

روش نوین دومرحله‌ای کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیکی در حضور سیستم‌های فتوولتائیک

فهیمة صیادی شهرکی^{۱،۲}، دانشجوی دکتری؛ سعید اسماعیلی^۳، دانشیار؛ فرشید کی‌نیا^۴، استادیار

۱- پژوهشکده انرژی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان - کرمان - ایران - f.sayadi@kgut.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی شهرکرد - شهرکرد - ایران - f.sayadi@shk-iau.ac.ir

۳- بخش مهندسی برق - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - s_esmaeili@uk.ac.ir

۴- پژوهشکده انرژی - دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان - کرمان - ایران - f.keynia@kgut.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیکی شدید با هدف افزایش کیفیت توان ارائه شده است که نیازمند پیش‌بینی دقیق تولید منابع نمی‌باشد. در روش ارائه شده از ظرفیت توان راکتیو سیستم فتوولتائیک (PV) به‌صورت برخط در کنترل ولتاژ و توان راکتیو سیستم استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا بر پایه الگوی بار مورد تقاضا از سیستم و الگوی توان اکتیو تولیدی منابع PV، نحوه کنترل ادوات مکانیکی کنترل ولتاژ و توان راکتیو سیستم PV برای روز بعد با استفاده از P-PSO^۱ بهینه‌سازی می‌شود. به‌منظور پوشش تغییرات تصادفی تولید، از یک شبکه عصبی آموزش‌دیده برای تعیین توان راکتیو بهینه سیستم PV بر اساس توان تولیدی واقعی به‌صورت برخط استفاده می‌شود. برای آموزش این شبکه عصبی با در نظر گرفتن محدوده نامعینی تولید در هر ساعت از شبانه‌روز، توان راکتیو بهینه در حالات مختلف بهینه‌سازی شده و شبکه عصبی آموزش داده می‌شود. بهینه‌سازی با استفاده از روش P-PSO در شبکه تست IEEE ۱۲۳ با ۳۷ باسه با اضافه کردن بارهای غیرخطی صورت گرفته و نتایج رضایت‌بخشی از روش کنترل پیشنهادی حاصل شده است.

واژه‌های کلیدی: اعوجاج هارمونیکی، کنترل ولتاژ و توان راکتیو، شبکه عصبی، سیستم فتوولتائیک (PV)

New Bi-Level Voltage and Reactive Power Control in Harmonic Distribution Network

F. Sayadi^{1,2}, PhD Student; S. Esmaeili³, Associate Professor; F. Keynia⁴, Assistant Professor

1- Energy Department, Kerman Graduate University of Technology, Kerman, Iran, Email: f.sayadi@kgut.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University of Shahrekord, Shahrekord, Iran, Email: f.sayadi@shk-iau.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: s_esmaeili@uk.ac.ir

4- Energy Department, Kerman Graduate University of Technology, Kerman, Iran, Email: f.keynia@kgut.ac.ir

Abstract: In this paper, new voltage and reactive power (volt/var) control in harmonic polluted distribution network is proposed to improve the power quality criteria. In the first level, mechanical controllers dispatch and early planning of reactive power are determined based on PV and load forecasts. Possible uncertainties of load and power forecasts and mechanical control setting have been used to estimate optimized reactive power of PV for achieving maximum voltage regulation, reducing network losses and total harmonic distortion. These data have been trained a neural network to estimate optimized PV reactive power. This neural network in second layer have been used to online reactive power setting based on online real PV power. For more practical application of the proposed method, simulation is carried out in the large distorted IEE 123- bus and 37 bus distribution system. The algorithm will increase use of renewable energies, reduce voltage fluctuations, THD, and wear and tear of mechanical equipment.

Keywords: Harmonic distortion, volt/ var control, neural network, photovoltaic system.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۲۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵

نام نویسنده مسئول: سعید اسماعیلی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - بلوار ۲۲ بهمن - دانشگاه شهید باهنر کرمان - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

کنترل ولتاژ، توان راکتیو و اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ (THD^2) شبکه، روش مؤثری در کاهش تلفات و بهبود کیفیت توان در سیستم‌های توزیع می‌باشد. این عمل می‌تواند با استفاده از کنترل تغییردهنده‌های تپ ترانسفورماتور (LTC^2) و توان راکتیو ناشی از خازن‌های موازی یا منابع انرژی تجدیدپذیر صورت پذیرد. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و نسبت X/R کوچک در این شبکه‌ها منجر به تقویت بیش‌تر این تأثیر می‌شود [۱].

اتصال منبع تجدیدپذیر متناوب PV، به علت تغییرات تصادفی و سریع توان خروجی منجر به نوسانات سریع ولتاژ فیدر می‌شود که ادوات کنترل‌کننده مکانیکی کند قادر به پاسخ‌گویی به این تغییرات سریع نیستند [۲-۳]. از طرفی اینورتر موجود در این سیستم‌ها قادر به توازن توان راکتیو سیستم با سرعتی بالاتر از خازن‌های موازی می‌باشد. بنابراین، تولیدات پراکنده از قبیل سیستم PV نیز می‌توانند به عنوان منبع تولید توان راکتیو مورد توجه قرار گیرند و کنترل بهینه توان راکتیو این سیستم‌ها از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

کنترل روزانه ولتاژ و توان راکتیو سیستم‌های توزیع مکرراً جهت کاهش تلفات و حفظ سطوح ولتاژ در محدوده استاندارد استفاده شده است. نفوذ بارهای غیرخطی در سیستم منجر به پیچیدگی بیش‌تر مسئله می‌شود. در اغلب مطالعات، کنترل غیر برخط به عنوان ابزاری برای هماهنگ کردن کنترل‌کننده‌های متمرکز و محلی شبکه توزیع با هدف تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات بکار می‌رود [۴]. در [۴] مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو به صورت برنامه ریزی روزانه ادوات مکانیکی بدون در نظر گرفتن نامعینی تولید ارائه شده است. در برخی مطالعات از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم PV به عنوان یک متغیر کنترلی اضافه استفاده شده است [۵-۶]. در [۶] روش کنترل دولایه ارائه شده است که از توان راکتیو سیستم PV به صورت محلی صرفاً برای کنترل نوسانات ولتاژ بدون در نظر گرفتن هارمونیک‌ها استفاده شده است. در [۸] با فرض پیش‌بینی دقیق خروجی سیستم PV از مقادیر پیش‌بینی روزانه بار و تولید برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو سیستم در شرایط هارمونیک با استفاده از توان راکتیو استفاده شده است اما علی‌رغم لحاظ کردن هارمونیک‌ها، نامعینی در تولید لحاظ نشده است. در [۹] برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت دو مرحله‌ای در یک سیستم توزیع اکتیو بدون در نظر گرفتن قید هارمونیک و توان راکتیو منابع تولید پراکنده ارائه شده است که نیازمند محاسبه همزمان ضرایب حساسیت سیستم است و از طرفی امکان رخداد کلیدزنی‌های متعدد وجود دارد. در [۱۰ و ۱۱] نیز خطای پیش‌بینی تولید در برنامه‌ریزی روزانه لحاظ شده است ولی در نهایت نتایج به صورت احتمالاتی ارائه می‌شود و هارمونیک‌ها نیز لحاظ نشده‌اند. دو نقص عمده در مطالعات پیشین وجود دارد: ۱- در اکثر مطالعات یک محدوده قطعی برای توان راکتیو سیستم PV استفاده شده درحالی‌که توان راکتیو به مقدار توان اکتیو خروجی نیز وابسته

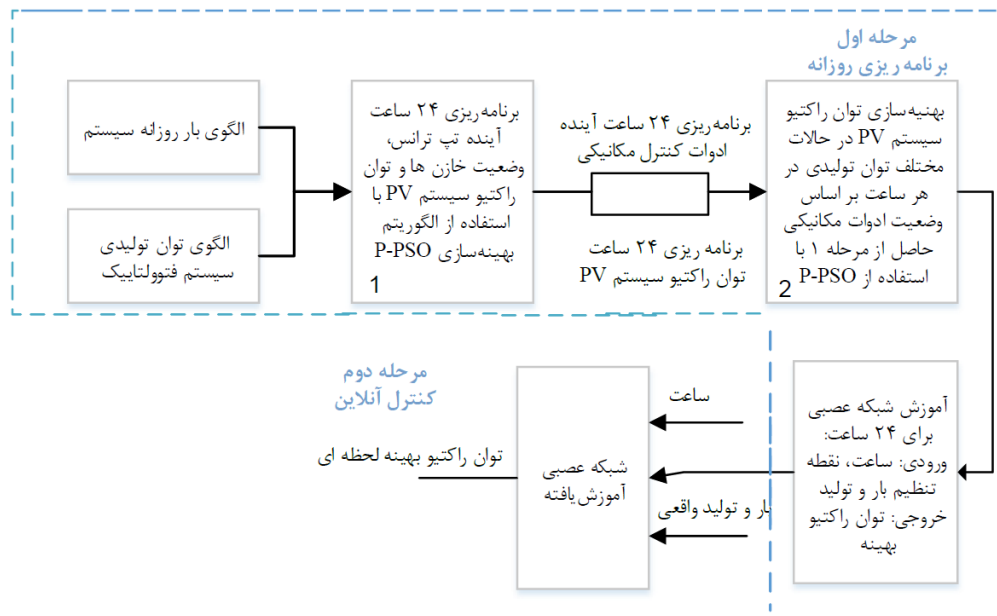
بوده و مطالعات نشان می‌دهد سطح تشعشعات خورشیدی می‌تواند در مدت یک ثانیه حتی به میزان ۶۰٪ تغییر یابد [۱۲]. بنابراین، پیش‌بینی خروجی PV برای ۲۴ ساعت آینده و در نتیجه محدوده در دسترس توان راکتیو دقیق نمی‌باشد [۵-۱۱]. ۲- در بسیاری از روش‌های ارائه شده THD و تأثیرپذیری آن از توان راکتیو در نظر گرفته نشده است [۹-۱۱].

به منظور غلبه همزمان بر این محدودیت‌ها در این مقاله روش کنترل دولایه ارائه شده است که الگوی توان تولیدی سیستم PV را با توجه به میانگین روزهای قبل تخمین زده و با استفاده از داده‌های بار و تولید و روش بازه‌بندی بهینه زمانی، برنامه‌ریزی کنترل‌کننده‌های مکانیکی و برنامه‌ریزی اولیه توان راکتیو روز آینده را انجام داده و با در نظر گرفتن محدوده خطای تولید مشاهده شده در هر ساعت، توان راکتیو بهینه برای حالات مختلف محاسبه و شبکه عصبی جهت استخراج توان راکتیو بهینه آموزش داده می‌شود. در نهایت از این شبکه عصبی به صورت برخط (در فاصله ۱۵ دقیقه) برای استخراج توان راکتیو بهینه استفاده می‌شود. به این صورت نوسانات ولتاژ در اثر تغییرات تصادفی تولید حداقل می‌شود. روش پیشنهادی، به صورت یک مسئله بهینه سازی مطرح می‌شود که برای بهینه سازی سه قسمت، شامل بازه‌بندی بهینه زمانی، برنامه‌ریزی ۲۴ ساعت آینده سیستم و تعیین توان راکتیو بهینه در هر ساعت، از الگوریتم P-PSO استفاده شده و در شبکه تست IEEE ۱۲۳ و ۳۷ با سه مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. با توجه به توضیحات بالا، نوآوری‌های مقاله به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- ۱- ارائه روش کنترل دولایه نوینی که با لحاظ کردن نامعینی تولید، از کنترل توان راکتیو اینورتر PV برای تنظیم ولتاژ استفاده می‌کند.
- ۲- نامعینی در تولید و تأثیر آن بر محدوده در دسترس توان راکتیو و نیز هارمونیک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.
- ۳- روش بهینه‌سازی P-PSO برای اولین بار در مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو استفاده می‌شود.

۲- روش پیشنهادی

بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است که شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله اول برای برنامه‌ریزی روز آینده و مرحله دوم که فرآیند کنترل توان راکتیو را به صورت برخط اجرا می‌نماید. در مرحله اول یکی از ورودی‌ها الگوی بار مصرفی سیستم بوده و ورودی دیگر الگوی توان تولیدی سیستم PV است که بر اساس اینکه وضعیت آب و هوای روز آینده به چه شکل می‌باشد، توسط میانگین‌گیری توان تولیدی سیستم در سی روز گذشته و با وضعیت جوی مشابه حاصل می‌شود. مطابق توضیحات گذشته پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده سیستم پیچیده بوده و زمان‌بر می‌باشد. در روش پیشنهادی این فرآیند پیچیده حذف شده و تنها از اطلاعات گذشته الگوی تولیدی با در نظر گرفتن وضعیت جوی استفاده شده و سپس با



شکل ۱: طرح کنترل ولتاژ و توان راکتیو دو لایه پیشنهادی

۲۴ ساعت شبانه روز حاصل می شود. محدودیت اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس های سیستم نیز به صورت یک تابع جریمه در تابع هدف گنجانده می شود. تابع هدف تعریف شده به صورت رابطه زیر می باشد:

$$F = \min \begin{pmatrix} f_1 = \sum_{t=1}^{Nt} K_p P_{loss,t} \\ f_2 = \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^n \mu_{THD_i,t} \\ f_3 = \sum_{t=1}^{Nt} \sum_{i=1}^n \mu_{\Delta V_i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

در معادله بالا f_1 هزینه تلفات توان اکتیو سیستم بوده و P_{loss} تلفات توان اکتیو، n تعداد باس های سیستم، Nt تعداد فواصل زمانی سیستم در ۲۴ ساعت بوده که در این مقاله با توجه به فواصل زمانی موجود برای توان سیستم PV این فاصله ۱۵ دقیقه می باشد. به منظور کاهش بیش تر THD و نوسانات ولتاژ این پارامترها به عنوان بخشی از تابع هدف سیستم به ترتیب توسط معادلات f_1 و f_2 گنجانده می شود، که μ_{f_i} می باشد. $\Delta V_i = |1 - V_i|$ بر اساس انحراف f از مقدار مطلوب آن یعنی f_d به صورت زیر تعریف می شود که $f_d = 0.5\%$ در نظر گرفته شده است [۱۳]:

$$\mu_{f_i} = \begin{cases} f_i / f_{i,max} & \text{for } f_i < f_d \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^{(h)}|^2}}{|V_i^{(1)}|} \quad (3)$$

THD_i توسط محاسبات پخش بار هارمونیک (HLPF) حاصل می شود [۱۳]. تلفات توان اکتیو شبکه نیز با جمع تلفات فرکانس اصلی و سایر فرکانس های هارمونیک به صورت زیر محاسبه می شود:

توجه به همان اطلاعات، محدوده تغییرات توان تولیدی سیستم تعیین می شود.

۲-۱- تابع هدف و قیود مسئله

کنترل ولتاژ و توان راکتیو دو مرحله ای در شبکه های توزیع دارای منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان منابع تولید پراکنده، مسئله بهینه سازی غیرخطی و دارای پارامترها و متغیرهای پیوسته و گسسته می باشد. در مرحله برنامه ریزی روزانه (بلوک ۱ در شکل ۱) تابع هدف ارائه شده برای ۲۴ ساعت و با هدف برنامه ریزی کنترل خازن ها و تپ ترانز سفورماتور و توان راکتیو سیستم PV با استفاده از P-PSO بهینه می شود. سپس نتایج حاصل از بلوک ۱، شامل برنامه ریزی ساعتی کلیدها در ساعات ۸ صبح تا ۸ شب، و توان راکتیو ۲۴ ساعت به بلوک ۲ انتقال می یابد. در بلوک دوم برای تولید داده های لازم برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده در کنترل برخط، همین تابع هدف برای هر ساعت در توان های مختلف بهینه شده و خروجی آن توان راکتیو بهینه سیستم PV در ازای ساعت و تولید خاص خواهد بود. متغیرهای کنترلی بلوک ۱ شامل برنامه ریزی ۲۴ ساعت موقعیت OLTC ها، خازن ها و برنامه ریزی ساعتی توان راکتیو خروجی سیستم PV بر اساس طرح پیشنهادی شکل ۱ و برای بلوک ۲، تنها متغیر کنترلی توان راکتیو بهینه سیستم PV می باشد. اهداف طرح کنترلی شامل کاهش تلفات سیستم، بهبود پروفایل ولتاژ و نیز محدود کردن اعوجاج هارمونیک (THD) ولتاژ باس ها می باشد. در ادامه توابع هدف و محدودیت های مسئله ارائه شده است:

تلفات توان اکتیو از مجموع تلفات خطوط و ترانسفورماتورهای سیستم در فرکانس اصلی و سایر فرکانس های هارمونیک سیستم در

بازه‌های زمانی بهینه، پس از پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده بار الکتریکی و توان خروجی سیستم PV تابع هدف زیر بایستی حداقل شود:

$$F = \min \sum_{LL=1}^n \sum_{t=1}^{NT} \sigma_L \quad (9)$$

که n تعداد سطوح بار (چهار) و NT خروجی مسئله بهینه سازی می‌باشد که نشان‌دهنده تعداد ساعات در هر سطح بار است (بازه‌بندی زمانی) و مجموع آن در کلیه بازه‌های زمانی برابر ۲۴ ساعت می‌باشد. بنابراین، مطابق رابطه (۲۳) در هر بازه زمانی هر چه اختلاف توان‌های تولیدی سیستم PV و بار الکتریکی سیستم نزدیک به هم باشند، پارامتر σ_L مقدار کم‌تری خواهد داشت.

$$\sigma_L = (P_{Lhs}^t - P_{Lhs}^1)^2 + (P_{Lhs}^t - P_{Lhs}^1)^2 \quad (10)$$

ساعت t ام سطح بار نشان می‌دهد.

در فرآیند بهینه‌سازی مرحله اول، هر ذره از جمعیت شامل زیر بخش‌هایی به تعداد همین بازه‌های زمانی می‌باشد. در این مقاله تعداد بازه‌های زمانی برابر ۴ و تپ ترانسفورماتور از ۷- تا ۷+ و مجموعاً ۱۵ حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، در هر ذره از جمعیت ذرات ۵ بیت (متغیر باینری) به آن اختصاص می‌یابد. همچنین به‌ازای هر واحد خازنی موجود در سیستم نیز یک بیت اختصاص می‌یابد که وضعیت روشن یا خاموش بودن آن به‌ترتیب با استفاده از "۰" و "۱" نشان داده می‌شود. در نهایت برای توان راکتیو هر یک از واحدهای PV موجود در سیستم یک بیت اختصاص می‌یابد.

محدودیت در حداکثر توان راکتیو سیستم PV

در هر زمان از شبانه‌روز، توان راکتیو حاصل (Q_{PV}) بسته به نقطه کار سیستم PV، توان راکتیو رد و بدل شده بین شبکه و مبدل سیستم PV توسط قیود مختلفی محدود می‌شود. فرض می‌شود سیستم PV با حداکثر توان اکتیو (p_{PV}) در شبکه بهره‌برداری می‌شود. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها برای توان راکتیو سیستم از طریق حداکثر توان ظاهری اینورتر تعیین می‌شود. توان راکتیو PV بستگی به بیشینه مقادیر ولتاژ و جریان مبدل آن دارد. بنابراین، برای محاسبه محدود قابل کنترل $Q_{PV} - p_{PV}$ بایستی مقادیر ولتاژ و جریان ماکزیمم مبدل

$$V_{C,max} = \frac{X_C}{V_{PV,max}} \sqrt{P_{PV,R}^2 + \left(V_{PV,R} \tan \theta_R + \frac{V_{PV,max}^2}{X_C} \right)^2}$$

$$Q_{C,PV}^t = \sqrt{(V_{PV} I_{C,max})^2 - P_{PV}^t{}^2}, \quad \text{و } I_{C,max} \text{ در}$$

$$Q_{v,PV}^t = \sqrt{\left(\frac{V_{C,max} V_{PV}}{X_C} \right)^2 - P_{PV}^t{}^2 - \frac{V_{PV}^2}{X_C}}$$

$$Q_{PV,max}^t = \min \{ Q_{C,PV}^t, Q_{v,PV}^t \}$$

نظر گرفته شود. رابطه توان اکتیو و راکتیو با در نظر گرفتن جریان مبدل I_C به‌صورت زیر است:

$$P_{PV}^2 + Q_{PV}^2 = (I_C V_{PV})^2 \quad (11)$$

که V_{PV} ولتاژ مبدل بوده و رابطه توان اکتیو و راکتیو با در نظر گرفتن محدودیت ولتاژ مبدل به‌صورت زیر است:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_b} P_{loss,i}^1 + \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{h=h_0}^{h_{max}} P_{loss,i}^h \quad (4)$$

که n_b ، h_0 و h_{max} به‌ترتیب تعداد شاخه‌های شبکه، کم‌ترین و بیش‌ترین مرتبه هارمونیک‌های سیستم می‌باشند. طبق استاندارد IEEE-519 مقدار THD ولتاژ باس‌های سیستم تا حد ۵٪ محدود می‌شود [۱۴]. در نهایت تابع هدف که بایستی کمینه شود در هر ساعت t (مطابق گام دوم شبیه‌سازی) با استفاده از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$f(x) = \alpha_1 f_{1n} + \alpha_2 f_{2n} + \alpha_3 f_{3n} \quad (5)$$

α_1 ، α_2 و α_3 ضرایب وزنی هزینه تلفات، THD ولتاژ و انحراف ولتاژ باس‌ها هستند که به‌صورت تجربی محاسبه می‌شوند. f_{1n} ، f_{2n} و f_{3n} مقادیر نرمالیزه توابع f_1 ، f_2 و f_3 هستند که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{in}(x) = \frac{f_i - f_{i,min}}{f_{i,max} - f_{i,min}} \quad (6)$$

که $f_{i,max}$ و $f_{i,min}$ حداکثر و حداقل تابع f_i می‌باشند. در این مقاله $f_{i,max} = 0$ و $f_{i,min} = 0$ مقادیر توابع، پیش از بهینه‌سازی می‌باشند.

قیود مسئله

محدودیت ولتاژ باس‌ها

اندازه ولتاژ باس‌ها توسط رابطه زیر محدود می‌شود:

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max}, i=1,2,...,n \quad (7)$$

که $V_{min} = 0.95$ pu و $V_{max} = 1.05$ pu در نظر گرفته می‌شود. مقدار ولتاژ مؤثر هر باس نیز توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$|V_i| = \sqrt{|V_i^{(1)}|^2 + \sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^{(h)}|^2} \quad (8)$$

محدودیت حداکثر تعداد کلیدزنی OLTC و تعداد عمل

کلیدزنی خازن‌ها

یکی از مشکلات برنامه ریزی ادوات مکانیکی کنترل ولتاژ و توان راکتیو شامل خازن‌ها و کنترل‌کننده‌های تپ ترانسفورماتور رخداد کلیدزنی متعدد در سیستم و مشکلات ناشی از آن می‌باشد. بنابراین، تعیین زمان مناسب و به حداقل رساندن کلیدزنی از اهداف مهم در این مقاله می‌باشد. یک روش مناسب برای به حداقل رساندن عملکرد کلیدزنی خازن‌ها و OLTC، کاهش فضای جستجو در مسئله بهینه سازی و کاهش اثر نامعینی و تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده این است که از روش تقسیم بازه‌های زمانی استفاده شود. در [۱۵] روشی ارائه شده که بازه‌بندی بهینه زمانی را تنها بر اساس تغییرات سطح بار سیستم اجرا می‌نماید. در روش تقسیم بازه زمانی بر اساس اینکه در طول یک شبانه روز حداکثر چه تعداد عملکرد کلیدزنی در ادوات مکانیکی صورت می‌گیرد (تعداد بازه‌های زمانی) با توجه به تغییرات سطح بار الکتریکی و نیز توان خروجی سیستم PV کل ۲۴ ساعت شبانه‌روز به چند بازه بهینه تقسیم می‌شود. بهینه‌سازی بر این اصل استوار است که بایستی مجموع تفاوت توان و بار در بازه‌های زمانی کمینه شود. برای حصول

در این مقاله $V_{PV,max} = ۱/۰۵$ و $V_{PV,min} = ۰/۹۵$ و $X_C = ۰/۳$ پریونیت در نظر گرفته شده اند.

۲-۲- مازول آموزش شبکه عصبی و کنترل برخط

شکل ۲ فلوچارت کامل مازول شبکه عصبی برای آموزش شبکه و کنترل برخط توان راکتیو را نشان می‌دهد. کارایی این مازول خصوصاً مربوط به زمانی است که تغییرات عمده و پیش‌بینی نشده‌ای در بار یا تولید ایجاد شود. در عمل تخمین بار سیستم عموماً با دقت بسیار خوبی صورت می‌گیرد. به همین دلیل در این مقاله تنها نامعینی تولید در نظر گرفته می‌شود. برای مثال در شکل ۳ میانگین توان تولیدی سیستم در آب و هوای آفتابی و محدوده تغییرات مشاهده شده توان تولیدی طی سی روز گذشته نشان داده شده است. با در نظر گرفتن این محدوده تغییرات در هر ساعت و تنظیمات کنترلی حاصل از مرحله اول، در هر ساعت (۹ صبح تا ۷ عصر) محدوده توان تولیدی به بازه‌هایی با دقت ۰.۱ پریونیت تقسیم شده و در هر بازه با در نظر گرفتن تنظیمات کنترلی حاصل از مرحله اول مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف معادله (۵) برای حصول توان راکتیو بهینه با استفاده از روش بهینه‌سازی P-PSO اجرا می‌شود. در نهایت شبکه عصبی مطابق شکل ۲ آموزش داده می‌شود. شبکه عصبی سه‌لایه بوده و به روش پس‌انتشار خطا آموزش داده می‌شود. لایه مخفی شامل ۵ نرون بوده و از توابع تبدیل "tansig" و "purelin" به ترتیب در لایه‌های مخفی و خروجی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای ساعات دیگر شبانه‌روز توان راکتیو حاصل از مرحله اول مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$P_{PV}^2 + \left(Q_{PV} + \frac{V_{PV}^2}{X_C} \right)^2 = \left(\frac{V_C V_{PV}}{X_C} \right)^2 \quad (۱۲)$$

X_C راکتانس خازنی نصب شده می‌باشد. با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار طراحی $V_{C,max}$ را محاسبه کرد که حداکثر ولتاژ لینک DC اینورتر $V_{DC,max}$ و حداکثر جریان مبدل $I_{C,max}$ را تعیین می‌کند [۱۶ و ۱۷]. حداکثر جریان مبدل بایستی در رابطه زیر با استفاده از مقادیر ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو PV صدق نماید:

$$I_{C,max} = \frac{P_{PV,R}^2 + (V_{PV,R} \tan \theta_R)^2}{V_{PV,min}} \quad (۱۳)$$

که $\cos \theta_R$ ضریب توان نامی می‌باشد. به شینه ولتاژ کانورتر بر اساس مقدار توان اکتیو و راکتیو و حداکثر ولتاژ PV به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{C,max} = \frac{X_C}{V_{PV,max}} \sqrt{P_{PV,R}^2 + \left(V_{PV,R} \tan \theta_R + \frac{V_{PV,max}^2}{X_C} \right)^2} \quad (۱۴)$$

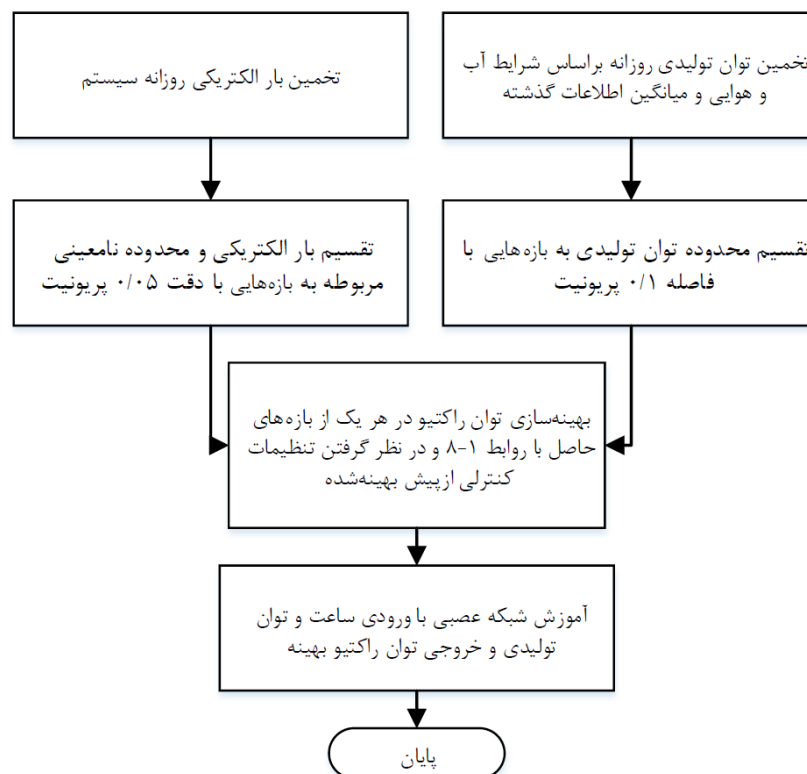
همچنین توان راکتیو PV به ترتیب با در نظر گرفتن جریان نامی و ولتاژ نامی سیستم PV عبارتست از:

$$Q_{C,PV}^t = \sqrt{(V_{PV} I_{C,max})^2 - P_{PV}^2}, \quad (۱۵)$$

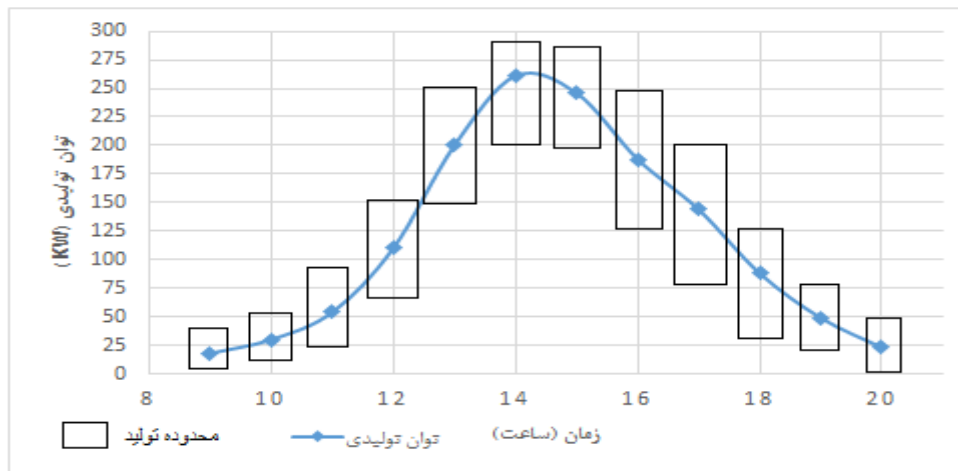
$$Q_{V,PV}^t = \sqrt{\left(\frac{V_{C,max} V_{PV}}{X_C} \right)^2 - P_{PV}^2} - \frac{V_{PV}^2}{X_C}$$

در نهایت در هر نقطه کار حداکثر توان راکتیو در هر ساعت t با استفاده از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۷]:

$$Q_{PV,max}^t = \min \{ Q_{C,PV}^t, Q_{V,PV}^t \} \quad (۱۶)$$



شکل ۲: مازول شبکه عصبی و کنترل برخط



شکل ۳: الگوی توان تولیدی سیستم PV و محدوده تغییرات مشاهده شده

$$V_i = \omega_i + \sum_{P_k \in N_i} c_k r_k (P_k - X_i) \quad (19)$$

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (20)$$

که P نشان‌دهنده بهترین تجربه شخصی از ذرات همسایه موجود در همسایگی ذره i ام است. N_i تعداد ذرات موجود در همسایگی ذره، c_k ضریب شتاب است که به صورت یکنواخت $c_k = c/|N_i|$ بین ذرات همسایگی تقسیم می‌شود و $c = 4/1$ و r_k عدد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ است.

۳-۲- مازول آشفستگی

برای جلوگیری از همگرایی زود هنگام این مازول طوری طراحی شده است که تنوع بیشتری برای جهش از بهینه محلی ایجاد کند. برای این منظور، شمارنده f_c در نظر گرفته می‌شود که، در صورت عدم بهینه شدن پاسخ در هر تکرار یک واحد افزایش می‌یابد. مازول آشفستگی طوری طراحی شده است که اگر $f_c > m$ شد عمل می‌کند که m حداکثر تعداد تکرار متوالی برنامه بدون بهبود تابع هدف برای فعال شدن مازول آشفستگی است و در این طرح $m = 5$ در نظر گرفته شده است. در مازول آشفستگی از جمعیت P_g بین ۱۰ تا ۵۰ درصد از ابعاد آن (D) به صورت تصادفی انتخاب شده و مطابق رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$P_{gd}^{per} = \begin{cases} P_{gd} + r_4(X_{\max,d} - X_{\min,d}) & \text{if } r_3 > 0.5 \\ P_{gd} - r_4(X_{\max,d} - X_{\min,d}) & \text{if } r_3 \leq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

که r_3 و r_4 اعداد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ هستند که با استفاده از توزیع نرمال حاصل می‌شوند. P_{gd}^{per} در واقع d امین بعد از P_g است که آشفستگی در آن اعمال شده است. $X_{\max,d}$ و $X_{\min,d}$ به ترتیب بهترین و بدترین موقعیت ذره در این بعد را نشان می‌دهند. در نهایت تابع هدف برای ذرات آشفته محاسبه شده و اگر $f(P_g^{per}) < f(P_g)$ ، ذرات آشفته (P_g^{per}) جایگزین P_g می‌شود. فلوجارت کامل این روش در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی

PSO یک تکنیک بهینه‌سازی برای حل مسائل بهینه‌سازی است ایده اصلی آن تولید جمعیت به صورت تصادفی است که هر فرد در جمعیت ذرات، یک ذره یا "particle" نامیده می‌شود و یک حل بالقوه را نشان می‌دهد. هر ذره در فضای جستجو، موقعیت خود را تغییر داده و سرعت خود را بر اساس تجربیات پرواز خود و اجزای همسایه، به‌هنگام می‌کند که برای کسب موقعیت بهتر کمک می‌کند [۱۸].

۳-۱- الگوریتم P- PSO

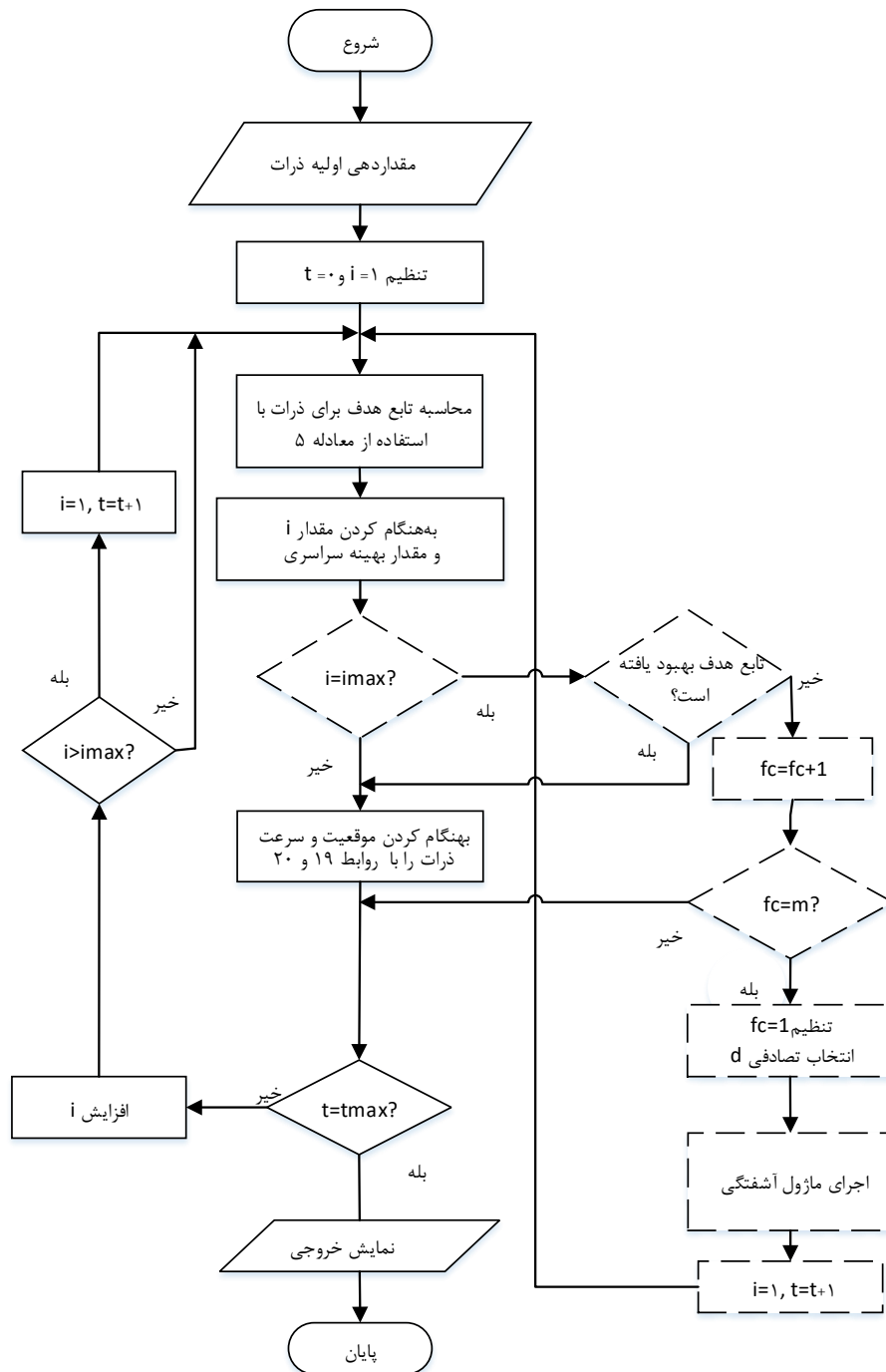
قابلیت این روش پیشنهادی اولین بار برای مسئله بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی و نیز کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع با استفاده از خازن‌گذاری و بازآرایی شبکه در مراجع [۱۹ و ۲۰] نشان داده شد. در این روش به منظور کنترل بهتر قابلیت‌های اکتشاف و استخراج پارامتر ω بستگی به برازش ذره‌ها و همچنین زمان دارد. بنابراین، به ذرات با برازش کمتر سرعت کمتری تخصیص می‌شود تا به استخراج کمک کند. در حالی که ذرات با تابع برازش بزرگ‌تر با مقادیر سرعت بالاتری مواجه می‌شود که این ذره را برای اکتشاف بیشتر هدایت می‌کند. عنصر اول و دوم در رابطه زیر، به ترتیب بستگی سرعت به تابع برازش و زمان را نشان می‌دهند. سرعت ذره i ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_i = c_1((\omega_{\max} - \omega_{\min}) * G_i + \omega_{\min}) + c_2((\omega_{\max} - \omega_{\min}) * \frac{\max iter - iter}{\max iter} + \omega_{\min}) \quad (17)$$

که $\omega_{\max}$ و $\omega_{\min}$ مقادیر بیشینه و کمینه سرعت بوده و به ترتیب برابر $0/4$ و $0/9$ هستند و برازش G_i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_i = \frac{f(P_i) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (18)$$

$f_{\min}$ و $f_{\max}$ مقادیر برازش بیشینه و کمینه تجربه شخصی هر ذره موجود در جمعیت است. طبق رابطه (۱۸) برای ذره با برازش کمتر G_i کمتر می‌شود و بالعکس. در نهایت، سرعت V_i ذره i ام به صورت زیر به‌هنگام می‌شود:



شکل ۴: الگوریتم PSO پیشنهادی با مازول آشفته‌گی

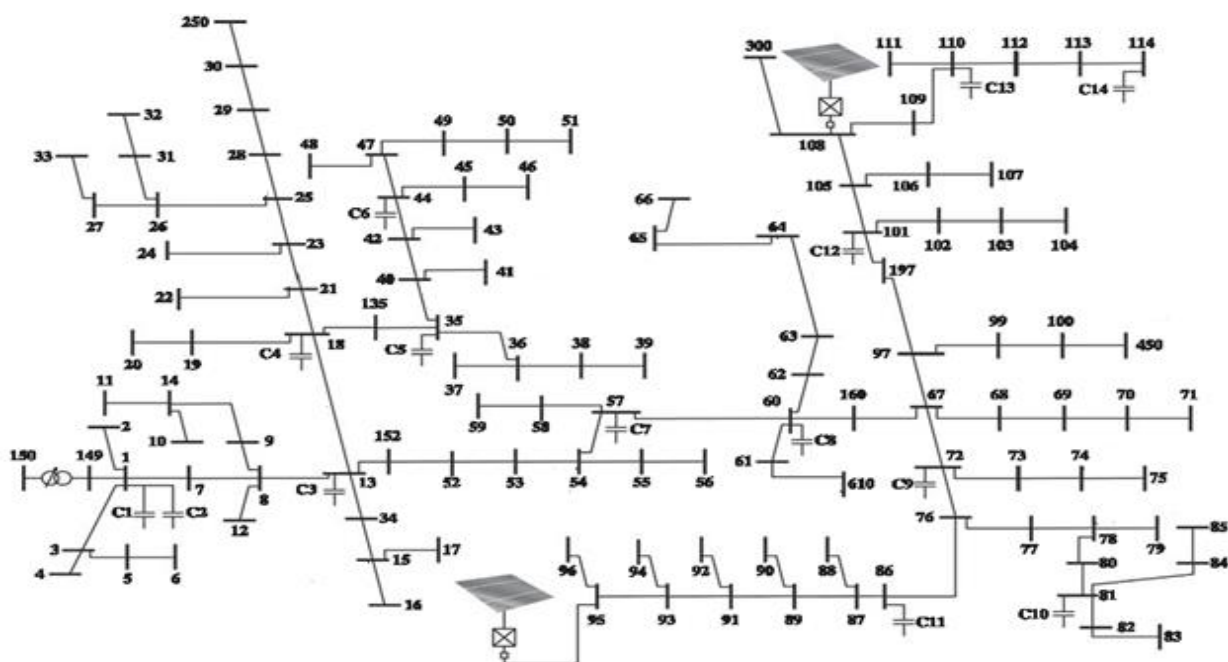
۴- نتایج عددی

الکتریکی در [۲۲] و اطلاعات مربوط به الگوی توان تولیدی سیستم PV از شرکت برق منطقه‌ای کرمان دریافت شده است. واحدهای خازنی به صورت جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود.

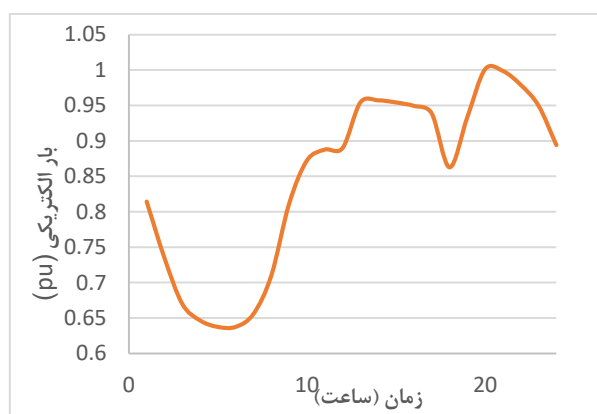
جدول ۱: واحدهای خازنی موجود در سیستم

باس	۲۷	۲۹	۵۴	۵۰	۶۶	۵۴
kVar	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۵۰
باس	۸۴	۱۹	۱۴	۹	۱۳	۵۲
kVar	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰

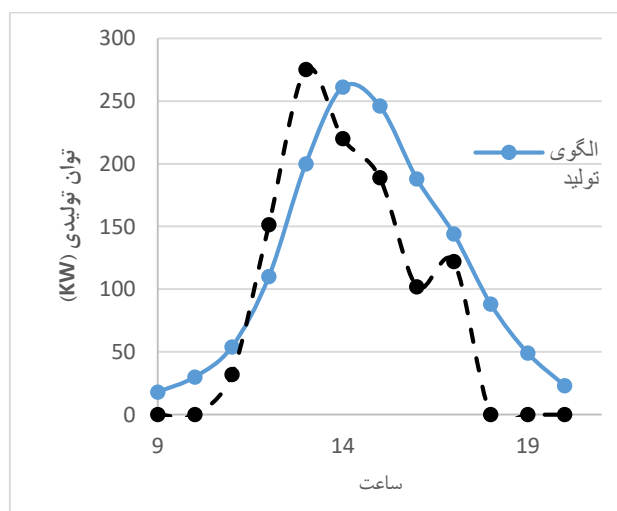
الف: شبکه ۱۲۳ باسه: روش پیشنهادی بر روی شبکه ۴/۱۶ کیلوولت ۱۲۳ باسه IEEE شامل بارهای غیرخطی مطابق شکل ۵ اجرا شده است که مشخصات آن در [۲۱] ارائه شده است و بار الکتریکی بیشینه سیستم نسبت به سیستم اصلی ۵٪ افزایش یافته است. دو سیستم PV با ظرفیت ۳۰۰ kW مطابق شکل در باس‌های ۹۵ و ۱۰۸ واقع شده که با فرض فاصله کم بین دو سیستم و شرایط آب و هوایی یکسان، توان خروجی آن‌ها یکسان می‌باشد. در ضمن اینورتر مربوط به سیستم‌های PV با ظرفیت ۵۰۰ kVA در نظر گرفته شده است. سری زمانی بار



شکل ۵: سیستم ۱۲۳ باس



شکل ۶: الگوی بار الکتریکی سیستم در ۲۴ ساعت



شکل ۷: الگوی توان تولیدی سیستم فتوولتائیک

حالت چهارم: بهینه‌سازی تپ ترانسفورماتور و وضعیت خازن‌ها با استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم PV و بدون در نظر گرفتن هارمونیک‌ها صورت گرفته است.

حالت پنجم: بهینه‌سازی تپ ترانسفورماتور و وضعیت خازن‌ها با در نظر گرفتن هارمونیک‌ها و در نظر گرفتن ظرفیت توان راکتیو سیستم فتولتاییک صورت گرفته است (روش پیشنهادی).

در ابتدا (حالت اول) فرض شده است که واحدهای خازنی در سیستم وجود نداشته و تپ ترانسفورماتور در مقدار +۵ تنظیم شده است. بر این اساس، ابتدا منحنی الگوی بار الکتریکی مورد تقاضا و توان خروجی سیستم PV در ۲۴ ساعت آینده مطابق شکل ۶ و شکل ۷ حاصل می‌شود. با در نظر گرفتن الگوی بار و تولید و استفاده از بازه‌های بهینه حاصل نتایج برنامه ریزی ۲۴ ساعت آینده کنترل ادوات مکانیکی کنترل ولتاژ و توان راکتیو در حالات مختلف، مطابق جدول ۲ حاصل می‌شود.

بر این اساس برای حصول حداقل کلیدزنی مکانیکی با توجه به الگوی بار و تولید که به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ مشخص شده است، الگوریتم بازه‌بندی بهینه زمانی با هدف رسیدن به چهار بازه بهینه اجرا شده و بازه‌های زمانی به صورت ساعات {۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸}، {۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲}، {۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹} و {۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴} مشخص می‌شود.

سیستم شکل ۵ در چهار حالت مطابق زیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد:

حالت اول: هیچ جبران‌سازی بهینه‌ای در سیستم صورت نگرفته است. موقعیت تپ ترانسفورماتور +۵ در نظر گرفته شده است.

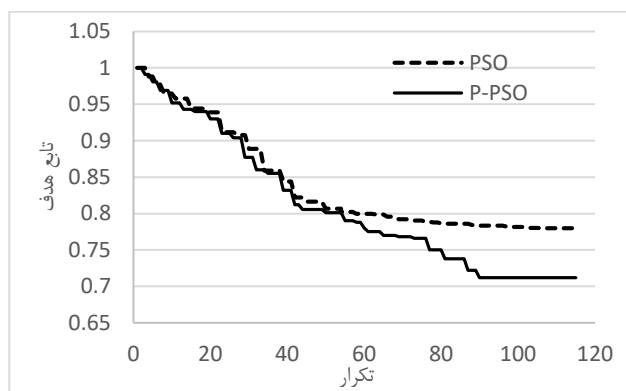
حالت دوم: بهینه‌سازی تپ ترانسفورماتور و وضعیت خازن‌ها بدون استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم PV و بدون در نظر گرفتن هارمونیک‌ها صورت گرفته است.

حالت سوم: بهینه‌سازی تپ ترانسفورماتور و وضعیت خازن‌ها با در نظر گرفتن هارمونیک‌ها و بدون استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم PV صورت گرفته است.

جدول ۲: نحوه کنترل ادوات مکانیکی کنترل برای حالات مختلف

حالت دوم													حالت سوم و پنجم														
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	TAP	ساعت	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	TAP	ساعت
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۲	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۳	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۴	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۵	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۶	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۷	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	-۳	۸	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۲	۱
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	-۵	۹	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۵	۱	
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	-۵	۱۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۵	۱	
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	-۵	۱۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۵	۱	
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	-۵	۱۲	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۵	۱	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۳	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۴	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۵	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۶	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۷	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۸	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۶	۱۹	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	-۶	۰
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۷	۲۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۷	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	-۷	۲۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۷	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	-۷	۲۲	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۷	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	-۷	۲۳	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۷	۰	
۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	-۷	۲۴	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	-۷	۰	

[۲۰] نیز ارزیابی و ارائه گردیده است. در شکل ۸ نمودار همگرایی دو روش ارائه شده است که، مقایسه نتایج نشان‌دهنده گیر افتادن PSO در بهینه محلی و عملکرد مناسب روش P-PSO نسبت به آن می‌باشد. مطابق جدول نتایج، در حالت دوم که هارمونیک‌ها در مسئله بهینه‌سازی لحاظ نشده است، وضعیت سیستم از لحاظ هارمونیک بدتر می‌شود. مطابق جدول ۳ تلفات انرژی در سیستم به‌ترتیب از حالت دوم تا پنجم حدود ۱۵/۵، ۲۰، ۲۴/۵ و ۲۳/۶ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت توان راکتیو سیستم PV منجر به کاهش بیش‌تر تلفات و بهبود بیش‌تر پروفایل ولتاژ در سیستم می‌شود. از طرفی بیش‌ترین کاهش تلفات مربوط به حالت چهارم می‌باشد که ضمن این که از ظرفیت توان راکتیو سیستم PV استفاده شده است، قید هارمونیک‌ها در مسئله بهینه‌سازی لحاظ نشده است. مقایسه نتایج مربوط به هارمونیک‌ها در سیستم نیز نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هارمونیک‌ها در تابع هدف (حالت سوم و پنجم) منجر به رعایت قید هارمونیک‌ها خصوصاً در حالت پنجم شده که از ابزار اضافی توان راکتیو نیز با روش پیشنهادی استفاده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که روش کنترل پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها نتایج بهتری در پی داشته است.



شکل ۸: نمودار همگرایی PSO و P-PSO

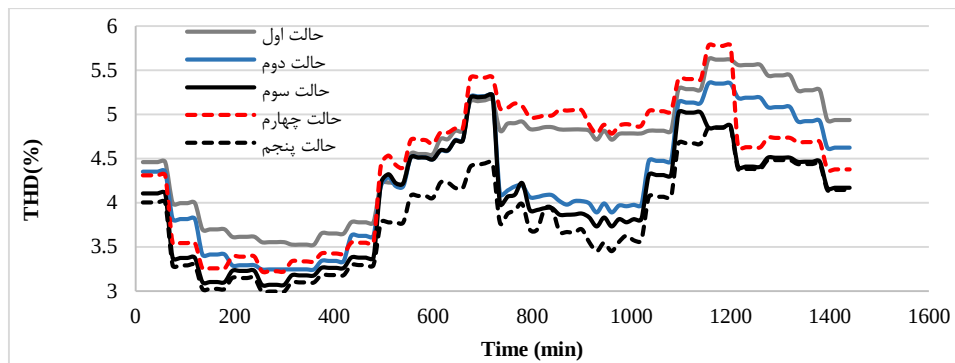
حالت چهارم

ردیف	TAP	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۱	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۲	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۳	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۴	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۵	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۶	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۷	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۸	-۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱
۹	-۵	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۱۰	-۵	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۱۱	-۵	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۱۲	-۵	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
۱۳	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۱۴	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۱۵	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۱۶	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۱۷	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۱۸	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۱۹	-۶	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱
۲۰	-۷	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۲۱	-۷	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۲۲	-۷	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۲۳	-۷	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۲۴	-۷	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰

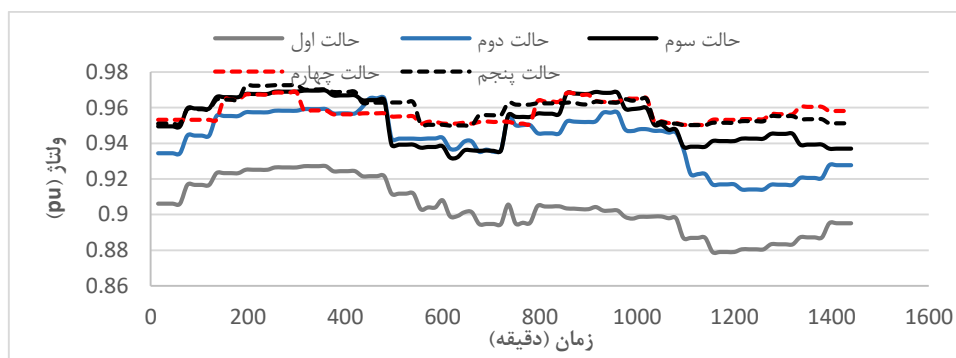
در اجرای بهینه‌سازی، برای حالت دوم و چهارم ضرایب وزنی معادله (۵) به صورت $\alpha_1 = 0.5$ ، $\alpha_2 = 0$ و $\alpha_3 = 0.5$ و برای حالت سوم و پنجم به صورت $\alpha_1 = 0.6$ ، $\alpha_2 = 0.2$ و $\alpha_3 = 0.2$ لحاظ می‌شود. نتایج حدی حاصل از اجرای برنامه در حالات مختلف مطابق جدول ۳ حاصل می‌شود. همچنین به‌منظور نشان دادن کارایی روش P-PSO نسبت به PSO نتایج حالت پنجم با PSO با پارامترهای کنترل مطابق

جدول ۳: نتایج حدی حاصل از اجرای برنامه

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	حالت پنجم با PSO
۰/۸۷۱۳	۰/۹۱۷	۰/۹۴۱	۰/۹۵۱	۰/۹۵۰۴	۰/۹۴۷۷
۱	۱/۰۳۲	۱/۰۳۳	۱/۰۳۴	۱/۰۳۸	۱/۰۳۳
۵/۶۲۲۶	۵/۸۳۲	۵/۰۲	۵/۷۷	۴/۸	۵/۰۳۳
-	۱۵/۵۶	۲۰/۲۵	۲۴/۴۹	۲۳/۶۱	۲۱/۹۳
۴/۵۴	۴/۴۱	۳/۹۸۲	۴/۳۲	۳/۷۷	۳/۹۱۸
THD متوسط					
انرژی ذخیره شده %					
$THD_{max}\%$					
بیشینه ولتاژ باس (pu)					
کمینه ولتاژ باس (pu)					

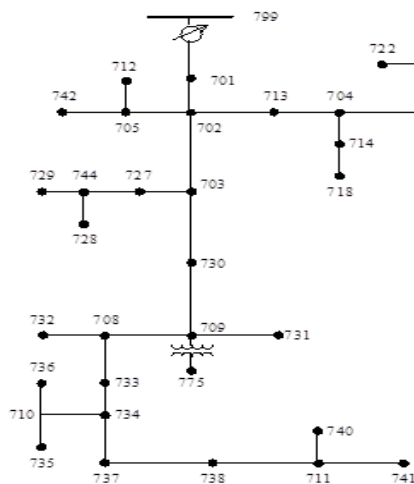


شکل ۹: THD ولتاژ باس‌ها در حالات مختلف



شکل ۱۰: کمینه ولتاژ باس‌ها

در باس‌های ۷۲۴، ۷۳۲ و ۷۳۶ می‌باشد. الگوی بار مشابه شکل ۶ و الگوی توان تولیدی سیستم PV مطابق شکل ۱۲ می‌باشد.



شکل ۱۱: شبکه ۳۷ باسه مورد مطالعه

واحدهای خازنی سیستم در جدول ۴ و نتایج بازه‌بندی زمانی و خروجی مرحله اول در جدول ۶، مشاهده می‌شود.

جدول ۴: واحدهای خازنی

باس	۷۴۴	۷۳۷	۷۳۴	۷۳۲	۷۲۹	۷۰۴
kVAr	۱۵۰	۵۰	۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۵۰

بارهای هارمونیک مطابق جدول ۵ به شبکه اضافه شده است.

در شکل ۹ اعوجاج هارمونیک ولتاژ باس‌های سیستم ترسیم شده است. مطابق نمودار، THD پیش از جبران بالا بوده و در بسیاری از ساعات از حد مجاز فراتر رفته است. نمودار نشان می‌دهد که اجرای کنترل ولتاژ و توان راکتیو بدون لحاظ کردن هارمونیک‌ها (حالت دوم و چهارم) گاهی منجر به شدیدتر شدن اعوجاج هارمونیک سیستم می‌شود. بهترین حالت مربوط به حالت پنجم بوده که نسبت به حالت سوم دارای کنترل برخط پیشنهادی می‌باشد. در حالت سوم با وجود عدم نظر گرفتن قید هارمونیک، به علت وجود نامعینی در تولید و گاهی عدم ارضای قید توان راکتیو، THD ولتاژ باس‌ها کاملاً ارضا نشده است. همچنین شکل ۱۰، کمینه ولتاژ باس‌ها در ساعات مختلف را نشان می‌دهد. سطح ولتاژ پیش از جبران مناسب نبوده و نوسان زیادی دارد. کنترل ولتاژ و توان راکتیو در حالات دوم و سوم (بدون کنترل برخط)، هر چند منجر به بهبود سطح ولتاژ شبکه شده اما همچنان نوسان ولتاژ بالا بوده و سطح ولتاژ گاهی کمتر از حد مجاز قرار دارد. مطابق شکل در حالات چهارم و پنجم با استفاده از کنترل برخط شبکه و استفاده از ظرفیت توان راکتیو سیستم، ولتاژ باس‌ها پروفایل مناسب‌تر و با نوسان کم‌تری دارد.

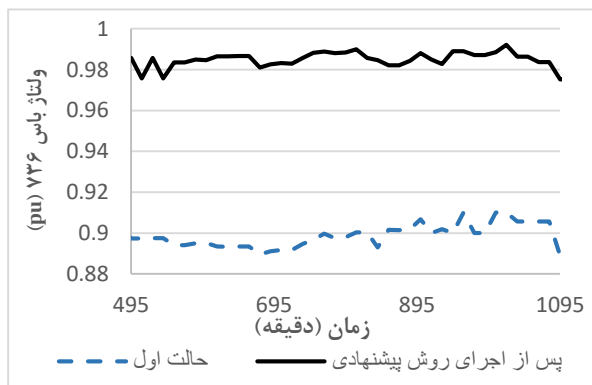
ب: شبکه ۳۷ باسه: برای نشان دادن کارایی روش کنترل

پیشنهادی شبکه تست IEEE ۳۷ باسه مطابق شکل ۱۱ نیز ارزیابی و روش پیشنهادی (کنترل ولتاژ و توان راکتیو با در نظر گرفتن هارمونیک‌ها و استفاده برخط از ظرفیت توان راکتیو سیستم PV) در آن ارزیابی می‌شود. شبکه شامل سه سیستم PV با ظرفیت ۳۰۰ kVA

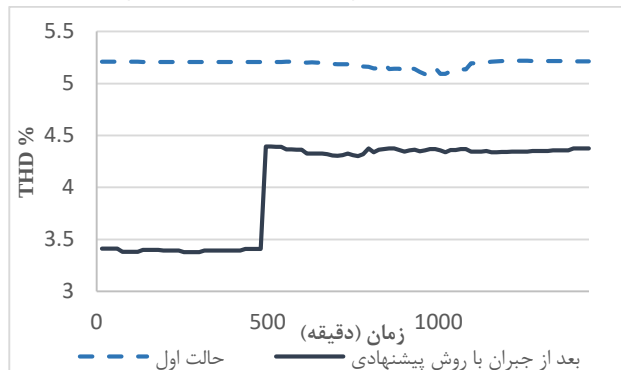
خلاصه نتایج قبل و بعد از جبران با استفاده از روش پیشنهادی در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین شکل ۱۳ و ۱۴ دیگرام ولتاژ و THD ولتاژ را در دو حالت، نشان می‌دهد. قبل از جبران پروفایل ولتاژ و سطح THD در سطح نامناسبی بوده و با اجرای روش پیشنهادی به صورت مناسبی جبران می‌شود.

جدول ۷: خلاصه نتایج روش پیشنهادی

روش پیشنهادی	حالت اول	
۰/۹۶۱	۰/۸۷۵۷	کمینه ولتاژ باس (pu)
۴/۴	۵/۲۱۸	$THD_{max}\%$
۲۴/۴۱	-	انرژی ذخیره شده %
۳/۳۷۱	۴/۰۱۲	THD متوسط



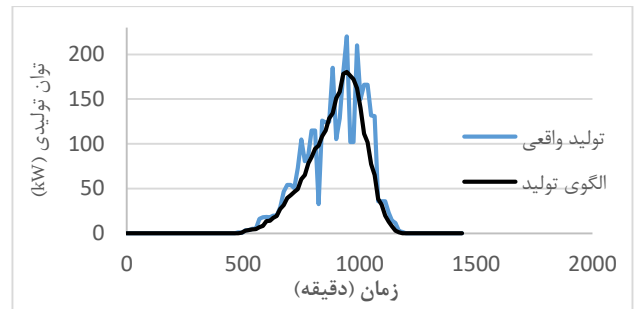
شکل ۱۳: ولتاژ باس ۷۳۶ قبل و بعد از جبران



شکل ۱۴: ماکزیمم اعوجاج هارمونیک ولتاژ قبل و بعد از جبران

۵- نتیجه

در این مقاله، روش کنترل ولتاژ و توان راکتیو و THD در حضور سیستم‌های PV به عنوان منابع تولید پراکنده ارائه شده است. روش پیشنهادی به صورت یک مسئله بهینه سازی چند هدفه فرمول بندی شده و نوسانات ولتاژ و THD ولتاژ نیز به عنوان اهداف دیگر علاوه بر تلفات در تابع هدف گنجانده می شود. با توجه به عدم امکان پیش بینی دقیق خروجی سیستم PV، روش ارائه شده به پیش بینی دقیق خروجی سیستم نیازمند نبوده و تنها با استفاده از الگوی تولید و بار سیستم برنامه ریزی را انجام داده و سپس با در نظر گرفتن محدوده تولید بلوک شبکه عصبی آموزش دیده را برای کنترل برخط توان راکتیو سیستم



شکل ۱۲: الگوی توان تولیدی سیستم فتوولتائیک

جدول ۵: اطلاعات بارهای غیر خطی سیستم

شماره باس	نوع [۲۱]	kW	kVar
۷۰۳	six-pulse vfd	۲۰۰	۱۰۰
۷۰۵	PWM-ASD	۲۵۰	۱۲۵
۷۰۸	six-pulse vfd	۱۹۰	۹۵
۷۱۸	six-pulse	۲۰۰	۱۰۰
۷۲۴	six-pulse	۲۰۰	۱۰۰
۷۲۷	six-pulse	۱۹۰	۹۵
۷۳۷	six-pulse	۱۹۰	۹۵
۷۴۰	PWM-ASD	۲۵۰	۱۲۵
۷۷۵	PWM-ASD	۲۵۰	۱۲۵

جدول ۶: نتایج خروجی مرحله اول روش پیشنهادی

ساعت	TAP	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۲	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۳	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۴	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۵	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۶	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۷	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۸	-۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰
۹	-۷	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۰	-۷	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۱	-۷	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۲	-۷	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱
۱۳	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۴	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۵	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۶	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۷	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۸	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۹	-۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۰	-۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۲۱	-۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۲۲	-۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۲۳	-۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰
۲۴	-۸	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰

- renewable resources," *IEEE Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 313–322, 2010.
- [10] Z. Ziadi, M. Oshiro and T. Senjyu, "Optimal voltage control using inverters interfaced with PV systems considering forecast error in a distribution system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 682–690, 2014.
- [11] L. Zhang, W. Tang, J. Liang and P. Cong, "Coordinated day-ahead reactive power dispatch in distribution network based on real power forecast errors," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 2472–2480, 2016.
- [12] M. Lave, J. Kleissl, and E. Arias-Castro, "High frequency irradiance fluctuations and geographical smoothing," *Solar Energy*, vol. 86, no. 8, pp. 2190–2199, 2012.
- [۱۳] عباس کارگر، فهیمه صیادی شهرکی و جعفر سلطانی، «خازن‌گذاری بهینه در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیک برای تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات با استفاده از PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۱، شماره ۱، صفحات ۳۳–۴۳، ۱۳۹۰.
- [14] C. F. Chang, "Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 1747–1755, 2008.
- [15] P. Zhaoyu, L. Shengzhu, Z. Hong and Z. Nan, "The Application of the PSO Based BP Network in Short-Term Load Forecasting," *Physics Procedia*, vol. 24, pp. 222–232, 2012.
- [16] V. Calderaro, G. Conio, V. Galdi, G. Massa and A. Piccolo, "Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no.1, pp. 230–241, 2014.
- [17] V. Calderaro, V. Galdi, A. Piccolo and G. Massa, "Optimal fuzzy controller for voltage control in distribution systems," in *Proceedings of international conference on intelligent systems design and applications*, Cordoba, Spain, pp. 1282–1287, 2011.
- [18] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, US, pp. 1942–1948, 1995.
- [۱۹] فهیمه صیادی شهرکی، فرشید کی‌نیا و سعید اسماعیلی، «بخش بار اقتصادی دینامیکی بهینه با استفاده از P-PSO پیشنهادی»، *مجله مهندسی و مدیریت انرژی کاشان*، جلد ۵، شماره ۲، صفحات ۲–۱۳، ۱۳۹۴.
- [20] F. Sayadi, S. Esmaili and F. Keynia, "Feeder Reconfiguration and Capacitor Allocation in Presence of Non-linear Loads Using New P-PSO Algorithm," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 10, pp. 225–239, 2016.
- [21] A. Ulinuha, MA. Masoum and SM. Islam, "Optimal scheduling of LTC and shunt capacitors in large distorted distribution systems using evolutionary-based algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 434–441, 2008.
- [22] www.iso-ne.com/markets/hourly/smd_hourly.xls

استفاده می‌نماید. به این ترتیب تأثیر نامعینی تولید در روش ارائه شده جبران شده و طبق نتایج مشاهده شده، روش پیشنهادی نتایج بسیار مطلوبی از نقطه نظر کیفیت توان، تلفات انرژی و نوسانات ولتاژ دارد. ۵ حالت مختلف کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه توزیع شدیداً هارمونیک ۱۲۳ با سه و ۳۷ با سه IEEE اجرا شده و نتایج مناسبی از نقطه نظر بهینه‌سازی و نیز عملکرد روش کنترل پیشنهادی (حالت پنجم) حاصل شد.

مراجع

- [1] M. Singh, V. Khadkikar, A. Chandra and R. K. Varma, "Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features," *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 307–315, 2011.
- [2] M. Marzband, N. Parhizi, M. Savaghebi and J. M. Guerrero, "Distributed Smart Decision-Making for a Multi-microgrid System Based on a Hierarchical Interactive Architecture," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 637–648, 2016.
- [۳] سعید عباسی، علی اصغر قدیمی و امیرحسین ابوالمعصومی، «حذف نوسانات توان اکتیو تزریقی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در شرایط افت ولتاژ»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحات ۱۴۹–۱۵۸، ۱۳۹۴.
- [4] X. Lai, Z. Yang, G. Liu and et al, "Coordinated Volt-VAR control in active distribution systems for renewable energy integration," in *Proceedings of IEEE Electrical Power and Energy Conference*, London, UK, 2015.
- [5] FA. Viawan and D. Karlsson, "Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no.2, pp. 1079–1087, 2008.
- [6] E. A. Paaso, Y. Liao and A. Cramer, "Formulation and solution of distribution system voltage and VAR control with distributed generation as a mixed integer non-linear programming problem," *Electric Power System Research*, vol. 108, pp. 164–169, 2014.
- [7] S. Deshmukh, B. Natarajan and A. Pahwa, "Voltage/VAR control in distribution networks via reactive power injection through distributed generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.3, pp. 1226–1234, 2014.
- [8] S. Jashfar and S. Esmaili, "Volt/var/THD control in distribution networks considering reactive power capability of solar energy conversion", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 60, pp 221–233, 2014.
- [9] A. Borghetti, M. Bosetti and S. Grillo, "Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of

‡ Load Tap Changer

‡ Harmonic Load Flow

‡ Perturbation-Particle Swarm Optimization

‡ Total harmonic distortion