کنترل ولتاژ و توان راکتیو دو مرحله‌ای در شبکه‌های توزیع در حضور سیستم‌های فتوولتائیک مبتنی بر پیش‌بینی کوتاه مدت بار و تولید

فرشید کی نیا[1]، فهیمه صیادی شهرکی[2]، سعید اسماعیلی[3]

۱- استادیار پژوهشکده انرژی- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته - کرمان- ایران

f.keynia@kgut.ac.ir

۲- مربی دانشکده فنی- دانشگاه آزاد اسلامی- شهرکرد-ایران

sayadi.f2009@gmail.com –

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان- ایران

s_esmaeili@uk.ac.ir –

چکیده: **کنترل ولتاژ و توان راکتیو بصورت گسترده در شبکه‌های توزیع برای افزایش کیفیت توان بکار می‌رود. اخیرا استفاده از تولیدات پراکنده مبتی بر انرژی‌های تجدیدپذیر رو به افزایش است که بر عملکرد سیستم و کنترل ولتاژ و توان راکتیو سیستم تاثیر می‌گذارد. منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب و غیر قابل پیش‌بینی به‌ویژه سیستم‌های بادی و خورشیدی و نیز تغییرات تصادفی سطح بار الکتریکی سیستم می‌تواند منجر به نوسانات شدید ولتاژ شود. در این مقاله یک روش کنترل دو مرحله‌ای برای بهنیه سازی ادوات کنترلی، تنظیم ولتاژ و اعوجاج هارمونیک ولتاژ (THD) پیشنهاد می‌شود. کنترل تپ ترانسفورماتورها و خازن‌ها بر اساس پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده بار و تولید در سیستم صورت می‌گیرد؛ در حالیکه برای پوشش نوسانات ولتاژ در اثر تغییرات تصادفی بار یا تولید، پیش‌بینی ساعت آینده بار و تولید صورت گرفته و در نهایت از ابزار توان راکتیو سیستم فتولتاییک استفاده می‌گردد. نتایج روش پیشنهادی در شبکه ۱۲۳ باسه IEEE باس استاندارد تحت شرایط بار و تولید متغیر با استفاده از الگوریتم PSO با ماژول آشفتگی (P-PSO) در چهار سناریوی مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو بهینه سیستم توزیع دارای منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب بسیار مناسب است.**

کلمات کلیدی: **شبکه‌های توزیع، سیستم فتوولتائیک، توان راکتیو**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر فرشید کی نیا

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – کرمان – انتهای اتوبان هفت باغ- دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و تکنولوژی پیشرفته کرمان

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

۱- مقدمه

استفاده از تولیدات پراکنده و مخصوصا منابع انرژی تجدیدپذیر در سال‌های اخیر گسترش روز افزونی یافته است. عرضه برق سازگار با محیط زیست، محدودیت ساخت خطوط انتقال جدید و کاهش استفاده از منابع سوختی از جمله مزایای تولیدات پراکنده می‌باشد [۱]. کاربرد روز افزون منابع انرژی تجدیدپذیر بر کنترل ولتاژ و توان راکتیو به‌عنوان اصلی ترین وظیفه اپراتورهای سیستم توزیع تاثیر می‌گذارد. ساختار شعاعی این شبکه‌ها و نسبت X/R کوچک خطوط این اثر را تقویت می‌کند [۲].

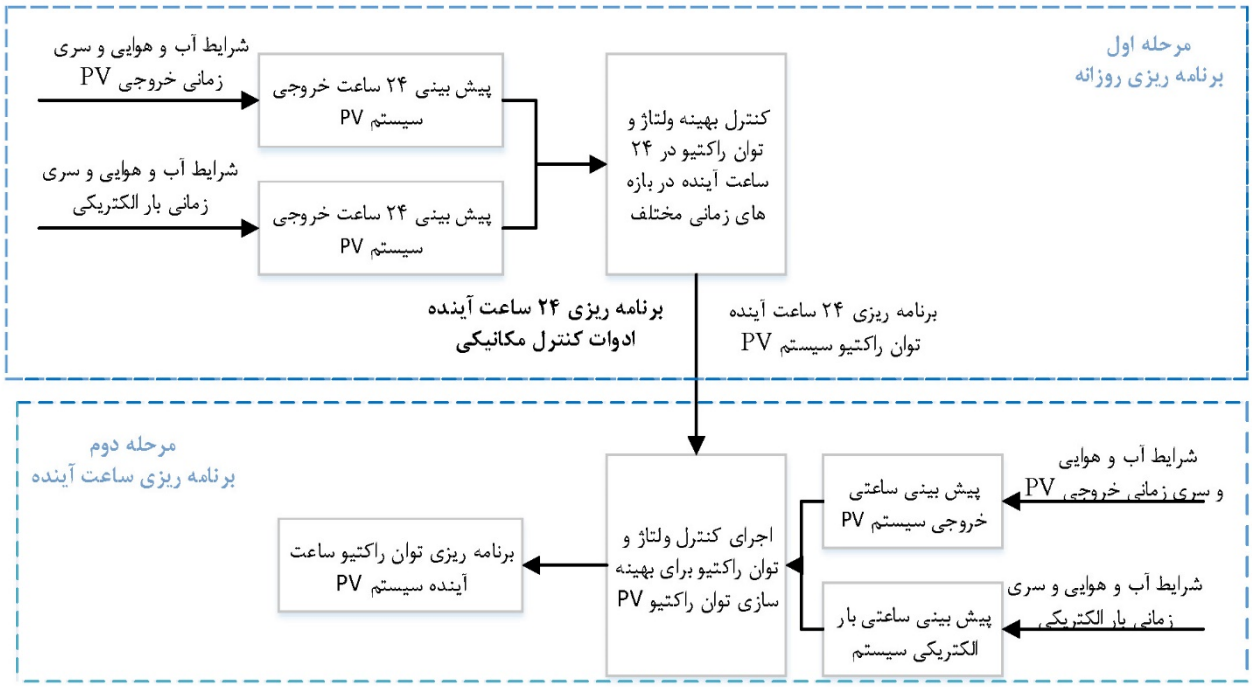
در حال حاضر پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی برای تولید توان الکتریکی به‌عنوان منبع انرژی پاک و پایدار استفاده می‌شوند که می‌توانند بار خطوط انتقال را کاهش دهند [۳]. اینورترها یا مبدل‌های DC/AC قادرند توان راکتیو را در سیستم قدرت با پاسخ زمانی سریعتر نسبت به خازن‌های موازی متعادل نمایند. بنابراین با اصلاح اینورتر سیستم فتولتاییک و در نظر گرفتن خروجی متناوب سیستم می‌توان از ظرفیت توان راکتیو سیستم فتوولتائیک برای جبران توان راکتیو سیستم استفاده کرد. به‌دلیل اینکه کنترل‌کننده‌های سنتی سیستم عمدتا توسط سوییچ‌های مکانیکی کند عمل می‌کنند، معمولا پاسخ آن‌ها در برابر نوسانات سریع ولتاژ کند است. به‌دلیل نوسانات ولتاژ دنبال کردن این تغییرات سریع توسط کنترل کننده‌های مرسوم ولتاژ و توان راکتیو در سیستم منجر به فرسودگی و خرابی تجهیزات می‌گردد [۴]. نفوذ شدید سیستم‌های فتوولتائیک در سیستم توزیع موقعیت‌ها و چالش‌های فراوانی برای شرکت‌های توزیع ایجاد می‌کند. با تغییر سریع شدت تابش‌های خورشیدی ولتاژها در سیستم دچار افت یا افزایش می‌شوند، که با استفاده از تجهیزات کند کنترل ولتاژ و توان راکتیو قابل جبران نیستند و این می‌تواند منجر به افت کیفیت توان در شبکه شود. سیستم فتوولتائیک دارای اینورتر با پاسخ سریع با قابلیت کنترل توان راکتیو می‌تواند در صورت مشکلات زودگذر و پیش‌بینی نشده ولتاژ، توان راکتیو لازم را تولید یا مصرف نماید و توان راکتیو هر واحد می‌تواند به‌عنوان یک ابزار اضافی در بهبود بهینه‌سازی سیستم توزیع باشد [۵]. مطالعات نشان می‌دهد که سطح تشعشعات خورشیدی می‌تواند در زمان ۱ ثانیه به میزان ۶۰٪ تغییر نماید و این پیش‌بینی کوتاه مدت (۲۴ ساعت) خروجی این واحدها را با دقت مناسب ناممکن ساخته که این می‌تواند منجر به نوسانات شدیدی در ولتاژ سیستم شده و حتی حدود عملی تجاوز نماید [۶]. بنابراین، مدیریت سیستم‌های توزیع اخیر بر بهنیه‌سازی بر پایه برنامه‌ریزی و کنترل کوتاه‌مدت ادوات کنترلی و منابع انرژی موجود در شبکه گرایش دارد [۷].

کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع به‌صورت گسترده برای کاهش تلفات و جبران ولتاژ باس‌های سیستم بکار رفته است [۸]. افزایش نفوذ بارهای غیر خطی و وجود منابع انرژی تجدیدپذیر منجر به پیچیدگی بیشتر مسئله شده است. کنترل روزانه آفلاین ابزاری برای هماهنگ کردن کنترل‌کننده‌های متمرکز و کنترل کننده‌های محلی مدیریت سیستم توزیع است [۹ و۱۰]. تاکنون روش‌های کنترل ولتاژ و توان راکتیو متعددی پیشنهاد شده است. در بیشتر مطالعات گذشته کنترل ولتاژ و توان راکتیو روزانه با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و شرایط سینوسی بهینه‌سازی شده است. در [۱۱]. یک استراتژی هماهنگ کنترل ولتاژ و توان راکتیو در حضور منابع تولید پراکنده و کنترل‌کننده‌های مرسوم شامل کنترل کننده‌های تپ ترانسفورماتور و خازن‌ها ارائه شده است. در برخی از کارهای گذشته ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم PV نیز به‌صورت قابل برنامه‌ریزی مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۲] از برنامه‌ریزی صحیح ترکیبی جهت بهینه‌سازی توان راکتیو استفاده شده است. در [۱۳] برنامه ریزی در منابع تولید پراکنده مختلف در شرایط نامتعادل صورت می‌گیرد. در [۱۴و ۱۵] ظرفیت توان راکتیو سیستم فتوولتائیک برنامه‌ریزی شده است. استفاده از این ابزار در مسئله کنترل بسیار مفید است اما مانع موجود در کنترل آنلاین شبکه بر اساس این ظرفیت، بار محاسباتی سنگین مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو خصوصا در سیستم‌های شامل منابع گسترده فتوولتائیک است [۱۶]. به‌دلیل محاسبات سنگین و عملکرد کند کنترل کننده‌های مرسوم، روش‌های کنترل ولتاژ و توان راکتیو مرسوم قادر به پاسخگویی مناسب به تغییرات سریع تشعشعات خورشیدی یا تغییرات تصادفی بار الکتریکی سیستم نیستند و این منجر به نوسانات ولتاژ سیستم خواهد شد. در [۴] یک روش کنترل دو لایه برای تنظیم کنترل بهینه و حصول ولتاژ در رنج مناسب ارائه شده است. رگولاتورهای ولتاژ، OLTCها، بانک‌های خازنی و اینورترهای هوشمند در کنترل سراسری شبکه مشارکت دارند. در حالی که اینورترهای هوشمند با تغییرات سریع گذرا در سطوح کنترل محلی مشارکت می‌کنند. پیش‌بینی بسیار کوتاه مدت سیستم PV در [۱۰] برای برنامه‌ریزی بسیار کوتاه مدت ادوات کنترلی و منابع انرژی مختلف سیستم، استفاده شده است.

با توجه به تغییرات سریع خروجی سیستم فتوولتائیک و بار الکتریکی با توجه به تغییرات پیش‌بینی نشده آب و هوا، در این مقاله کنترل ولتاژ دو مرحله ای پیشنهاد می‌گردد که بر اساس آن کنترل ولتاژ و توان راکتیو مرسوم با استفاده از توان راکتیو سیستم فتوولتائیک بعنوان متغیر کنترلی اضافه بر اساس پیش‌بینی ۲۴ ساعت تولید صورت گرفته و در مرحله دوم با پیش‌بینی بار و تولید در بازه‌های زمانی کوچکتر، توان راکتیو سیستم فتوولتائیک برای پوشش دادن به تغییرات سریع بار و تولید بهینه می‌گردد. در این مقاله با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات بار و تولید در بازه کمتر از یک ساعت، بازه زمانی دوم یک ساعت در نظر گرفته شده است. در صورت در دسترس بودن اطلاعات و در عمل می‌توان این بازه را ۱۰ یا ۱۵ دقیقه در نظر گرفت که در کلیت روش تغییری ایجاد نمی‌کند.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

برای افزایش دقت پیش‌بینی از ترکیب الگوریتم بهنیه سازی PSO با روش شبکه عصبی و بر مبنای دسته بندی شرایط آب و هوایی، خروجی سیستم فتوولتائیک و نیز بار الکتریکی سیستم استفاده می‌گردد. روش پیش‌بینی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده در این مقاله در سیستم ۱۲۳ باسه IEEE تحت شرایط بار متغیر در چهار حالت مختلف اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم کنترل پیشنهادی برای رفع مشکلات نوسانات ولتاژ، پوشش تغییرات تصادفی بار و خروجی سیستم‌های فتوولتائیک در سیستم‌های توزیع بسیار مناسب است.



شکل (۱): دیاگرام کنترل ولتاژ و توان راکتیو دو مرحله ای پیشنهادی

۲- کنترل ولتاژ و توان راکتیو پیشنهادی

در عمل پیش‌بینی بار الکتریکی و خروجی سیستم فتوولتائیک برای ۲۴ ساعت آینده سیستم از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. این مقادیر برای برنامه ریزی ۲۴ ساعت آینده ادوات کنترلی کند که بایستی تعداد کلیدزنی محدود داشته باشند قابل استفاده هستند. بنابراین، گام اول برنامه ریزی برای ۲۴ ساعت آینده سیستم را با استفاده از روش تقسیم بازه‌های زمانی بر مبنای سطوح بار و خروجی سیستم فتوولتائیک انجام داده و وضعیت کنترل OLTC ها، رگولاتورهای ولتاژ، بانک‌های خازنی و برنامه ریزی توان راکتیو خروجی سیستم‌های PV بهینه می‌گردد. در گام دوم برنامه‌ریزی توان راکتیو برای ساعت آینده سیستم بر اساس پیش‌بینی دقیق ساعت آینده بار و تولید انجام می‌گیرد. به این صورت که توان خروجی سیستم فتوولتائیک و سطح بار الکتریکی سیستم برای ساعت آینده و در نتیجه با دقت بالا پیش‌بینی شده و در صورتی‌که تفاوت این مقادیر با مقادیر پیش‌بینی شده این ساعت در گام اول بیشتر از حد خاصی گردد یا قید توان راکتیو تولیدی توسط اینورترهای سیستم فتوولتائیک رعایت نشده باشد، با اجرای پخش بار در سیستم در صورت عدم رعایت حدود مورد نظر ولتاژ، مقدار بهینه توان راکتیو تولیدی سیستم فتوولتائیک بر اساس اطلاعات کوتاه مدت بهینه می‌گردد لازم به ذکر است که وضعیت رگولاتورهای ولتاژ، OLTC ها و بانک‌های خازنی مطابق خروجی گام اول بوده و تغییر نمی‌کند. شکل (۱) طرح کنترلی پیشنهادی مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

۲-۱- فرمول بندی مسئله

کنترل ولتاژ و توان راکتیو دو مرحله‌ای در شبکه‌های توزیع دارای منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان منابع تولید پراکنده، مسئله بهینه‌سازی غیر خطی و دارای پارامترها و متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشد. تابع هدف با اجرای محاسبات پخش بار هارمونیکی[۱] و بر اساس متغیرهای کنترلی موجود محاسبه می‌شود. این متغیرهای کنترلی شامل موقعیت تپ OLTC ها، خازن‌ها و برنامه ریزی ساعتی توان راکتیو خروجی سیستم فتوولتائیک بر اساس طرح پیشنهادی شکل ۱ می‌باشد. اهداف طرح کنترلی شامل کاهش تلفات سیستم، بهبود پروفایل ولتاژ و نیز محدود کردن اعوجاج هارمونیکی (THD[۲]) ولتاژ باس‌ها می‌باشد. محاسبات پخش بار هارمونیکی توسط مدل‌سازی سیستم در نرم‌افزار Digsinent و بهینه‌سازی از طریق برنامه‌نویسی در MATLAB صورت گرفته است. نحوه برقراری ارتباط بین این دو ماژول در [۱۵] ارائه شده است. توابع هدف و محدودیت‌های مسئله عبارتند از:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

۱-۱-۲- تابع هدف

تلفات توان اکتیو در ساعت t از مجموع تلفات خطوط و ترانسفورماتورهای سیستم در فرکانس اصلی و سایر فرکانس‌های هارمونیکی سیستم در ۲۴ ساعت شبانه روز حاصل می‌شود. محدودیت اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌های سیستم نیز به‌صورت یک تابع جریمه در تابع هدف گنجانده می‌شود. تابع هدفی که بایستی حاصل شود توسط رابطه (۱) حاصل می‌شود.

$$F = min\begin{pmatrix} f_1 = K_p Ploss + \sum_{i=1}^{n_c} K_{ci} Q_{ci} \\ f_2 = \sum_{i=1}^{n} \mu_i \end{pmatrix} \quad (۱)$$

در معادله بالا f_1 هزینه تلفات توان اکتیو و خازن‌های موازی سیستم بوده و K_p و K_{ci} به‌ترتیب هزینه سالیانه پریونیت تلفات توان اکتیو و توان راکتیو تزریقی توسط هر باس i سیستم می‌باشد. P_{loss} تلفات توان اکتیو، n تعداد باس‌های سیستم، Q_{ci} توان راکتیو تزریقی توسط باس i و n_c تعداد کل خازن‌های موازی سیستم می‌باشد. به منظور کاهش بیشتر THD این پارامتر بعنوان بخشی از تابع هدف سیستم گنجانده می‌شود. μ_i بعنوان انحراف اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ باس‌ها بصورت معادله (۲) حاصل می‌گردد:

$$\mu_i = \begin{cases} THD_i / THD_d & for\ THD_i < THD_d \\ 1 & else \end{cases} \quad (۲)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=h_0}^{h_{max}} \left|V_i^{(h)}\right|^2}}{\left|V_i^{(1)}\right|} \quad (۳)$$

تلفات توان اکتیو شبکه نیز به‌صورت جمع تلفات در فرکانس اصلی و سایر فرکانس‌های هارمویکی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_b} P_{loss,i}^1 + \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{h=h_0}^{h_{max}} P_{loss,i}^h \quad (۴)$$

که n_b، h_0 و h_{max} به تریب تعداد شاخه‌های شبکه، کمترین و بیشترین مرتبه هارمونیک‌های سیستم می‌باشند. طبق استاندارد IEEE-519 مقدار THD ولتاژ باس‌های سیستم تا حد ۵٪ محدود می شود [۱۷]. در نهایت تابع هدف که بایستی مینیمم گردد در هر ساعت t (مطابق گام دوم شبیه سازی) با استفاده از معادله زیر حاصل می‌شود [۱۷]:

$$f_t(x) = \alpha_1 f_{1n} + \alpha_2 f_{2n} \quad (۵)$$

در گام اول طرح کنترلی برای محاسبه تابع هدف نهایی، مقادیر تابع هدف در ۲۴ ساعت با هم جمع می‌شوند. α_1 و α_2 ضرایب وزنی هزینه تلفات و خازن گذاری و نیز THD ولتاژ باس‌های شبکه هستند که به‌صورت تجربی محاسبه می‌شوند. f_{1n} و f_{2n} مقادیر نرمالیزه توابع f_1 و f_2 هستند که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_{in}(x) = \frac{f_i - f_{i,min}}{f_{i,max} - f_{i,min}} \quad (۶)$$

که $f_{i,max}$ و $f_{i,min}$ حداکثر و حداقل مقدار تابع f_i می‌باشند.

۲-۱-۲- محدودیت‌های کیفیت توان

علاوه بر اندازه THD ولتاژ باس‌های سیستم، اندازه ولتاژ باس‌ها نیز توسط رابطه زیر محدود می‌شود:

$$V_{min} \le |V_i| \le V_{max}, i = 1,2,\dots,n \quad (۷)$$

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

$$|V_i| = \sqrt{\left|V_i^{(1)}\right|^2 + \sum_{h=h_0}^{h_{max}} \left|V_i^{(h)}\right|^2} \quad (۸)$$

برای محاسبات پخش بار هارمونیکی، در فرکانس‌های بالاتر کل سیستم قدرت به‌صورت ترکیبی از منابع جریان هارمونیکی و المان‌های پسیو مدل می‌شود. به‌دلیل اینکه مولفه‌های امپدانس سیستم قدرت با مرتبه هارمونیکی تغییر می‌کند، ماتریس ادمیتانس در هر مرتبه هارمونیکی اصلاح می‌شود. اگر از اثر پوستی صرف‌نظر کنیم به‌ترتیب، ادمیتانس بار، ادمیتانس خازن شنت و ادمیتانس فیدر در hامین فرکانس هارمونیکی در هر باس i عبارتست از:

$$Y_{li}^h = \frac{P_{li}}{\left|V_i^1\right|^2} - j\frac{Q_{li}}{h\left|V_i^1\right|^2} \quad (۹)$$

$$Y_{ci}^h = hY_{ci}^1 \quad (۱۰)$$

$$Y_{i,i+1}^h = \frac{1}{R_{i,i+1} + jhX_{i,i+1}} \quad (۱۱)$$

که P_{li} و Q_{li} به‌ترتیب، توان اکتیو و راکتیو بارهای خطی باس i، را نشان می‌دهند. بارهای خطی از یک مقاومت موازی با یک راکتانس تشکیل شده‌اند.. بارهای غیر خطی به‌صورت منابع جریان رفتار می‌کنند، بنابراین جریان تزریقی هارمونیکی توسط بارهای غیر خطی در باس i با استفاده از رابطه زیر استخراج می‌شود:

$$I_i^l = \left[\frac{P_{hi} + iQ_{hi}}{V_i^l}\right]^* \quad (۱۲)$$

$$I_i^h = C(h) I_i^l \quad (۱۳)$$

که P_{hi} و Q_{hi} به‌ترتیب، توان اکتیو و راکتیو بارهای غیر خطی باس i، را نشان می‌دهند. $C(h)$، از تست میدان و تحلیل فوریه تمام مصرف‌کننده‌های فیدر حاصل می‌شود.

ولتاژهای هارمونیکی با استفاده از معادله گره حاصل می‌شوند:

$$\left[Y^{(h)}\right]\left[V^{(h)}\right] = \left[I^{(h)}\right] \quad (۱۲)$$

که $\left[Y^{(h)}\right]$، $\left[V^{(h)}\right]$ و $\left[I^{(h)}\right]$ به‌ترتیب، ماتریس ادمیتانس، بردار ولتاژ باس و بردار جریان تزریقی در hامین مرتبه هارمونیکی هستند. به‌دلیل اینکه $\left[Y^{(h)}\right]$ و $\left[I^{(h)}\right]$ برای هر مرتبه هارمونیکی متفاوت هستند، فرآیند تحلیل هارمونیکی باید برای هر هارمونیک جداگانه صورت گیرد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]

۳-۱-۲- محدودیت ادوات کلیدزنی

محدودیت حداکثر تعداد کلیدزنی OLTC و تعداد عمل سوییچ زنی خازن‌ها که به‌ترتیب به مقادیر M_T و M_C در طی ۲۴ ساعت شبانه روز مطابق روابط زیر محدود می‌گردد:

$$\sum_{t=1}^{24}|TAP^t - TAP^{t-1}| \le M_T \quad (۹)$$

$$\sum_{t=1}^{24}|C^t - C^{t-1}| \le M_C \quad (۱۰)$$

۳-۱-۴- محدودیت حداکثر توان راکتیو سیستم فتوولتائیک

در هر زمان از شبانه روز، توان راکتیو حاصل از سیستم فتوولتائیک بسته به نقطه کار سیستم، توان راکتیو رد و بدل شده بین شبکه و مبدل سیستم فتوولتائیک توسط قیود مختلفی محدود می‌شود. فرض می‌کنیم سیستم PV با حداکثر توان اکتیو در سیستم قرار دارد. یکی از مهمترین محدودیت‌ها برای توان راکتیو سیستم از طریق حداکثر توان ظاهری اینورتر تعیین می‌شود. توان راکتیو PV بستگی به ماکزیمم مقادیر ولتاژ و جریان مبدل آن دارد بنابراین برای محاسبه محدود قابل کنترل $Q_{PV} - P_{PV}$ بایستی مقادیر ولتاژ و جریان ماکزیمم مبدل $V_{C,max}$ و $I_{C,max}$ در نظر گرفته شود. رابطه توان اکتیو و راکتیو با در نظر گرفتن جریان مبدل بصورت زیر است:

$$P_{PV}^2 + Q_{PV}^2 = (I_C V_{PV})^2 \quad (۱۱)$$

و رابطه توان اکتیو و راکتیو با در نظر گرفتن محدودیت ولتاژ مبدل بصورت زیر است:

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

با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار طراحی $V_{C,max}$ را محاسبه کرد، که حداکثر ولتاژ لینک dc اینورتر V_{dcmax} و $I_{C,max}$ را تعیین می‌کند. [۱۹-۱۸]. حداکثر جریان مبدل بایستی در رابطه زیر با استفاده از مقادیر ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو PV صدق نماید:

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

ماکزیمم ولتاژ کانورتر نیز مقدار توان اکتیو و راکتیو و حداکثر ولتاژ PV بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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

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

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

در نهایت در هر نقطه کار حداکثر توان راکتیو در هر ساعت t با استفاده از رابطه زیر حاصل می‌شود [۲۱]:

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

در این مقاله $V_{PV,max} = 1.05$ و $V_{PV,min} = 0.95$ و $X_C = 0.3$ در نظر گرفته شده است.

۳- روش بهینه‌سازی پیشنهادی P-PSO

قابلیت این روش پیشنهادی اولین بار برای مسئله بهینه‌سازی پخش بار اقتصادی در مرجع [۳۴] نشان داده شد. در این روش به‌منظور کنترل بهتر قابلیت‌های اکتشاف[۳] و استخراج[۴] 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. درحالی‌که ذرات با تابع برازش بزرگ‌تر با مقادیر سرعت بالاتری مواجه می‌شود که این ذره را برای اکتشاف بیشتر هدایت می‌کند. برای جلوگیری از همگرایی زودهنگام در این روش یک ماژول آشفتگی طوری طراحی شده است که تنوع بیشتری برای جهش از بهینهٔ محلی ایجاد کند. برای این منظور، شمارندهٔ f_c در نظر گرفته می‌شود که در صورت عدم بهینه شدن پاسخ در هر تکرار یک واحد افزایش می‌یابد. ماژول آشفتگی طوری طراحی شده است که اگر $f_c > m$ شد عمل کرده و دسته‌ای از ذرات را به‌صورت تصادفی انتخاب و با ایجاد آشفتگی، تنوع در ذرات ایجاد می‌کند. m حداکثر تعداد تکرار متوالی برنامه بدون بهبود تابع هدف برای فعال شدن ماژول آشفتگی است و در این طرح $m = ۷$ در نظر گرفته شده است. تنظیمات کنترلی و سایر پارامترهای این روش مطابق [۱۷] در نظر گرفته شده است.

۴- پیش‌بینی بار الکتریکی و توان فتوولتائیک

با افزایش روز افزون کاربرد سیستم‌های فتوولتائیک، پیش‌بینی با دقت خروجی این سیستم‌ها از اهمیت خاصی برخوردار می‌شود [۲۰-۲۱]. با توجه به اینکه در این مقاله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شرایط رخداد تغییرات تصادفی بار و خروجی سیستم فتوولتائیک صورت می‌گیرد، اساس کارکرد مناسب آن در شبکه بر پایه پیش‌بینی دقیق این پارامترها می‌باشد. در حالت کلی روش‌های پیش‌بینی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: روش‌های آماری و روش‌های بر پایه هوش مصنوعی. روش‌های هوش مصنوعی کارآیی مناسبتری برای برقراری ارتباط بین خروجی سیستم فتوولتائیک و فاکتورهای مرتبط با آن را دارد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که روش های ترکیبی برای پیش‌بینی بار از دقت بالایی برخوردار هستند [۲۲-۲۳]. بنابراین در این مقاله از روش ترکیبی شبکه عصبی[۵] و الگوریتم P-PSO (P-PSO+NN) برای پیش‌بینی بار الکتریکی سیستم در روز آینده (مرحله اول) و نیز ساعت آینده همان روز (مرحله دوم) استفاده می‌شود. در این روش، الگوریتم P-PSO برای بهنیه سازی وزن‌ها و بایاس‌های شبکه عصبی با هدف کاهش خطای پیش‌بینی استفاده می‌شود.

با وجود اینکه پیش‌بینی خروجی سیستم فتوولتائیک هنوز در مرحله تئوری قرار دارد، تا کنون تکنیک‌های متعددی از قبیل استفاده

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

از اطلاعات ماهواره ای از میزان ابری بودن هوا و نیز پیش‌بینی عددی آب و هوا برای پیش‌بینی خروجی سیستم فتوولتائیک استفاده شده است. خطای پیش‌بینی کوتاه مدت سیستم فتوولتائیک در حدود ۱۰-۲۰٪ می‌باشد. البته در صبح یا تحت شرایط بارندگی یا روزهایی با وضعیت آب و هوایی متغیر متوسط خطای نسبی (RSME) تا ۵۰٪ نیز می‌رسد [۲۴]. در حالت کلی دو روش پرکاربرد برای پیش‌بینی خروجی سیستم فتوولتائیک وجود دارد. یکی از این روش‌ها پیش‌بینی بر اساس شدت تابش خورشید به این صورت است که در ابتدا شدت اشعه خورشی بر اساس مدل‌های تابشی پیش‌بینی شده و سپس با استفاده از رابطه بین توان خروجی و شدت تابش خورشید، خروجی سیستم فتوولتائیک پیش‌بینی می‌گردد [۲۵]. روش دیگر پیش‌بینی مستقیم خروجی سیستم فتوولتائیک بدون نیاز به محاسبه شدت تابش می‌باشد [۲۶]. با وجود اینکه روش اول در عمل روش موثری می‌باشد، اما نیازمند اطلاعات هوا سنجی و جغرافیایی دقیقی برای حل معادلات دیفرانسیلی پیچیده می‌باشد [۲۷]. شبکه عصبی مصنوعی روش شناخته شده و مناسبی برای پیش‌بینی مستقیم خروجی سیستم فتوولتائیک است. هر چند یکی از اشکالات آن گیر افتادن در بهینه محلی است که با آموزش صحیح می‌تواند بر این محدودیت‌های عملی غلبه نماید [۲۸]. در [۲۹] از روش ترکیبی PSO+NN برای پیش‌بینی خروجی سیستم فتوولتائیک استفاده شده است. در این مقاله از روش مشابهی استفاده شده است با این تفاوت که برای اموزش شبکه به جای الگوریتم PSO مرسوم از P-PSO استفاده شده که قابلیت جستجو در فضای حل و فرار از بهنیه محلی مناسبتری دارد. ورودی‌های شبکه شامل مقادیر خروجی سیستم در ساعات گذشته، ساعت و شرایط آب و هوایی مورد نظر می‌باشد. شبکه عصبی ترکیبی مورد استفاده در این مقاله سه لایه با سرعت همگرایی و دقت پیش‌بینی مناسبتری نسبت به شبکه عصبی می‌باشد.

۵- روش حل

اولین گام مهم برای برنامه ریزی در سیستم‌های توزیع دارای منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده از ابزار مناسبی برای پیش‌بینی بار الکتریکی و خروجی سیستم فتوولتائیک برای تنظیم ادوات کنترلی سیستم و استفاده از آن برای برنامه‌ریزی سوییچ‌زنی خازن‌ها و تغییرات تپ ترانس است. یک روش مناسب برای به حداقل رساندن عملکرد سوییچ زنی خازن‌ها و OLTC ها، کاهش فضای جستجو در مسئله بهینه‌سازی و کاهش اثر نامعینی و تغییرات مقادیرپیش‌بینی شده این روش پیشنهادی بر روی شبکه ۴,۱۶ کیلوولت ۱۲۳ باسه IEEE هارمونیکی مطابق شکل (۳) اجرا گردیده است که مشخصات آن در [۳۱] ارائه شده است. دو سیستم فتوولتائیک با ظرفیت ۴۰۰ kw مطابق شکل در باس‌های ۹۵ و ۱۰۸ واقع شده که با فرض فاصله کم توان خروجی ان‌ها یکسان می‌باشد. اطلاعات آب و هوا مربوط به شهر لندن، سری زمانی بار الکتریکی و نیز خروجی سیستم فتوولتائیک در سال ۲۰۰۹ به‌ترتیب در [۳۲-۳۳] و نیز نرم افزار SAM موجود می‌باشد.

است که از روش تقسم بازه‌های زمانی استفاده شود. در روش تقسیم بازه زمانی بر اساس اینکه بخواهیم در طول یک شبانه روز حداکثر چه تعداد عملکرد سوییچ زنی در ادوات مکانیکی صورت گیرد (تعداد بازه‌های زمانی) با توجه به تغییرات سطح بار الکتریکی و نیز توان خروجی سیستم فتوولتائیک کل ۲۴ ساعت شبانه روز به چند بازه بهینه تقسیم می‌شود. بهینه‌سازی بر این اصل استوار است که بایستی مجموع تفاوت توان و بار در بازه‌های زمانی مینیمم گردد [۳۰]. برای حصول بازه‌های زمانی بهینه، پس از پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده بار الکتریکی و توان خروجی سیستم فتوولتائیک تابع هدف زیر بایستی حداقل گردد:

$$F = min \sum_{LL=1}^{n} \sum_{t=1}^{NT} \sigma_L \qquad (۱۷)$$

که n تعداد سطوح بار (چهار) و NT در واقع خروجی مسئله بهینه‌سازی می‌باشد که نشان دهنده تعداد ساعات در هر سطح بار است (بازه بندی زمانی) و مجموع آن در کلیه بازه‌های زمانی برابر ۲۴ ساعت می‌باشد. بنابراین مطابق رابطه (۱۷) در هر بازه زمانی هر چه اختلاف توان‌های تولیدی سیستم فتوولتائیک و بار الکتریکی سیستم نزدیک به هم باشند، پارامتر σ_L مقدار کمتری خواهد داشت.

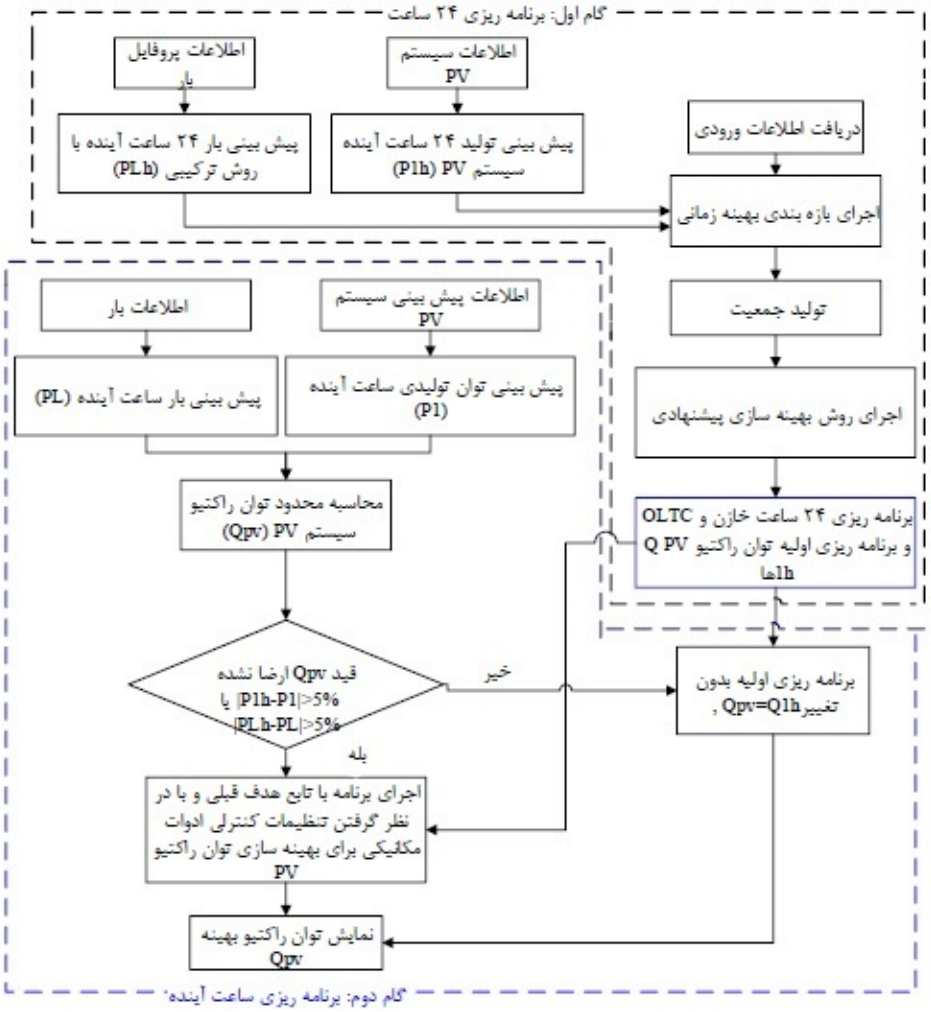
$$\sigma_L = \left(P_{Lhs}^t - P_{Lhs}^1\right)^2 + \left(P_{1hs}^t - P_{1hs}^1\right)^2 \qquad (۱۸)$$

P_{Lhs}^t و P_{1hs}^t به ترتیب توان خروجی سیستم فتوولتائیک و بار الکتریکی را در ساعت t ام سطح بار نشان می‌دهد.

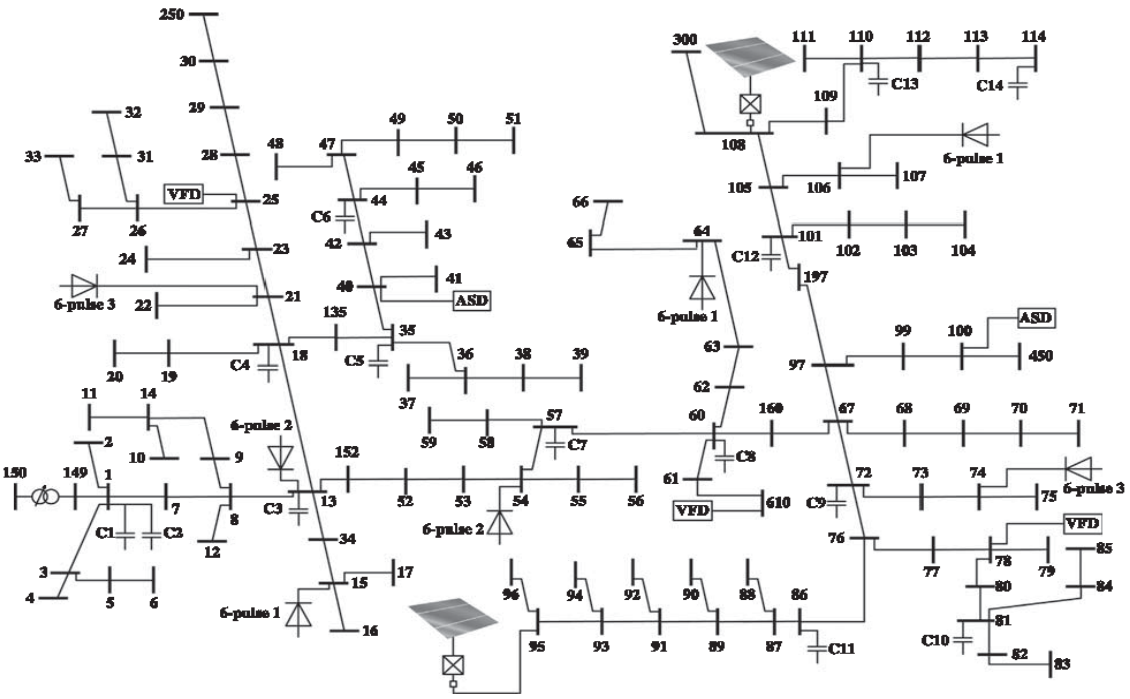
در فرآیند بهینه‌سازی مرحله اول، هر ذره از جمعیت شامل زیر بخش‌هایی به تعداد همین بازه های زمانی می‌باشد. در این مقاله تعداد بازه‌های زمانی برابر ۴ و تپ ترانسفورماتور از ۷- تا ۷+ و مجموعا ۱۵ حالت ممکن در نظر گرفته می‌شود بنابراین در هر ذره از جمعیت ذرات ۵ بیت به آن اختصاص می‌یابد. همچنین به ازای هر واحد خازنی موجود در سیستم نیز یک بیت اختصاص می‌یابد که وضعیت خاموش یا روشن بودن آن به‌ترتیب با استفاده از "۰" و "۱" نشان داده می‌شود. در نهایت برای توان راکتیو هر یک از واحدهای فتوولتائیک موجود در سیستم یک بیت اختصاص می‌یابد. شکل (۲) فلوچارت بهینه‌سازی سیستم را نشان می‌دهد.

۶- نتایج

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]



شکل (۲): فلوچارت اجرای کنترل ولتاژ و توان راکتیو بهینه دو مرحله‌ای در سیستم



شکل (۳): سیستم ۱۲۳ باس

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

واحدهای خازنی با اجرای خازن‌گذاری بهینه و با فرض وجود واحدهای ۵۰ و ۳۰۰ kVar، بصورت جدول (۱) حاصل می‌شود.

جدول (۱): واحدهای خازنی موجود در سیستم

باس	۹	۱۳	۱۴	۱۹	۲۷	۲۹
kVar	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳۰۰	۳۰۰
باس	۵۰	۵۲	۵۴	۶۶	۸۴	
kVar	۳۰۰	۵۰	۳۵۰	۳۰۰	۵۰	

همچنین بار الکتریکی شبکه با ۵ درصد افزایش نسبت به شبکه استاندارد در نظر گرفته شده است. در ابتدا فرض می‌شود که واحدهای خازنی در سیستم وجود نداشته و تپ ترانس در مقدار ۵+ خود تنظیم شده است. بر این اساس ابتدا مقادیر واقعی و پیش‌بینی بار الکتریکی و توان خروجی سیستم فتوولتائیک در ۲۴ ساعت آینده مطابق شکل (۴) و شکل (۵) حاصل می‌شود. پیش‌بینی ساعتی (یک ساعت آینده) بار الکتریکی شبکه با دقت بسیار خوب و خطای کمتر از یک درصد صورت می‌گیرد. لذا، بار پیش‌بینی شده برای ساعت آینده مطابق بار الکتریکی واقعی شبکه در شکل (۴) در نظر گرفته شده است.

بر این اساس برای حداقل سوییچ زنی مکانیکی با استفاده از روش بازه بندی زمانی بهینه چهار بازه زمانی بصورت 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 می‌گردد.

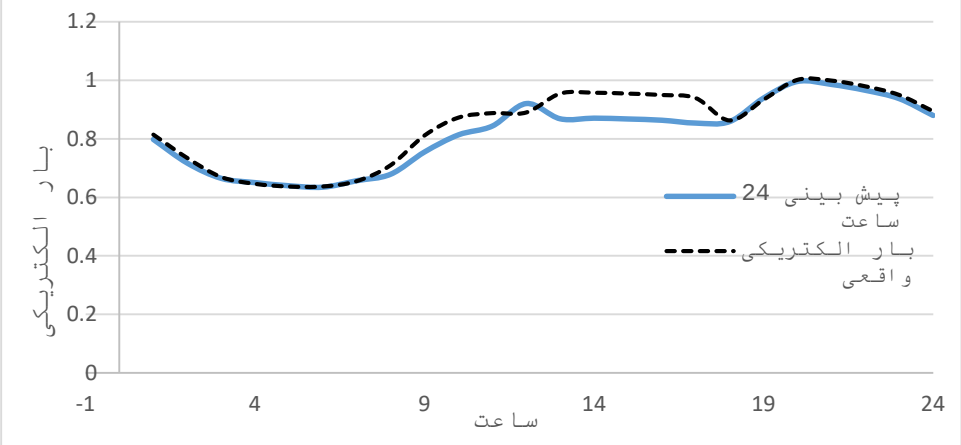
سیستم در چهار حالت مطابق زیر مورد مطالعه قرار می‌گیرد:

حالت اول: هیچ جبران سازی بهینه ای در سیستم صورت نگرفته است. موقعیت تپ ترانس ۵+ می‌باشد.

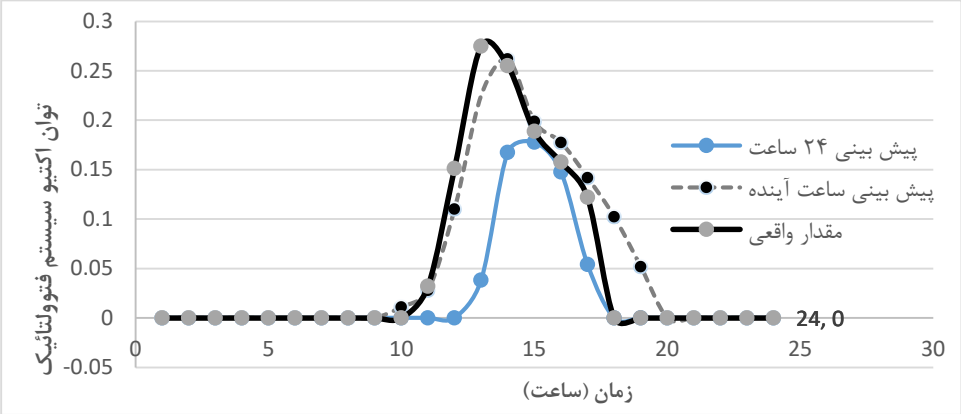
حالت دوم: بهینه‌سازی تپ ترانس و وضعیت خازن‌ها با فرض پیش‌بینی بار الکتریکی و خروجی سیستم فتوولتائیک در ۲۴ ساعت آینده و بدون استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم فتوولتائیک صورت می‌گیرد.

حالت سوم: بهینه‌سازی با پیش‌بینی بار الکتریکی و خروجی سیستم فتوولتائیک در ۲۴ ساعت آینده و با استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم فتوولتائیک صورت می‌گیرد.

حالت چهارم: بهینه‌سازی دو مرحله ای با پیش‌بینی بار الکتریکی و خروجی سیستم فتوولتائیک در ۲۴ ساعت آینده و نیز با پیش‌بینی ساعت آینده بار و توان و با استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر سیستم فتوولتائیک صورت می‌گیرد. برنامه ریزی کنترل دو لایه و همچنین نتایج سناریو اول بصورت جدول (۳) حاصل می‌شود.



شکل (۴): بار الکتریکی واقعی و پیش‌بینی شده ۲۴ ساعت آینده



شکل (۵): توان خروجی سیستم فتولتاییک واقعی، پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده و ساعت آینده

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

جدول (۲): موقعیت تپ ترانس OLTC و وضعیت خازن‌ها در حالت‌های مختلف مورد مطالعه

موقعیت تپ ترانس و وضعیت خازن‌ها در حالت سوم و چهارم

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

موقعیت تپ ترانس و وضعیت خازن‌ها در حالت دوم

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

جدول (۳): نتایج حدی در چهار حالت مورد مطالعه

	تلفات کل (MW)	V_{min}(pu)	THD_{max}	THD متوسط
حالت اول	۱۰/۱۳۸۹۴	۰/۸۸۰۵	۵/۶۲۲۶	۴/۵۸۱۶
حالت دوم	۸/۳۲۱۶۶۵	۰/۹۳۲۸	۵/۲۶۵۸	۴/۱۷۳۳
حالت سوم	۷/۸۱۵۹	۰/۹۴۵۷	۵/۱۰۳۳	۳/۹۵۲۲
حالت چهارم	۷/۵۴۳۱	۰/۹۵۱۳	۴/۸۷۳۸	۳/۷۹۹۰

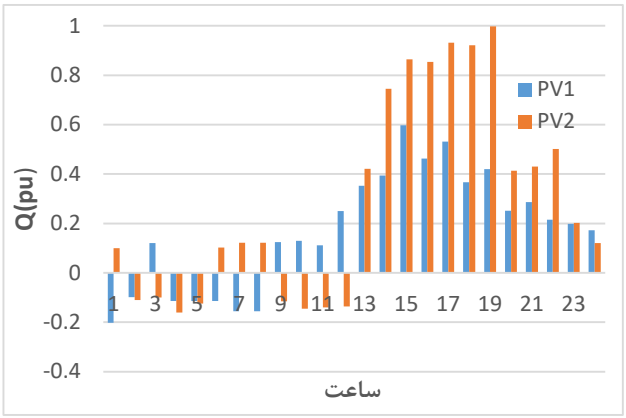
مطابق نتایج جدول ۳، در حالتی که هیچ بهینه‌سازی در سیستم صورت نگرفته است مقادیر ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌ها از حدود مورد نظر خارج شده اند. استفاده از اطلاعات پیش‌بینی بار الکتریکی و خروجی سیستم فتوولتائیک در ۲۴ ساعت آینده و بهینه‌سازی وضعیت تپ ترانسفورماتور و خازن‌های موازی بر اساس آن بدون لحاظ کردن ظرفیت توان راکتیو سیستم فتوولتائیک نتایجی مطابق حالت دوم از جدول ۲ در بر خواهد داشت. برای نشان دادن تاثیر پیش‌بینی دقیق بار و خروجی سیستم فتوولتائیک، نتایج بهینه‌سازی با مقادیر واقعی بار الکتریکی و توان سیستم فتولتاییک ارزیابی شده و در حالت دوم جدول ۳ ارائه شده است. طبق جدول ۳، در اثر ارزیابی سیستم با نتایج شبیه سازی حالت دوم و مقادیر واقعی بار و تولید، ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ از حدود مجاز تجاوز می‌نماید.

در حالت سوم بهینه‌سازی یک مرحله ای مجددا بر اساس مقادیر پیش‌بینی ۲۴ ساعت بار و تولید و با فرض قابلیت استفاده از ظرفیت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

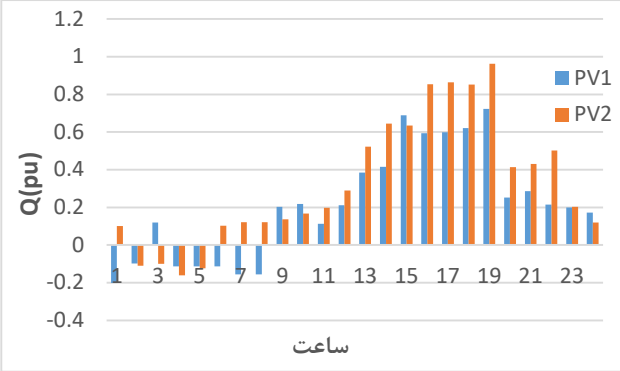
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

توان راکتیو سیستم فتوولتائیک صورت می‌گیرد. در جدول ۳، نتایج حالت سوم نشان‌دهنده ارزیابی نتایج ارائه شده در حالت سوم جدول ۲ با مقادیر واقعی بار و تولید ارائه شده است. طبق نتایج جدول ۳، تلفات در این حالت نسبت به حالت اول کاهش بیشتری یافته و وضعیت ولتاژ و اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌ها نسبت به حالت دوم بهبود می‌یابد. برنامه‌ریزی توان راکتیو در هر ساعت مطابق شکل (۶) می‌باشد. نکته قابل توجه این است که مجددا به دلیل استفاده از مقادیر پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده در بهینه‌سازی، ارزیابی نتایج در حالت واقعی مجددا منجر به عدم ارضای کامل قیود می‌گردد. نکته قابل ذکر این است که فقط در ساعت ۹-۱۸ به دلیل عدم تطابق بار و تولید در پیش‌بینی ۲۴ ساعت و ساعت آینده، بهینه‌سازی در مرحله دوم صورت می‌گیرد.



شکل (۶): توان راکتیو برنامه ریزی شده در حالت سوم و لایه اول حالت چهارم

در حالت چهارم در مرحله اول نتایج حالت سوم در روز گذشته بر اساس پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده استخراج گردیده و سپس بر اساس پیش‌بینی بار و تولید در ساعت آینده همان روز، در صورت عدم تطابق پیش‌بینی‌ها یا عدم ارضای قیود طبق فلوچارت شکل (۱)، بهینه‌سازی در لایه دوم با هدف تعیین مقدار بهینه توان راکتیو سیستم فتوولتائیک صورت می‌گیرد. ارزیابی نتایج با مقادیر واقعی نتایجی مطابق حالت چهارم دارد که در جدول ۴ ارائه می‌شود. مطابق جدول با کنترل دو مرحله‌ای به‌دلیل اینکه پیش‌بینی بار و تولید به‌صورت کوتاه مدت صورت گرفته و با بهینه‌سازی توان راکتیو سیستم فتوولتائیک بر اساس آن، کمترین تلفات را در بر داشته و کلیه قیود در سیستم ارضا گردیده است. همچنین در ساعت ۱۹ توان راکتیو حاصل از بهینه‌سازی در لایه اول از قید خود خارج شده و بنابراین لایه دوم اجرا می‌گردد. شکل (۷)، نتایج توان راکتیو برنامه ریزی شده در این حالت را نشان می‌دهد.

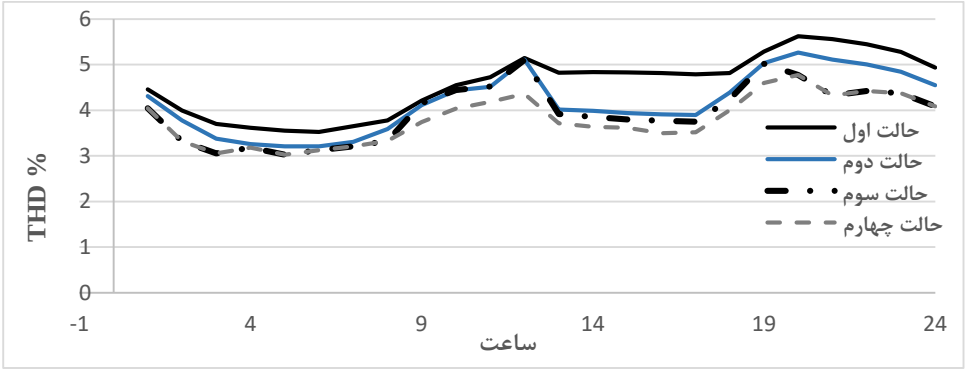


شکل (۷): توان راکتیو برنامه ریزی شده در حالت چهارم

برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر THD_{max} و V_{min} در ۴ حالت مورد مطالعه (باس ۸۶) در شکل (۸) و (۹) ترسیم شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ظرفیت توان راکتیو سیستم فتوولتائیک، در حالت سوم و چهارم منجر به بهبود نسبی وضعیت هارمونیکی سیستم می‌شود. علت این امر را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

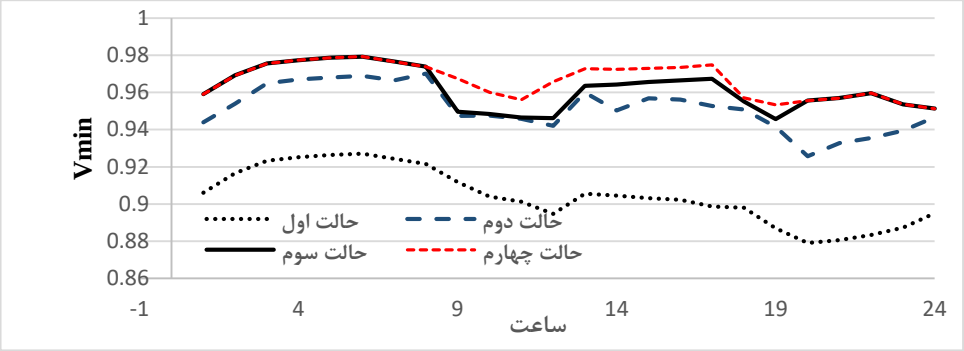
اولا: یکی از روش‌های مرسوم برای جبران توان راکتیو در شبکه توزیع، استفاده از خازن‌های موازی بوده که در شرایط هارمونیکی برخی از این واحدها منجر به رخداد تشدید یا شرایط نزدیک به تشدید می‌شود.

ثانیا: استفاده از ظرفیت توان راکتیو سیستم PV با حذف خازن های تقویت کننده هارمونیک، منجر به بهبود وضعیت هارمونیکی سیستم می‌شود. از طرف دیگر تزریق توان راکتیو در شبکه باعث تقویت مولفه اصلی ولتاژ در سیستم شده که این منجر به کاهش THD ولتاژ شبکه می‌شود.



شکل (۸): بیشترین اعوجاج هارمونیکی ولتاژ در ۲۴ ساعت شبانه روز در چهار حالت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018



شکل (۹): ولتاژ مینیمم در ۲۴ ساعت شبانه روز در چهار حالت

نتیجه‌گیری

در این مقاله روش کنترل ولتاژ و توان راکتیو دو مرحله‌ای نوین بر اساس پیش‌بینی بار و تولید در شبکه توزیع دارای سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی به‌عنوان سیستم تولید پراکنده با استفاده از ظرفیت توان راکتیو اینورتر فتوولتائیک پیشنهاد شد. در مرحله اول، بهینه‌سازی سیستم برای ۲۴ ساعت آینده و بر اساس پیش‌بینی ۲۴ ساعت آینده بار و تولید صورت گرفته و وضعیت سوییچ‌های مکانیکی و توان راکتیو برنامه ریزی شده و برای پوشش دادن تغییرات سریع و پیش‌بینی نشده بار و تولید و در نتیجه پارامترهای کیفیت توان در سیستم، پیش‌بینی بار و تولید در مرحله دوم بر اساس پیش‌بینی ساعت آینده همان روز صورت گرفته و در صورت وقوع تغییرات تصادفی، توان راکتیو سیستم فتوولتائیک بهینه می‌شود. روش پیشنهادی در سیستم ۱۲۳ باس استاندارد در ۴ سناریوی مختلف بکار رفته و نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی ساعت آینده بار و تولید می‌تواند منجر به برنامه ریزی عملیاتی موثرتری در توان راکتیو منبع فتوولتائیک و در نتیجه کنترل بهتر ولتاژ و توان راکتیو شبکه گردد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۳۴۸۹ تحت حمایت پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان می باشد.

مراجع:

[1] Masters, C., Voltage rise: the big issue when connecting embedded generation to long 11 kV overhead lines, Power Engineering Journal, vol. 16, pp. 5-12, 2002.
[2] 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 Trans. Power Del.., vol. 26, no. 1, pp. 307–315, Jan. 2011.
[3] Yeh H-G, Gayme DF, Low SH. Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators. IEEE Trans Power Syst 2012; 27:1656–63.
[4] Varma RK, Khadkikar V, Seethapathy R. Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage. IEEE Trans Energy Convers 2009; 24:983–5.
[5] K. Turitsyn, P. Šulc, S. Backhaus, M. Chertkov, Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators, Proc. IEEE, 99 (6), 1063–1073 (2011); arXiv:1008.0878.
[6] Lave, M.,Kleissl, J., andArias-Castro, E., High frequency irradiance fluctuations and geographical smoothing, Solar Energy, Vol. 86, No. 8, pp. 2190–2199, August 2012.
[7] Borghetti, M. Bosetti, S. Grillo, S. Massucco, C.A. Nucci, M. Paolone, F. Silvestro, Short-Term Scheduling and Control of Active Distribution Systems with High Penetration of Renewable Resources, IEEE Systems Journal, Vol. 4, No. 3, pp. 313 - 322, Sept. 2010.
[8] S. Jadid, O. Homaee & A. Zakariazadeh, Voltage Control Approach in Smart Distribution Network with Renewable Distributed Generation, Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 10, No.1, 2013.
[9] Hu, Z., Wang, X., Chen, H., and Taylor, G., Volt/Var control in distribution systems using a time-interval based approach, in Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, pp. 548-554, 2003.
[10] Liang, R. H. and Cheng, C. K., Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system, Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 16, pp. 625-630, 2001.
[11] Viawan FA, Karlsson D. Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation. IEEE Trans Power Delivery 2008; 23:1079–87.
[12] Borghetti, A., "Using mixed integer programming for the volt/VAR optimization in distribution feeders," Electric Power Syst. Res., Vol. 98, pp. 39–50, May 2013.
[13] Deshmukh, S., Natarajan, B., and Pahwa, A., Voltage/VAR control in distribution networks via reactive power injection through distributed generation, IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 3, pp. 1226–1234, September 2012.
[14] Paaso, E. A., Liao, Y., and Cramer, A., Formulation and solution of distribution system voltage and VAR control with distributed generation as a mixed integer non-linear programming problem, Electric Power Syst. Res., Vol. 108, pp. 164–169, March 2014.
[15] Jashfar,S.,Esmaeili, S., Volt/var/THD control in distribution networks considering reactive power capability of solar energy conversion, Electrical Power and Energy Systems, pp 221–233, 2014.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.1- Spring 2018

[16] Feng, X., Peterson, W., Yang, F., Wickramasekara, G., and Finley, J., Implementation of control center based voltage and VAR optimization in distribution management system, 2010 IEEE Power and Energy Society Distribution and Transmission Conference and Exposition, New Orleans, LA, 19–22 April, 2010.
[17] F. Sayadi, S. Esmaeili, F. Keynia, Feeder Reconfiguration and Capacitor Allocation in Presence of Non-linear Loads Using New P-PSO Algorithm", IET- GTD, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0936, 2016.
[18] Calderaro V, Conio G, Galdi V, Massa G, Piccolo A. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators. IEEE Trans Power Syst 2014; 29:230–41.
[19] Calderaro V, Galdi V, Piccolo A, Massa G. Optimal fuzzy controller for voltage control in distribution systems. In: 11th international conference on intelligent systems design and applications (ISDA). IEEE; 2011. p. 1282–7.
[20] Ming Ding, Lei Wang, Rui Bi, An ANN-based Approach for Forecasting the Power Output of Photovoltaic System, Procedia Environmental Sciences, 2011, pp.1308-1315.
[21] Sandjib, M. Short term load forecasting using computational intelligence methods, Master Thesis. National Institute of Technology of Rourkela, 2008.
[22] Amjady N. Short-term bus load forecasting of power systems by a new hybrid method. IEEE Trans Power Syst 2007; 22:333–41.
[23] Seifi H, Sepasian MS. Electric power system planning: issues, algorithms and solutions. Springer; 2011.
[24] Jie Shi Wei-Jen Lee Y ongqian Liu Yongping Yang Peng Wang, Forecasting Power Output of Photovoltaic System Based on Weather Classification and Support Vector Machine, IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1064 – 1069, 2011.
[25] E. Lorenz, J. Hurka, D. Heinemann, and H.G. Beyer, Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 2, pp. 2-10, 2009.
[26] Cai. Tao, Duan. Shanxu, and Chen. Changsong, Forecasting power output for grid-connected photovoltaic power system without using solar radiation measurement, PEDG Symposium, pp. 773-777, 2010.
[27] Yona, T. Senjyu, A.Y. Saber, T. Funabashi, H. Sekine, and Kim. Chul-Hwan, Application of neural network to oneday- ahead 24 hours generating power forecasting for photovoltaic system, ISAP Conference, 2007.
[28] Adnan So¨zen, Erol Arcakloglu, Mehmet O¨zalp, and Naci C¸ aglar, Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey, Renewable Energy, vol. 30, pp. 1075-1090, June 2005.
[29] Zhaoyu, P., Shengzhu, L., Hong, Z., and Nan, Z., The Application of the PSO Based BP Network in Short-Term Load Forecasting, Physics Procedia, vol. 24, pp. 222-232, 2012.
[30] Hu Z, Wang X, Chen H, Taylor G., Volt/var control in distribution systems using a time-interval based approach. Gener, Transm Distrib, IEE Proc: IET 2003:548–54.
[31] Kersting W. Radial distribution test feeders. In: Power engineering society winter meeting. IEEE; 2001. p. 908–12.
[32] www.iso-ne.com/markets/hourly/smd_hourly.xls
[33] www.soxlamps.com/weather.htm
[۳۴] فهیمه صیادی شهرکی، فرشید کی نیا و سعید اسماعیلی، پخش بار اقتصادی دینامیکی بهنیه با استفاده از P-PSO پیشنهادی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال پنجم، شمارهٔ دوم، تابستای ۱۳۹۴، صفحه ۲-۱۳.

زیرنویس‌ها

[1] HLFC
[2] Total Harmonic Distortion
[3] Exploration
[4] Exploitation
[5] Neural Network
[6] Relative Mean Squire Error

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.1.5.3]