

## کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو در سیستم‌های توزیع شعاعی تحت نفوذ بالای سیستم‌های فتوولتاییک با استفاده الگوریتم ژنتیک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

کد مقاله: ۹۳۵۹۷

بابک صفری چابک<sup>۱\*</sup>، سجاد غلامرضایی سرولات<sup>۲</sup>،  
حمید امینی خاوندی<sup>۳</sup>، سولماز کاظمی<sup>۴</sup>، امیرحسین آمرزش<sup>۵</sup>

### چکیده

در سیستم‌های توزیع شعاعی تحت نفوذ بالای سیستم‌های فتوولتاییک (PVS)، باسهای حساس شبکه به ویژه باسهای انتهایی فیدر به دلیل نسبت بالای شاخه‌ها در معرض اضافه ولتاژهای استاتیکی و دینامیکی قرار دارند. در این مقاله، یک رهیافت متمرکز دو مرحله‌ای کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو با استفاده از ظرفیت به‌القوه واسط‌های اینورتری سیستم‌های PVS برای حل این مشکل پیشنهاد می‌گردد. ابتدا، حساس‌ترین باسهای شبکه با بکارگیری آنالیز حساسیت شناسایی و اولویت‌بندی می‌شوند و سپس، ظرفیت بهینه جذب توان راکتیو توسط واسط‌های اینورتری PVS در باسهای حساس شبکه بر اساس لیست اولویت با هدف حذف اضافه ولتاژها و بازگرداندن دامنه ولتاژ باس‌ها به محدوده مجاز مطابق استانداردهای بهره‌برداری تعیین می‌شود. به منظور اعتبارسنجی و تایید کارایی رهیافت پیشنهادی، مطالعات عددی و شبیه‌سازی بر روی یک فیدر توزیع شعاعی فشار ضعیف ۱۰-باسه با ظرفیت پست هوایی ۶۰ کیلوولت آمپر دارای بار ممتد ۵ کیلوواتی با ضریب توان واحد بکار گرفته می‌شود، در سیستم توزیع تست به جز باس ۱ مابقی باس‌ها به منبع PV مجهز به واسط اینورتری متصل هستند. نتایج شبیه‌سازی گواه این حقیقت است که رهیافت پیشنهادی دارای دقت و سرعت مناسب برای حذف اضافه ولتاژهای استاتیکی و دینامیکی ناشی از نفوذ بالای PV در شبکه توزیع شعاعی می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو (Volt/Var)، شبکه توزیع شعاعی، اضافه ولتاژهای استاتیکی و دینامیکی، اینورترها و سیستم‌های فتوولتاییک (PV)

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق-قدرت، رئیس شرکت کهکشان پژوهش گستر برق (نویسنده مسئول)  
Babak.safari9941@gmail.com

۲- مربی- هیئت علمی آموزشکده امام جعفر صادق آستانه اشرافیه

۳- دانشجوی دکترا مهندسی برق-قدرت دانشگاه آزاد اسلامی ساوه

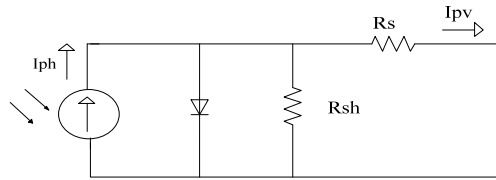
۴- کارشناس ارشد مهندسی برق-کنترل فارغ التحصیل دانشگاه آزاد اسلامی تهران- جنوب

۵- کارشناس ارشد مهندسی برق-قدرت فارغ التحصیل دانشگاه آزاد اسلامی تهران- مرکز

امروزه، تکنولوژی سیستم‌های فتوولتائیک (PVs) متصل به شبکه توزیع بواسطه مزایای فراوان بسیار اهمیت یافته است و به این دلیل، توسعه این منابع در مقایسه با منابع تولید پراکنده دیگر از سرعت بیشتری برخوردار شده است. یکی از مزایای اصلی استفاده از PVs در شبکه توزیع فشار ضعیف کاهش تلفات کل سیستم قدرت خواهد بود، اما نصب این منابع مسائلی نظیر کوری حفاظتی، اضافه ولتاژ و غیره را ایجاد می‌کند. در ساعات کم باری، شرایط وقوع اضافه ولتاژ و شارش معکوس توان به واسطه نفوذ بالای PVs در شبکه توزیع فراهم می‌گردد که ظرفیت نصب آنها را محدود می‌سازد و بنابراین تنظیم ولتاژ باسها در محدوده مجاز استاندارد بسیار با اهمیت می‌باشد. با توجه به اهمیت بحث تا کنون مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است که به طور خلاصه در ذیل به برخی از آنها پرداخته می‌شود. در مرجع (Franco, J.F, 2013:10-20) برورسانی بهینه مشخصات ساختاری شبکه توزیع از طریق افزایش سطح مقطع کابل‌های بمنظور کاهش امپدانس شاخه‌ها توسط یک رهیافت برنامه‌ریزی خطی صحیح-ترکیبی پیشنهاد شد. در مرجع (Legha, M.M, 2014:33-41)، بهینه‌سازی سطح مقطع هادی‌ها و خازنگذاری در شبکه توزیع به طور همزمان مطالعه گردید. در مرجع (Xu, Y. Z, 2013:4072-7079)، نصب بانک‌های خازنی در کنار ترانسفورماتورها برای مدیریت توان راکتیو و کنترل ولتاژ شبکه توزیع شعاعی مطالعه گردید و نشان داده شد که حتی تلفیق ترانسفورماتور مجهز به تیپ‌چنجر آنلاین و بانک خازنی به واسطه پاسخ کند قادر به کنترل و تنظیم مناسب ولتاژ در زمان عبور ابرها از روی سیستم‌های خورشیدی سقفی نیستند. در مرجع (Salih, S.N, 2016:4026 - 4035)، کاربرد ترانسفورماتورهای مجهز به تیپ‌چنجر را برای کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو شبکه توزیع شامل منابع توربین بادی بحث شد. در مرجع (Mehrizi-Sani, A, 2012:216-223)، روش‌های مناسب کنترل ترانسفورماتور مجهز به تیپ‌چنجر آنلاین را برای عملکرد مناسب شبکه‌های توزیع مجهز به سیستم‌های خورشیدی بررسی شد. در مراجع (Moursi, M. S. E, 2014:1157 - 1167) و (Salih, S. N, 2016:4026 - 4035) کنترل هماهنگ ترانسفورماتور مجهز به تیپ‌چنجر آنلاین را برای عملکرد مناسب ریزش‌های تحت پوشش شبکه توزیع مجهز به منابع توربین بادی بحث گردید و دلیل عملکرد نادرست روش‌های کنترلی پیشین را ماهیت غیرمتمرکز آنها عنوان شد. در مرجع (Ghosh, S, 2017:13-22)، یک تکنیک تنظیم ولتاژ محلی توسط واسط اینورتری منابع PVs پیشنهاد گردید و در آن از پیش‌بینی بسیار کوتاه-مدت توان PVs مبتنی بر فیلتر کالمن استفاده شد تا مانع تخطی ولتاژ باسهای شبکه توزیع از حد ماکزیمم استاندارد (۰.۹۵ تا ۱.۰۵ پریونیت) شود. بعلاوه، روش پیشنهادی از قطع بار توان اکتیو در زمانی که جذب توان راکتیو قادر به حذف اضافه ولتاژ شبکه نمی‌باشد، استفاده کرده است. منابع PVs برای تولید بیشترین توان به سیستم ردیاب توان ماکزیمم تجهیز می‌شوند و از آنجایی که دارای واسط اینورتری هستند در کسری از ثانیه قادرند تا مشکلات مربوط به نوسان‌های ولتاژی شبکه را برطرف نمایند در حالیکه تجهیزات قدیمی برای رفع مشکل به چند ثانیه زمان نیاز دارند. البته یکی از روش‌های مقابله با اضافه ولتاژهای دینامیکی روش قطع بار بر اساس معادل تونن شبکه است که مرجع (Wang, Y, 2012:2071 - 2078) به آن پرداخته است. در مراجع (Tonkoski, R, 2011:139-147) و (Azzouz, M. A, 2015:3234-3245) غلبه بر این مشکلات را از طریق مدیریت توان راکتیو دنبال شد. بنابراین، با توجه نتایج تحقیقات اخیر بهترین راه بهبود پروفیل ولتاژ شبکه توزیع تحت نفوذ بالای PVs مدیریت توان راکتیو با کمینه‌سازی قطع بار اکتیو است که در این مقاله دنبال می‌شود. ایده اصلی، بکارگیری ظرفیت خالی اینورترهای واسط PVs برای جذب توان راکتیو در باس‌های حساس شبکه توزیع شعاعی می‌باشد به نحوی که به برای باسبار از دیدگاه شبکه ضریب قدرت بالاتر از ۰.۹ حفظ گردد. در رهیافت پیشنهادی، ابزار قطع بار برای حذف اضافه ولتاژها دسترس‌پذیر نمی‌باشد و عملکرد نرمال منابع PVs از طریق کنترل ردیاب توان ماکزیمم (MPPT) دنبال می‌شود. مزیت اصلی رهیافت متمرکز دو مرحله‌ای پیشنهادی این مقاله در حقیقت دقت بالا برای حذف رخدادهای اضافه ولتاژ در باسهای سیستم توزیع شعاعی از طریق مدیریت توان راکتیو واسط‌های اینورتری PVs در مقایسه با تنظیم-کننده‌های ولتاژ سنتی می‌باشد. رهیافت پیشنهادی موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش پایداری ولتاژی در شبکه‌های توزیع شعاعی می‌گردد. سازماندهی مابقی بخش‌های این مقاله به ترتیب ذیل می‌باشد. در قسمت دوم، اجزاء، نحوه عملکرد منبع تولید پراکنده PV و مدل‌سازی آن ارائه می‌شود. در قسمت سوم، رهیافت پیشنهادی مبتنی بر مدیریت توان راکتیو شبکه توزیع شعاعی تحت نفوذ بالای منابع PVs با هدف حذف اضافه ولتاژها استاتیک و دینامیک تشریح می‌گردد. در قسمت چهارم، بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی و شبیه‌سازی بر روی یک سیستم توزیع تست فشار ضعیف ۱۰-باسه با ساختار شعاعی و بار ممتد ۵ کیلوواتی ارائه می‌شود. در نهایت، نتایج مفهومی حاصله از شبیه‌سازی‌ها در قسمت پنجم بیان می‌گردد.

## ۲- نحوه عملکرد منبع تولید پراکنده PV و مدل‌سازی آن

خورشید نه تنها خود منبع عظیم انرژی بلکه سرمنشاء حیات و تمام انرژی‌های دیگر در دنیا است. سلول خورشیدی بعنوان تجهیز پایه سیستم PV از یک پیوند p-n تشکیل شده است. مدار معادل سلول خورشیدی در حالت ایده‌آل مطابق شکل (۱) با یک منبع جریان و موازی با یک دیود نمایش می‌شود. در حالت غیرایده‌آل، دو مقاومت به صورت سری و موازی به مدار معادل ایده‌آل اضافه می‌گردد. (Chen, K, 2014:978-985)



شکل ۱- مدار معادل سلول خورشیدی

برای دستیابی به سطح جریان و ولتاژ بالاتر، سلول‌های خورشیدی بترتیب بفرم موازی و سری اتصال می‌یابند و ماژول (معمولاً ۳۶ سلول سری)، پنل (اتصال گروهی از ماژول‌ها)، آرایه (اتصال پنل‌ها) فتوولتاییک را می‌سازند. رابطه غیرخطی جریان آرایه یا سیستم فتوولتاییک بر اساس تعداد سلول‌های خورشیدی سری و موازی، سطح تابش، دمای عملکردی مطابق روابط (۱) تا (۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_r \quad (1)$$

$$I_{ph} = I_{sc0} \times \frac{S}{S_0} + C_t (T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_d = I_0 (e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1) \quad (3)$$

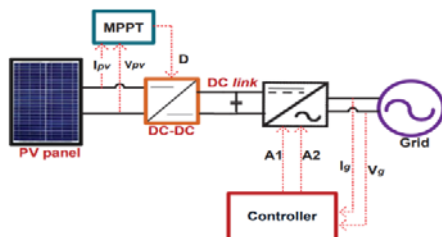
$$I_0 = I_{sc0} \times \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \times e^{\frac{qE_g}{AK}} \quad (4)$$

$$I_r = \frac{V_o}{R_{sh}} \quad (5)$$

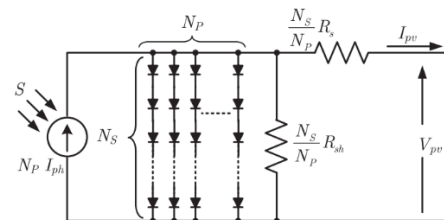
$$V_D = V_o + I_{pv} \times R_s \quad (6)$$

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left( e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{N_s}} - 1 \right) - \frac{N_p V}{N_s} + I_{pv} R_s \quad (7)$$

که در روابط فوق جریان سلول  $I_{pv}$ ، جریان تولید شده توسط تابش  $I_{ph}$ ، جریان عبوری از دیود  $I_d$ ، جریان عبوری از مقاومت سری  $I_r$ ، جریان اتصال کوتاه در شرایط نامی  $I_{sc0}$ ، شدت تابش نامی  $S_0$  که معمولاً  $1000 \text{ W/m}^2$  تعریف می‌گردد، شدت تابش خورشید در مکان نصب  $S$ ، ضریب دمایی  $C_t$ ، دمای مرجع  $T_{ref}$  (معمولاً  $25^\circ\text{C}$ ) تعریف می‌گردد، دمای سلول خورشیدی  $T$ ، جریان اشباع معکوس دیود  $I_0$ ، بار الکترون  $q$  (معادل  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ) تعریف می‌گردد، ضریب انتشار  $A$ ، ثابت بولتزمن  $K$  ( $1.38 \times 10^{-23}$ )، ولتاژ دیود  $V_D$ ، مقاومت سری  $R_s$ ، مقاومت موازی  $R_{sh}$ ، باند انرژی  $E_g$  (eV)، ولتاژ خروجی  $V_o$  می‌باشد. اگر تعدادی سلول به صورت موازی  $N_p$  یا سری  $N_s$  در اختیار باشد، مدار معادل یک منبع PV مطابق شکل (۲) نمایش داده می‌شود. جریان خروجی در ترمینال سیستم PV مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود. سیستم‌های PVS به عنوان پرمصرف‌ترین منبع تولید انرژی تجدیدپذیر در صنعت برق است که هر روزه بر تعداد متقاضیان آن افزوده می‌شود. هم اکنون، در بسیاری از کشورهای دنیا نیروگاه‌های PV در واحدهای کوچک و بزرگ مقیاس متصل به/منفصل از شبکه سراسری نصب و بهره‌برداری می‌شوند و معمولاً ساختار کنترلی آنها در وضعیت متصل به شبکه مطابق شکل (۳) است.



شکل ۳- ساختار کنترلی سیستم فتوولتاییک در وضعیت متصل به شبکه

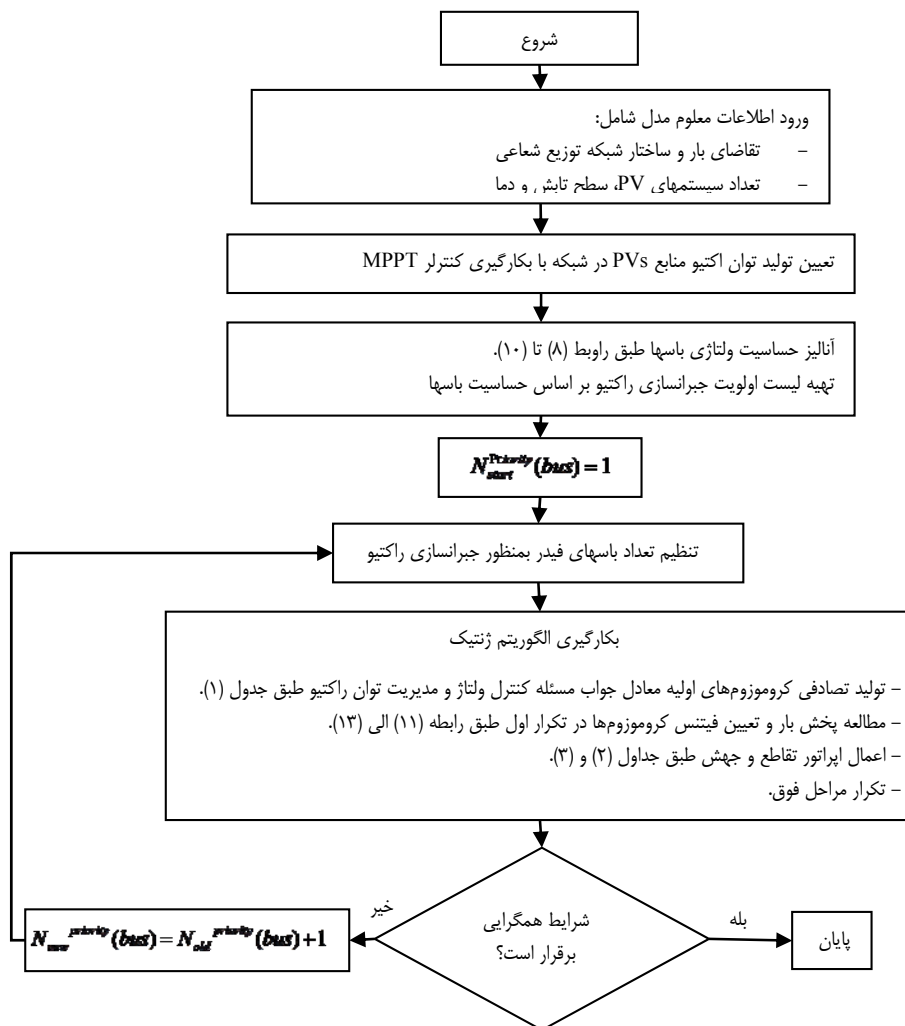


شکل ۲- مدار معادل یک سیستم فتوولتاییک

مطابق شکل (۳)، منبع PVS از طریق یک بوست کانورتر به لینک DC ورودی اینورتر متصل به شبکه سراسری اتصال می‌یابد. از آنجایی که در هر لحظه جریان خروجی منبع به شدت تابش خورشید و دمای پنل منبع PV وابسته است، کنترلر MPPT با نمونه‌برداری از ولتاژ و جریان خروجی پنل خورشیدی و با تغییر مدت زمان سوئیچینگ کانورتر DC-DC و اینورتر DC-AC باعث می‌شود تا در هر لحظه توان اکتیو ماکزیمم ( $P_{mp}$ ) متناظر با ولتاژ ماکزیمم ( $V_{mp}$ ) و جریان ماکزیمم ( $I_{mp}$ ) از این منبع غیرخطی جذب گردد.

### ۳- مدل‌سازی مبتنی بر ژنتیک مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو

در شبکه‌های توزیع با ساختار شعاعی اغلب باس انتهایی فیدر پایین‌ترین دامنه ولتاژ و بیشترین افت ولتاژ را در امتداد فیدر تجربه می‌کنند. با بکارگیری آنالیز حساسیت می‌توان دریافت آخرین باس هر فیدر شعاعی بواسطه نسبت بالای مقاومت اهمی به راکتانس سلفی در شاخه‌ها بعنوان حساس‌ترین باس شناخته می‌شود. همواره باسهای انتهایی فیدر و خصوصا باس انتهایی فیدرهای توزیع شعاعی تحت نفوذ بالای منابع PVS در معرض بیشترین اضافه ولتاژها هستند.



شکل ۴- فلوجارت پیشنهادی مدل‌سازی مبتنی بر ژنتیک مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو

بنابراین، هدف از برنامه مدیریت توان راکتیو در واقع کنترل و حفظ زمان واقعی دامنه ولتاژ حساس‌ترین باس شبکه توزیع در محدوده مجاز بین ۰٫۹۵ تا ۱٫۰۵ پریونیت یا ۰٫۹۸ تا ۱٫۰۲ پریونیت مطابق با استانداردهای بهره‌برداری شبکه است. در این مقاله برای تحقق هدف به عملکرد کنترلر MPPT در رابطه با استخراج توان ماکزیمم، ظرفیت اینورترهای واسط منابع PVS، حساسیت باس‌های به تزریق توان اکتیو و ضریب قدرت خالص هر باس‌ساز از دیدگاه شبکه بعنوان چهار فاکتور مهم مدل‌سازی توجه شده است. به هنگام نفوذ بالای سیستمهای PVS در یک شبکه توزیع شعاعی معمولاً باس انتهایی فیدر بعنوان حساس‌ترین باسها

در معرض اضافه ولتاژ خواهند بود. بنابراین، جذب راکتیو در باسهای انتهایی فیدر اغلب بیشتر باعث کاهش اضافه ولتاژها می‌شود، این جذب توان راکتیو از طریق کنترل اینورتر واسط دارای ظرفیت توانی خالی و ضریب قدرت مجاز باسبار مذکور محدود می‌گردد. البته، ظرفیت تولید و انتقال توان راکتیو منابع PVS نیز یک فاکتور محدودکننده برای قابلیت جذب توان راکتیو توسط اینورترهای واسط سیستم محسوب می‌گردد. بنابراین، میزان بهینه جذب توان راکتیو توسط اینورترهای واسط منابع PVS بر اساس لیست اولویت مکانی نصب بترتیب از انتهای فیدر (حساس‌ترین باس)، اولویت ظرفیت اینورتر (بالاترین ظرفیت) و اولویت استخراج ماکزیمم توان از منابع PVS با عملکرد MPPT و اولویت آخر ضریب توان باسبار تعیین می‌گردد تا اضافه ولتاژها در برخی باسهای سیستم توزیع تحت نفوذ بالای منابع PVS حذف گردد. با توجه به سرعت و قابلیت کنترلی بالایی مدیریت توان راکتیو از طریق اینورترهای واسط منابع PVS از بکارگیری گزینه قطع بار توان راکتیو چشم پوشی شده است. فلوچارت شکل (۴)، رهیافت پیشنهادی برای حذف اضافه ولتاژ در باسهای سیستم توزیع تحت نفوذ بالای منابع PVS را از طریق مدیریت توان راکتیو با بکارگیری ظرفیت به القوه واسط اینورتری منابع PVS تشریح می‌کند.

آنالیز حساسیت ولتاژ روشی مناسب برای مدیریت توان راکتیو در عملکرد اینورترهای واسط سیستمهای PV ارائه می‌کند. از معادلات پخش بار مطابق روابط (8) و (9)، می‌توان ماتریس حساسیت شبکه را طبق رابطه (۱۰) محاسبه کرد تا باس‌ها با شرایط بحرانی به لحاظ اضافه ولتاژی شناسایی شوند.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (۸)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (۹)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\delta P} & S_{\delta Q} \\ S_{VP} & S_{VQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

اندیس‌های  $V_i$  و  $V_j$  دامنه ولتاژ باس‌های  $i$  و  $j$  شبکه توزیع است،  $P_i$  و  $Q_i$  توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی خالص به باس  $i$ ،  $\delta_i$  زاویه فاز ولتاژ باس  $i$  و  $Y_{ij}$  ادمیتانس شاخه بین باس‌های  $i$  و  $j$  است. اندیس‌های  $S_{VP}$  و  $S_{\delta P}$  حساسیت زاویه فاز ولتاژ و دامنه ولتاژ نسبت به تغییر توان تزریقی اکتیو در باس‌ها می‌باشد و اندیس‌های  $S_{VQ}$  و  $S_{\delta Q}$  حساسیت زاویه فاز ولتاژ و دامنه ولتاژ نسبت به تغییر توان تزریقی راکتیو در باس‌ها می‌باشد. به طور کلی، اجرای الگوریتم پیشنهادی به این شکل خواهد بود که بعد ورود اطلاعات مفروض مدل شامل ساختار شبکه توزیع، تقاضای بار، شدت تابش و دما، ابتدا ردیابی توان ماکزیمم سیستمهای PVS متصل به شبکه توزیع شعاعی توسط کنترلر MPPT انجام می‌شود و تولید توان اکتیو آنها تحت شرایط شدت تابش و دما منطقه مشخص می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت یک مجموعه کاندید از حساس‌ترین باسهای شبکه شناسایی شده و بر اساس اولویت شماره‌گذاری می‌شوند. با انتخاب شماره ۱ تنها یک باس (ظرفیت خالی واسطهای اینورتری PVS متصل به باس انتهایی فیدر) و بر همین اساس در صورت انتخاب عدد  $n-1$  (ظرفیت‌های خالی واسطهای اینورتری PVS متصل به همه باس‌های فیدر به جز باس ابتدایی) برای جذب توان راکتیو بمنظور حذف اضافه ولتاژ از باسهای شبکه استفاده خواهد شد. در ادامه روند حل مسئله برای تعیین مقدار بهینه جذب توان راکتیو توسط واسطهای اینورتری PVS با هدف حذف اضافه ولتاژ شبکه توزیع از کاربست الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود. مطابق جدول (۱)، با انتخاب تعداد باسها برای جبرانسازی راکتیو، تعداد ژن‌های هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک معادل با متغیرهای مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو (توان راکتیو جذبی) شبکه توزیع شعاعی اکتیو تعیین می‌گردد.

**جدول ۱- یک کروموزوم نمونه معادل جذب توان راکتیو توسط واسطهای اینورتری منابع PVS**

$Q_{Bus_2}^{Inv-PV}$	.....	$Q_{Bus_{n-1}}^{Inv-PV}$	$Q_{Bus_n}^{Inv-PV}$
----------------------	-------	--------------------------	----------------------

محدوده مجاز برای تعیین مقدار بهینه جذب توان راکتیو از طریق اینورتر واسط PV در باس  $i$  شبکه توزیع معادل یک ژن کروموزوم های الگوریتم ژنتیک طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. جمعیت اولیه کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک معادل جواب مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو در محدوده مجاز به طور تصادفی در تکرار اول الگوریتم تولید می‌شوند. برای هر کروموزوم با اعمال جذب توان راکتیو توسط واسطهای اینورتری PVS در باسها از شبکه توزیع شعاعی پخش بار گرفته می‌شود و

مقدار برانزنگی آن‌ها بر اساس مجموع تخطی از مقادیر مجاز دامنه ولتاژ برای کلیه باسهای شبکه طبق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$Q_{Bus_i}^{Inv\_PV} = \min(\sqrt{(S_{Bus_i}^{Inv\_PV})^2 - (P_{Bus_i}^{Inv\_PV})^2}, (S_{Bus_i}^{Inv\_PV} \times \sin(\varphi_{max})))$$

$$\cos(\varphi_{max}) \geq 0.9 \quad (11)$$

$$P_{Bus_i}^{Inv\_PV} = P_{Bus_i}^{PVMPPT}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$Penalty^{voltage}(i) = \begin{cases} |V_i - V_{max}| \times 10^{+3} \rightarrow V_i > V_{max} & \text{if} \\ |V_{min} - V_i| \times 10^{+3} \rightarrow V_i < V_{min} & \text{if} \end{cases} \quad (12)$$

$$Fit_{VC\&RM}^{GA} = \text{Min}(\sum_i Penalty^{voltage}(i)) \quad (13)$$

بعد محاسبه برآزش کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک ( $Fit_{VC\&RM}^{GA}$ )، نتایج را از بهترین به بدترین فیتنس یا عبارت دیگر از کمترین به بیشترین جریمه تخطی ولتاژ مرتب کرده و بمنظور ایجاد بهبود در نتایج بر روی هر جفت کروموزوم عملگر تقاطع مطابق جدول (۲) اعمال می‌شود و سپس عملگر جهش طبق جدول (۳) بر روی فرزندان بکار گرفته می‌شود. با اعمال اپراتورهای تقاطع و جهش، در واقع برای بهبود روند جبرانسازی توسط اینورترهای واسط PVS در راستای هدف حذف اضافه ولتاژها از باسهای سیستم در قالب تکامل ژنتیکی طبیعی پیش خواهیم رفت. اگر انتخاب تنها باس آخر فیدر و عملکرد اینورتر واسط PV متصل به آن باس موجب حذف اضافه ولتاژ نشود یعنی معیار همگرایی برای مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو تحقق پیدا نکرده است و بایستی دو باس انتهایی فیدر شعاعی برای جبرانسازی راکتیو انتخاب گردد و در صورتی که بازمعیار همگرایی ارضاء نشد این روند افزایش تعداد باس‌ها و اینورترهای PVS مشارکت‌کننده در جبرانسازی توان راکتیو را افزایش داد تا شرایط همگرایی (مجموع تخطی ولتاژ باسها از محدوده مجاز صفر) ایجاد گردد.

جدول ۲- عملگر تقاطع برای هر جفت کروموزوم

$Q_{Bus_2}^{Inv\_PV}$	..	$Q_{Bus_{n-1}}^{Inv\_PV}$	$Q_{Bus_n}^{Inv\_PV}$	والد ۱
$Q_{Bus_2}^{Inv\_PV^*}$	..	$Q_{Bus_{n-1}}^{Inv\_PV^*}$	$Q_{Bus_n}^{Inv\_PV^*}$	والد ۲
$Q_{Bus_2}^{Inv\_PV}$	...	$Q_{Bus_{n-1}}^{Inv\_PV^*}$	$Q_{Bus_n}^{Inv\_PV^*}$	فرزند ۱
$Q_{Bus_2}^{Inv\_PV^*}$	...	$Q_{Bus_{n-1}}^{Inv\_PV}$	$Q_{Bus_n}^{Inv\_PV}$	فرزند ۲

جدول ۳- عملگر جهش برای کروموزوم فرزند

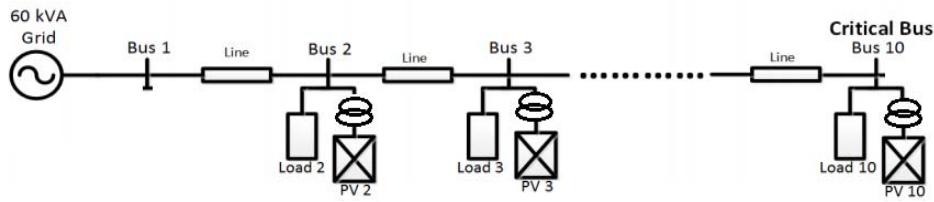
$Q_{Bus_{n-4}}^{Inv\_PV}$	...	$Q_{Bus_{n-2}}^{Inv\_PV}$	.	$Q_{Bus_n}^{Inv\_PV^*}$	فرزند ۱
$Q_{Bus_{n-4}}^{Inv\_PV}$	...	$Q_{Bus_{n-2}}^{Inv\_PV^o}$	.	$Q_{Bus_n}^{Inv\_PV^*}$	فرزند جدید

بعد پایان الگوریتم پیشنهادی، نتایج حل برای مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو به طور بهینه تعیین می‌گردد و در نتیجه توان اکتیو و راکتیو انتقالی اینورترهای واسط PVS در شبکه مشخص می‌شود.

#### ۴- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی

بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو شبکه توزیع تحت نفوذ بالای سیستم فتوولتائیک، مطالعات عددی و شبیه‌سازی بر روی یک فیدر توزیع شعاعی فشار ضعیف ۱۰-باسه، با ظرفیت

پست ۲۰۰ کیلوولت آمپر و تقاضای بار ممتد و ۹ عدد سیستم PVs مجهز به اینورتر واسط انجام می‌شود. شکل (۵) شبکه توزیع شعاعی مورد مطالعه شامل سیستم‌های PVs مجهز به واسط اینورتری نشان می‌دهد.



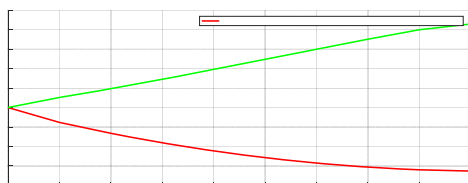
شکل (۵): شبکه توزیع شعاعی مورد مطالعه شامل سیستم‌های PVs

همان طور که دیده می‌شود تقاضای بار اکتیو در باس ۲ تا ۱۰ به طور مشابه معادل ۵ کیلووات و برای توان راکتیو معادل ۰ کیلووار است. امپدانس خطوط فیدر شعاعی برای طول اسین‌های ۱۰۰ متری مشابه و معادل  $0.0059 + j0.0065$  می‌باشد و امپدانس ترانسفورماتور در کنار شاخه اول معادل  $0.0012 + j0.0015$  است. سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه توزیع همگی مجهز به کنترلر MPPT می‌باشند تا همواره ماکزیمم توان اکتیو بر اساس شرایط تابش و دمای عملکرد سیستم از آنها استخراج گردد. مشخصات فنی سیستم‌های PV2 تا PV10 مورد استفاده شامل تعداد ماژول سری و موازی، ظرفیت توان انتقالی واسط اینورتری سیستم PV، دمای محیط و شدت تابش خورشید در جدول (۴) آمده است.

جدول ۴- اطلاعات معلوم برای سیستم‌های PVs سیستم توزیع شعاعی مورد مطالعه

PVs	ظرفیت اینورتر KVA	ماژول‌های سری	آرایه‌های موازی	دمای سیستم (°C)	شدت تابش $w / m^2$
PV2	۷	۵	۴	۳۰	۸۰۰
PV3	۸,۵	۵	۴	۳۰	۸۰۰
PV4	۱۰	۵	۴	۳۰	۸۰۰
PV5	۱۰	۵	۴	۳۰	۱۰۰۰
PV6	۱۵	۵	۴	۳۰	۱۲۰۰
PV7	۱۵	۵	۴	۳۰	۱۵۰۰
PV8	۲۰	۵	۴	۳۰	۱۸۰۰
PV9	۲۵	۵	۱۰	۳۰	۲۰۰۰
PV10	۳۵	۵	۱۲	۳۰	۲۵۰۰

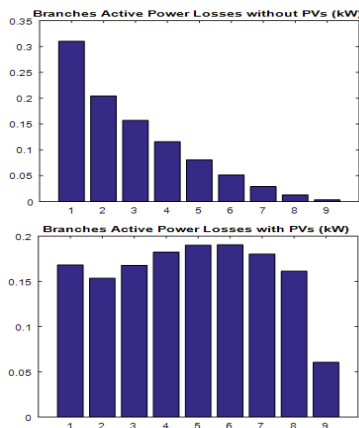
محدوده مجاز بالا و پایین دامنه ولتاژ باس‌ها مطابق استانداردهای بهره‌برداری شبکه توزیع به ترتیب ۰,۹۸ و ۱,۰۲ پریونیت لحاظ شده است و برای شناسایی باس‌های متحمل اضافه ولتاژ بواسطه نصب سیستم‌های PVs از مطالعه پخش بار AC استفاده می‌شود. ضریب قدرت مطلوب هر باسبار از دیدگاه شبکه مقدار کمینه ۰,۹ ثابت فرض می‌شود و مطالعات شبکه با توجه به شرایط مفروض انجام می‌شود. کدهای مدل پیشنهادی برای حل مسئله کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو شبکه توزیع شعاعی ۱۰-باسه تحت مطالعه در محیط نرم افزار متلب نوشته شده است که بر روی لپ‌تاپ ASUS با پردازشگر ۴ هسته‌ای ۲ گیگاهرتزی و حافظه جانبی ۸ گیگابایت اجرا می‌شود. مطالعات شبیه‌سازی بر روی شبکه توزیع شعاعی تست در سه بخش مطابق ذیل انجام می‌شود: در مطالعه موردی اول شرایط الکتریکال شبکه توزیع به فرم فیدر شعاعی با بار ممتد در عدم حضور سیستم‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار می‌دهیم و دامنه ولتاژ باسها و توان‌های انتقالی از پست و تلفات شبکه تحلیل می‌شود. در مطالعه موردی دوم شرایط الکتریکال شبکه توزیع مورد مطالعه در هنگام اتصال سیستم‌های PVs و عدم حضور سیستم کنترلی برای کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو بررسی می‌شود.



شکل ۶- مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای پروفیل ولتاژ فیدر ۱۰-باسه در حضور و عدم حضور سیستم PVs

در مطالعه موردی سوم شرایط الکتریکال شبکه توزیع در حضور سیستم‌های PVs و بکارگیری کنترلر پیشنهادی برای مدیریت توان راکتیو و کنترل ولتاژ با تغییرات دینامیکی شدت تابش خورشید در برخی مناطق بررسی می‌کنیم. مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای پروفیل ولتاژ در امتداد فیدر شعاعی ۱۰-باسه با حضور و عدم حضور سیستم PVs در شکل (۶) نمایش شده است.

همان طور که از نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه موردی اول با رنگ قرمز مربوط به عدم حضور سیستم‌های PVS در شبکه توزیع دیده می‌شود دامنه ولتاژ باس‌ها از ۲۲۰ ولت (باس اسلک) تا تقریباً ۲۱۳٫۴۸ ولت (باس ۱۰) کاهش می‌یابد زیرا علاوه بر مولفه حقیقی جریان که بواسطه توان اکتیو درخواستی مصرف‌کننده‌ها مولفه موهومی جریان نیز بواسطه درخواست توان راکتیو مصرفی در سلف شاخه از پست توزیع کشیده می‌شود و در نتیجه موجب افت ولتاژ در امتداد فیدر شعاعی می‌گردد. طبق استاندارد بهره‌برداری حد پایین مجاز برای دامنه ولتاژ باسها معادل ۲۱۵٫۶ ولت است، این مشاهده می‌شود که تخطی رخ داده است. از نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه موردی دوم با خط سبز رنگ مربوط به تاثیر حضور و بهره‌برداری از سیستم‌های PVS در شبکه توزیع شعاعی مورد مطالعه دیده می‌شود دامنه ولتاژ باس‌ها از ۲۲۰ ولت (باس اسلک) تا تقریباً ۲۲۸٫۵۸۷ ولت (باس ۱۰) افزایش می‌یابد در حالیکه که طبق استاندارد بهره‌برداری حد مجاز بالا برای دامنه ولتاژ باس‌ها معادل ۲۲۴٫۴ ولت است که در اینجا نیز تخطی رخ داده است. تلفات کل توان اکتیو در فیدر برای مطالعات موردی اول و دوم به ترتیب ۰٫۹۶۴۴ و ۱٫۴۵۴۱ کیلووات برآورد شده است. از مقایسه مقادیر تلفات توان اکتیو کل، می‌توان دریافت که نصب منابع تولید پراکنده سیستم‌های PVS و عدم کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو در امتداد فیدر موجب افزایش تلفات به دلیل تغییر مقدار و جهت فلوی توان عبوری از شاخه‌ها می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای تلفات توان اکتیو در شاخه‌های فیدر شعاعی در حضور و عدم حضور منابع تولید پراکنده سیستم‌های PVS در عدم حضور کنترلر ولتاژی در شکل (۷) نمایش شده است.



شکل ۷- تلفات توان اکتیو فیدر شعاعی در غیاب کنترلر ولتاژی با حضور و عدم حضور سیستم‌های PVS

مطابق انتظار در عدم حضور سیستم‌های PVS در شبکه توزیع بیشتر جریان از شاخه اول عبور می‌کند و تقریباً معادل با مجموع جریان کشیده شده توسط همه مصرف‌کننده‌های متصل به باس‌های شبکه می‌باشد که بیشترین تلفات اهمی را در این شاخه ایجاد می‌کند با پیشروی در امتداد فیدر و کاهش جریان عبوری از شاخه‌ها تلفات نیز کاهش می‌یابد. اما، در مطالعه موردی دوم حضور سیستم‌های PVS شارش توان و جریان‌های عبوری از شاخه‌ها را تغییر می‌دهد در نتیجه میزان تلفات توان اکتیو قابل پیش‌بینی نبوده و به میزان تولید توان اکتیو این منابع بستگی خواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی برای میزان تولید توان اکتیو سیستم‌های PVS با توجه به شرایط مفروض شدت تابش و دمای عملکردی سیستم در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵- میزان تولید توان اکتیو سیستم‌های PVS با توجه به شرایط مفروض شدت تابش و دمای عملکردی سیستم

توان تولید سیستم‌های PVS (KW)				
PV1=0	PV2=3.37	PV3=3.37	PV4=3.37	PV5=4.18
PV6=4.96	PV7=6.09	PV8=7.15	PV9=19.5	PV10=28.1

برای مطالعه موردی سوم دو سناریو بکار گرفته می‌شود که شرایط مفروض شدت تابش بر سطح برخی سیستم‌های PVS در طی زمان مطابق جدول (۶) تغییر می‌کند. مجدداً از رهیافت پیشنهادی مدیریت توان راکتیو برای حذف اضافه ولتاژ دینامیکی برخی باس‌های شبکه توزیع شعاعی و بازگرداندن دامنه ولتاژ این باسها به محدوده مجاز مطابق استاندارد بهره‌برداری استفاده می‌گردد. با بکارگیری رهیافت پیشنهادی، وضعیت سوئیچینگ اینورترهای واسط سیستم‌های PVS با توجه به شرایط جدید ولتاژی فیدر تغییر می‌کند تا با جذب توان راکتیو بتواند اضافه ولتاژ دینامیکی بوجود آمده در برخی باس‌های شبکه توزیع به ویژه در انتهای فیدر شعاعی را به محدوده مجاز بین ۲۱۵٫۶ ولت و ۲۲۴٫۴ ولت بازگرداند. نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه موردی سوم نشان می‌دهد که دامنه ولتاژ باس‌های فیدر توزیع شعاعی تحت مطالعه طی دو سناریو مختلف شدت تابش خورشید برای سیستم‌های PV8، PV9 و PV10 پس از عملکرد کنترلر پیشنهادی به مقادیر حالت دائمی مطابق جدول (۷) می‌رسند.

جدول ۶- شرایط مفروض شدت تابش بر سطح برخی سیستم‌های PVS در طی زمان برای مطالعه موردی سوم

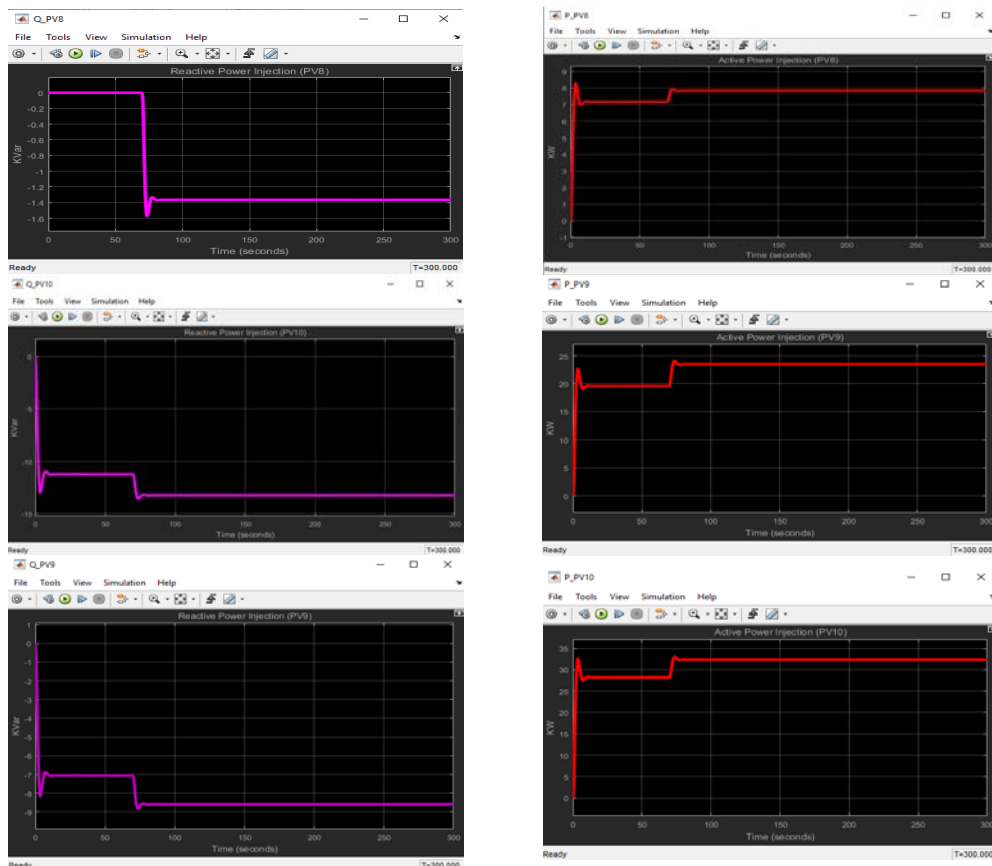
PV10	PV9	PV8	شدت تابش خورشید PVS
۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۸۰۰	سناریو ۱: زمان ۰ تا ۷۰ ثانیه
۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰	سناریو ۲: زمان ۷۰ تا ۳۰۰ ثانیه



جدول ۷- دامنه ولتاژ باس های شبکه تحت سناریوهای مختلف شدت تابش خورشید برای برخی سیستمهای PVs

Bus5	Bus4	Bus3	Bus2	Bus1	دامنه ولتاژ باس ها
۲۲۱,۵۸	۲۲۱,۱۱	۲۲۰,۶۹	۲۲۰,۳۴	۲۲۰	سناریو ۱
۲۲۱,۷۷	۲۲۱,۳۴	۲۲۰,۷۸	۲۲۰,۳۷	۲۲۰	سناریو ۲
Bus10	Bus 9	Bus 8	Bus 7	Bus6	دامنه ولتاژ باس ها
۲۲۳,۸۳	۲۲۳,۵۵	۲۲۳,۱۰	۲۲۲,۶۰	۲۲۲,۰۸	سناریو ۱
۲۲۴,۳۹	۲۲۴,۰۵	۲۲۳,۴۹	۲۲۲,۹۲	۲۲۲,۳۳	سناریو ۲

با افزایش شدت تابش بر سطح سه سیستم PV8، PV9 و PV10 انتظار می رود کنترلر MPPT تحت شرایط جدید مقادیر بیشتری توان اکتیو را از این منابع استخراج نموده و به شبکه تحویل دهد. تحت چنین شرایطی، میزان جذب توان راکتیو توسط اینورترهای واسط سیستمهای PVs بمنظور حذف اضافه ولتاژ دینامیکی تغییر خواهد کرد. بعد اجرای مدل پیشنهادی، نتایج شبیه سازی برای مقادیر ماکزیمم توان اکتیو استخراج شده و توان راکتیو جذب شده از سیستمهای PV8، PV9 و PV10 با بکارگیری رهیافت پیشنهادی در شکل (۸) به نمایش در آمده است.



شکل (۷): نتایج شبیه سازی برای مقادیر ماکزیمم توان اکتیو استخراج شده و راکتیو جذب شده از طرق سیستمهای PV8، PV9 و PV10 برای مطالعه موردی سوم

نتایج شبیه سازی گواه این حقیقت است که کنترلر MPPT در مطالعه موردی سوم برای استخراج توان اکتیو ماکزیمم از منبع غیرخطی PVs با دقت و سرعت مناسبی تغییرات شدت تابش خورشید را تعقیب می کند. علاوه، رهیافت پیشنهادی مطابق انتظار با تغییر سطح راکتیو جذب شده توسط عملکرد واسطهای اینورتری در سناریو افزایش شدت تابش خورشید همچنان دامنه ولتاژ باسها را در محدوده مجاز حفظ می کند. برای سناریو اول در زمان ۰ ثانیه تا ۷۰ ثانیه واسطهای اینورتری سیستمهای PV9 و PV10 بترتیب موجب جذب ۷ کیلووات و ۱۱,۲ کیلووات و برای سناریو دوم طی زمان ۷۰ ثانیه تا ۳۰۰ ثانیه سیستمهای PV8، PV9 و PV10 بترتیب موجب جذب ۱,۳۸ کیلووات، ۸,۸ کیلووات و ۱۳,۵ کیلووات خواهند شد تا دامنه ولتاژ باسها را در محدوده مجاز بهره برداری حفظ کنند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک راهکار جدید جهت بهبود پروفیل ولتاژ شبکه توزیع شعاعی تحت نفوذ بالای سیستم‌های PVs از طریق مدیریت توان راکتیو با اجتناب از گزینه قطع بار توان اکتیو شبکه ارائه گردید. استخراج ماکزیمم توان اکتیو از سیستم‌های PVs منصوب در شبکه توزیع شعاعی برای هر لحظه از طریق کنترلر MPPT انجام می‌شود. ایده اصلی کار برای حذف اضافه ولتاژهای استاتیکی و دینامیکی در واقع استفاده از ظرفیت خالی اینورترهای واسط سیستم‌های PVs برای جذب توان راکتیو در باسهای حساس شبکه بوده است به نحوی که از حداکثر ظرفیت انتقال توان این تجهیزات الکترونیک قدرت با پاسخ سریع تا قبل رسیدن به محدودیت ضریب قدرت (۰,۹) استفاده گردد. بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی رهیافت پیشنهادی جهت کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو شبکه توزیع تحت نفوذ بالای سیستم PVs، مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک فیدر توزیع فشار ضعیف ۱۰- باسه، ۲۲۰ ولتی با ظرفیت پست ۶۰ کیلوولت آمپر و تقاضای بار ممتد ۵ کیلووات شامل ۹ سیستم PVs انجام شده است. مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با استفاده بهینه از ظرفیت خالی اینورترهای واسط سیستم‌های PVs برای جذب توان راکتیو قادر است تا مشکل تحمیل اضافه ولتاژهای استاتیکی و دینامیکی به سیستم را رفع نموده و دامنه ولتاژ باس‌های حساس فیدرهای شبکه توزیع شعاعی تحت نفوذ بالای سیستم PVs را در محدوده مجاز حفظ کند.

## منابع

1. Franco, J. F., Rider, M.J., Lavorato, M., and Romero, R. (2013). Optimal Conductor Size Selection and Reconductoring in Radial Distribution Systems Using a Mixed-Integer LP Approach, IEEE Transaction on Power System 28, pp. 10–20.
2. Legha, M. M. (2014). Combination of optimal conductor selection and capacitor placement in radial distribution systems using PSO method", Iraqi J. Electr. Electron. Eng 10, pp. 33–41.
3. Xu, Y. Z., Dong, Y., Wong, K., Liu, P. E. and Yue, B. (2013). Optimal Capacitor Placement to Distribution Transformers for Power Loss Reduction in Radial Distribution Systems, IEEE Transaction on Power Systems 28, 4, pp. 4072-7079.
4. Salih, S.N., and Chen, P. (2016). On Coordinated Control of OLTC and Reactive Power Compensation for Voltage Regulation in Distribution Systems with Wind Power, IEEE Transaction on Power System 31, 5, pp. 4026 – 4035.
5. Mehrizi-Sani, A., and Iravani, R. (2012). Online set point adjustment for trajectory shaping in micro-grid applications, IEEE Transaction on Power System 27, 1, pp. 216–223.
6. Moursi, M. S. E., Zeineldin, H. H., Kirtley, J. L. Jr., and Alobeidli, K. (2014). A Dynamic Master/Slave Reactive Power-Management Scheme for Smart Grids with Distributed Generation, IEEE Transaction on Power Delivery 29, 3, pp.1157 – 1167.
7. Salih, S. N., and Chen, P. (2016). On Coordinated Control of OLTC and Reactive Power Compensation for Voltage Regulation in Distribution Systems with Wind Power, IEEE Transaction on Power System 31, 5, pp. 4026 – 4035.
8. Ghosh, S., Rahman, S., and Pipattanasomporn M. (2017). Distribution Voltage Regulation through Active Power Curtailment with PV Inverters and Solar Generation Forecasts, IEEE Transaction on Sustainable Energy 8, 1, pp. 13-22.
9. Wang, Y., Zhang, P., Li, W., Xiao, W., and Abdollahi, A. (2012). Online Overvoltage Prevention Control of Photovoltaic Generators in Micro-grids, IEEE Transaction on Smart Grid 3, 4, pp. 2071 – 2078.
10. Tonkoski, R., Lopes, L. A., and El-Fouly, T. H. (2011). Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention, IEEE Transaction on Sustainable Energy 2, 2, pp. 139–147.
11. Azzouz, M. A., Shaaban, M. F. and El-Saadany, E. F. (2015). Real-Time Optimal Voltage Regulation for Distribution Networks Incorporating High Penetration of PEVs, IEEE Transaction on Power Systems 30, 6, pp. 3234-3245.
12. Chen, K., Tian, S., Cheng, Y., and Bai, L. (2014). An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System under Partial Shading Condition, IEEE Transaction on sustainable energy 5, 3, pp. 978-985.