

مدیریت توزیع شده و سلسله‌مراتبی ولتاژ در شبکه هوشمند با مشارکت مولدهای پراکنده

مجید نیری پور^۱، دانشیار؛ حسین فلاح‌زاده ابرقوئی^۲، دانشجوی دکتری؛ سعید حسونند^۳، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - nayeri@sutech.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - hossein.fallahzadeh@sutech.ac.ir

۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان - دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد - خرم‌آباد - ایران - s.hasanvand@sutech.ac.ir

چکیده: در سیستم‌های توزیع قدرت علاوه بر بهره‌برداری بهینه، لازم است که ولتاژ مشترکین در محدوده مجاز حفظ شود. با توجه به افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر به‌ویژه منابع بادی و خورشیدی با طبیعت تصادفی، امکان نوسانات ولتاژ در سیستم‌های توزیع وجود دارد. در روش‌های مرسوم از ترانسفورماتورهای دارای تپ‌چنجر، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و بانک‌های خازنی به‌منظور کنترل ولتاژ شبکه توزیع استفاده می‌شود اما این تجهیزات برای مواجهه با تغییرات سریع مناسب نیستند. این مقاله یک دیدگاه کنترلی توزیع شده و سلسله‌مراتبی برای حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز ارائه می‌نماید که مبتنی بر مولدهای مجهز به اینورترهای هوشمند است. طرح پیشنهادی، ابتدا شبکه توزیع را به نواحی مختلف افراز نموده و سپس با تعیین بهینه نقطه کار توان راکتیو مولدهای محدود به هر ناحیه به‌صورت سلسله‌مراتبی در دو سطح هماهنگ ثانویه و بلادرنگ اولیه، پروفیل ولتاژ هر یک از نواحی را به‌طور هوشمند مدیریت می‌کند. ارزیابی مطالعه انجام شده بر روی شبکه تست ۳۴ باسه تحت وضعیت‌های مختلف تولید و بار نشان می‌دهد که دیدگاه ارائه شده برای مدیریت ولتاژ شبکه توزیع با منابع تجدیدپذیر مناسب است.

واژه‌های کلیدی: مدیریت توزیع شده، تنظیم ولتاژ، منبع تولید پراکنده تصادفی، افراز (ناحیه‌بندی) شبکه توزیع، ماتریس حساسیت، کنترل بلادرنگ اولیه، کنترل هماهنگ ثانویه، پخش بار بهینه.

Hierarchical and Distributed Voltage Management in Smart Grid with Distribution Generator Participation

M. Nayeripour¹, Associated Professor; H. Fallahzadeh-Abarghouei², PhD Student; S. Hasanvand³, PhD Student

1- Department of Electrical and Electronic Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: nayeri@sutech.ac.ir

2- Department of Electrical and Electronic Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: hossein.fallahzadeh@sutech.ac.ir

3- Young Researchers and Elite Club, Islamic Azad University of Khorramabad Branch, Khorramabad, Iran, Email: s.hasanvand@sutech.ac.ir

Abstract: The primary purpose of a distribution system is to meet the demands optimally as well as to maintain voltage within a specified range. Since renewable energy resources such as wind and solar energy have intermittent nature, they cause significant fluctuations in distribution system voltages. In conventional methods, tap changer transformers, voltage regulators and capacitor banks are used to control the voltage of distribution network, but these equipments are not proper to track rapid changes. The proposed method in this paper which is based on distributed generations with smart inverters, presents a distributed and hierarchical management approach to maintain the bus voltages within an allowable range. At first, the distribution system is divided to multiple areas and then voltage profile is managed in an optimal way by determining reactive power set point of generators for each area in two levels: real-time primary level and coordinated secondary level. The results on 34-bus test feeder under different load level show that the proposed voltage management scheme has high accuracy and reasonable computation time which makes it efficient approach for smart distribution grid with renewable resources

Keywords: Distributed management, voltage regulation, intermittent distributed energy resource, distribution system partitioning, sensitivity matrix, real-time primary control, coordinated secondary control, optimal power flow.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۰۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۵

نام نویسنده مسئول: مجید نیری پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

به صورت توزیع شده قابل اجراست [۱۱]. به همین منظور در [۱۲] روشی برای افراز شبکه توزیع ارائه شده که تعداد نواحی افراز را برابر با تعداد واحدهای تولید پراکنده موجود در شبکه در نظر می‌گیرد که به دلیل افزایش تعداد نواحی با افزایش تعداد واحدهای تولید پراکنده، روش پیشنهادی منطقی نخواهد بود. همچنین نویسندگان در [۱۳] روشی موسوم به کنترل توزیع شده ولتاژ ارائه نموده‌اند که مبتنی بر منابع توان راکتیو موجود در مصرف‌کنندگان نهایی است و تأثیر منابع تولید پراکنده ولتاژ ثابت را نیز لحاظ کرده است. در این روش برای افراز شبکه از معیار ε برای تجزیه ماتریس ژاکوبین استفاده شده که تعیین مقدار معیار ε چالش جدی آن محسوب می‌شود. مسئله افراز شبکه به غیر از مسئله کنترل ولتاژ، از نقطه نظرات دیگری همچون خودترمیمی و بازگردانی شبکه [۱۴]، جلوگیری از رخدادهای متوالی [۱۵]، پایداری زاویه روتور [۱۶] و ... نیز در پژوهش‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله، روش جدیدی مبتنی بر معماری توزیع شده ارائه می‌شود که توان راکتیو تولیدی توسط مولدهای پراکنده را به منظور کنترل ولتاژ، به صورت سلسله‌مراتبی در دو سطح هماهنگ و بلادرنگ تنظیم می‌نماید. در این طرح با توجه به ماتریس حساسیت شبکه، ابتدا شبکه توزیع به نواحی مختلفی که هر یک دارای مرکز مدیریت منحصر به خود است افراز شده و سپس در هر ناحیه سطح هماهنگ ثانویه، بر اساس میانگین توان اکتیو تولیدی توسط مولدهای ناحیه در یک دقیقه گذشته، نقطه کار بهینه توان راکتیو آن‌ها را برای یک دقیقه پیش رو محاسبه و ارسال می‌کند. از طرف دیگر هر مولد مجهز به یک سطح بلادرنگ اولیه است که به منظور تثبیت ولتاژ در فواصل اجرای سطح ثانویه، با اصلاح توان راکتیو دریافتی از مرکز، نوسانات ولتاژ ناشی از تغییرات توان اکتیو مولد مربوطه را جبران می‌نماید. در واقع با توجه به اینکه از یک طرف، عمده تلفات سیستم قدرت مربوط به شبکه توزیع است لذا وجود یک سطح کنترلی ثانویه به منظور کنترل بهینه ولتاژ-توان راکتیو ضروری به نظر می‌رسد و از طرف دیگر وجود منابع تجدیدپذیر تصادفی در آن‌ها منجر به ایجاد نوسانات شدید در ولتاژ شبکه توزیع می‌گردد که وجود یک سطح اولیه به منظور محدود کردن بلادرنگ تغییرات لحظه‌ای ایجاد شده لازم است.

نوآوری روش پیشنهادی این مقاله در مقایسه با روش غیرمتمرکز، این است که به جای شکستن محاسبات مسئله به چندین زیرمسئله، شبکه توزیع را به چند ناحیه مستقل افراز کرده و برای هر ناحیه یک مرکز مدیریت محلی در نظر می‌گیرد که عملکرد آن مشابه مرکز کنترل متمرکز است اما محدوده جغرافیایی تحت نظارت و کنترل آن به جای کل سیستم تنها بخشی از آن بوده و تنها بهینه کردن اهداف محلی را در ناحیه تحت مدیریت خود دنبال می‌کند که در این صورت با از دست رفتن یک مرکز مدیریت محلی یا لینک‌های ارتباطی درون یک ناحیه، کنترل پروفیل ولتاژ کل سیستم دچار خدشه نمی‌شود. مزایای روش ابتکاری این مقاله در مقایسه با روش‌های مذکور عبارت‌اند

در شبکه‌های توزیع برخلاف شبکه‌های انتقال، دامنه ولتاژ باس‌ها، به طور محسوسی تحت تأثیر تغییرات توان اکتیو نیز قرار می‌گیرد. با گذار از شبکه‌های سنتی به شبکه‌های هوشمند، با توجه به حضور مؤثر تولیدات پراکنده تجدیدپذیر در آن‌ها، با تغییر مداوم و تصادفی وضعیت تولید، ولتاژ باس‌ها به طور قابل‌ملاحظه‌ای نوسان خواهد کرد. در شبکه‌های سنتی، مدیریت ولتاژ توسط تجهیزات مرسوم، مانند ترانسفورماتورهای تپ‌چنچری زیر بار، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ پله‌ای و بانک‌های خازنی ثابت و سوئیچ‌شونده، انجام می‌شود [۱] اما این تجهیزات، ذاتاً برای مدیریت تغییرات ایجاد شده توسط منابع پراکنده طراحی نشده‌اند و برای دنبال کردن تغییرات توان خروجی مولدهای تجدیدپذیر، عمر این تجهیزات به دلیل استهلاک قطعات مکانیکی در تعداد دفعات متعدد تغییر تپ و سوئیچ‌زنی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. از آنجاکه تولیدات پراکنده غالباً به واسطه یک مبدل الکترونیک قدرت به شبکه توزیع متصل می‌شوند یک راه‌حل مناسب برای حل این مشکل به کارگیری توان راکتیو این مولدها است که با کنترل مناسب آن، مسئله تنظیم ولتاژ در شبکه‌های هوشمند قابل مدیریت است [۲]. در مقاله [۳] یک ساختار دومرحله‌ای برای مسئله کنترل ولتاژ ارائه شده است که مقدار توان راکتیو مورد نیاز برای رفع تخطی ولتاژ در مرحله اول توسط منابع محلی و در مرحله دوم توسط منابع موجود در باس‌های مجاور، تأمین می‌گردد. همچنین در [۴] نیز روشی مشابه مرحله اول از مقاله قبل ارائه شده است که نقطه کار بعدی منابع با مراجعه به یک پایگاه داده محلی، تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه این روش‌ها صرفاً مبتنی بر اطلاعات محلی است لزوماً بهینه نخواهند بود. در برخی دیگر از مقالات مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو مبتنی بر معماری مدیریت متمرکز است که در آن به یک بهره‌بردار مرکزی برای جمع‌آوری اطلاعات از سراسر شبکه و هماهنگی عملیات سیستم لازم است [۵-۷]. هرچند در این روش‌ها مشکل عدم بهینگی روش‌های قبلی مرتفع شده اما با گسترش ابعاد سیستم و با توجه به تأخیرهای بستر مخابراتی شبکه‌های هوشمند، مسئله بهینه‌سازی یک مسئله بزرگ‌مقیاس و وقت‌گیر خواهد شد. برای حل این معضل در برخی از پژوهش‌ها و مطالعات ساختار غیرمتمرکز پیشنهاد شده [۸-۱۰] که در آن، محاسبات مسئله کنترل ولتاژ در چند مرکز مجزا به طور موازی انجام شده و یک مرکز مدیریت مرکزی نیز برای از بین بردن هرگونه عدم تطابق بین این مراکز فعالیت می‌کند. اگرچه در این روش سرعت پاسخ‌دهی در مقایسه با روش قبلی بالاتر است اما در صورت از دست رفتن هر یک از این مراکز عملکرد سیستم مدیریت دچار خدشه می‌شود.

برخلاف فرکانس سیستم قدرت، ولتاژ سیستم، دارای ویژگی محلی بودن است. بنابراین پروفیل ولتاژ یک ناحیه به طور عمده می‌تواند از طریق تنظیم منابع موجود در آن ناحیه کنترل شود. با توجه به این ویژگی از سیستم قدرت، بهینه‌سازی و کنترل ولتاژ سیستم نیز،

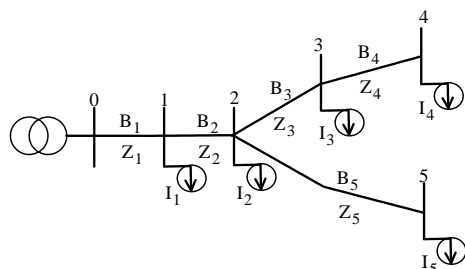
$$[B] = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= [BIBC][I]$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ V_0 \\ V_0 \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & 0 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 & 0 \\ Z_1 & Z_2 & 0 & 0 & Z_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = [BCBV][B] \quad (3)$$

با توجه به دو دسته معادله بالا، ارتباط بین جریان و ولتاژ باس‌ها به وسیله ماتریسی به نام DLF که از حاصل ضرب این دو ماتریس به دست می‌آید به صورت رابطه (۴) است.

$$[V_0] - [V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (4)$$



شکل ۱: یک سیستم توزیع ۵ باسه نوعی

ماتریس $[DLF]$ تنها یک بار ساخته می‌شود و در صورتی که ساختار توپولوژیکی شبکه ثابت بماند تغییری نخواهد کرد و در محاسبات پخش بار مستقیم مورد استفاده قرار خواهد گرفت. این ماتریس در واقع بیان‌کننده حساسیت تغییرات ولتاژ باس‌ها به تغییرات جریان باس‌ها است. واضح است که تغییر در توان تولیدی یا مصرفی باس‌ها منجر به تغییر جریان مصرفی در این باس‌ها و تغییر ولتاژ باس‌های سیستم می‌شود. ماتریس حساسیت $[S^{vp}]$ و $[S^{vq}]$ که مدنظر است، باید اطلاعاتی درباره تأثیر تغییر تولید یا مصرف توان اکتیو و راکتیو مصرفی بر روی ولتاژ باس‌های سیستم فراهم نماید. در شبکه‌های توزیع، افت ولتاژ بین دو باس مجاور به‌طور تقریبی بر اساس رابطه پریونیتی (۵) به دست می‌آید [۱۸].

$$V_i - V_j = R_j \cdot P_j + X_j \cdot Q_j \quad (5)$$

که V_i و V_j به ترتیب دامنه ولتاژ باس‌های مجاور i و j و R_j ، X_j ، P_j و Q_j ، به ترتیب مقاومت اهمی خط، راکتانس خط، توان اکتیو و توان راکتیو عبوری از خط بین این دو باس است. با توجه به اینکه در کنترل ولتاژ، زاویه ولتاژ باس‌ها اهمیتی نداشته و هدف سیستم مدیریت ولتاژ، حفظ دامنه ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز است لذا بسط رابطه (۵) برای تمامی باس‌ها به روابط ماتریسی (۶) منتج خواهد شد.

از: (۱) مقرون به صرفه بودن مدل پیشنهادی به دلیل حذف لینک‌های ارتباطی بین مراکز در مقایسه با روش غیرمتمرکز (۲) بار محاسباتی کمتر به دلیل کاهش ابعاد مسئله در مقایسه با روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز (۳) عدم نیاز به اطلاعات کل شبکه و کافی بودن اطلاعات ناحیه‌ای برای کنترل مولدها. همچنین با توجه به ساختار سلسله‌مراتبی پیشنهادی، نوآوری دیگر این مقاله، ارائه یک روش کنترلی جدید برای سطح بلادرنگ اولیه است که نوسانات لحظه‌ای ولتاژ در اثر تغییرات تصادفی توان اکتیو تولیدی مولدها را جبران می‌کند.

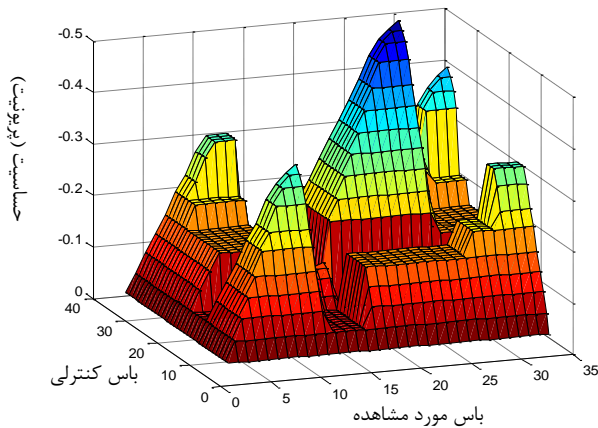
باقی‌مانده این مقاله به صورتی که در ادامه می‌آید سازمان یافته: در قسمت دوم نحوه افزایش شبکه توزیع تشریح شده است. قسمت سوم به بیان دیدگاه مدیریتی شامل سطح بهینه هماهنگ ثانویه و سطح بلادرنگ اولیه پرداخته است. قسمت چهارم سیستم مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی را مفصلاً تشریح کرده است. در قسمت پنجم نتایج شبیه‌سازی نمونه مطالعاتی، مورد بررسی واقع شده و نهایتاً مقاله با نتیجه‌گیری خاتمه یافته است.

۲- مدل‌سازی مدیریت توزیع شده ولتاژ از دیدگاه مکانی

در مسئله مدیریت ولتاژ، حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز مدنظر است. در این قسمت یک شبکه شعاعی نوعی که به جز باس مرجع دارای N باس است، با استفاده از ماتریس حساسیت ولتاژ باس‌ها نسبت به تغییرات توان اکتیو و راکتیو، به نواحی مختلف افزایش می‌گردد. بردار تغییرات ولتاژ در باس‌ها بر حسب تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی آن‌ها به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$[\Delta V] = [S^{vp}][\Delta p] + [S^{vq}][\Delta q] \quad (1)$$

با توجه به شکل ۱ و با فرض اینکه باس صفرم، باس اسلک باشد، بردارهای $[\Delta V]$ ، $[\Delta p]$ و $[\Delta q]$ که به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات دامنه ولتاژ، توان اکتیو مصرفی و توان راکتیو مصرفی باس‌ها هستند، در حالت کلی همگی دارای ابعاد $N \times 1$ هستند. همچنین ماتریس‌های $[S^{vp}]$ و $[S^{vq}]$ ، به ترتیب ماتریس‌های حساسیت تغییر ولتاژ باس‌ها به تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی آن‌ها بوده و دارای ابعاد $N \times N$ هستند. برای محاسبه این دو ماتریس برای یک شبکه توزیع شعاعی از دیدگاه پخش بار مستقیم که در [۱۷] ارائه شده است می‌توان ایده گرفت. این دیدگاه مبتنی بر توسعه دو ماتریس به نام‌های $[BIBC]$ و $[BCBV]$ است که به ترتیب بیانگر ارتباط بین جریان مصرفی باس‌ها-جریان خطوط و جریان خطوط-ولتاژ باس‌هاست که بیان این ماتریس‌ها برای سیستم توزیع ۵ باسه شکل ۱ عبارت است از:



شکل ۲: رسم سه‌بعدی ماتریس $[S^{vq}]$

رسم سه‌بعدی ماتریس $[S^{vp}]$ نیز مشابه با $[S^{vq}]$ است به این معنی که نسبت درایه‌های مشابه در دو ماتریس مقدار ثابتی است. لذا برای افراز شبکه به نواحی مختلف با استفاده از ماتریس‌های حساسیت، به‌کارگیری یکی از این ماتریس‌ها به‌تنهایی کافی است. در روش افزاری که در ادامه می‌آید هدف این است که بتوان محدوده هر یک از نواحی را به‌نحوی تعیین کرد که باس‌های هر ناحیه بیش‌ترین همبستگی را از نظر حساسیت به یکدیگر داشته باشند.

با محاسبه طیف $[S^{vq}]$ می‌توان گراف شبکه را به نواحی مختلف افراز نمود. منظور از طیف یک گراف، لیست مقادیر ویژه متناظر با یکی از ماتریس‌های مرتبط با گراف است. با توجه به این‌که یک شبکه توزیع در واقع یک گراف درختی است که از مجموعه‌ای از شاخه‌ها و گره‌ها تشکیل شده است برای افراز آن با هدف مدیریت ولتاژ از طیف ماتریس حساسیت مرتبط با گراف شبکه می‌توان استفاده نمود. با مرتب کردن مقادیر ویژه ماتریس حساسیت از بزرگ به کوچک، بردار ویژه متناظر با دومین بزرگ‌ترین مقدار ویژه از لحاظ اندازه، خاصیتی دارد که گراف شبکه را به دو ناحیه بسته مجزا افراز می‌کند. باس‌هایی که مقدار متناظر با آن‌ها در این بردار ویژه، مثبت است در یک ناحیه واقع می‌شوند و مابقی باس‌ها که مقدار متناظر آن‌ها در این بردار ویژه منفی است در ناحیه دیگر قرار می‌گیرد. پس از افراز شبکه به دو ناحیه، با کنار گذاشتن ناحیه دارای تعداد باس کم‌تر، مجدداً همین کار را برای مابقی باس‌های شبکه انجام می‌دهیم و این ناحیه را به دو ناحیه دیگر افراز می‌کنیم. وابسته به ابعاد شبکه و تعداد باس‌های آن، این فرایند برای بزرگ‌ترین ناحیه باقی‌مانده تکرار می‌شود تا به تعداد ناحیه مطلوب دست یابیم. تعداد بهینه نواحی را می‌توان از حل یک مسئله بهینه‌سازی که هزینه بالای یک مرکز محاسباتی متمرکز با توان بالا را توأم با هزینه کم‌تر مراکز توزیع شده با توان محاسباتی کم‌تر در نظر می‌گیرد به‌دست آورد. در ادامه مدل‌سازی ریاضی مدیریت ولتاژ در هر یک از این نواحی را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ V_0 \\ V_0 \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & R_3 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_1 & X_2 & 0 & 0 & 0 \\ X_1 & X_2 & X_3 & 0 & 0 \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & 0 \\ X_1 & X_2 & 0 & 0 & X_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

دو ماتریس مربعی نشان‌داده‌شده در این رابطه، به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی همان ماتریس $[BCBV]$ هستند. با توجه به اینکه تغییرات ولتاژ باس‌ها برحسب تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی در باس‌ها موردنیاز است لذا می‌توان بر اساس رابطه (۷) با جایگذاری توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط برحسب توان اکتیو و راکتیو مصرفی در باس‌ها توسط ماتریس $[BIBC]$ ، رابطه (۶) را به‌صورت رابطه (۸) بازنویسی نمود که در این روابط p_i و q_i به ترتیب توان اکتیو و توان راکتیو خالص مصرفی در باس i است.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ V_0 \\ V_0 \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & R_3 & 0 & 0 \\ R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 \\ R_1 & R_2 & 0 & 0 & R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_1 & X_2 & 0 & 0 & 0 \\ X_1 & X_2 & X_3 & 0 & 0 \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & 0 \\ X_1 & X_2 & 0 & 0 & X_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= -[S^{vp}] \cdot [p] - [S^{vq}] \cdot [q]$$

بنابراین ماتریس‌های حساسیت ولتاژ باس‌ها نسبت به تغییرات توان اکتیو و راکتیو باس‌ها به‌صورت روابط (۹) است.

$$\begin{aligned} [S^{vp}] &= -\text{real}([BCBV] \cdot [BIBC]) \\ &= -\text{real}([DLF]) \\ [S^{vq}] &= -\text{imag}([BCBV] \cdot [BIBC]) \\ &= -\text{imag}([DLF]) \end{aligned} \quad (9)$$

شکل ۲ ماتریس $[S^{vq}]$ را برای شبکه تست ۳۴ باس [۱۹] به‌منظور افراز شبکه به نواحی مدیریتی توزیع‌شده نشان می‌دهد.

۳- مدل‌سازی ریاضی مسئله مدیریت توزیع شده ولتاژ از دیدگاه زمانی

می‌شود. به دلیل پیچیدگی مسئله پخش بار بهینه روش‌های مختلفی از جمله روش‌های کلاسیک برنامه‌ریزی ریاضی و روش‌های هوشمند برای حل آن ارائه شده است که اگرچه تقریباً تمامی آن‌ها قابل‌اعمال به این مسئله هستند اما اغلب روش‌های هوشمند به دلیل کند بودن قابلیت استفاده در کنترل‌های نزدیک به زمان واقعی را ندارند [۲۰]. در اینجا ابتدا مدل‌سازی این سطح به‌صورت متمرکز ارائه و سپس مدل‌سازی آن به‌صورت توزیع شده برای سیستم افزاشده بیان می‌شود. با توجه به پسر-پیشرو بودن روش پخش بار مذکور، تمامی مولدهای پراکنده و در نتیجه باس‌های متناظر آن‌ها به‌صورت باس PQ در نظر گرفته می‌شوند، لذا برای هر یک از باس‌های شبکه می‌توان نوشت:

$$s_i = p_i + jq_i = (p_i^L - p_i^G) + j(q_i^L - q_i^G) \quad (10)$$

در این رابطه s_i ، p_i و q_i به ترتیب توان مختلط، توان اکتیو و راکتیو خالص مصرفی در باس i ، p_i^L و q_i^L به ترتیب مجموع توان اکتیو و راکتیو بارهای موجود در این باس و p_i^G و q_i^G به ترتیب مجموع توان اکتیو و راکتیو تولیدی در آن است. فرض می‌شود که کلیه مولدهای پراکنده، میانگین مقدار توان اکتیو تولیدی خود در یک دقیقه گذشته را به مرکز مدیریت ارسال می‌نماید و این مقدار انتظاری به‌عنوان مرجع مولد در دوره بعد ($p_i^{G,ref}$) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مقادیر $p_i^{G,ref}$ مربوط به مولدهای مختلف و مقادیر توان اکتیو و راکتیو مصرفی بارها، تابعی که در مرکز مدیریت باید کمینه شود، تلفات ایجادشده در کلیه خطوط شبکه است.

$$f = \sum_{l=1}^N R_l \cdot |B_l|^2 \quad (11)$$

در این رابطه R_l و B_l ، به ترتیب مقاومت اهمی و جریان عبوری از خط l و f تابع تلفات شبکه است. همچنین N بیانگر تعداد خطوط یا تعداد کل باس‌های شبکه به‌غیر از باس اسلک است. این تابع هدف باید به نحوی کمینه شود که قیود معادله‌ای پخش بار رعایت گردد.

$$\text{real}([V] - [V_0] + [DLF][\frac{P - jq}{V^*}]) = 0 \quad (12)$$

$$\text{imag}([V] - [V_0] + [DLF][\frac{P - jq}{V^*}]) = 0$$

در این مسئله، مقادیر q_i^G متغیرهای کنترلی و اندازه و زاویه ولتاژها متغیرهای حالت هستند که باید تعیین شوند. همچنین قیود نامعادله‌ای حاکم بر مسئله نیز عبارت‌اند از:

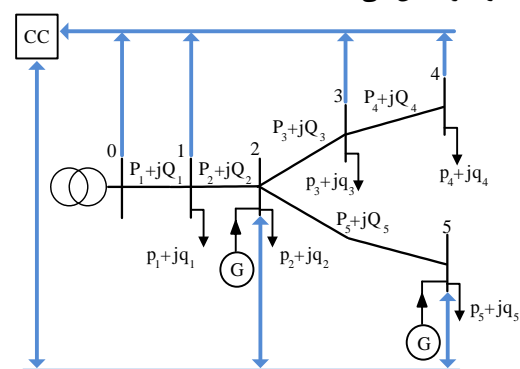
$$\begin{aligned} B_l^{\min} &\leq B_l \leq B_l^{\max} \quad l = 1, \dots, N \\ 0.8q_i^{G,\min} &\leq q_i^{G,ref} \leq 0.8q_i^{G,\max} \quad i = 1, \dots, N \\ V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 0, \dots, N \end{aligned} \quad (13)$$

برای تخصیص بخشی از ظرفیت آزاد توان راکتیو مولدها به سطح اولیه، تنها درصد معینی از این ظرفیت آزاد به سطح ثانویه تخصیص داده می‌شود و لذا ۸۰٪ از مقدار کران بالا و پایین آن‌ها به‌عنوان

پس از افزاش شبکه به نواحی مختلف، در هر ناحیه دو سطح از کنترل اعمال می‌شود که دیدگاه سلسله‌مراتبی موردنظر را شکل می‌دهند. سلسله‌مراتب به نوع خاصی از هماهنگی میان مرکز بالا (ثانویه) و کنترل سطح پایین‌تر (اولیه) به‌منظور بهینه‌سازی و تثبیت ولتاژ اشاره دارد. در واقع از یک طرف در سطح هماهنگ ثانویه یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی به‌صورت دوره‌ای هر یک دقیقه یک‌بار اجرا می‌شود و نقطه کار توان راکتیو مولدهای درون ناحیه را مشخص و به آن‌ها ارسال می‌کند که به بسترهای مخابراتی شبکه‌های هوشمند برای ارتباط اطلاعاتی باس‌های درون ناحیه به مرکز مدیریت ناحیه‌ای نیازمند است و از طرف دیگر در سطح اولیه بلادرنگ محلی به‌منظور تثبیت ولتاژ در فواصل بین اجرای بهینه‌سازی ثانویه و جبران نوسان لحظه‌ای ولتاژ باس‌ها در اثر تغییرات تصادفی توان اکتیو تولیدی، اصلاحاتی در نقطه کار توان راکتیو ارسالی از سطح ثانویه اعمال می‌گردد. در ادامه ابتدا به مدل‌سازی سطح ثانویه و پس از آن، به مدل‌سازی سطح اولیه می‌پردازیم.

۳-۱- مدل‌سازی سطح بهینه‌سازی هماهنگ ثانویه

در کنترل ولتاژ ثانویه، توان راکتیو تزریقی به خطوط توسط مولدهای پراکنده به نحو بهینه‌ای توسط مرکز کنترل هماهنگ می‌شود. در این حالت باس‌های فاقد تولید تولید پراکنده، تنها ارسال‌کننده توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی خود به مرکز کنترل هستند و باس‌های دارای مولد تولید پراکنده در کنار این داده‌ها، میزان توان اکتیو تولیدی توسط مولد تولید پراکنده را نیز ارسال کرده و علاوه بر ارسال داده، نقطه کار تنظیم توان راکتیو خود را نیز از این مرکز دریافت می‌کنند. البته اگر بار باس‌های فاقد مولد پراکنده نیز هوشمند باشند این باس‌ها نیز دارای ارتباط دوطرفه با مرکز کنترل خواهند بود. شکل ۳ طرح کلی سطح کنترل ثانویه را نشان می‌دهد.



شکل ۳: طرح کلی شبکه هوشمند با مدیریت هماهنگ

در واقع مسئله‌ای که باید در مرکز کنترل به‌صورت بهینه حل شود یک مسئله پخش بار بهینه است که در آن به‌منظور کمینه کردن تلفات شبکه، از قابلیت تولید توان راکتیو منابع تولید پراکنده استفاده

توان راکتیو مولدها تنها متغیرهای کنترلی مسئله هستند و مقادیر توان اکتیو، معین فرض می‌شوند لذا می‌توان به‌طور خلاصه‌تر نوشت:

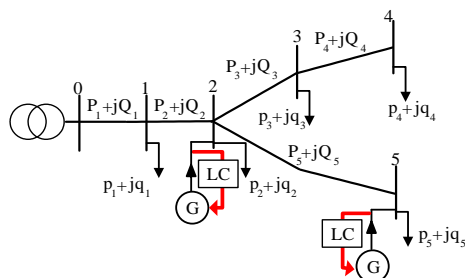
$$\Delta V_{m,0} = \Delta V_{k_m} = S_{k_m, k_m}^{vq} \cdot (Q^m - \overline{Q}^m) \quad (17)$$

بنابراین از لحاظ تبادل اطلاعات، تفاوت روش توزیع شده با متمرکز این است که علاوه بر داده‌های قبلی که در روش متمرکز به آن اشاره شد، ولتاژ آخرین باس ناحیه بالادستی و میانگین توان مصرفی ناحیه موردنظر نیز اندازه‌گیری و به مرکز مدیریت آن ارسال می‌گردد. همچنین در نقاط اتصال یک ناحیه به نواحی پایین دست، توان ناحیه پایین دست نیز به مرکز مدیریت ناحیه‌ای ارسال می‌گردد. مخابراتی موردنیاز برای اجرای این روش می‌تواند با استفاده از خطوط توزیع و با تکنیک PLC (Power Line Carrier) پیاده‌سازی گردد. همچنین در یک روش دیگر و با توجه به ظهور شبکه‌های انتقال داده نسل ۳ و ۴ می‌توان با مجهز نمودن هر یک از باس‌ها به این تکنولوژی، ارتباط آن‌ها را برای تبادل اطلاعات با مرکز هر ناحیه به‌صورت بی‌سیم و با استفاده از بستر مخابراتی شبکه‌های تلفن همراه برقرار نمود.

در هر دو روش متمرکز و توزیع شده در فواصل زمانی بین هر دو دوره، امکان نوسانات شدید توان اکتیو واحدهای تولید پراکنده و در نتیجه نوسانات ولتاژ باس‌ها وجود دارد. برای حذف تأثیرات این نوسانات، در مدل سلسله‌مراتبی پیشنهادی، سطح دیگری از کنترل پیش‌بینی شده است که بتواند به‌صورت بلادرنگ در جهت جبران تغییرات برآید که در ادامه به مدل‌سازی این سطح پرداخته می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی سطح بلادرنگ اولیه با استفاده از ماتریس‌های حساسیت

در مقایسه با سطح هماهنگ، در سطح بلادرنگ، برای جبران نوسانات لحظه‌ای توان اکتیو تولیدی و جلوگیری از تأثیر آن بر ولتاژ باس‌ها، هر ژنراتور توان راکتیو تولیدی خود را تنها بر مبنای اندازه‌گیری‌های محلی اصلاح می‌کند. شکل ۴ طرح کلی این سطح را نشان می‌دهد.



شکل ۴: طرح کلی شبکه هوشمند با کنترل‌های بلادرنگ محلی

بنابراین در مدل سلسله‌مراتبی همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود یک مولد برای کنترل توان راکتیو خود از دو سطح فرمان می‌گیرد. از یک طرف، مقدار نقطه کار بهینه توان راکتیو را از مرکز مدیریت هماهنگ دریافت می‌کند که در قسمت قبل به آن پرداخته شد و از طرف دیگر برای جبران نوسانات تصادفی توان اکتیو مولد، به‌صورت محلی تغییراتی در نقطه کار توان راکتیو خود اعمال می‌کند.

محدوده توان راکتیو در این سطح انتخاب می‌شود و باقی‌مانده آن برای سطح اولیه در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم روش توزیع شده مشابه روش متمرکز است اما در روش توزیع شده، این الگوریتم در هر ناحیه به‌صورت جداگانه و مستقل اجرا می‌شود درحالی‌که در روش متمرکز کل شبکه به‌عنوان یک ناحیه تلقی می‌شود. بنابراین در روش توزیع شده تفاوتی که وجود دارد این است که نقاط کار توان راکتیو مولدهای درون ناحیه به نحوی تعیین می‌شود که تلفات مربوط به همان ناحیه به‌همراه قیود مربوطه بهینه شود. در این حالت میانگین توان اکتیو و راکتیو تحویلی به نواحی پایین دست متصل به این ناحیه در یک دقیقه گذشته نیز به بار مصرفی باس‌های متصل‌کننده ناحیه به این نواحی اضافه شده و به مرکز ناحیه‌ای ارسال می‌شود. بنابراین با فرض تعداد M ناحیه، برای ناحیه مفروض m فرمول‌بندی مسئله عبارت است از:

$$\begin{aligned} \min \quad & f_m = \sum_{l=1}^{N_m} R_{m,l} \cdot |B_{m,l}|^2 \\ \text{real}([V]_m - [V_{m,0}] + [DLF]_m \left[\frac{P-jq}{V^*} \right]_m) &= 0 \\ \text{imag}([V]_m - [V_{m,0}] + [DLF]_m \left[\frac{P-jq}{V^*} \right]_m) &= 0 \quad (14) \\ B_{m,l}^{\min} \leq B_{m,l} \leq B_{m,l}^{\max} \quad & l = 1, \dots, N_m \\ V_{m,i}^{\min} \leq V_{m,i} \leq V_{m,i}^{\max} \quad & i = 1, \dots, N_m \\ 0.8q_{m,i}^{G, \min} \leq q_{m,i}^{G, \text{ref}} \leq 0.8q_{m,i}^{G, \max} \quad & j = 1, \dots, N_m \\ V_{m,i}^{\min} \leq V_{m,0} + \Delta V_{m,0} \leq V_{m,i}^{\max} \end{aligned}$$

که در این رابطه $V_{m,0}$ بیانگر دامنه ولتاژ آخرین باس ناحیه بالادست است که ناحیه m به آن متصل شده و در هر دوره به مرکز مدیریت ناحیه m ارسال می‌شود. با فرض اینکه این باس در شبکه افزاینده، دارای شماره فرضی k_m است، با توجه به تأثیرگذاری تغییرات توان در ناحیه m بر ولتاژ این باس، لذا در فرایند بهینه‌سازی باید شرط زیر برای آن برقرار باشد:

$$V_{k_m}^{\min} \leq V_{k_m} + \Delta V_{k_m} \leq V_{k_m}^{\max} \quad (15)$$

به‌طوری‌که:

$$\begin{aligned} \Delta V_{m,0} = \Delta V_{k_m} \\ = S_{k_m, k_m}^{vp} \cdot (P^m - \overline{P}^m) + S_{k_m, k_m}^{vq} \cdot (Q^m - \overline{Q}^m) \end{aligned} \quad (16)$$

که در این رابطه، \overline{P}^m و \overline{Q}^m بیانگر میانگین توان اکتیو و راکتیو مصرفی ناحیه m در یک دقیقه گذشته است که مبنای محاسبات ناحیه بالادست قرار گرفته است. همچنین P^m و Q^m نیز بیانگر توان اکتیو و راکتیو مصرفی ناحیه m است که در طول فرایند بهینه‌سازی در این ناحیه، مبنای محاسبه تغییر ولتاژ قرار می‌گیرد و در واقع P^m و Q^m بیانگر مجموع توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط یا خطوط واردشده از باس k_m به ناحیه m هستند. با توجه به اینکه در فرایند بهینه‌سازی،

که در این قانون، $[A]$ یک ماتریس $G \times G$ است و مسئله به یافتن این ماتریس تبدیل می‌شود به نحوی که تغییرات ولتاژ باس‌ها کمینه شود. لذا با جایگذاری قانون کنترلی در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$[\Delta V] = ([S^{vp}] + [S^{vq}][A])[\Delta p] \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) برای حذف اثرات تغییر توان اکتیو بر روی ولتاژ، کافی است که رابطه (۲۲) برقرار باشد.

$$[S^{vp}] + [S^{vq}][A] = 0 \Rightarrow [A] = -[S^{vq}]^{-1}[S^{vp}] \quad (22)$$

در این صورت به شرطی که توان راکتیو تزریقی هیچ مولدی به کران خود نرسیده باشد، نوسانات ولتاژ در اثر تغییرات توان اکتیو صفر خواهد شد اما در حالت کلی، ماتریس $[A]$ یک ماتریس قطری نیست، لذا برای صفر شدن تغییرات ولتاژ در هر یک از باس‌های دارای مولد، لازم است که از تغییرات توان اکتیو در کلیه باس‌ها مطلع بود. بنابراین اگرچه در این حالت، تغییرات ولتاژ به‌طور کلی حذف می‌شود اما به‌دلیل محلی نبودن سیگنال‌های کنترلی، این قانون برای سطح بلادرنگ قابل قبول نیست.

۳-۲-۲- حالت دوم ($[\Delta V]$ ، $N \times 1$ و $[A]$ قطری باشد)

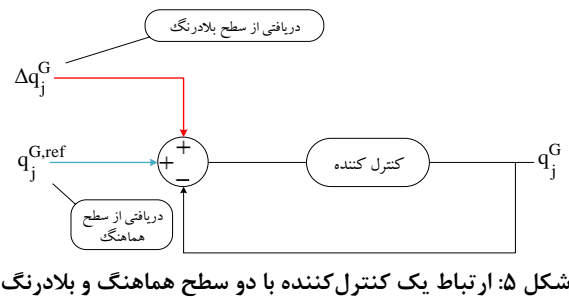
در این حالت، برخلاف حالت اول فرض می‌شود که تغییرات ولتاژ تمامی باس‌ها لحاظ شود و لذا $[\Delta V]$ ، یک بردار $N \times 1$ بوده و ماتریس‌های $[S^{vp}]$ و $[S^{vq}]$ ، $N \times G$ باشند و همچنین ماتریس مربعی $[A]$ نیز قطری باشد. لذا تغییرات توان راکتیو در باس‌های دارای مولد تولید پراکنده به‌صورت محلی و بر اساس تغییرات توان اکتیو مصرفی در آن باس کنترل خواهد شد. بنابراین مسئله می‌تواند به‌صورت رابطه (۲۳) بیان شود.

$$\min [\Delta V] = ([S^{vp}] + [S^{vq}][A])[\Delta p] \quad (23)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{n1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{n2} & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & a_{nG} \end{bmatrix}$$

هدف در این مسئله، یافتن درایه‌های a_{n1} تا a_{nG} است که $n1$ ، $n2$ ، ... و nG نشان‌دهنده شماره باس‌های دارای مولد پراکنده است. بر این اساس ابتدا رابطه (۲۳) را به‌صورت رابطه (۲۴) بسط داده، سپس برای حذف تأثیر علامت عناصر بردار $[\Delta V]$ ، تابع هدف رابطه (۲۵) را برای کمینه‌سازی انحراف ولتاژ در نظر می‌گیریم که با حل آن بر اساس رابطه (۲۶) یافتن ضرایب a_{n1} تا a_{nG} به حل دستگاه معادلات جبری خطی (۲۷) منتهی می‌شود.

$$[\Delta V] = \begin{bmatrix} (s_{1,n1}^{vp} + s_{1,n1}^{vq}a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{1,n2}^{vp} + s_{1,n2}^{vq}a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{1,nG}^{vp} + s_{1,nG}^{vq}a_{nG})\Delta p_{nG} \\ (s_{2,n1}^{vp} + s_{2,n1}^{vq}a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{2,n2}^{vp} + s_{2,n2}^{vq}a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{2,nG}^{vp} + s_{2,nG}^{vq}a_{nG})\Delta p_{nG} \\ \vdots \\ (s_{N,n1}^{vp} + s_{N,n1}^{vq}a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{N,n2}^{vp} + s_{N,n2}^{vq}a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{N,nG}^{vp} + s_{N,nG}^{vq}a_{nG})\Delta p_{nG} \end{bmatrix} \quad (24)$$



شکل ۵: ارتباط یک کنترل‌کننده با دو سطح هماهنگ و بلادرنگ

بسط رابطه ماتریسی (۱) برای باس i عبارت است از:

$$\Delta V_i = \sum_{j=1}^N S_{i,j}^{vp} \cdot \Delta p_j + \sum_{j=1}^N S_{i,j}^{vq} \cdot \Delta q_j, \quad i = 1, \dots, N \quad (18)$$

در این رابطه ΔV_i نشان‌دهنده تغییرات ولتاژ باس i در ازای تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی Δp_j و Δq_j در باس j بوده و $S_{i,j}^{vp}$ و $S_{i,j}^{vq}$ به ترتیب حساسیت ولتاژ باس i به تغییرات توان اکتیو و راکتیو مصرفی باس j می‌باشند. با فرض ثابت بودن بار مصرفی در فواصل یک دقیقه‌ای اجرای سطح ثانویه، Δp_j برابر است با تفاضل توان اکتیو تولیدی لحظه‌ای مولد پراکنده نصب‌شده در باس j و مقدار $p_j^{G,ref}$ ارسالی از سطح هماهنگ ثانویه در دوره قبل:

$$\Delta p_j = p_j^G - p_j^{G,ref} \quad (19)$$

بنا بر رابطه (۱۸) و با توجه به تغییرات توان اکتیو حول مقدار مرجع یعنی Δp_j ، برای جبران نوسانات ولتاژ، مقدار Δq_j نیز به‌صورت بلادرنگ باید تغییر کند. برای تعیین میزان اصلاح توان راکتیو برحسب تغییرات توان اکتیو هر مولد، شبکه توزیع شعاعی نوعی، دارای N باس که تعداد G باس از آن مجهز به مولد تولید پراکنده است را در نظر می‌گیریم.

۳-۲-۱- حالت اول ($[\Delta V]$ ، $G \times 1$ باشد)

با حذف تغییرات ولتاژ باس‌های دارای مولد تولید پراکنده، ولتاژ باس‌های فاقد مولد نیز تثبیت خواهد شد لذا فرض می‌کنیم که تنها تغییرات ولتاژ باس‌های دارای مولد تولید پراکنده لحاظ شود و لذا ابعاد بردار $[\Delta V]$ ، $G \times 1$ و ابعاد ماتریس‌های $[S^{vp}]$ و $[S^{vq}]$ ، $G \times G$ باشد. با توجه به این‌که هدف سطح بلادرنگ، تثبیت ولتاژ و حداقل کردن نوسانات ولتاژ $[\Delta V]$ ، به‌وسیله اصلاح توان راکتیو تولیدی برحسب تغییرات توان اکتیو تولیدی است لذا قانون کلی کنترل تغییرات توان راکتیو برحسب توان اکتیو برای G مولد را به‌صورت رابطه (۲۰) در نظر می‌گیریم.

$$[\Delta q] = [A][\Delta p] \quad (20)$$

$$f(a_{n1}, \dots, a_{ng}) = \Delta V_1^2 + \dots + \Delta V_n^2 = [\Delta V]^T [\Delta V] = [\Delta p]^T ([S^{vp}] + [S^{vq}][A])^T ([S^{vp}] + [S^{vq}][A])[\Delta p]$$

$$\Rightarrow f(a_{n1}, \dots, a_{ng}) = [(s_{1,n1}^{vp} + s_{1,n1}^{vq} a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{1,n2}^{vp} + s_{1,n2}^{vq} a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{1,nG}^{vp} + s_{1,nG}^{vq} a_{nG})\Delta p_{nG}]^2 +$$

$$[(s_{2,n1}^{vp} + s_{2,n1}^{vq} a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{2,n2}^{vp} + s_{2,n2}^{vq} a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{2,nG}^{vp} + s_{2,nG}^{vq} a_{nG})\Delta p_{nG}]^2 +$$

$$\dots +$$

$$[(s_{N,n1}^{vp} + s_{N,n1}^{vq} a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{N,n2}^{vp} + s_{N,n2}^{vq} a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{N,nG}^{vp} + s_{N,nG}^{vq} a_{nG})\Delta p_{nG}]^2 \quad (25)$$

$$\frac{\partial f}{\partial a_i} = 2 \cdot s_{i,i}^{vq} \cdot \Delta p_i [(s_{1,n1}^{vp} + s_{1,n1}^{vq} a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{1,n2}^{vp} + s_{1,n2}^{vq} a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{1,nG}^{vp} + s_{1,nG}^{vq} a_{nG})\Delta p_{nG}] +$$

$$2 \cdot s_{2,i}^{vq} \cdot \Delta p_i [(s_{2,n1}^{vp} + s_{2,n1}^{vq} a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{2,n2}^{vp} + s_{2,n2}^{vq} a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{2,nG}^{vp} + s_{2,nG}^{vq} a_{nG})\Delta p_{nG}] +$$

$$\dots +$$

$$2 \cdot s_{N,i}^{vq} \cdot \Delta p_i [(s_{N,n1}^{vp} + s_{N,n1}^{vq} a_{n1})\Delta p_{n1} + (s_{N,n2}^{vp} + s_{N,n2}^{vq} a_{n2})\Delta p_{n2} + \dots + (s_{N,nG}^{vp} + s_{N,nG}^{vq} a_{nG})\Delta p_{nG}] = 0 \quad (26)$$

$\forall i = n1, \dots, nG$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_{nG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_{nG} \end{bmatrix} \quad E_{i,j} = \Delta p_j \sum_{r=1}^N s_{r,i}^{vq} \cdot s_{r,j}^{vp}$$

$$d_i = - \sum_{r=1}^N s_{r,i}^{vq} \cdot \sum_{s=1}^{nG} s_{r,s}^{vp} \cdot \Delta p_s \quad (27)$$

فرضیات حالت دوم فرض می‌کنیم که نسبت R/X برای تمامی خطوط ثابت بوده و برای مواردی هم که این فرض برقرار نیست در پایان راهکار دیگری پیشنهاد خواهیم نمود.

در رابطه (۲۴) با صفر شدن تمامی ضرایب Δp_i ها برای باس i می‌توان اطمینان حاصل کرد که تغییرات ولتاژ این باس از بین می‌رود و ولتاژ آن تثبیت خواهد شد. برای صفر شدن نوسانات ولتاژ باس i لازم است رابطه (۲۹) برقرار باشد.

$$a_{n1} = -\frac{s_{i,n1}^{vp}}{s_{i,n1}^{vq}}, a_{n2} = -\frac{s_{i,n2}^{vp}}{s_{i,n2}^{vq}}, \dots, a_{nG} = -\frac{s_{i,nG}^{vp}}{s_{i,nG}^{vq}} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (29)$$

بنابراین مشاهده می‌شود که برای تثبیت ولتاژ هر یک از باس‌ها مقادیر مختلفی برای a_{n1} تا a_{nG} به دست می‌آید که تابع حساسیت‌ها است. با توجه به این فرض که نسبت مقاومت به راکتانس برای تمامی خطوط، یکسان است لذا با در نظر گرفتن این نسبت به صورت $R/X = \eta$ ، رابطه (۲۹) را برای تثبیت ولتاژ باس i به صورت رابطه (۳۰) می‌توان بازنویسی کرد.

$$a_{n1} = -\frac{s_{i,n1}^{vp}}{s_{i,n1}^{vq}} = \frac{R_1 + \dots + R_{i1}}{X_1 + \dots + X_{i1}} = \frac{\eta X_1 + \dots + \eta X_{i1}}{X_1 + \dots + X_{i1}} = \eta \frac{X_1 + \dots + X_{i1}}{X_1 + \dots + X_{i1}} = \eta$$

$$\vdots$$

$$a_{ng} = -\frac{s_{i,ng}^{vp}}{s_{i,ng}^{vq}} = \frac{R_1 + \dots + R_{ig}}{X_1 + \dots + X_{ig}} = \frac{\eta X_1 + \dots + \eta X_{ig}}{X_1 + \dots + X_{ig}} = \eta \frac{X_1 + \dots + X_{ig}}{X_1 + \dots + X_{ig}} = \eta \quad (30)$$

$$\vdots$$

$$a_{nG} = -\frac{s_{i,nG}^{vp}}{s_{i,nG}^{vq}} = \frac{R_1 + \dots + R_{iG}}{X_1 + \dots + X_{iG}} = \frac{\eta X_1 + \dots + \eta X_{iG}}{X_1 + \dots + X_{iG}} = \eta \frac{X_1 + \dots + X_{iG}}{X_1 + \dots + X_{iG}} = \eta$$

لذا مشاهده می‌شود که با فرض ثابت بودن نسبت R/X برای تمام خطوط، ضرایب a_{n1}, a_{n2}, \dots و a_{nG} برای تثبیت ولتاژ تمامی

با توجه به فرض قطری بودن $[A]$ ، لذا تغییرات توان راکتیو در باس‌های دارای مولد پراکنده به صورت محلی و بر اساس تغییرات توان اکتیو مصرفی در آن باس‌ها به صورت رابطه (۲۸) است.

$$\Delta q_i = a_i \cdot \Delta p_i \quad i = n1, \dots, nG \quad (28)$$

برای تنظیم Δq_i ، اگرچه در مقایسه با حالت قبل، در این حالت، معضل عدم اطلاع بلادرنگ یک باس از تغییرات توان اکتیو در باس‌های دیگر برطرف شد، اما در محاسبه ضرایب a_i نیاز است که تخمینی از Δp_i ها در دیگر باس‌ها در یک دقیقه پیش رو داشته باشیم. به عبارت بهتر، معضل وابستگی Δq_i به تغییرات توان اکتیو سایر باس‌ها در حالت اول، به معضل وابستگی a_i به این تغییرات تبدیل شد که در صورت وجود انواع مولد در یک باس این معضل پیچیده‌تر نیز می‌گردد. بنابراین در این حالت لازم است پس از بهینه‌سازی ثانویه، مرکز مدیریت ابتدا مقادیر تغییرات توان تولیدی واحدها را در یک دقیقه پیش رو تخمین زده و سپس بر اساس آن، ضرایب a_i را محاسبه کرده و به همراه مقادیر $q_i^{G.ref}$ به مولدها ارسال کند.

۳-۲-۳- حالت سوم ($[A]$ ، $N \times 1$ ، $[\Delta V]$) قطری و همه خطوط دارای نسبت ثابت R/X باشد)

وابستگی ضرایب a_i در هر باس به تخمین تغییرات توان اکتیو در سایر باس‌ها در حالت دوم، ممکن است به دلیل عدم تطابق مقادیر تخمینی با مقادیر واقعی، منجر به تخطی ولتاژ یک یا چند باس شود. با توجه به این که در سطح ثانویه مسئله مدیریت ولتاژ به صورت بهینه حل می‌شود و در سطح اولیه، امنیت و قابلیت اطمینان سیستم نسبت به بهینگی تقدم دارد لذا در اینجا به ارائه مدلی می‌پردازیم که معضلات حالت‌های اول و دوم در آن برطرف شود. در این حالت علاوه بر

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_{WT,rated} \frac{v^2 - v_{ci}^2}{v_{rated}^2 - v_{ci}^2} & v_{ci} \leq v \leq v_{rated} \\ P_{WT,rated} & v_{rated} \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} < v \end{cases} \quad (33)$$

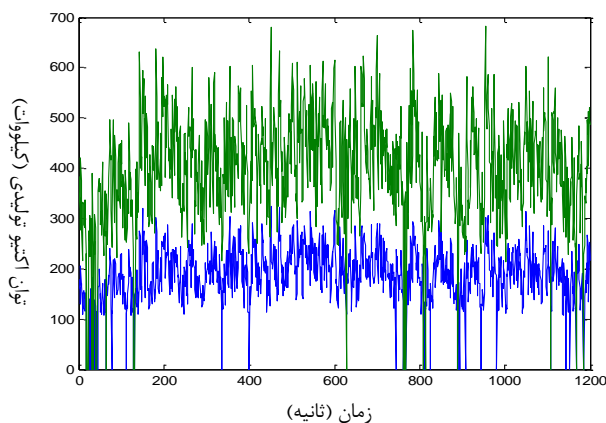
که در این رابطه، v سرعت باد، v_{ci} سرعت قطع پایین، v_{co} سرعت قطع بالا، v_{rated} سرعت نامی، $P_{WT,rated}$ توان نامی و P_{WT} توان خروجی توربین بادی هستند. همچنین برای توان خروجی مولد فتوولتائیک، از داده‌های واقعی تابش خورشیدی که با دقت ۱ نمونه بر ثانیه ثبت شده است و در [۲۳] آمده استفاده شد. برای تبدیل شدت تابش خورشید به توان اکتیو خروجی مولد فتوولتائیک نیز از رابطه (۳۴) استفاده شد [۲۲]:

$$P_s = \begin{cases} P_{S,rated} \frac{S^2}{S_{rated} \cdot S_c} & 0 \leq S \leq S_c \\ P_{S,rated} \frac{S}{S_{rated}} & S_c \leq S \leq S_{rated} \\ P_{S,rated} & S_{rated} \leq S \end{cases} \quad (34)$$

که در این رابطه، S تابش خورشید، S_{rated} تابش نامی، S_c تابش معین، $P_{S,rated}$ توان نامی و P_s توان خروجی مولد فتوولتائیک هستند.

به‌طور مشابه برای در نظر گرفتن الگوی تغییرات بار مصرفی سیستم با دقت مناسب، از داده‌های واقعی ارائه‌شده در [۲۴] استفاده شد.

با در نظر گرفتن $v_{ci}=4\text{ m/s}$ ، $v_{co}=25\text{ m/s}$ و $v_{rated}=15\text{ m/s}$ برای مولد بادی و $S_{rated}=1000\text{ W/m}^2$ و $S_c=150\text{ W/m}^2$ برای مولد فتوولتائیک [۲۲]، شبیه‌سازی‌ها برای یک بازه زمانی ۱۲۰۰ ثانیه‌ای انجام شد. این بازه به نحوی انتخاب شد که شدیدترین تغییرات در تولید مولدها در آن لحاظ شود که شدت این تغییرات در شکل ۷ و شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به کم‌تر بودن نرخ تغییرات بار سیستم نسبت به نوسانات تولید، بار سیستم در هر دوره ۶۰ ثانیه‌ای از این بازه، ثابت فرض شد. شکل ۹ پروفیل بار مصرفی سیستم را در طول این دوره نشان می‌دهد.



شکل ۷: تغییرات توان اکتیو تولیدی مولدهای بادی

باس‌ها یکسان بوده و به i وابسته نیست و لذا می‌توان از رابطه (۳۱) برای تغییر توان راکتیو برحسب توان اکتیو هر مولد استفاده نمود.

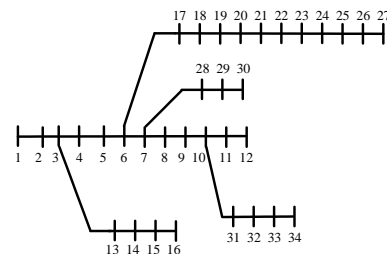
$$\Delta q_i = a_i \cdot \Delta p_i = \eta \cdot \Delta p_i \quad i = n1, \dots, nG \quad (31)$$

در این حالت مزیت دیگری که حاصل شد این است که لازم به محاسبه و ارسال پی‌درپی ضرایب قانون کنترلی توسط مرکز مدیریت نبوده و تنها یک‌بار برای همیشه و به‌صورت محلی این ضرایب تنظیم می‌شوند. البته چنانچه در باس i بیش از یک مولد پراکنده نصب شده باشد نحوه محاسبه a_i برای آن تفاوتی نمی‌کند اما با توجه به مجموع تغییرات Δp_i ، مقدار Δq_i باید به نسبت ظرفیت باقی‌مانده توان راکتیو مولدها بین آن‌ها تقسیم شود تا هیچ مولدی قبل از سایر مولدهای موجود در این باس به حد نهایی تولید توان راکتیو خود نرسد. در مواردی که نسبت R/X برای تمام خطوط یکسان نیست برای محاسبه a_i ‌ها می‌توان به‌صورت تقریبی از میانگین این نسبت‌ها استفاده نمود. در این صورت ضرایب قانون کنترلی در هر باس دارای مولد عبارت است از:

$$a_i = \frac{-\sum_{k=1}^n \frac{S_{k,i}^{vp}}{S_{k,i}^{vq}}}{n} \quad \forall i = n1, \dots, nG \quad (32)$$

۴- سیستم مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

برای ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه تست ۳۴ باسه انتخاب شد که اطلاعات آن در [۱۹] و نمودار تک‌خطی آن در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶: شبکه تست ۳۴ باسه

فرض شد که مولدهای بادی در باس‌های ۱۶ و ۳۴ نصب شده‌اند که مجموع ظرفیت آن‌ها در هر باس به ترتیب 400 kW و 800 kW است. همچنین مولدهای فتوولتائیک در باس‌های ۲۷ و ۳۰ نصب شده‌اند که مجموع ظرفیت آن‌ها در هر باس به ترتیب 1600 kW و 1200 kW است. توان ظاهری اینورتر متصل‌کننده این مولدها به شبکه به‌منظور داشتن قابلیت کنترل توان راکتیو، ۲۵٪ مازاد بر ظرفیت توان اکتیو مولدهایشان در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی سطح بلادرنگ نیاز به دانستن تغییرات توان خروجی مولدها با دقت زمانی بالا است. لذا برای سرعت باد از داده‌های واقعی منتشرشده در [۲۱] که با دقت ۷،۶ نمونه در ثانیه ثبت شده است استفاده گردید. برای تبدیل تغییرات سرعت باد به تغییرات توان اکتیو مولد بادی از رابطه (۳۳) استفاده شد [۲۲]:

روی ولتاژ شبکه وجود ندارد با تغییر توان اکتیو تولیدی مولدها، ولتاژ این باس‌ها متغیر بوده و دامنه تغییرات آن وسیع است به طوری که از ثانیه ۸۰۰ به بعد و با توجه به شکل ۸ و شکل ۹ که تولید مولدهای پراکنده افت کرده و همزمان مصرف نیز افزایش یافته، افت ولتاژ قابل توجهی در برخی از باس‌های سیستم نمایان است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است لذا در این سناریو میانگین انحراف ولتاژ باس‌ها از ولتاژ باس اول برابر با $0/0084$ پریونیت و حداکثر انحراف ولتاژ باس‌ها از باس اول $0/0277$ پریونیت گردید.

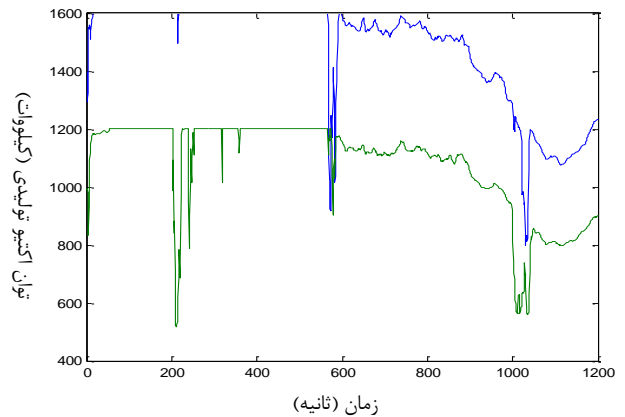
۵-۲-۲- روش متمرکز با مشارکت مولدها و تنظیم‌کننده باس ابتدایی در کنترل ولتاژ

۵-۲-۱- کنترل ثانویه مولدها

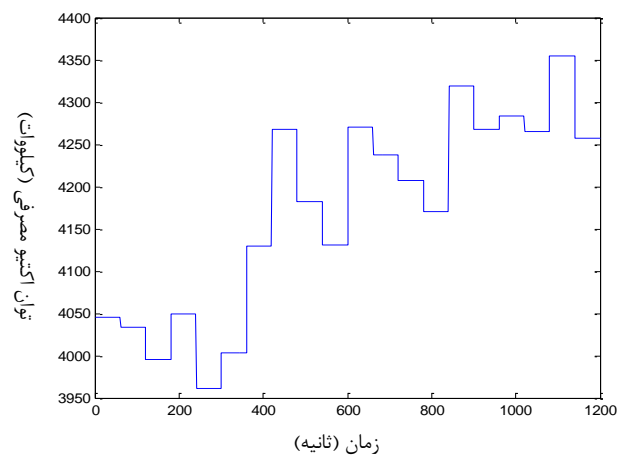
در این حالت فرض شد علاوه بر مولدهای پراکنده، یک جبران‌ساز پیوسته توان راکتیو نیز در مد کنترل ولتاژ در باس ابتدایی شبکه نصب شده باشد. همان‌طور که اشاره شد در روش متمرکز، کل شبکه تنها یک ناحیه است و دارای یک مرکز مدیریت متمرکز است که هر دقیقه یک‌بار، میزان توان راکتیو بهینه تولیدی توسط مولدهای پراکنده و همچنین ولتاژ بهینه اولین باس شبکه را به‌منظور کمینه کردن تلفات، تعیین می‌کند. مقادیر توان راکتیو و ولتاژ تعیین‌شده توسط این مرکز، تا دوره بعد ثابت بوده و هیچ‌گونه کنترل بلادرنگی برای جبران تغییرات ولتاژ باس‌ها در ازای تغییرات توان اکتیو مولدها در طول این مدت وجود ندارد لذا در این حالت نقاط کار توان راکتیو مولدها و تنظیم‌کننده اولین باس شبکه بر اساس آخرین داده‌های ارسالی از مولدها هر دقیقه یک‌بار تعیین شده و تا دوره بعد ثابت می‌ماند. در این حالت تغییرات زمانی ولتاژ باس‌های انتخابی مذکور در شکل ۱۱ رسم شده است که مشاهده می‌شود مولدهای پراکنده با به‌کارگیری توان راکتیو تولیدی خود و تنظیم‌کننده باس اول با افزایش سطح ولتاژ این باس و در نتیجه سایر باس‌های شبکه، در جهت جبران افت ولتاژی که در قسمت قبل به آن اشاره شد برآمده‌اند و با توجه به این که بارها از نوع توان ثابت هستند همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در نتیجه این افزایش ولتاژ، تلفات شبکه کاهش یافته و ولتاژ باس‌های انتخابی نیز نسبت به حالت بدون کنترل، مسطح‌تر و دامنه تغییرات آن‌ها کم‌تر شده است به طوری که میانگین انحراف ولتاژ باس‌ها از ولتاژ باس اول برابر با $0/0045$ پریونیت و حداکثر انحراف ولتاژ باس‌ها از باس اول $0/0206$ پریونیت شد.

۵-۲-۲- کنترل ثانویه و اولیه مولدها

در این حالت فرض شد علاوه بر سطح ثانویه، سطح اولیه نیز وجود دارد و در فواصل بین دوره‌های بهینه‌سازی مرکز مدیریت متمرکز، تأثیر نوسانات لحظه‌ای توان اکتیو مولدها را بر ولتاژ باس‌ها با تغییر



شکل ۸: تغییرات توان اکتیو تولیدی مولدهای فتوولتائیک



شکل ۹: تغییرات بار مصرفی سیستم

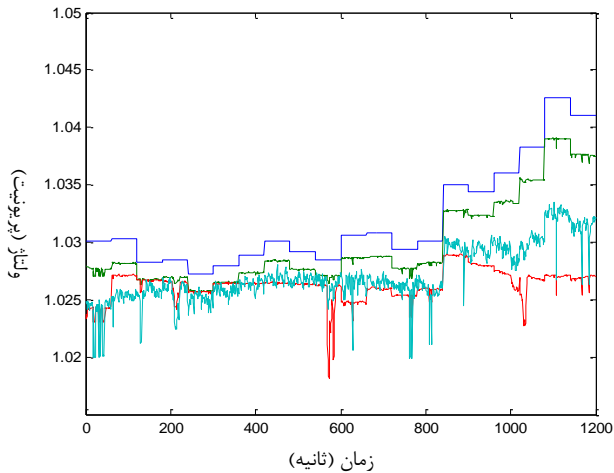
شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک دستگاه لپ‌تاپ با پردازنده Core i5-520M 2.40 GHz و حافظه رم 4 GB RAM در نرم‌افزار متلب و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نقطه میانی (interior-point) انجام شد. سناریوهای مختلفی که برای انجام شبیه‌سازی در نظر گرفته شد عبارت‌اند از ۴ ترکیب حالت‌های زیر:

- استفاده از روش متمرکز (بدون ناحیه‌بندی) یا روش توزیع‌شده (ناحیه‌بندی‌شده)
- شبیه‌سازی با در نظر گرفتن سطح محلی بلادرنگ و بدون در نظر گرفتن آن

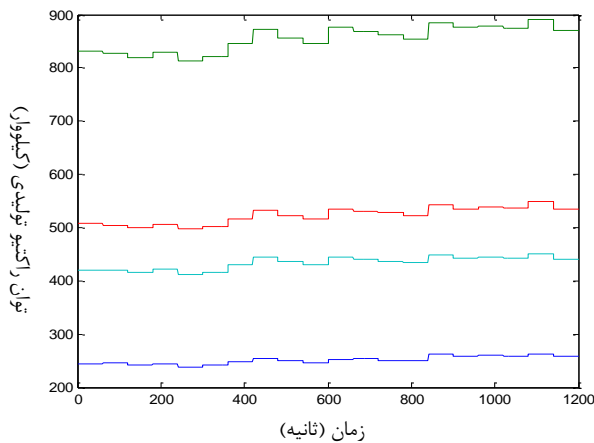
۵- نتایج و تفسیر آن‌ها

۵-۱- بدون مشارکت مولدهای پراکنده در کنترل ولتاژ

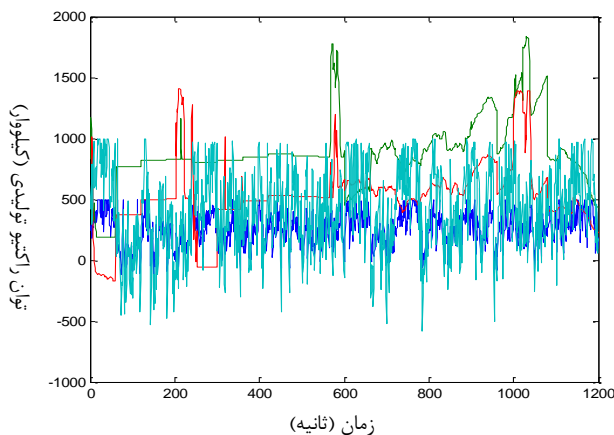
در این حالت فرض شد که مولدهای تولید پراکنده تنها توان اکتیو تولید می‌کنند و توان راکتیو تولیدی یا مصرفی آن‌ها صفر باشد. همچنین فرض شد که ولتاژ باس ابتدایی شبکه در مقدار یک پریونیت ثابت باشد. در این حالت تغییرات زمانی ولتاژ ۴ باس انتخابی ۱، ۱۳، ۲۳ و ۳۳ به نمایندگی از کل باس‌های سیستم در شکل ۱۰ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل این که هیچ‌گونه کنترلی بر



شکل ۱۲: تغییرات زمانی ولتاژ ۴ باس انتخابی ۱، ۱۳، ۲۳ و ۳۳ در کنترل متمرکز ولتاژ با مشارکت ثانویه و اولیه



شکل ۱۳: تغییرات زمانی توان راکتیو مولدها در کنترل متمرکز ولتاژ با مشارکت ثانویه

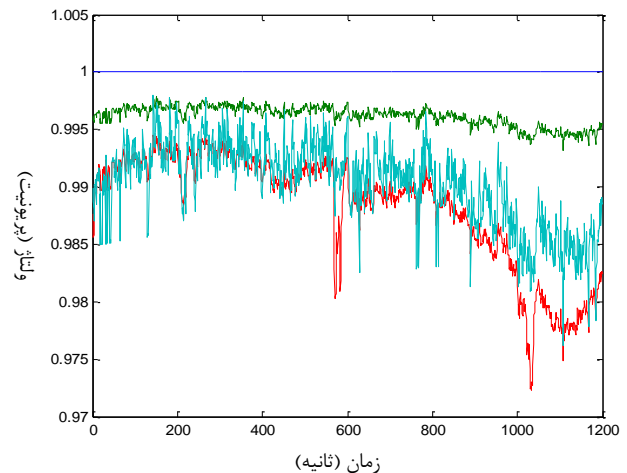


شکل ۱۴: تغییرات زمانی توان راکتیو مولدها در کنترل متمرکز ولتاژ با مشارکت ثانویه و اولیه

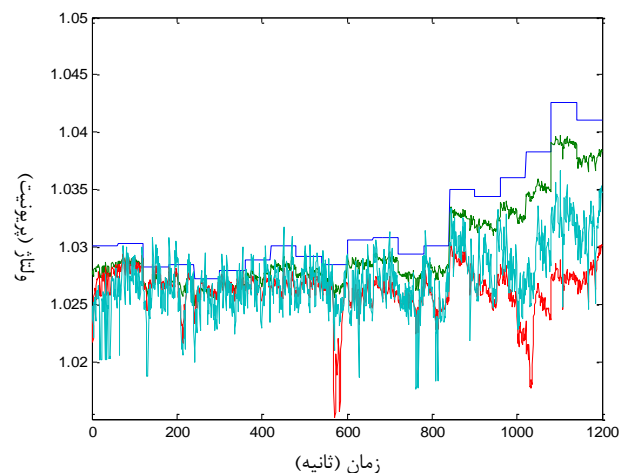
۵-۳- روش توزیع شده با مشارکت مولدها و تنظیم کننده باس ابتدایی در کنترل ولتاژ

برای شبکه تست ۳۴ باسه، افزاز شبکه به ۳ ناحیه به صورت شکل ۱۵ به دست آمد. در این حالت نیز فرض شد علاوه بر مولدهای پراکنده،

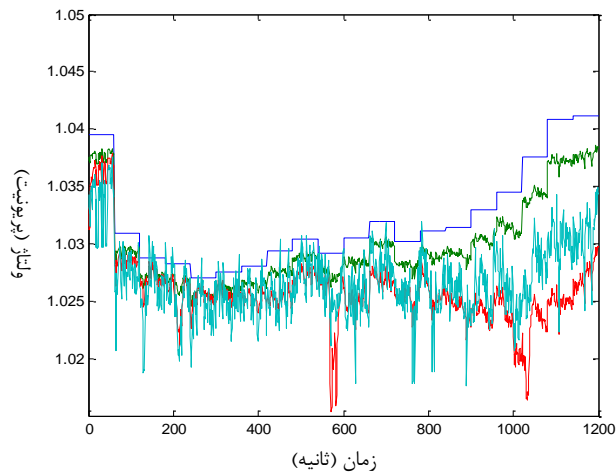
بلادرنگ توان راکتیو مولدها کمتر می‌کند که نتایج آن در شکل ۱۲ رسم شده است. در این حالت اگرچه میانگین انحراف ولتاژ باس‌ها از ولتاژ باس اول نسبت به حالت الف تغییر چندانی ندارد اما حداکثر انحراف ولتاژ باس‌ها از باس اول به مقدار ۰/۰۱۷۵ پریونیت کاهش یافت. همچنین تغییرات توان راکتیو تزریقی مولدها در دو سناریوی مذکور در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ آمده است. در شکل ۱۴، ثابت شدن توان راکتیو برخی از مولدها در بعضی از بازه‌های یک دقیقه‌ای به این دلیل است که توان اکتیو مولد موردنظر به حد نهایی خود رسیده و ثابت شده لذا توان راکتیوی هم که در اختیار می‌گذارد ثابت است. همچنین با مقایسه همزمان تغییرات ولتاژ و توان راکتیو، مشاهده می‌شود که ولتاژ یک باس زمانی تغییرات شدید داشته است که توان راکتیو نزدیک‌ترین مولد به آن باس به حد نهایی جبران‌سازی خود رسیده و بیش از آن نتوانسته است که تغییرات توان راکتیو را جبران نماید.



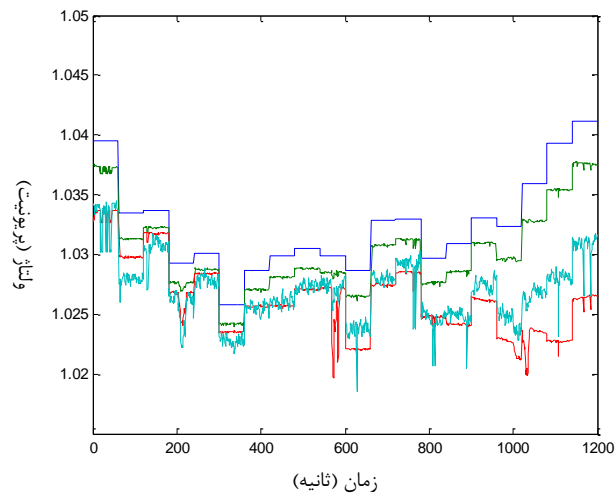
شکل ۱۰: تغییرات زمانی ولتاژ ۴ باس انتخابی ۱، ۱۳، ۲۳ و ۳۳ بدون مشارکت مولدهای پراکنده و تنظیم کننده باس ابتدایی در کنترل ولتاژ



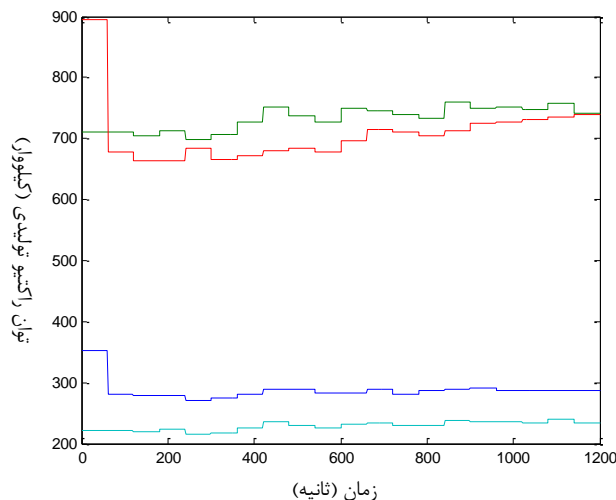
شکل ۱۱: تغییرات زمانی ولتاژ ۴ باس انتخابی ۱، ۱۳، ۲۳ و ۳۳ در کنترل متمرکز ولتاژ با مشارکت ثانویه



شکل ۱۶: تغییرات زمانی ولتاژ باس‌های انتخابی در کنترل توزیع شده ولتاژ با مشارکت ثانویه

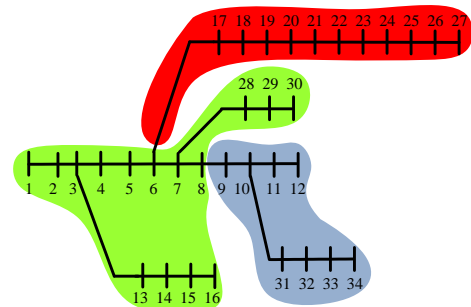


شکل ۱۷: تغییرات زمانی ولتاژ باس‌های انتخابی در کنترل توزیع شده ولتاژ با مشارکت ثانویه و اولیه



شکل ۱۸: تغییرات زمانی توان راکتیو مولدها در کنترل توزیع شده ولتاژ با مشارکت ثانویه

یک جبران‌ساز پیوسته توان راکتیو نیز در مد کنترل ولتاژ در باس ابتدایی شبکه نصب شده است. نتایج شبیه‌سازی روش توزیع‌شده در ادامه بررسی می‌گردد.



شکل ۱۵: شبکه تست ۳۴ باسه افزاشده

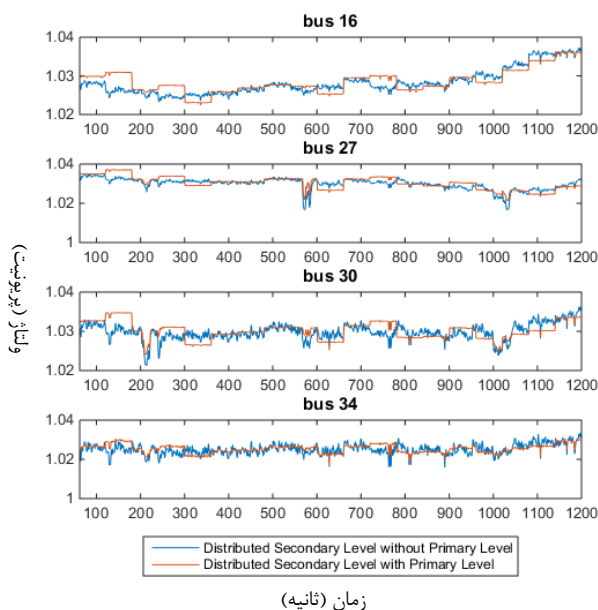
۵-۳-۱- کنترل ثانویه مولدها

در این حالت تغییرات زمانی ولتاژ ۴ باس انتخابی ۱، ۱۳، ۲۳ و ۳۳ به نمایندگی از نواحی مختلف در شکل ۱۶ رسم شده است. مشاهده می‌شود که ولتاژ یکی از باس‌ها که همان اولین باس شبکه است و مقدار بهینه آن توسط مرکز مدیریت ناحیه اول تعیین می‌شود در طول هر دوره ثابت بوده و ولتاژ باس‌های انتخابی دیگر با تغییر توان مولدها نوسان می‌کند و با توجه به اینکه ولتاژ یک کمیت محلی است، نوع و شدت نوسان آن به نوع مولدی وابسته است که به باس موردنظر نزدیک‌تر است. در این حالت مشاهده می‌شود که ولتاژ باس‌های انتخابی نسبت به حالت مشابه متمرکز، تفاوت چندانی نداشته به طوری که میانگین انحراف ولتاژ باس‌ها از ولتاژ باس اول برابر با $0.048/0.212$ پریونیت و حداکثر انحراف ولتاژ باس‌ها از باس اول $0.048/0.212$ پریونیت شد اما میانگین زمان محاسباتی مرکز ناحیه‌ای در مقایسه با مرکز متمرکز همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود تقریباً 88% کاهش یافته است.

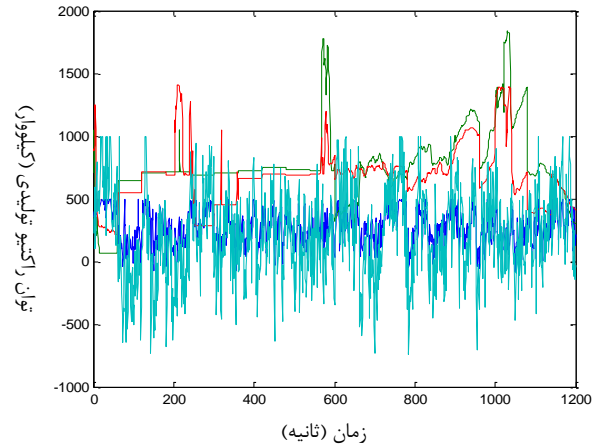
۵-۳-۲- کنترل ثانویه و اولیه مولدها

در این حالت نیز تغییرات زمانی ولتاژ باس‌های انتخابی در شکل ۱۷ رسم شده است و مشابه حالت قبل، میانگین زمان محاسباتی مرکز ناحیه‌ای در مقایسه با مرکز متمرکز تقریباً 88% کاهش یافت. همچنین سایر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده برای این حالت در جدول ۱ آمده است. تغییرات توان راکتیو تزریقی مولدها در روش توزیع‌شده نیز در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ آمده است و مشابه شکل ۱۴، عدم تغییر توان راکتیو برخی از مولدها در بعضی از بازه‌ها به دلیل به اشباع رفتن توان اکتیو مولد در حد نهایی آن است. همچنین با مقایسه همزمان تغییرات ولتاژ و توان راکتیو، مشاهده می‌شود که ولتاژ یک باس زمانی تغییرات شدید داشته است که توان راکتیو نزدیک‌ترین مولد به آن باس به حد نهایی جبران‌سازی خود رسیده و بیش از آن نتوانسته است تغییرات توان اکتیو را جبران نماید.

توزیع شده در مقایسه با روش متمرکز تقریباً ۸۸٪ کم‌تر شده و در مقایسه با حالت بدون کنترل، میانگین انحراف ولتاژ باس‌ها در طول دوره شبیه‌سازی در هر تمامی حالت‌های متمرکز و توزیع شده تقریباً به یک‌دوم کاهش یافته است. البته بهینه‌تر بودن جزئی نتایج روش متمرکز در مقایسه با روش توزیع شده به این دلیل است که در روش توزیع شده برخلاف روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز هیچ مرکز هماهنگ‌کننده برای هماهنگی و تعیین بهینه ولتاژ باس‌های ابتدایی نواحی مختلف وجود ندارد که بهینگی سراسری را تضمین کند لذا نسبت به روش متمرکز زیربهینه است. همچنین مقایسه نتایج روش‌های متمرکز و توزیع شده در صورت بهره‌گیری از سطح اولیه، نشان می‌دهد که اگرچه نسبت به حالت‌های متناظری که از سطح اولیه استفاده نشده، حداکثر انحراف ولتاژ بهبود یافته اما انرژی تلف شده اندکی افزایش یافته است. در واقع اگرچه سطح کنترل اولیه، به تثبیت بهتر پروفیل ولتاژ باس‌ها کمک می‌کند اما با اصلاح نقاط کار توان راکتیو باس‌ها، ممکن است مقادیر آن‌ها را از مقدار بهینه تعیین شده توسط سطح ثانویه دور کند که به دلیل اهداف متفاوت سطح ثانویه و اولیه با یکدیگر است. در واقع سطح ثانویه، به دنبال بهینه ساختن تلفات سیستم است در حالی که برای سطح اولیه تثبیت و تسطیح ولتاژ باس‌ها و جلوگیری از تخطی آن‌ها اولویت دارد. همچنین در جدول ۱ شاخص زمانی ارائه شده تنها نشان‌دهنده زمان محاسباتی مرکز ثانویه بوده و در عمل تأخیرهای مخابراتی دریافت و ارسال داده را نیز باید لحاظ نمود. اهمیت کاهش این شاخص در روش توزیع شده در مقایسه با روش متمرکز برای شبکه‌های هوشمند آتی که دارای باس‌ها و مولدهای بیش‌تر و ابعاد وسیع‌تر است بیش‌تر آشکار می‌گردد که با تبدیل مسئله کنترل ولتاژ از یک مسئله سراسری در روش متمرکز به چند مسئله زیر بهینه در روش توزیع شده می‌توان زمان محاسباتی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر روی یک مرکز متمرکز با توان محاسباتی بالا را با جایگزینی آن با چند مرکز دارای توان محاسباتی پایین‌تر کاهش داد.

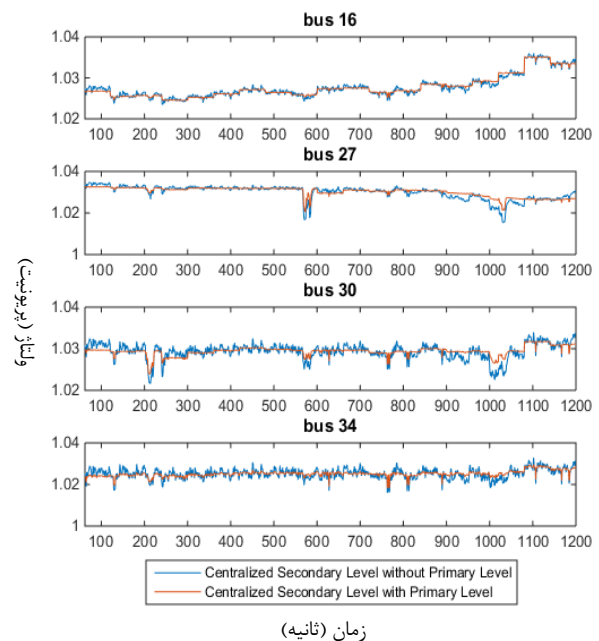


شکل ۲۱: تغییرات زمانی ولتاژ باس‌های مولد در کنترل توزیع شده



شکل ۱۹: تغییرات زمانی توان راکتیو مولدها در کنترل توزیع شده ولتاژ با مشارکت ثانویه و اولیه

در ادامه به منظور فراهم شدن امکان بررسی و مقایسه ولتاژ باس‌های دارای مولد پراکنده، تغییرات زمانی ولتاژ این باس‌ها در دو حالت متمرکز و توزیع شده در شکل ۲۰ و شکل ۲۱ ترسیم شده است.



شکل ۲۰: تغییرات زمانی ولتاژ باس‌های مولد در کنترل متمرکز

برای مقایسه سناریوهای مختلف روش متمرکز و توزیع شده، شاخص‌های جدول ۱ مورد بررسی واقع شد. لازم به ذکر است که این شاخص‌ها صرفاً مربوط به باس‌های انتخابی نبوده و با استفاده از نتایج کلیه باس‌های شبکه به دست آمده است. از مقایسه نتایج روش بدون افراز (متمرکز) با نتایج روش افراز شده پیشنهادی (توزیع شده) مشاهده می‌گردد که نتایج روش افراز شده اختلاف قابل توجهی با روش بدون افراز نشان نمی‌دهد؛ به عنوان مثال مقدار تلفات در صورت عدم استفاده از سطح اولیه از ۷/۵۸۷۶ به ۷/۹۱۸۴ افزایش یافته است و با وجود سطح اولیه از ۹/۲۲۹۳ به ۹/۵۱۵۱ افزایش یافته که این افزایش چشم‌گیر نیست و این حاکی از آن است که روش افراز پیشنهادی سطح بهینگی قابل قبولی ارائه می‌نماید. این در حالی است که زمان محاسباتی روش

جدول ۱: مقایسه سناریوهای مختلف روش متمرکز و توزیع شده

| میانگین زمان محاسباتی ثانویه (s) | ولتاژ کمینه (pu) | ولتاژ بیشینه (pu) | حداکثر انحراف از ولتاژ باس ۱ (pu) | میانگین انحراف از ولتاژ باس ۱ (pu) | انرژی تلف شده (kWh) | بدون جبران‌سازی |
|----------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| - | ۰/۹۷۲۳ | ۱/۰۰۱۳ | ۰/۰۲۷۷ | ۰/۰۰۸۴ | ۲۱/۸۵۰۴ | ۵-۱ بدون کنترل |
| ۱/۶۹۹۹ | ۱/۰۱۵۰ | ۱/۰۴۲۶ | ۰/۰۲۰۶ | ۰/۰۰۴۵ | ۷/۵۸۷۶ | ۵-۱ کنترل ثانویه مولدها |
| ۱/۷۰۶۰ | ۱/۰۱۷۸ | ۱/۰۴۲۶ | ۰/۰۱۷۵ | ۰/۰۰۴۴ | ۹/۲۲۹۳ | ۵-۲ کنترل ثانویه و اولیه مولدها |
| ۰/۱۹۳۳ | ۱/۰۱۵۲ | ۱/۰۴۴۷ | ۰/۰۲۱۲ | ۰/۰۰۴۸ | ۷/۹۱۸۴ | ۵-۱ کنترل ثانویه مولدها |
| ۰/۱۹۷۵ | ۱/۰۱۸۰ | ۱/۰۴۱۱ | ۰/۰۱۸۱ | ۰/۰۰۴۷ | ۹/۵۱۵۱ | ۵-۲ کنترل ثانویه و اولیه مولدها |

محلی در کنار مرکز کنترل هماهنگ، نوسانات لحظه‌ای ولتاژ باس‌ها را به حداقل ممکن می‌رسانند. روش توزیع شده پیشنهادی با روش متمرکز در دو حالت وجود و عدم وجود سطح بلادرنگ محلی مورد مقایسه قرار گرفت. این سناریوهای مختلف بر روی شبکه تست ۳۴ باسه دارای تولیدات پراکنده بادی و فتوولتائیک که در ۴ باس مختلف از شبکه نصب شده‌اند تحت وضعیت‌های مختلف تولید و مصرف مورد ارزیابی واقع شد. نتایج به‌دست‌آمده کاهش قابل‌توجه در تلفات و حداکثر انحراف ولتاژ ایجاد شده توسط تغییرات توان اکتیو را به نمایش گذاشت. نتایج شبیه‌سازی، قابلیت پیاده‌سازی این دیدگاه را برای مدیریت آنلاین ولتاژ در شبکه‌های هوشمند مجهز به مولدهای دارای واسط الکترونیک قدرت تصدیق می‌کند.

مراجع

- [1] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, New York, NY, USA: CRC Press, 2001.
- [2] مهدی ثواقبی و علیرضا جلیلیان، «کنترل سلسله‌مراتبی برای جبران‌سازی هارمونیک‌های ولتاژ در ریزشبکه‌های هوشمند»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۱، شماره ۲، صفحات ۲۵-۳۹، ۱۳۹۰.
- [3] B. A. Robbins, C. N. Hadjicostis, and A. D. Domínguez-García, "A two-Stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1470-1482, 2013.
- [4] K. Tanaka, M. Oshiro, S. Toma, A. Yona, T. Senjyu, T. Funabashi, and C. H. Kim, "Decentralised control of voltage in distribution systems by distributed generators," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 11, p. 1251-1260, 2010.
- [5] A. Cagnano, and E. D. Tuglie, "Centralized voltage control for distribution networks with embedded PV systems," *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 173-185, 2015.
- [6] E. A. Paaso, Y. Liao, and A. M. Cramer, "Dual-layer voltage and VAR control approach with active participation from distributed solar generations," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 8-10, pp. 854-865, 2015.
- [7] L. Meegahapola, S. Durairaj, D. Flynn, and B. Fox, "Coordinated utilisation of wind farm reactive power capability for system loss," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, no. 1, pp. 40-51, 2011.
- [8] B. Zhang, A. Lam, A. Dominguez-Garcia, and D. Tse, "An optimal and distributed method for voltage

اگرچه در [۶] نیز ساختار دوسطحی مشابهی برای کنترل ولتاژ شبکه توزیع در حضور مولدهای فتوولتائیک ارائه شده اما مزیت روش پیشنهادی این مقاله در این است که با افزایش شبکه توزیع، ساختار سلسله‌مراتبی پیشنهادی را به‌صورت توزیع‌شده پیاده کرده است که در صورت خروج مرکز کنترل هر یک از نواحی از مدار خللی در عملکرد سایر مراکز ایجاد نمی‌گردد و الگوریتم بهینه‌سازی سطح ثانویه در هر یک از نواحی بسیار سریع‌تر همگرا می‌گردد که در شبکه‌های با تعداد مولد زیاد حائز اهمیت است. همچنین از نظر سطح بلادرنگ اولیه مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش مرجع مذکور، این است که به دلیلی عدم وابستگی ضرایب قانون کنترلی به نقاط کار شبکه، نیازی به ارسال مکرر این ضرایب به کنترل‌کننده‌های اولیه در هر دوره نبوده و تنها یک‌بار برای همیشه و به‌صورت محلی این ضرایب تنظیم می‌شوند. همچنین از مقایسه نتایج این مقاله با نتایج مرجع [۱۳] در می‌یابیم که به‌دلیل وجود یک سطح بلادرنگ در ساختار سلسله‌مراتبی پیشنهادی، پروفیل ولتاژ باس‌ها مسطح‌تر بوده و نوسانات لحظه‌ای ولتاژ قابل کنترل است. از طرف دیگر برخلاف روش افزایش مرجع مذکور که در آن بعد از تجزیه شبکه به نواحی کنترلی، ممکن است باس‌هایی وجود داشته باشند که در هیچ ناحیه‌ای قرار نگرفته باشند، در روش افزایش پیشنهادی در این مقاله علاوه بر رفع معضل مذکور، محدوده نواحی نسبت به تغییر شرایط اقلیمی و جوی مقاوم است زیرا ماتریس استخراج‌شده پیشنهادی برای افزایش شبکه تنها به توپولوژی و پارامترهای خطوط شبکه وابسته بوده و مستقل از نوع، موقعیت و ظرفیت مولدها و بارهای شبکه است.

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله یک کاربرد کنترل توزیع‌شده و سلسله‌مراتبی را برای مدیریت ولتاژ در شبکه‌های توزیع هوشمند با مشارکت مولدهای پراکنده دارای قابلیت تولید توان راکتیو ارائه نمود. مطالب ارائه‌شده در این مطالعه شامل افزایش شبکه توزیع به نواحی مستقل، مدل‌سازی مسئله کنترل هماهنگ و بهینه‌سازی بر اساس ماتریس حساسیت در شبکه توزیع و یک روش جدید برای کنترل بلادرنگ و محلی توان راکتیو مولدهای پراکنده شد. به‌کارگیری روش ارائه‌شده در این مقاله موجب افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر و کاهش توأم تلفات و نوسانات ولتاژ در حضور این تولیدکنندگان می‌گردد. در روش پیشنهادی، کنترل‌کننده‌های بلادرنگ

- propagation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1461-1469, 2013.
- [16] G. Xu, and V. Vittal, "Slow coherency based cutset determination algorithm for large power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 877-884, 2010.
- [17] T. Jen-Hao, "A direct approach for distribution system load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 882-887, 2003.
- [18] M. Elkhatab, R. El-Shatshat, and M. Salama, "Novel coordinated voltage control for smart distribution networks with DG," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 598-605, 2011.
- [19] M. Chis, M. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 3, pp. 225-230, 1997.
- [20] M. Nayeripour, H. Fallahzadeh-Abarghouei, S. Hasanvand, and M. E. Hassanzadeh, "Interactive fuzzy binary shuffled frog leaping algorithm for multi-objective reliable economic power distribution system expansion planning," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 351-363, 2015.
- [21] *Surface Level Wind Data Collection*, [Online], Available: <http://google-rec-csp.googlecode.com/files/06-13-2011.txt.gz>.
- [22] N. Nikmehr, and S. Najafi-Ravadanegh, "Optimal operation of distributed generations in micro-grids under uncertainties in load and renewable power generation using heuristic algorithm," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, p. 982-990, 2015.
- [23] *National Renewable Energy Laboratory, Solar Measurement*, [Online], Available online at: http://www.nrel.gov/midc/oahu_archive/rawdata/Oahu_GHI/201007.zip.
- [24] *Primary Substation Transformer Dataset*, [Online], Available at: <http://www.networkrevolution.co.uk/wp-content/uploads/2014/10/CLNR-L191.xlsx>.
- regulation in power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 1714-1726, 2015.
- [9] P. Sulc, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 4, pp. 968-977, 2014.
- [10] X. Cheng, Y. Zhang, L. Cao, J. Li, T. Shen, and S. Zhang, "A real-time hierarchical and distributed control scheme for reactive power optimization in multi-area power systems," *IEEE PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, 2005.
- [11] M. Shahidehpour, and Y. Wang, *Communication and Control in Electric Power*, New York, John Wiley & Sons, 2003.
- [12] M. Bahrampanah, M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Network clustering for voltage control in active distribution network including energy storage systems," *Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2015 IEEE Power & Energy Society*, 2015.
- [۱۳] احمد عابسی، وحید وحیدی‌نسب و محمدصادق قاضی‌زاده، «بررسی تأثیر حضور منابع تولید پراکنده ولتاژ ثابت بر کنترل توزیع شده ولتاژ شبکه‌های هوشمند با بهره‌گیری از مصرف‌کنندگان نهایی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۶۷-۲۷۵، ۱۳۹۵.
- [14] H. You, V. Vittal, and Z. Yang, "Self-healing in power systems: An approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, p. 174-181, 2003.
- [15] H. Mehrjerdi, S. Lefebvre, M. Saad, and D. Asber, "A decentralized control of partitioned power networks for voltage regulation and prevention against disturbance