction and load balancing. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407.
- M. A. Azzouz, M. F. Shaaban and E. F. El-Saadany. (2015). Real-Time Optimal Voltage Regulation for Distribution Networks Incorporating High Penetration of PEVs. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 3234-3245.
- Y. Huang, Y. Xiang, R. Zhao and Z. Cheng. (2020). Air Quality Prediction Using Improved PSO-BP Neural Network. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 99346-99353.
- Xinhui Lu, Kaile Zhou, Shanlin Yang, Huizhou Liu. (2018). Multi-objective optimal load dispatch of microgrid with stochastic access of electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, Volume 195, Pages 187-199.
- Ping He, Qiyuan Fang, Haoran Jin, Yuqi Ji, Zhijie Gong, Jie Dong. (2022). Coordinated design of PSS and STATCOM-POD based on the GA-PSO algorithm to improve the stability of wind-PV-thermal-bundled power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,” Volume 141, 108208.
- Hajjabadi M E, samadi M, lotfi H, hosseinpor E, sabori A. Optimal location of protection devices based on the importance of reliability in the distribution network with an improved genetic algorithm. *iejqp* 2022; 11 (3) :19-30. URL: <http://iejqp.ir/article-1-881-fa.html>
- Haghshenas M, Hooshmand R, Gholipour M. Simultaneous Hardening Planning of Lines and Substations for Resilience Enhancement of Electric Power Distribution System against Dust Storms. *iejqp* 2022; 11 (3) :48-60. URL: <http://iejqp.ir/article-1-856-fa.html>