

بررسی تأثیر حضور منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت بر کنترل توزیع شده ولتاژ شبکه‌های هوشمند با بهره‌گیری از مصرف‌کنندگان نهایی

احد عباسی^۱، کارشناس ارشد؛ وحید وحیدی‌نسب^۲، استادیار؛ محمدصادق قاضی‌زاده^۳، دانشیار

- ۱- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - ahadabessi@yahoo.com
 ۲- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - v_vahidinasab@sbu.ac.ir
 ۳- دانشکده مهندسی برق - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - m_ghazizadeh@sbu.ac.ir

چکیده: حضور نسل جدید بارهای الکتریکی و همچنین ادوات اصلاح‌کننده ضریب قدرت موجود در بارهای الکتریکی، امکان استفاده از مصرف‌کننده‌های نهایی برای کنترل توان راکتیو و بهبود ولتاژ در شبکه‌های توزیع را فراهم نموده است. در این مقاله، با بهره‌گیری از مصرف‌کننده نهایی، به کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های هوشمند پرداخته می‌شود. روش کار به این صورت است که ابتدا از الگوریتم کنترل توزیع شده به‌عنوان راه‌حلی مناسب با بار محاسباتی کم‌تر استفاده می‌شود. در الگوریتم کنترل توزیع شده مذکور، در ابتدا با روشی کارآمد موسوم به روش تجزیه اِپسیلون، شبکه توزیع به چند ناحیه تقسیم شده و سپس در هر یک از این نواحی، شین‌های کاندید برای تزریق توان راکتیو تعیین می‌شوند. سپس، مقادیر بهینه تزریق توان راکتیو هر ناحیه در هر یک از شین‌های کاندید با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. در این مقاله، تأثیر حضور منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت بر کنترل ولتاژ نیز مورد توجه قرار گرفته است. در انتها، به‌منظور ارزیابی چارچوب پیشنهادی، شبکه‌های آزمایش استاندارد ۳۳ و ۶۹ شینه IEEE مورد استفاده قرار گرفته است. تجزیه‌وتحلیل انجام‌گرفته روی نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، حاکی از بهبود عمده پروفیل ولتاژ در شبکه‌های تحت مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: کنترل توزیع شده ولتاژ، مصرف‌کنندگان نهایی، منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت، شبکه‌های توزیع هوشمند.

Analysis of the Impact of Constant Voltage DGs on Distributed Voltage Control of Smart Grids by using End-consumers

Ahad Abessi¹, MSc; Vahid Vahidinasab², Assistant Professor; Mohammad Sadegh Ghazizadeh³, Associate Professor

- 1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Abbaspour Campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: ahadabessi@yahoo.com
 2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Abbaspour Campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: v_vahidinasab@sbu.ac.ir
 3- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Abbaspour Campus, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: m_ghazizadeh@sbu.ac.ir

Abstract: The presence of new generation of electrical loads equipped with power factor correction devices makes it possible to utilize end-consumers in distribution grids voltage improvement. In this paper, reactive power and voltage control of a smart distribution grid by using end-consumers are studied. The distributed control algorithm is used as a suitable mechanism with less computational burden. In this regard, through the ϵ -decomposition approach the distribution network is divided into some sub-networks. After that, candidate buses for reactive power are selected and optimal reactive power injections at each candidate bus are acquired by genetic algorithm. Also, the impact of constant voltage distributed generations on voltage control is investigated. Finally, in order to evaluate effectiveness of proposed framework, IEEE 33-bus and 69-bus test systems are used. Simulation results show significant impact of proposed framework on voltage improvement of the distribution network.

Keywords: Distributed voltage control, End-consumers, Constant voltage distributed generation's source, Smart distribution grids.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۳۰ و ۱۳۹۳/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

نام نویسنده مسئول: وحید وحیدی‌نسب

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - بلوار وفادار شرقی - بلوار شهید عباسپور - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های قدرت به‌ویژه در شبکه‌های هوشمند، به‌منظور بهره‌برداری مناسب از سیستم و نیز نیل به اهدافی از قبیل حفظ ولتاژ در محدوده‌ی تعیین‌شده، بهره‌برداری بهتر از سیستم انتقال و کاهش تلفات مورد توجه بسیاری از بهره‌برداران و برنامه‌ریزان سیستم‌های قدرت است [۱].

مراجع [۲] و [۳] از جمله مقالاتی هستند که به بررسی و توسعه بهره‌گیری از مصرف‌کنندگان نهایی در شبکه‌های انتقال قدرت پرداخته‌اند. ساختار کنترلی ارائه‌شده در این مراجع مبتنی بر سیستم مدیریت فرمان در حوادث^۱ است که برای هماهنگی، فرمان دادن و کنترل پاسخ‌های اضطراری مورد استفاده قرار گرفته است. مرجع [۴]، در ادامه کار مرجع [۲]، ضمن استفاده از سیستم مدیریت فرمان در حوادث، استفاده از ساختار چندعاملی^۲ را به‌عنوان ابزار کنترلی مناسب معرفی کرده است. رله‌های موجود در فیدرهای شبکه، به‌عنوان اجزایی از سیستم کنترلی مورداشاره، اطلاعات و فعالیت‌های کنترلی موردنیاز در لایه‌های کنترلی را هماهنگ نموده و مدیریت می‌کنند. این مرجع نحوه مدل‌سازی شبکه توزیع را بررسی کرده؛ اما به نحوه به دست آوردن شین‌های کاندید توجه نکرده است. علاوه‌براین، نویسندگان مقاله مذکور از مدلی مبتنی بر کنترل مرکزی استفاده کرده‌اند. این در حالی است که با توجه به روند رو به رشد به‌کارگیری کنترل‌های گسترده، استفاده از این روش کارایی مطلوبی ندارند.

مرجع [۵] از یک ساختار تنظیم‌کننده^۳ غیرسلسله‌مراتبی و غیرمتمرکز استفاده کرده است که بدون نیاز به فرآیند مرکزی، مقادیر واقعی تابع هدف را محاسبه نموده و ضمن هماهنگ ساختن منابع تولید با ادوات متعارف کنترل ولتاژ، بهره‌برداری کارآمد و ایمن شبکه را تضمین می‌کند. در این مرجع، استفاده از کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده به‌عنوان یک روش کارآمد که در آن هر کنترل‌کننده، شین‌های دارای منبع تولیدپراکنده را کنترل و از این طریق کنترل ولتاژ هر ناحیه را انجام می‌دهد، مطرح شده است. در این مرجع، اساساً به موضوع مصرف‌کننده‌های نهایی و نحوه مدل‌سازی این منابع در کنترل ولتاژ شبکه پرداخته نشده است.

وجود مشکلات متعدد برای انتقال توان راکتیو در مسافت‌های طولانی، باعث شده تا کنترل ولتاژ توسط ادوات خاصی که در سراسر سیستم گسترده هستند، صورت گیرد. در این راستا، در حال حاضر یکی از چالش‌های پیش‌روی پژوهش‌گران و مهندسان، انتخاب و هماهنگی مناسب تجهیزات دارای قابلیت تأمین و یا جذب توان راکتیو، برای کنترل توان راکتیو و ولتاژ است. با گسترش زیرساخت‌های شبکه هوشمند، مباحث جدیدی در نحوه برخورد با مسائل کنترل ولتاژ و توان راکتیو ایجاد شده که امکان استفاده بیش‌تر از ظرفیت‌های سیستم توزیع را فراهم کرده است. مرجع [۶] ایده‌ی استفاده از مصرف‌کننده‌های نهایی به‌عنوان یک ابزار کنترلی در مبحث کنترل توان راکتیو را مطرح کرده است. مطابق با بحث صورت گرفته

در این مرجع، مصرف‌کننده‌های نهایی می‌توانند مجهز به تجهیزات اصلاح‌کننده‌ی ضریب قدرت^۴ شوند و با تغییر در مدل کنترلی خود، قابلیت تزریق و یا جذب توان راکتیو پیدا کرده و به‌این‌ترتیب به‌عنوان یک پشتیبان مناسب برای کنترل توان راکتیو مورد استفاده قرار گیرند. ازجمله این مصرف‌کننده‌های نهایی می‌توان به خودروهای الکتریکی، تلویزیون، یخچال، روشنایی و رایانه رومیزی اشاره کرد. با مطرح شدن مصرف‌کننده‌های نهایی به‌عنوان پشتیبان توان راکتیو و با توجه به گسترش زیرساخت‌های شبکه هوشمند، می‌توان از زاویه‌ای متفاوت به موضوع کنترل توان راکتیو و کنترل ولتاژ در شبکه‌های قدرت نگاه کرد.

مرجع [۷] یک ساختار کنترلی غیرمتمرکز برون‌خط^۵ را برای واحدهای تولیدپراکنده پیشنهاد کرده است. طبق بحث انجام‌شده در این مرجع، هماهنگی برون‌خط، از اصلاح و تغییر سیستم‌های کنترلی موجود جلوگیری می‌کند و تبادل اطلاعات نیز تنها در صورت وجود تغییرات عمده در ساختار سیستم توزیع، موردنیاز خواهد بود. این مرجع تنها به مدل‌سازی منابع تولیدپراکنده بادی و فتوولتائی پرداخته و مدل‌سازی مصرف‌کننده‌های نهایی و پشتیبانی توان راکتیو توسط این منابع را مورد بررسی قرار نداده است.

در مرجع [۸] کنترل توزیع‌شده‌ی بهینه ولتاژ به‌عنوان یک الگوریتم کنترلی مناسب ارائه شده است که به علت در نظر نگرفتن برخی از شین‌ها و تقسیم شبکه به چند ناحیه، از بار محاسباتی پائینی نسبت به روش‌های کنترلی دیگر برخوردار است. این مرجع تنها از منابع تولیدپراکنده به‌عنوان یک ابزار کنترل ولتاژ استفاده کرده و بحثی از مصرف‌کننده‌های نهایی به‌عنوان گزینه‌ای برای تأمین توان راکتیو نکرده است.

مرجع [۹] مدلی مبتنی بر حساسیت برای کنترل ولتاژ در شبکه‌های هوشمند با استفاده از منابع تولیدپراکنده ارائه کرده است. در این مرجع، از منابع تولیدپراکنده‌ای استفاده شده که قابلیت کنترل توان راکتیو خود را دارند. این مرجع، مدل کنترلی خود را به منابع تولیدپراکنده محدود نموده و بحثی از مصرف‌کننده‌های نهایی به‌عنوان گزینه‌ای برای پشتیبانی توان راکتیو نکرده است.

با عنایت به مطالعات انجام‌شده و بررسی به‌عمل‌آمده روی مراجع مرتبط با موضوع، این مقاله به‌منظور توسعه و تکمیل فعالیت‌های انجام‌شده در این حوزه، نوآوری‌های ذیل را مورد توجه دارد:

- در این مقاله روشی موسوم به کنترل توزیع‌شده ولتاژ^۶ مبتنی بر منابع توان راکتیو موجود در مصرف‌کنندگان نهایی، به‌عنوان روشی کارآمد پیشنهاد شده است.
 - به‌منظور تکمیل مدل پیشنهادی، تأثیر منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت بر مدل ارائه‌شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است.
- بر اساس اطلاع نویسندگان و با توجه به آخرین تحقیقات صورت گرفته، تاکنون چنین چارچوب جامعی برای مدل‌سازی کنترل ولتاژ شبکه‌های توزیع هوشمند که بتواند به‌طور هم‌زمان مشارکت

شبکه را از نظر حساسیت ولتاژ تقسیم‌بندی می‌کند، استفاده شده است [۸، ۱۲]. اولین اقدام در اجرای فرآیند تجزیه، محاسبه ماتریس حساسیت شبکه است. برای به دست آوردن ماتریس حساسیت به‌طور متعارف از معکوس ماتریس ژاکوبین حاصل از پخش بار نیوتون-رافسون استفاده می‌شود. اما چنان‌که توضیح داده شد، در سیستم‌های توزیع نمی‌توان از پخش بارهای متعارف شبکه انتقال استفاده کرد. از این‌رو نیاز است روش دیگری برای محاسبه ماتریس حساسیت استفاده شود که متناسب با خصوصیات شبکه‌های توزیع باشد. به این منظور، در این مقاله از روش محاسباتی نوین مطرح در [۱۳] برای به دست آوردن ماتریس حساسیت استفاده می‌شود:

$$\Lambda_{VQ} = \Lambda'_{VQ} + \varepsilon R \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، Λ'_{VQ} ماتریس حساسیتی با عنصرهایی بزرگ‌تر از مقدار اِپسیلون است که به معنای حفظ وابستگی‌های قوی در شبکه است. همچنین عبارت εR ماتریس باقی‌مانده است که به معنای وجود وابستگی‌های ضعیف بوده و تمام عنصرهای R ، کوچک‌تر یا مساوی یک هستند. حال از طریق ماتریس Λ'_{VQ} که حاصل از تجزیه اِپسیلون است، می‌توان به ساختار نواحی ایجادشده پی برد. بعد از تجزیه شبکه به نواحی کنترلی، ممکن است شین‌هایی در شبکه وجود داشته باشند که در هیچ ناحیه‌ای قرار نگرفته‌اند. باید توجه داشت که محدوده پوشش این نواحی متناسب با تغییرات مقدار اِپسیلون، قابل تغییر است.

با توجه به این نکته که شبکه بعد از اجرای تجزیه اِپسیلون، به نواحی کنترلی مستقل از هم و سیستم مخابراتی موردنیاز نیز به زیرسیستم‌های تقسیم می‌شود، سیستم ارتباطی موردنیاز کاهش قابل‌ملاحظه‌ای کرده و این روش را به یک روش کارآمد تبدیل می‌کند. بعد از مرحله تجزیه شبکه به نواحی کنترلی، مطابق با بخش سوم روند نمای نشان داده‌شده در شکل ۱ نیاز است که شین‌های کاندید تعیین شود.

شین‌هایی به‌عنوان شین کاندید در نظر گرفته می‌شوند که بیش‌ترین تأثیر را روی تابع هدف که همان بهبود پروفیل ولتاژ است، داشته باشند. تابع هدف در این تحقیق، به‌صورت کمینه‌سازی اختلاف ولتاژ شین‌ها از یک مقدار مرجع در نظر گرفته شده است. شین‌های کاندید در واقع شین‌هایی هستند که در شبکه توزیع باید برنامه‌ریزی شوند تا هوشمندسازی در سطح مصرف‌کنندگان نهایی بر روی آن‌ها اجرا شود و در واقع مجهز به تجهیزاتی شوند که این بستر را برای آن‌ها فراهم می‌کنند.

$$f = \sum_{n=1}^{NB} [V_n - V_{spec}]^2 = \sum_{n=1}^{NB} [\eta_n]^2 \quad (۲)$$

که در آن:

$$\eta_n = V_n - V_{spec} \quad (۳)$$

مصرف‌کنندگان نهایی و منابع تولیدپراکنده را مدل کند، ارائه نشده است.

در ادامه این مقاله و در بخش دوم به مدل‌سازی مسئله کنترل توزیع‌شده ولتاژ باوجود منبع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت پرداخته شده و ضمن تشریح چگونگی محاسبه ماتریس حساسیت و تجزیه شبکه به نواحی کنترلی، به نحوه محاسبه شین‌های کاندید پرداخته می‌شود. در بخش سوم نیز نتایج شبیه‌سازی حاصل از اجرای روش پیشنهادی روی سیستم‌های آزمایش نمونه ارائه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. بخش چهارم پایان‌بخش این مقاله است که به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مدل‌سازی کنترل توزیع‌شده باوجود منابع تولیدپراکنده

در این بخش به مدل‌سازی مسئله کنترل توزیع‌شده پرداخته می‌شود. کنترل توزیع‌شده، به علت ناکارآمدی کنترل مرکزی در شبکه‌های هوشمند و نیز به دلیل اقتصادی نبودن نصب تجهیزات کنترل هوشمند بر روی تمامی شین‌های سیستم قدرت، به‌عنوان گزینه‌ای که از نظر زیرساخت مخابراتی نسبت به کنترل مرکزی مناسب‌تر است، مطرح می‌شود. روند نمای کلی طرح پیشنهادی این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است.

در کنترل توزیع‌شده ولتاژ شبکه‌های توزیع، به‌منظور عملیاتی و کارآمد نمودن طرح، ابتدا باید شین‌های کاندید از بین شین‌های مختلف شبکه تعیین شود، سپس با استفاده از روشی مناسب، شبکه به چند ناحیه تقسیم‌شده و در انتها میزان بهینه توان راکتیو تزریق‌شده شین‌های کاندید برای بهبود پروفیل ولتاژ توسط روش‌های بهینه‌سازی تعیین می‌گردد. بالا بودن نسبت R/X در شبکه‌های توزیع در مقابل شبکه‌های انتقال باعث شده که روش‌های سنتی پخش بار شبکه‌های انتقال دیگر کارآمد نباشد. از این‌رو نیاز است که برای اجرای پخش بار و محاسبه ماتریس حساسیت در شبکه‌های توزیع، از روش‌های کارآمدی که متناسب با خصوصیات شبکه توزیع بوده و از همگرایی مناسبی برخوردار است، استفاده کرد. روش پخش‌باری که در این مقاله از آن استفاده شده است، پخش‌بار سیستم‌های توزیع مبتنی بر ماتریس‌های جریان تزریقی شین به جریان شاخه^۷ (BIBC) و جریان شاخه به ولتاژ شین^۸ (BCBV) است [۱۰، ۱۱]. این پخش‌بار در مقایسه با دیگر پخش‌بارهای مطرح در سیستم‌های توزیع، دارای سرعت اجرای بالا بوده و برای تحلیل‌های زمان واقعی^۹، مناسب است.

مطابق با بخش دوم روند نمای شکل ۱، به‌منظور کنترل توزیع‌شده ولتاژ در یک شبکه، در ابتدا باید شبکه به چند ناحیه تقسیم شود که نسبت به هم دارای حساسیت کم‌تری هستند [۸]. به‌منظور تجزیه یک شبکه به چند ناحیه کنترلی، باید از روش‌هایی استفاده کرد که شبکه را بر اساس حساسیت شین‌ها تقسیم می‌کند. در این مقاله از روش تجزیه اِپسیلون به‌عنوان روشی کارآمد و مناسب که

برای تعیین میزان توان راکتیو در دسترس بار، باید میزان حضور بار الکتریکی در شبکه مشخص شود. میزان حضور یک بار در شبکه را می‌توان عملاً با ضریب مشارکت آن یکی دانست. در واقع ضریب مشارکت بیانی احتمالی از میزان حضور یک بار الکتریکی در شبکه است. با توجه به فناوری‌های موجود در ادوات الکترونیک قدرت، در نسل جدید بارهای الکتریکی این امکان فراهم شده است که بار بتواند در حالت خاموشی هم با شبکه تبادل توان راکتیو داشته باشد [۱۵، ۱۴]. بارهای الکتریکی در حالت خاموشی، توان راکتیو بیشتری نسبت به حالت روشن بودن، در دسترس دارند و علت آن این است که هیچ مقداری از ظرفیت ادوات الکترونیک قدرت در حالت خاموش بودن توسط توان اکتیو اشغال نشده است؛ ولی در حالتی که مصرف‌کننده روشن است، توان اکتیو مقداری از ظرفیت ادوات الکترونیک قدرت را اشغال می‌کند و موجب می‌شود توان راکتیو کم‌تری برای تزریق به شبکه در اختیار باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، نحوه‌ی به دست آوردن توان راکتیو متوسط قابل تحویل به شبکه ARP به صورت رابطه (۷) است.

$$ARP(i) = P_{on,i} \times Q_{on,i}^{accessible} + (1 - P_{on,i}) \times Q_{off,i}^{accessible} \quad (6)$$

که در آن:

$P_{on,i}$: ضریب مشارکت؛

$Q_{on,i}$: توان راکتیو در دسترس در حالت روشن بودن واحد؛

$Q_{off,i}$: توان راکتیو در دسترس در حالت خاموش بودن واحد؛

گروه‌بندی مصرف‌کنندگان که بر اساس توان راکتیو در دسترس است، تأثیر بسزایی بر روی انتخاب شین‌های کاندید دارد. با توجه به توضیحات فوق، عبارت جدیدی به صورت رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$\nabla g = |2\eta\Lambda_{VQ} \times ARP(i)| \quad (7)$$

با توجه به مقادیر ∇g ، شین‌های با حساسیت بالاتر، کنترل بهتری بر روی پروفیل ولتاژ دارند و شین‌هایی با حساسیت صفر هیچ تأثیری بر روی پروفیل ولتاژ ندارند. به تعداد k از بالاترین مقادیر بردار ∇g ، به عنوان شین‌های کاندید انتخاب می‌شوند. به منظور به دست آوردن شرایط اولیه برای اجرای پخش بار و سپس به دست آوردن شین‌های کاندید نیاز به پیروی از روند خاصی است که در روند نمای موجود در شکل ۱ در قسمت اول نشان داده شده است.

همان‌طور که در بخش اول روند نمای شکل ۱ نشان داده شده، در بخش محاسبه حالت اولیه برای اجرای پخش بار، ابتدا فرض بر این است که تمام شین‌های بار (PQ)، شین کاندید هستند، سپس میزان تزریق توان راکتیو بهینه شین‌ها به شبکه به منظور بهبود تابع هدف، توسط الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. در نهایت با اجرای مجدد پخش بار با مقادیر توان راکتیو به دست آمده از گام قبل، ماتریس حساسیت توسط رابطه (۷) محاسبه شده و سپس k تعداد از بالاترین مقادیر ماتریس، به عنوان شین‌های کاندید در نظر گرفته می‌شود.

در رابطه (۲)، V_{spec} ولتاژ مرجع مطلوب است. همچنین، به منظور اجرایی بودن طرح پیشنهادی، تلاش می‌شود مقدار تزریق توان راکتیو در شین‌ها، کمینه گردد. این کار از طریق اضافه کردن یک عبارت جریمه برای تزریق توان راکتیو به تابع هدف مذکور میسر می‌گردد. این کار به منظور مدیریت منابع گسترده توان راکتیو و استفاده از آن‌ها در شرایطی که تزریق توان راکتیو آن‌ها تأثیر بسزایی در بهبود پروفیل ولتاژ داشته باشد، صورت می‌گیرد. به این ترتیب از استفاده بیهوده از ادوات پرهیز می‌شود. با توجه به توضیحات داده شده، رابطه ارائه شده برای تابع هدف (رابطه (۲)) به شکل رابطه (۴) اصلاح می‌شود.

$$g = \min \left(\sum_{n=1}^{NB} [V_n - V_{spec}]^2 + \beta \sum_{m=1}^{NM} |\Delta Q_m| \right) \quad (4)$$

در رابطه اخیر، $|\Delta Q_m|$ تغییرات خالص توان راکتیو شین m تعداد شین‌های کاندید، NB تعداد کل شین‌ها، V_{spec} ولتاژ مرجع مطلوب و β ضریب جریمه متناظر با تغییرات توان راکتیو است. باید توجه داشت که در مسئله بهینه‌سازی مذکور، متغیرهای کنترلی توان راکتیو تزریقی شین‌های کاندید هستند. همچنین، مشتق نسبی تابع g نسبت به توان راکتیو ∇g ، می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین حساسیت شین‌های مختلف در نظر گرفته شود:

$$\nabla g = |2\eta\Lambda_{VQ}| \quad (5)$$

در رابطه (۵)، Λ_{VQ} مشتق نسبی ولتاژ نسبت به توان راکتیو است. اما باید توجه داشت که این معیار شرایط واقعی را پوشش نمی‌دهد؛ زیرا ممکن است شینی از دید رابطه اخیر از حساسیت بالایی برخوردار باشد؛ اما در عمل منابع راکتیو در دسترس کمی برای کنترل ولتاژ داشته باشد. بنابراین باید معیاری را در نظر گرفت که توان راکتیو در دسترس را هم در به دست آوردن شین‌های کاندید دخیل نماید. این موضوع منجر به موضوع گروه‌بندی بار بر اساس میزان کنترل‌پذیری می‌شود.

میزان کنترل‌پذیری بودن بار یک شین به عواملی از قبیل ساختار بار و توان راکتیو در دسترس بار بستگی دارد که می‌تواند به عنوان معیارهایی برای گروه‌بندی بارها به کار روند. ساختار بار به مشخصات کنترلی و ادوات الکترونیک قدرت مورد استفاده در بار وابسته است و مشخص می‌کند که به چه میزان امکان کنترل توان راکتیو از نظر ساختار فیزیکی فراهم است. در حالت دیگر، میزان کنترل‌پذیری به ظرفیت‌های ادوات استفاده شده و توان اکتیو بار بستگی دارد که میزان توان راکتیو در دسترس برای در اختیار گذاشتن به شبکه را مشخص می‌کند. به علت در دسترس نبودن اطلاعات کافی در مورد ساختار مصرف‌کنندگان، تنها توان راکتیو در دسترس به عنوان عامل اصلی برای دسته‌بندی بار الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. این دسته‌بندی بارهای الکتریکی تأثیر بسزایی بر انتخاب شین‌های کاندید دارد.

بررسی قرار می‌گیرد، به‌منظور به دست آوردن مقدار توان راکتیو در دسترس مصرف‌کنندگان نهایی باید تحلیل مجزایی در یک مدت معین در یک خانه هوشمند انجام شود و روابطی بین توان اکتیو، راکتیو و ظرفیت مبدل‌های موجود به دست آید و سپس توان راکتیو در دسترس از آن طریق حساب شود؛ اما با توجه به این نکته که این‌چنین تجزیه‌وتحلیل‌هایی خارج از بحث این مقاله است، به‌منظور ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی، توان راکتیو در دسترس از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$Q_m^{accessible} = \frac{1}{2} \times (P_m + Q_m), \quad m = 1, \dots, NM \quad (11)$$

که در رابطه (۱۱)، P_m و Q_m به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار در شین‌های کاندید هستند.

۳- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این قسمت از شبکه‌های آزمایش ۳۳ شینه IEEE و ۶۹ شینه IEEE به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است. داده‌های عددی مربوط به این شبکه از مراجع [۱۶-۱۸] استخراج شده است.

۳-۱- شبیه‌سازی بر روی شبکه آزمایش ۳۳ شینه

در بحث تجزیه نواحی، دو سناریو برای مقدار عددی اِپسیلون در این شبکه نمونه در نظر گرفته شده است:

سناریوی اول: مقدار اِپسیلون برابر با ۰/۰۰۰۰۵ باشد.

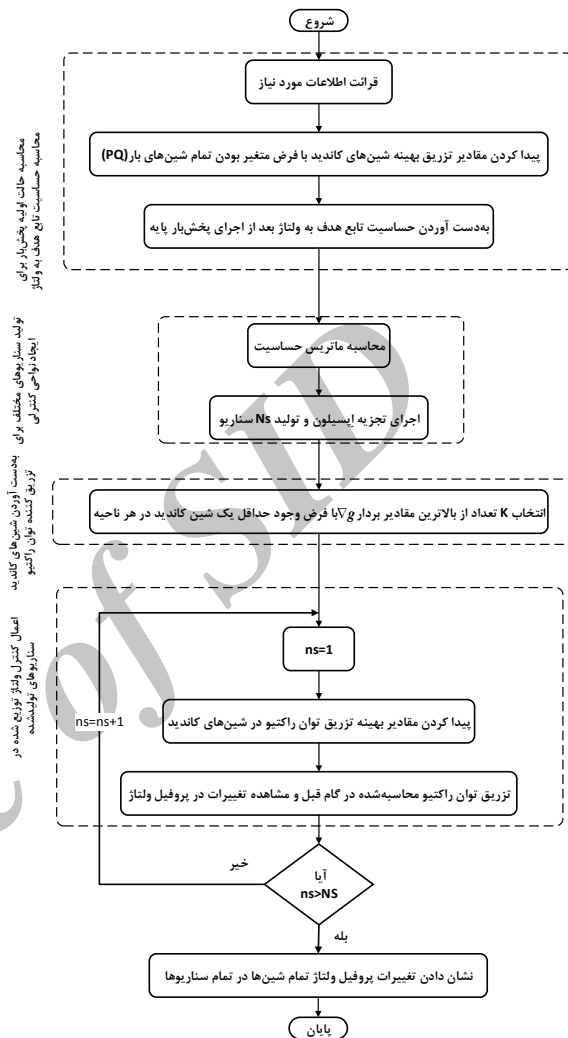
سناریوی دوم: مقدار اِپسیلون برابر با ۰/۰۰۰۲۵ باشد.

در این بخش از مقاله، با توجه به انجام مطالعه روی یک شبکه آزمایش نمونه و به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات واقعی درباره‌ی ضرایب مشارکت، مقادیر عددی فرضی برای متوسط توان راکتیو در دسترس مربوط به هر شین فرض شده که جزئیات مقادیر عددی مفروض مذکور در بخش ضمایم ارائه شده است. بدیهی است برای استفاده از مدل ارائه‌شده در سیستم‌های واقعی می‌توان از اطلاعات مربوط به آن و بدون هیچ محدودیتی استفاده نمود.

در این مقاله تأثیر منبع تولیدپراکنده بر روی کنترل ولتاژ با استفاده از مصرف‌کنندگان نهایی نشان داده خواهد شد. منابع تولید پراکنده مورد استفاده در این مقاله از نوع ولتاژ ثابت هستند که در مراجع مذکور به‌اندازه کافی به آن پرداخته نشده است. منابع ذکر شده در شین‌های ۱۲ و ۲۸ نصب شده‌اند و داری ظرفیت ۲۰۰ کیلووات هستند. این نوع منابع، ولتاژ شین‌های متصل به خود را در مقدار تنظیمی ثابت نگه می‌دارند.

به‌منظور کنترل توزیع‌شده ولتاژ و محاسبه مقادیر بهینه تزریق توان راکتیو شین‌های کاندید مطابق با بخش چهارم روند نمای شکل ۱، از الگوریتم ژنتیک [۱۹] استفاده شده است. پارامترهای کنترلی الگوریتم ژنتیک مورد استفاده، در جدول ۱ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که در این مقاله از الگوریتم ژنتیک تنها به‌عنوان یک

سپس مطابق با بخش چهارم روند نمای نشان داده‌شده در شکل ۱ با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه توان راکتیو تزریقی شین‌های کاندید به‌دست‌آمده می‌آید.



شکل ۱: روند نمای کنترل پیشنهادی

تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی به‌صورت عبارت‌های (۸) الی (۱۰) هستند.

$$Obj = \min \left(\sum_{n=1}^{NB} [V_n - V_{spec}]^2 + \alpha \sum_{m=1}^{NM} [\Delta Q_m] \right) \quad (8)$$

$$V_{lower} < V_n < V_{upper}, \quad n = 1, \dots, N_{sub-area} \quad (9)$$

$$\Delta Q_m < Q_m^{accessible}, \quad m = 1, \dots, NM \quad (10)$$

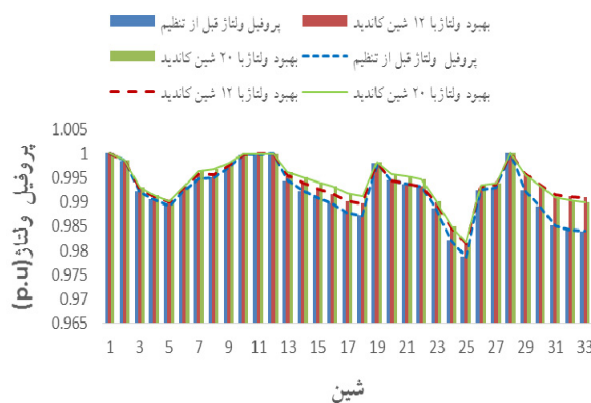
در روابط اخیر، V_{lower} و V_{upper} به ترتیب حدود مجاز بالا و پایین ولتاژ، V_{spec} ولتاژ مرجع مطلوب (ولتاژ مرجع در این مقاله یک است)، ΔQ_m توان راکتیو تزریق‌شده در شین‌های کاندید، α ضریب جریمه، NM تعداد شین‌های کاندید، NB تعداد شین‌ها و $Q_m^{accessible}$ بیشینه توان راکتیو قابل تزریق به شبکه است. با توجه به اینکه در این مقاله تجزیه‌وتحلیل زمانی صورت نمی‌گیرد و یک‌لحظه از شبکه مورد

جدول ۲: شین‌های کاندید با حضور منبع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت در سناریوی اول

شین‌های کاندید										
۱۲ شین	۷	۱۴	۱۶	۱۷	۱۸	۲۲	۲۴	۲۵	۳۰	۳۱
	۳۲	۳۳	-	-	-	-	-	-	-	-
۲۰ شین	۴	۷	۸	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۲۰
	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳

جدول ۳: مقادیر تزریق شده توان راکتیو شین‌های کاندید با حضور منبع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت در سناریوی اول

شین										
۱۲ شین	۷	۱۴	۱۶	۱۷	۱۸	۲۲	۲۴	۲۵	۳۰	۳۱
	۱۵۰	۱۰۰	۴۰	۴۰	۰	۰	۳۱۰	۳۱۰	۴۰۰	۱۰۰
۲۰ شین	۴	۷	۸	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۲۰
	۱۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۴۷/۵	۱۰۰	۳۵	۴۰	۴۰	۰	۶۵
۱۲ شین	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳
	۶۵	۰	۷۰	۳۱۰	۳۱۰	۹۵	۴۰۰	۱۱۰	۱۵۵	۳۰/۵



شکل ۳: پروفیل ولتاژ بعد و قبل از کنترل توزیع شده ولتاژ با ۱۲ و ۲۰ شین کاندید

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تزریق توان راکتیو در شین‌های ۱۸ و ۲۲ صفر است.

۳-۱-۲- سناریوی دوم

مطابق با شکل ۴، شبکه مورد مطالعه پس از اجرای تجزیه اِپسِلون، به ۵ ناحیه تقسیم شده است. جدول ۴ نتایج حاصل از انتخاب شین‌های

ابزار بهینه‌سازی استفاده شده و مقایسه بین الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی و کاربرد آن‌ها در حوزه مطالعه کنترل ولتاژ شبکه‌های هوشمند در کارهای آتی بررسی خواهد شد.

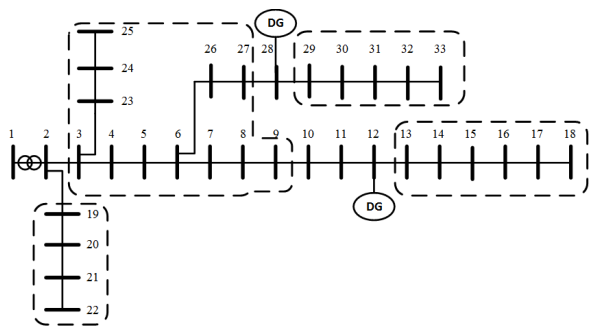
در ادامه، به مطالعه مجزای هرکدام از سناریوهای اشاره شده پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- سناریوی اول

در این سناریو مطابق با اجرای تجزیه اِپسِلون، ۴ ناحیه حاصل می‌شود که در شکل ۲ قابل مشاهده است.

با استفاده از بخش ابتدایی روند نمای توضیح داده شده در شکل ۱، شین‌های کاندید تزریق کننده توان راکتیو، به دست آمده و در جدول ۲ آورده شده است. سپس مقادیر بهینه توان راکتیو با اجرای کنترل توزیع شده در هر ناحیه به دست می‌آیند.

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، اکثر شین‌های انتخاب شده در نواحی انتهایی هستند و دلیل این موضوع نیز این است که وابستگی ولتاژ در شین‌های انتهایی نسبت به تزریق توان راکتیو بیشتر است. مطابق با شکل ۳، با انجام کنترل توزیع شده، پروفیل ولتاژ به‌طور فراوانی بهبود پیدا کرده و بهبود ولتاژ بیشتر در نواحی که از ولتاژ پایینی برخوردار بوده‌اند، صورت می‌گیرد. از این رو تزریق توان راکتیو بیشتر در شین‌های کاندیدی صورت می‌گیرد که به بهبود ولتاژ شین‌های ولتاژ پایین کمک بیشتری کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد شین‌های کاندید از ۱۲ به ۲۰ شین، باعث بهبود افزون‌تر پروفیل ولتاژ شده است. در این حالت، مشاهده می‌شود که حضور ۲۰ شین کاندید، حول شین‌های ۲۰ تا ۲۴ و ۷ تا ۱۰ بهبود ولتاژ افزایش می‌یابد و علت آن، امکان تزریق توان راکتیو افزون‌تر با افزایش تعداد شین‌ها است. به‌عنوان نمونه، مقادیر تزریق توان راکتیو در شین‌های کاندید در سناریوی اول در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: نواحی تجزیه شده در سناریوی اول

جدول ۱: پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم ژنتیک

جایه جایی	تولید مجدد	جهش	تقاطع	جمعیت	تعداد نسل
۰/۱	۰/۱	۰/۷	۰/۱	۱۰۰	۲۰۰

در سناریوی یک بهتر از سناریوی دو است و این تفاوت بیش تر در شین‌هایی با ولتاژ پایین وجود دارد.

۳-۲- شبیه‌سازی بر روی شبکه آزمایش ۶۹ شینه

به‌منظور بررسی یک شبکه در ابعاد بزرگ‌تر، در این قسمت کنترل توزیع‌شده ولتاژ در شبکه ۶۹ شینه IEEE در مقدار اِپسیلون ۰/۰۰۰۰۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت در شین‌های ۱۲ و ۵۴ نصب شده‌اند و دارای ظرفیت ۲۰۰ کیلووات هستند. این نوع منابع، ولتاژ شین‌های متصل به خود را در مقدار تنظیمی ثابت نگه می‌دارند. توان راکتیو متوسط فرض‌شده برای هر شین در بخش ضمایم آورده شده است.

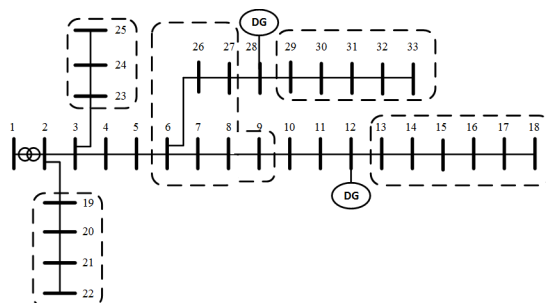
در این شبکه مطابق با شکل ۷، با استفاده از تجزیه اِپسیلون ۵ ناحیه حاصل می‌شود که عموماً شین‌های انتهایی شبکه را پوشش می‌دهند. با استفاده از بخش ابتدایی روند نمای توضیح داده‌شده در شکل ۱، شین‌های کاندید تزریق کننده توان راکتیو به دست آمده و در جدول ۵ آورده شده است. سپس مقادیر بهینه توان راکتیو با اجرای کنترل توزیع‌شده در هر ناحیه به دست می‌آیند. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده شده است، شین‌های کاندید انتخاب‌شده بیش تر در نواحی هستند که ولتاژ دارای مشکل بیش تری است.

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با انجام کنترل توزیع‌شده، پروفیل ولتاژ بهبود یافته؛ اما در این شبکه برخلاف شبکه ۳۳ شینه افزایش تعداد شین‌های کاندید تأثیری بر بهبود بیش تر ولتاژ نخواهد داشت و درواقع افزایش تعداد شین‌های کاندید در این شبکه تنها هزینه سیستم را افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، مشکل اصلی ولتاژ در شین‌های ۱۴ تا ۲۷ و ۵۵ تا ۶۵ است و با انتخاب شین‌های کاندید در این دو ناحیه، پروفیل ولتاژ این شین‌ها به حد زیادی بهبود می‌یابد.



شکل ۶: مقایسه بین پروفیل ولتاژ دو سناریوی مختلف شبیه‌سازی

کاندید را در هر سناریو نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مشابه جدول ۲ اکثر شین‌ها، شین انتهایی هستند و قید حداقل وجود یک شین کاندید در هر ناحیه کنترلی برقرار است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، کنترل توزیع‌شده در هر ناحیه اجراشده و مقادیر بهینه توان راکتیو شین‌های کاندید به دست می‌آیند.

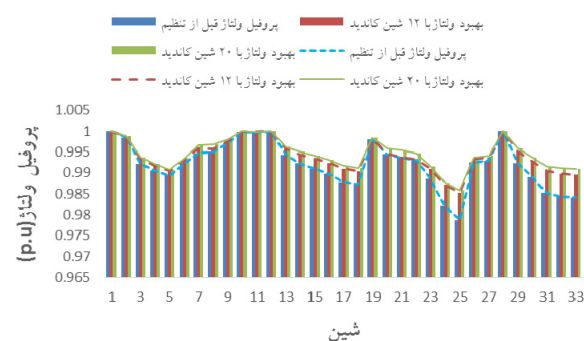


شکل ۴: نواحی تجزیه‌شده در سناریوی دوم با حضور منبع تولیدپراکنده

جدول ۴: شین‌های کاندید با حضور منابع تولید پراکنده ولتاژ ثابت در سناریوی دوم

شین‌های کاندید	
۲	۷ ۱۴ ۱۷ ۱۸ ۲۲ ۲۴ ۲۵ ۲۹ ۳۰ ۳۱
۳	۳۲ ۳۳ - - - - - - - -
۱	۷ ۸ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶ ۱۷ ۱۸ ۲۰ ۲۱
۳	۲۲ ۲۳ ۲۴ ۲۵ ۲۶ ۲۹ ۳۰ ۳۱ ۳۲ ۳۳

مطابق با شکل ۵، پروفیل ولتاژ بهبود زیادی پیدا کرده و افزایش تعداد شین‌های کاندید نیز بر میزان بهبود پروفیل ولتاژ تأثیر مثبت گذاشته است. باید توجه کرد که بهبود پروفیل ولتاژ با افزایش تعداد شین‌های کاندید، بیش تر حول شین‌های ۳۲ و ۳۳ اتفاق می‌افتد.



شکل ۵: پروفیل ولتاژ بعد و قبل از کنترل توزیع‌شده ولتاژ با ۱۲ و ۲۰ شین کاندید

به‌منظور مقایسه دو سناریو، نمودارهای مربوط به پروفیل ولتاژ در حالت اعمال ۲۰ شین کاندید در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان بهبود پروفیل ولتاژ

شین‌های کاندید بر بهبود بیش‌تر ولتاژ تأثیری نداشته و تنها هزینه‌های سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین بررسی‌ها نشانی می‌دهد با انتخاب بهینه شین‌های کاندید و اجرای چارچوب پیشنهادی، پروفیل ولتاژ به‌طور زیادی در نواحی تحت تأثیر شین‌های انتخابی بهبود می‌یابد.

پیوست‌ها

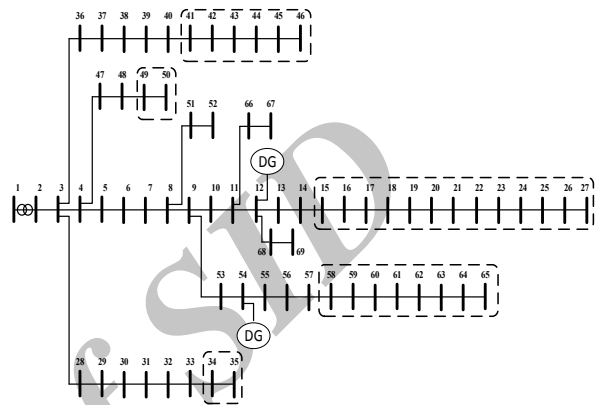
مقادیر متوسط توان راکتیو در دسترس برای سیستم‌های آزمایش تحت مطالعه، در جدول‌های (الف) و (ب) ارائه شده است.

مراجع

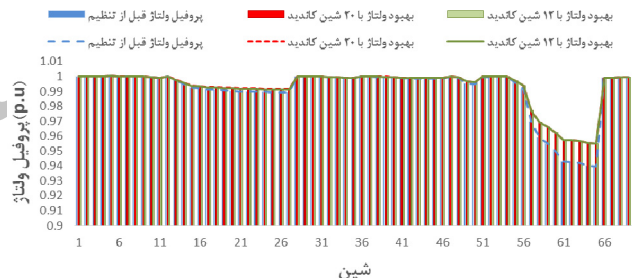
- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Tata McGraw-Hill Education, 1994.
- [2] R.K.K.M. Rogers, H. Khurana, and T.J. Overbye, "Smart-grid-enabled load and distributed generation as a reactive resource," *IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies*, 2010.
- [3] R.K.K.M. Rogers, H. Khurana, A. Aquino-Lugo, and T.J. Overbye, "An authenticated control framework for distributed voltage support on the smart grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 40-47, 2010.
- [4] A. Aquino-Lugo, R. Klump, and T.J. Overbye, "A control framework for the smart grid for voltage support using agent-based technologies," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 173-180, 2011.
- [5] A.V. Vaccaro, G. Velotto, and A.F. Zobaa, "A decentralized and cooperative architecture for optimal voltage regulation in smart grids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4593-4602, 2011.
- [6] C.J. RECIO, *The Utilization of Power Converters In Consumer Products For Distributed Reactive Power support*, M.Sc. Thesis, Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Chicago, IL, 2012.
- [7] G.F. Anna, R.D. Fazio, and M. Russo, "Decentralized control of distributed generation for voltage profile optimization in smart feeders," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1586-1596, 2013.
- [8] L. Yu, D. Czarkowski and F.D. León, "Optimal distributed voltage regulation for secondary networks with DGs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 959-967, 2012.
- [9] M.D.B. Brenna, E.D. Berardinis, L.D. Carpini, F. Foiadelli, P. Paulon, P. Petroni, G. Sapienza, G. Scrosati, and D. Zaninelli, "Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 877-885, 2013.
- [10] J.H. Teng, "A Direct approach for distribution system load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 882-887, 2003.
- [11] J.H. Teng, "Modelling distributed generations in three-phase distribution load flow," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, pp. 330-340, 2008.
- [12] M. Sezer, and D. Šiljak, "Nested ε -decompositions and clustering of complex systems," *Automatica*, vol. 22, pp. 321-331, 1986.

جدول ۵: مقادیر تزریق‌شده توان راکتیو شین‌های کاندید با حضور منابع تولید

پراکنده ولتاژ ثابت در شبکه ۶۹ شینه											
شین‌های کاندید											
شینه	۱۷	۱۸	۲۱	۳۴	۴۵	۴۹	۵۰	۵۹	۶۱	۶۲	
	۶۴	۶۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-
شینه	۱۶	۱۷	۱۸	۲۰	۲۱	۲۲	۲۴	۲۶	۲۷	۳۴	
	۴۳	۴۵	۴۶	۴۹	۵۰	۵۹	۶۱	۶۲	۶۴	۶۵	



شکل ۷: نواحی تجزیه‌شده در شبکه ۶۹ شینه با حضور منبع تولید پراکنده ولتاژ ثابت



شکل ۸: پروفیل ولتاژ قبل و بعد از کنترل توزیع‌شده با ۱۲ و ۲۰ شین کاندید

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در حالت وجود منبع تولید پراکنده ولتاژ ثابت و نسل جدید مصرف‌کنندگان نهایی بر روی شبکه ۳۳ شینه نشان می‌دهد که با افزایش تعداد نواحی کنترلی در کنترل توزیع‌شده، بهبود ولتاژ کم‌تری ایجاد شده است. همچنین، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی حاکی از آن است که با توجه به توسعه زیرساخت‌های شبکه‌ی هوشمند در نسل‌های جدید مصرف‌کنندگان نهایی و امکان اجرای واقعی کنترل توزیع‌شده، پروفیل ولتاژ بهبود قابل‌توجهی پیدا کرده و در حالتی که تعداد شین‌های کاندید (شین‌هایی که حاوی نسل جدید مصرف‌کنندگان نهایی بوده و همچنین دارای پتانسیل اثر بخشی بیش‌تری در تابع هدف هستند) بیش‌تر باشد، ولتاژ نیز بهتر صورت می‌گیرد. همچنین، بررسی‌های انجام‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که برخلاف شبکه ۳۳ شینه، در شبکه ۶۹ شینه افزایش

جدول ب: مقادیر متوسط توان راکتیو سیستم ۶۹ شینه IEEE

شماره شین	توان راکتیو متوسط در دسترس (kVAR)	شماره شین	توان راکتیو متوسط در دسترس (kVAR)
۲	۰	۳۶	۱۷/۵۷۴۷۷
۳	۰	۳۷	۱۸/۶۲۵۲۹
۴	۰	۳۸	۰
۵	۰	۳۹	۱۷/۸۷۴۲۳
۶	۳/۸۳۰۵۱	۴۰	۱۷/۷۳۶۹۲
۷	۱۸/۱۸۲۹۷	۴۱	۰/۹۶۲۰
۸	۴۹/۹۸۹۳	۴۲	۰
۹	۲۳/۱۳۹۵۲	۴۳	۴/۴۵۵۸۳
۱۰	۲۱/۳۱۰۲۶	۴۴	۰
۱۱	۱۱۳/۷۲۰۹	۴۵	۲۸/۸۷۱۷۴
۱۲	۱۰۴/۹۴۹۹	۴۶	۲۷/۴۴۶۱۱
۱۳	۵/۹۵۷۸۲۶	۴۷	۰
۱۴	۵/۶۰۲۲۵۲	۴۸	۶۰/۸۸۶۱۹
۱۵	۰	۴۹	۲۸۶/۳۵۹۵
۱۶	۱۵/۰۶۶۱۳	۵۰	۲۸۷/۹۷۰۵
۱۷	۴۰/۵۲۸۸	۵۱	۲۹/۷۵۱۵۳
۱۸	۴۰/۵۵۹۷	۵۲	۲/۶۲۰۹
۱۹	۰	۵۳	۳/۳۰۳۹۱۴
۲۰	۰/۷۱۱۲۲	۵۴	۱۸/۶۰۷۵۵
۲۱	۸۶/۳۱۵۳	۵۵	۱۷/۹۵۹۲۵
۲۲	۳/۵۰۹۲۱۲	۵۶	۰
۲۳	۰	۵۷	۰
۲۴	۱۸/۷۶۸۷۷	۵۸	۰
۲۵	۰	۵۹	۷۴/۱۲۴۹۱
۲۶	۱۰/۱۵۱۲۵	۶۰	۰
۲۷	۱۱/۱۴۱۵۷	۶۱	۸۹۷/۰۳۶۳
۲۸	۱۸/۴۳۲۲	۶۲	۲۲/۴۷۶۹۲
۲۹	۱۹/۰۹۹۳۷	۶۳	۰
۳۰	۰	۶۴	۱۷۸/۴۰۷۳
۳۱	۰	۶۵	۴۲/۳۱۸۵
۳۲	۰	۶۶	۱۳/۴۶۵۲۴
۳۳	۱۰/۵۹۴۰۱	۶۷	۱۲/۴۰۷۰۷
۳۴	۱۳/۹۰۴۴۳	۶۸	۲۰/۳۸۴۹۳
۳۵	۴/۶۴۳۷	۶۹	۲۱/۲۲۳۹

[13] D.K. Khatod, V. Pant, and J. Sharma, "A novel approach for sensitivity calculations in the radial distribution system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, 2006.

[14] M.H. Rashid, *Power Electronics handbook*, Academic Press, 2001.

[15] J. Cody, Ö. Göl, Z. Nedic, A. Nafalski, and A. Mohtar, "Regenerative braking in an electric vehicle," *Branzowy Condo Research and Development Electrical Machines*, Komel, 2009.

[16] P.R. Babu, C. Rakesh, M. Kumar, G. Srikanth, and D.P. Reddy, "A novel approach for solving distribution networks," *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pp. 1-5, 2009.

[17] M.E. Baran, and F.F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, 1989.

[18] M.E. Baran, and F.F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 725-734, 1989.

[19] S.S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley & Sons, 2009.

جدول الف: مقادیر متوسط توان راکتیو سیستم ۳۳ شینه IEEE

شماره شین	توان راکتیو متوسط در دسترس (kVAR)	شماره شین	توان راکتیو متوسط در دسترس (kVAR)
۲	۷۴/۵	۱۸	۵۲/۷۶
۳	۵۲/۸۵	۱۹	۵۵/۳۳
۴	۹۰/۱۶	۲۰	۵۵/۹۲
۵	۳۷/۲۵۲	۲۱	۶۰/۸۸
۶	۲۲/۹۵	۲۲	۵۵/۹۷
۷	۱۳۰/۳۵	۲۳	۵۶/۲۵
۸	۱۲۵/۵۳	۲۴	۳۷۰/۱۳
۹	۳۸/۲۹	۲۵	۲۶۱/۱۹
۱۰	۳۳/۸۵	۲۶	۳۶/۳۳
۱۱	۳۳/۱۵	۲۷	۳۵/۵۵
۱۲	۴۰/۲۴	۲۸	۳۵/۰۵
۱۳	۳۹/۸۶	۲۹	۷۵/۵۴
۱۴	۹۱/۰۴	۳۰	۳۴۰/۵۷
۱۵	۳۱/۸۴	۳۱	۹۵/۰۸
۱۶	۳۷/۰۷	۳۲	۱۳۶/۵۴
۱۷	۲۳/۱۹	۳۳	۴۳/۳۵

زیر نویس ها

⁶ Distributed voltage control

⁷ Bus-Injection to Branch-Current (BIBC)

⁸ Branch-Current to Bus-Voltage (BCBV)

⁹ Real Time

¹ Incident Command System (ICS)

² Multi-agent

³ Regulation

⁴ Power Factor Controller (PFC)

⁵ Offline