کنترل ولتاژ توزیع شده در شبکه‌های توزیع در حضور گسترده منابع فتوولتائیک با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی

هادی یوسفی[1]، دانشجوی دکترا، سید اصغر غلامیان[1]، دانشیار، علیرضا ذکریازاده[2]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- بابل- ایران
h.yousefi@stu.nit.ac.ir, gholamian@nit.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر کامپیوتر- دانشگاه علم و فناوری مازندران - بهشهر- ایران
zakaria@mazust.ac.ir

چکیده: نفوذ بالای واحدهای فتوولتائیک در سطح شبکه توزیع ممکن است منجر به چالش افزایش ولتاژ همزمان با ساعات حداکثر تولید این منابع شود. لذا نیاز به اجرای برنامه‌های کنترل ولتاژ با لحاظ کردن ویژگی تاثیر ناحیه‌ای توان راکتیو است. در این مقاله مدلی برای مدیریت توان راکتیو در شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده فتوولتائیک ارائه شده است که از قابلیت اینورتر واحدهای فتوولتائیک جهت تامین توان راکتیو مورد نیاز استفاده می‌کند. در روش پیشنهادی، با توجه به تاثیر ناحیه‌ای توان راکتیو، ابتدا شبکه توزیع با استفاده از یک روش خوشه‌بندی به بخش‌های کوچکتری تقسیم می‌شود. سپس، از الگوریتم توزیع شده مسیر متناوب ضرایب (ADMM) برای برنامه مدیریت ولتاژ و توان راکتیو به صورت توزیع شده در بخش‌های مختلف استفاده می‌شود. همچنین، عدم قطعیت تولید منابع فتوولتائیک با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی مدلسازی شده است. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع واقعی که مجهز به مولدهای تولیدپراکنده است مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد استفاده از روش کنترل ولتاژ پیشنهادی موجب استفاده حداقل از ظرفیت توان راکتیو و سرعت بالای انجام محاسبات می‌شود.

واژه های کلیدی: شبکه توزیع، منابع فتوولتائیک، کنترل ولتاژ، روش خوشه‌بندی، روش توزیع شده.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۴/۰۱

نام نویسنده‌ی مسئول: سید اصغر غلامیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های شبکه‌های توزیع در گذشته، پدیده افت ولتاژ در زمان‌های اوج بار بود. به علت ماهیت شعاعی و طولانی بودن شبکه، عموما در نقاط با فاصله بیشتر احتمال افت ولتاژ به خارج از محدوده مجاز وجود داشت. بر این اساس، نصب مولدهای تولید پراکنده و بانک‌های خازنی به عنوان یک راهکار تقویت ولتاژ شبکه مورد استفاده قرار می‌گرفت [۱]. در شبکه‌های فعلی اما چالش دیگری برای شبکه‌های توزیع مطرح شده است. با افزایش نفوذ مولدهای تولید پراکنده در سطح شبکه توزیع، امکان افزایش ولتاژ بیش از محدوده مجاز نیز وجود خواهد داشت [۲]. در حالت خاص، اگر تزریق توان این مولدها در زمان کم‌باری یا میان‌باری سیستم باشد احتمال بروز این پدیده افزایش می‌یابد. برای مثال، زمان اوج تولید مولدهای فتوولتائیک در ساعات میان روز است که عموماً مقارن با ساعات کم‌باری است و نتیجه آن افزایش ولتاژ در نقاط تزریق توان است [۳]. لذا نیاز به مدیریت توان راکتیو و به تبع آن کنترل ولتاژ در سطح شبکه است.

در مرجع [۴]، تاثیر اضافه شدن منابع انرژی پراکنده مبتنی بر اینورتر بر روی بهره‌برداری، کنترل، حفاظت و برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. این مرجع دید مناسبی پیرامون چالش‌های آینده سیستم توزیع در اثر افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده نظیر سیستم‌های فتوولتائیک ارائه می‌دهد. در مرجع [۵]، روشی ارتقا یافته برای کنترل ولتاژ در شبکه توزیع متناسب با نرخ افزایش سطح نفوذ سیستم‌های فتوولتائیک ارائه شده است که در آن برنامه‌ریزی توان راکتیو با استفاده از کنترل تپ‌چنجر زیر بار، تنظیم‌کننده ولتاژ پله‌ای و جبرانگر استاتیک توان راکتیو انجام شده است. در مرجع [۶]، روش مدیریت ولتاژ با درنظر گرفتن پارامترهای افت ضریب توان اینورتر واحدهای فتوولتائیک پیشنهاد شده است که موجب کاهش تغییرات شدید ولتاژ و استفاده حداقل از پله‌های تنظیم‌کننده‌های ولتاژ شده است. در مرجع [۷]، روش احتمالی تنظیم ولتاژ در شبکه توزیع ارائه شده است که در آن مدیریت ولتاژ با استفاده از قابلیت توان راکتیو اینورتر مولدهای فتوولتائیک به همراه نصب تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و جبرانگر استاتیک توان راکتیو انجام شده است.

با توجه به ماهیت تاثیر ناحیه‌ای توان راکتیو بر کنترل ولتاژ، ایده بخش‌بندی شبکه‌های توزیع بزرگ و پیچیده به شبکه‌های کوچکتر به منظور اجرای کنترل ولتاژ قابل تامل است [۸-۹]. در این ایده، کنترل ولتاژ مناسب در کل شبکه توزیع با انجام کنترل ولتاژ در هر کدام از بخش‌ها حاصل خواهد شد. در مقایسه با کنترل ولتاژ کل شبکه به روش متمرکز، در روش بخش‌بندی شبکه توزیع، ابعاد مسئله کاهش یافته لذا متغیرهای بهینه‌سازی و سرعت اجرای برنامه افزایش خواهد یافت. علت این امر، اجرا شدن برنامه‌های کنترل ولتاژ به صورت موازی در بخش‌های کوچکتر شبکه توزیع است. در مرجع [۱۰]، روش تنظیم ولتاژ آنلاین با استفاده از روش بهینه‌سازی تجمع ذرات پیشنهاد شده است که در آن با استفاده از ایده خوشه‌بندی، شبکه توزیع به چندین بخش کوچک کنترلی تقسیم شده است. در مرجع [۱۱]، یک روش کنترل ولتاژ با بهره‌گیری از قابلیت تنظیم ولتاژ اینورتر سیستم فتوولتائیک ارائه شده است. همچنین، کنترل ولتاژ با استفاده از بخش‌بندی شبکه توزیع به ناحیه‌های کوچکتر انجام شده است. در مرجع [۱۲]، یک روش کنترل ولتاژ بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی طیفی، برای بخش‌بندی شبکه توزیع ارائه شده است که در آن نفوذ بالای مولدهای فتوولتائیک مدنظر قرار گرفته است.

در شبکه‌های توزیع هوشمند، منابع تولید پراکنده به همراه ماهیت توزیع‌شده داده‌ها، پیچیدگی بهره‌برداری از شبکه را تا حد زیادی افزایش می‌دهد و نیاز به استفاده از روش‌های ریاضی توزیع شده در امور برنامه‌ریزی و بهره‌برداری را توجیه می‌کند. در سال‌های اخیر، رویکردهای مختلفی برای حل و بهینه‌سازی مسائل بهره‌برداری سیستم‌های قدرت به روش توزیع‌شده مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها بر مبنای رهاسازی لاگرانژ است [۱۳-۱۴]. در روش رهاسازی لاگرانژ، قیود اتصال بین زیرسیستم‌های مختلف شبکه توسط بکارگیری ضرایب لاگرانژ جداسازی می‌شوند که موجب ایجاد قابلیت جداسازی قسمت‌های مسئله می‌شود. در مرجع [۱۵]، یک روش رهاسازی لاگرانژ بر اساس ضرایب پویا برای حل مسئله توزیع اقتصادی بار به روش توزیع شده ارائه شده است. بر پایه رهاسازی لاگرانژ، روش‌های بهینه‌سازی توزیع شده دیگری نیز ایجاد شد. یکی از این روش‌ها، اصل مسئله کمکی نامیده می‌شود [۱۶]، که برای مسائل شامل پخش بار بهینه کاربرد مناسبی از خود نشان داده است [۱۷-۱۸]. این روش مسائل کمکی را با استفاده از رهاسازی لاگرانژ ارتقایافته حل می‌کند که موجب افزایش همگرایی آن نسبت به روش رهاسازی لاگرانژ استاندارد می‌شود. در ادامه، روش مسیر متناوب ضرایب (ADMM) بیشتر مورد توجه قرار گرفت که سازگاری بیشتری با بهینه‌سازی مسائل محدب داشت [۱۹-۲۳]. روابط فشرده روش ADMM در مرجع [۱۷] برای مسئله پخش بار بهینه مورد استفاده قرار گرفت. در مرجع [۲۳]، مسئله پخش بار با استفاده از روش ADMM مدلسازی و به صورت توزیع شده حل شد. در مرجع [۲۴]، روش کنترل ولتاژ توزیع شده بر مبنای رابطه بین توان اکتیو و راکتیو خروجی واحد فتوولتائیک ارائه شد که در آن علاوه بر درنظر گرفتن تجهیزات تنظیم ولتاژ سنتی، از قابلیت تامین توان راکتیو اینورترهای سیستم فتوولتائیک نیز استفاده شده است. در مرجع [۲۵]، یک روش غیرمتمرکز کنترل توان راکتیو با استفاده از قانون تصمیم‌گیری خطی پیشنهاد شده است که در آن ارائه توان خدمات توان راکتیو از سوی مولدهای فتوولتائیک با لحاظ کد شبکه کشور آلمان مدنظر قرار گرفت. در مرجع [۲۶]، یک روش بر مبنای قوانین برای کنترل توان راکتیو به شیوه غیر متمرکز ارائه شده است. این روش در فاصله زمانی نقطه تنظیم برنامه کنترل ولتاژ-وار، بر روی

× Alternating direction method of multipliers

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

کاهش نوسانات ولتاژی که به علت تغییرات توان اکتیو تحویلی سیستم فتوولتائیک رخ می‌دهد تمرکز می‌کند. روش مبتنی بر قاعده به روش سنتی کنترل ولتاژ-وار اضافه شد تا اثر نفوذ منابع فتوولتائیک در سطح شبکه توزیع را کاهش دهد.

در این مقاله، یک روش توزیع شده کنترل ولتاژ با استفاده از بخش‌بندی شبکه توزیع به ناحیه‌هایی با بیشترین تاثیرپذیری تغییرات ولتاژی پیشنهاد شده است. کنترل ولتاژ با استفاده از قابلیت تامین توان راکتیو اینورترهای سیستم فتوولتائیک انجام می‌شود. همچنین، به منظور برقراری هماهنگی بین کنترل ولتاژ در بخش‌های مختلف شبکه، الگوریتم توزیع شده ADMM مورد استفاده قرار گرفته است. در مقایسه با روش کنترل ولتاژ متمرکز، روش پیشنهادی موجب کاهش زمان اجرا و بهبود فرایند مدیریت توان راکتیو خواهد شد. همچنین، تاکنون عدم قطعیت تولید مولدهای فتوولتائیک در روش کنترل ولتاژ توزیع شده لحاظ نشده بود که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. نوآوری‌های این مقاله به طور خلاصه در زیر آورده شده است:

۱) روش بخش‌بندی شبکه بر اساس تحلیل ماتریس حساسیت ارائه شده است که شبکه توزیع بزرگ و پیچیده را به چندین شبکه کوچک بخش‌بندی می‌کند؛

۲) روش توزیع شده کنترل ولتاژ با استفاده از الگوریتم ADMM پیشنهاد شده است.

۳) مدلسازی عدم قطعیت تولید منابع فتوولتائیک با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی ارائه شده است.

ساختار ادامه مقاله بدین صورت تنظیم شده است. در بخش ۲، روابط روش بخش‌بندی شبکه، عدم قطعیت تولید منابع فتوولتائیک، روابط کنترل ولتاژ و الگوریتم توزیع شده ADMM آورده شده است. در بخش ۳، نتایج مطالعه عددی به منظور تایید عملکرد روش پیشنهادی ارائه شده است. در پایان نیز در بخش ۴ نتیجه گیری آورده شده است.

۲- مدلسازی و روابط روش توزیع شده کنترل ولتاژ

در این بخش روش مدیریت توان راکتیو سیستم فتوولتائیک با هدف کنترل ولتاژ شرح داده شده است. روش پیشنهادی در چهار بخش بیان شده است. ابتدا، عدم قطعیت تولید منابع فتوولتائیک با تولید سناریو مدلسازی می‌شود. سپس، شبکه توزیع با استفاده از تحلیل ماتریس حساسیت بین شین‌ها به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. لذا، شین‌هایی که بیشترین تاثیر ولتاژی را روی همدیگر دارند در داخل یک بخش قرار می‌گیرند. در قدم بعدی، کنترل ولتاژ با استفاده از قابلیت کنترل توان راکتیو اینورتر سیستم‌های فتوولتائیک برای هر بخش به صورت جداگانه اجرا می‌شود. با این وجود، با کمک الگوریتم توزیع شده ADMM، هماهنگی فرایند کنترل ولتاژ بین بخش‌های مختلف ساماندهی شده است. روندنمای روش پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده و جزئیات مدل پیشنهادی در ادامه شرح داده شده است.

شکل(۱) روندنمای کنترل ولتاژ با روش پیشنهادی

۲-۱- مدلسازی شبکه توزیع شعاعی

شبکه توزیع شعاعی با درخت $\Phi = (\mathrm{X}, \zeta)$ را در نظر بگیرید که در آن $\mathrm{X} := \{0, 1, \dots, N\}$ مجموعه شین‌ها و ζ مجموعه خطوط است. هر شین i به یک شین والد (ϖ_i) و چندین شین فرزند (C_i) متصل است. در اینجا فرض می‌شود هر خط از یک شین والد ϖ_i به شین i متصل است و شماره خط نیز i است. ماتریس A^0 با اندازه $N \times (N+1)$ نشان‌دهنده ماتریس برخورد Φ است. عناصر این ماتریس مقادیر ۱، ۱- و ۰ بوده که به ترتیب نشان‌دهنده خارج شدن خط i از شین j، وارد شدن خط i به شین j و در غیر این دو صورت است.

برای شبکه توزیع شعاعی، مدل شارش شاخه گزینه مناسبی برای معادلات پخش بار است که در روابط زیر داده شده است [۲۷].

$$P_i - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_{\pi_i}^2} r_i + p_i = \sum_{j \in C_i} P_j \quad (۱)$$

$$Q_i - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_{\pi_i}^2} x_i + q_i = \sum_{j \in C_i} Q_j \quad (۲)$$

$$V_{\pi_i}^2 - V_i^2 = 2(r_i P_i + x_i Q_i) - (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_{\pi_i}^2} \quad (۳)$$

که در این روابط p_i و q_i به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی روی خط i دیده شده از شین ارسال i است؛ r_i و x_i مقاومت و راکتانس خط i است؛ V_i اندازه ولتاژ شین i است. رابطه (۱) و (۲) بیانگر تعادل توان اکتیو و راکتیو در شین i است. رابطه (۳) نشان‌دهنده ارتباط ولتاژی بین دوشین همسایه است.

از آنجاییکه مدل شارش شاخه در اصل به صورت نامحدب است، مدل خطی‌سازی شده شارش شاخه با صرف نظر کردن از جملات مرتبه بالاتر و نسبتا صاف فرض کردن پرفیل ولتاژ حاصل می‌شود. این مدل به طور گسترده در حل مسائل برنامه‌ریزی و بهره‌برداری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

شبکه‌های توزیع بکار گرفته شده است [۲۸] و در روابط زیر بازنویسی شده است.

$$P_i - \sum_{j\in C_i} P_j = -p_i \quad (۴)$$

$$Q_i - \sum_{j\in C_i} Q_j = -q_i \quad (۵)$$

$$V_{\pi_i} - V_i = r_i P_i + x_i Q_i \quad (۶)$$

۲-۲- استراتژی کنترل اینوتر پنل فتوولتائیک

استراتژی‌های کنترل پیشرفته مانند توزیع بهینه اینورتر فتوولتائیک [۲۹]، این ابزار را قار می‌سازد تا خدمات تنظیم ولتاژ را فراهم کند. با درنظر گرفتن p_i^m به عنوان حداکثر توان اکتیو در دسترس پنل خورشیدی i ناحیه بهره‌برداری نقاط تنظیم P-Q به صورت روابط زیر بیان می‌شود.

$$0 \le p_i^s \le p_i^m \quad (۷)$$

$$|q_i^s| \le \sqrt{S_i^2 - (p_i^s)^2} \quad (۸)$$

که در این روابط، p_i^s و q_i^s به ترتیب نشان‌دهنده توان اکتیو و راکتیو نقاط تنظیم هستند؛ S_i توان ظاهری نامی است. به منظور جداسازی همبستگی بین توان اکتیو و راکتیو، رابطه (۸) با اعمال محدودسازی روی q_i^s به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$\underline{q}_i \le q_i^s \le \overline{q}_i \quad (۹)$$

که در این رابطه $\overline{q}_i = \sqrt{S_i^2 - (p_i^m)^2}$ و $\underline{q}_i = -\overline{q}_i$.

۲-۳- بخش‌بندی شبکه

شبکه توزیع با تعداد زیاد واحدهای فتوولتائیک، شبکه‌ای پیچیده محسوب می‌شود. لذا، با افزایش ابعاد شبکه، کنترل اینورتر همه منابع به شیوه متمرکز کار دشواری خواهد بود. با توجه به این مفهوم که درجه ارتباط و تاثیر ولتاژی بین شین‌های مختلف شبکه توزیع یکسان نیست، می‌توان به طور عملی شین‌هایی که تاثیرپذیری بیشتری از هم دارند را در قالب ناحیه‌هایی با هدف اجرای کنترل ولتاژ بخش‌بندی نمود. به بیان دیگر، گره‌هایی که در یک بخش قرار داده شده‌اند در مقایسه با سایر شین‌های شبکه، تاثیرپذیری بیشتری نسبت به هم دارند.

در این مقاله الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده در مرجع [۳۰] که مناسب برای بخش‌بندی شبکه‌ای بزرگ و پیچیده است برای هدف کنترل ولتاژ بکارگرفته شده است. از ویژگی این روش خوشه‌بندی، عدم نیاز به مشخص کردن تعداد خوشه‌ها از پیش است. این الگوریتم خوشه‌بندی با تعریف شاخص سنجش (ρ) کیفیت شکل‌گیری بخش‌ها را اندازه می‌گیرد. این شاخص به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\rho = \frac{1}{2m}\sum_i\sum_j\left[W_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}\right]\Psi(i,j) \quad (۱۰)$$

که در این رابطه، W_{ij} نشان دهنده ماتریس مجاورت وزنی برای شبکه اصلی است که ارتباط بین گره‌های i و j را با وزن‌دهی می‌سنجد. اگر ارتباطی بین دو گره وجود نداشته باشد $W_{ij} = 0$، در غیر این صورت $W_{ij} = 1$. پارامتر $k_i = \sum_j W_{ij}$ جمع همه مقادیر وزن دهی شده خط‌های متصل به گره i را نشان می‌دهد. پارامتر $m = \frac{1}{2}\sum_i\sum_j W_{ij}$ نیز نشان دهنده جمع کل وزن ها است؛ $\Psi(i,j)$ یک تابع باینری است که اگر گره‌های i و j در یک بخش قرارگیرند $\Psi(i,j) = 1$ و در غیر این صورت $\Psi(i,j) = 0$.

در این مقاله، ماتریس حساسیت توان اکتیو-ولتاژ (P-V) یا توان راکتیو-جریان (Q-V) برای تعیین شاخص وزنی W_{ij} استفاده شده است. ماتریس حساست که نشان‌دهنده رابطه بین ولتاژ و تغییر در توان تزریقی است به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta V\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\Gamma_{\delta P} & \Gamma_{\delta Q}\\ \Gamma_{VP} & \Gamma_{VQ}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

که در این رابطه ΔP، ΔQ ، ΔV و $\Delta\delta$ به ترتیب نشان دهنده تغییرات افزایشی توان اکتیو، توان راکتیو، دامنه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ است؛ $\Gamma_{\delta P}$، $\Gamma_{\delta Q}$، Γ_{VP} و Γ_{VQ} به ترتیب نشان‌دهنده حساسیت زاویه ولتاژ و دامنه ولتاژ متناسب با توان اکتیو و توان راکتیو هستند. یک ضریب وزنی متوسط (Ψ_{ij}^{VQ}) به عنوان شاخصی برای نشان‌دادن درجه ارتباط بین دو گره با استفاده از پارامترهای ماتریس حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Psi_{ij}^{VQ} = \frac{\Gamma_{VQ}^{ij} + \Gamma_{VQ}^{ji}}{2} \quad (۱۲)$$

۲-۴- کنترل توان راکتیو توسط سیستم‌های فتوولتائیک

- مدلسازی عدم قطعیت تولید منابع فتوولتائیک

توان تولیدی توسط مولدهای فتوولتائیک تحت تاثیر سه عامل اصلی شدت تابش، دمای محیط و مشخصه‌های ماژول است. با این وجود، به علت ماهیت غیر معین شدت تابش خورشید در طول روز، انرژی الکتریکی تولیدی این منابع نیز به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست. لذا نیاز به مدلسازی عدم قطعیت تولید توان این منابع است. معمولا به منظور مدلسازی عدم قطعیت تولید توان منابع فتوولتائیک، از تابع توزیع بتا استفاده می‌شود [۳۱]. تابع بتا $f_b(.)$ بر حسب شدت تابش ϕ در رابطه (۱۳) تعریف شده است.

$$f_b(\phi) = \begin{cases}\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \phi^{(\alpha-1)} \times (1-\phi)^{(\beta-1)} & for\ \ 0 \le \phi \le 1, \alpha \ge 0, \beta \ge 0\\ 0 & otherwise\end{cases} \quad (۱۳)$$

که در این رابطه ϕ نشان دهنده شدت تابش برحسب (kW/m^2). α و β پارامترهای تابع توزیع بتا هستند. به منظور محاسبه پارامترهای تابع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

توزیع بتا (α,β)، مقدار میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) متغیرهای تصادفی به صورت روابط زیر بکارگرفته می‌شوند.

$$\beta = (1-\mu)\times\left(\frac{\mu\times(1+\mu)}{\sigma^2}-1\right) \quad (۱۴)$$

$$\alpha = \frac{\mu\times\beta}{1-\mu} \quad (۱۵)$$

تابع احتمال شدت تابش $\rho(\phi)$ برای شدت تابش ϕ در طول یک ساعت خاص به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\rho(\phi) = \int_{\emptyset_1}^{\emptyset_2} f_b(\phi).d\phi \quad (۱۶)$$

که در این رابطه $\emptyset_1$ و $\emptyset_2$ محدودیت شدت تابش در حالت ϕ است. با استفاده از شدت تابش و تابع تبدیل تابش به توان قابل محاسبه است. این تابع تبدیل در رابطه (۱۷) آورده شده است [۳۲].

$$P_{pv}(\phi) = \eta^{pv}\times S^{pv}\times\phi \quad (۱۷)$$

که در این رابطه P_{pv}، η^{pv} و S^{pv} به ترتیب نشان‌دهنده توان خروجی PV بر حسب کیلووات، بازده سیستم فتوولتائیک (٪) و مساحت سطح پنل برحسب مترمربع است.

- **توابع هدف و قیود**

در این مقاله فرض می‌شود که سیستم‌های فتوولتائیک مجهز به اینورتر قابل کنترل هستند که آنها را قادر می‌سازد تا توان راکتیو تامین نمایند. تابع هدف مسئله (OF) با هدف کمینه‌سازی تلفات شبکه و تامین توان راکتیو سیستم‌های فتوولتائیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$OF = \min\left(\sum_{s=1}^{S}\pi_s\left[\omega_1\sum_i\frac{P_i^2+Q_i^2}{V_{\pi_i}^2}r_i + \omega_2\sum_i Q_i^{PV}\right]\right) \quad (۱۸)$$

که در این رابطه، s نشان دهنده شماره سناریو است. Q_i^{PV} توان راکتیو جذب شده توسط سیستم فتوولتائیک شین i است. قیود این مسئله شامل روابط شارش توان و قیود ولتاژی است.

$$0.95\,p.u. \le V_{C_k}^i \le 1.05\,p.u. \quad (۱۹)$$

که در این رابطه، $V_{C_k}^i$ نشان‌دهنده دامنه ولتاژ در گره i و بخش C_k است. میزان بهینه توان راکتیو جذب شده توسط سیستم‌های فتوولتائیک توسط تابع هدف رابطه (۱۸) تعیین می‌شود به طوری که ولتاژ شین‌ها در محدوده مجاز باقی نگه داشته شوند.

۵-۲- الگوریتم توزیع شده ADMM

روش ADMM به عنوان یک الگوریتم توزیع‌شده شناخته می‌شود که کارایی خوبی در حل مسائل بهینه‌سازی محدب از خود نشان داده است [۳۳]. این روش مسائل بزرگ را به شکل رابطه (۲۰) تغییر می‌دهد:

$$\min_{x,z} L_\rho(x,z,\lambda) = \sum_{n=1}^{N}[C_n(x_n)+\lambda_n^T.(\tilde{x}_n-z_n) + (\rho/2).\|\tilde{x}_n-z_n\|_2^2] \quad (۲۰)$$

که در این رابطه، $L_\rho(.)$ تابع لاگرانژ ارتقاء یافته است؛ $C_n(x_n)$ تابع هدف زیرسیستم n است؛ نشان‌دهنده متغیرهای زیرسیستم n است که شامل متغیرهای محلی $\bar{x}_n$ و متغیرهای اتصال $\tilde{x}_n$ است؛ z_n نشان‌دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n ضرایب لاگرانژ هستند؛ $\|.\|_2^2$ نرم l_2 یک بردار است. پارامتر $\rho>0$، به عنوان یکی از پارامترهای از پیش تعریف شده در الگوریتم ADMM است که مقدار آن بر روی تعداد تکرارهای الگوریتم تاثیرگذار است.

روش ADMM یک فرایند مبتنی بر تکرار است که توسط رابطه‌های (۲۱)-(۲۴) تعریف می‌شود:

$$x_n^{i+1} = \arg\min_{x_n\in\chi_n}\left(C_n(x_n)+\lambda_n^{iT}.x_n + \left(\frac{\rho}{2}\right).\|\tilde{x}_n-z_n^i\|_2^2\right)\ \forall n\in N \quad (۲۱)$$

$$z_g^{i+1} = \frac{\sum_{G(n,w)=g}(\tilde{x}_n^{i+1})_w}{\sum_{G(n,w)=g}1}, \forall g\in Z \quad (۲۲)$$

$$\lambda_n^{i+1} = \lambda_n^i + \rho.(\tilde{x}_n^{i+1}-z_n^{i+1}), \forall n\in N \quad (۲۳)$$

$$z_2 = (\theta_j^{S_1}+\theta_j+\theta_{nj}^{S_3})/3 \quad (۲۴)$$

که در این روابط، i نشان‌دهنده شاخص تکرار الگوریتم ADMM است؛ متغیرهای تصمیم‌گیری z و x به صورت مجزا در روابط (۲۱) و (۲۲) بهینه می‌شوند. برای مسئله توزیع‌شده کنترل توان راکتیو، تابع هدف کل شبکه (۱۸) می‌تواند به صورت مجموع توابع هدف هر یک از زیرسیستم‌ها در رابطه (۲۰) بیان شده و متغیر x_n قیود (۲۱) تا (۲۴) را برای زیرسیستم n برآورده کند. جمله $((\tilde{x}_n-z_n)=0)$ تضمین می‌کند که متغیرهای یکسان تعریف شده در زیرسیستم‌های مختلف باهم برابر هستند. رابطه (۲۲) بیان می‌کند که متغیر جامع z_g برابر است با متوسط همه $(\tilde{x}_n)_w$ که با z_g در ارتباط هستند. $(\tilde{x}_n)_w$ نشان‌دهنده متغییر wth از $\tilde{x}_n$ است. $g=G(n,w)$ بیانگر نگاشت متغییرهای اتصال دوگانه $\tilde{x}_n$ روی z_n به عنوان متغیرهای جامع هست. یعنی $(\tilde{x}_n)_w$ مرتبط با متغییر جامع z_g است.

شاخص همگرایی الگوریتم ADMM بر اساس رابطه باقی مانده اولیه (۲۵) و باقی مانده دوگان (۲۶) تعیین می‌شود که در آن ε_1 و ε_2 حدود آستانه از پیش تعریف شده هستند [۳۳]. به بیان دیگر، پارامترهای ε_1 و ε_2 میزان آستانه یا محدوده دقت الگوریتم را مشخص می‌نمایند. مقادیر کوچکتر ε منتهی به جواب‌ها با دقت بالاتر خواهد شد. مقادیر این پارامترها بر اساس تجربه و با آزمایش مقادیر مختلف آنها انتخاب شده است. همچنین، پارامتر r باقی‌مانده اولیه به وسیله متغیرهای اولیه x و z محاسبه می‌شوند. معیار توقف زمانی حاصل می‌شود که باقی مانده‌های اولیه و دوگان در هر سیستم n به اندازه کافی کوچک شوند.

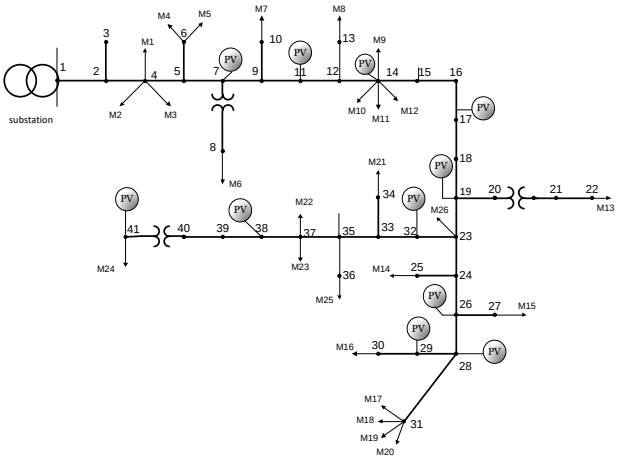
$$\|r_n^{i+1}\|_2^2 = \|\lambda^{i+1}-\lambda^i\|_2^2 \le \varepsilon_1, \quad (۲۵)$$

$$\|s_n^{i+1}\|_2^2 = \rho.\|z_n^{i+1}-z_n^i\|_2^2 \le \varepsilon_2 \quad (۲۶)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

۳- مطالعه عددی

در این بخش، روش پیشنهادی کنترل ولتاژ بر روی شبکه توزیع واقعی ۴۱ شینه که در شکل (۲) نمایش داده شده است، مورد مطالعه قرار گرفته است. اطلاعات شبکه مورد نظر در مرجع [۳۴] داده شده است. داده‌های بار شبکه برای ساعت ۱۲ در جدول (۱) نمایش داده شده است. مدل سیستم فتوولتائیک استفاده شده در شبیه‌سازی از مرجع [۳۵] استخراج شده است. هر اینورتر می‌تواند در محدوده ضریب توان (۰/۹- تا ۰/۹) لحاظ شده است. جهت بهینه‌سازی تابع هدف از روش برنامه‌ریزی درجه دوم محدب با قیود خطی‌سازی شده استفاده شده است[۳۶]. ضرایب وزنی ω_1 و ω_2 در تابع هدف برابر ۰/۵درنظر گرفته شده است. پارامترهای تعریف شده الگوریتم ADMM برای ρ برابر ۹ و برای ε_1 و ε_2 برابر ۰/۰۰۰۱ لحاظ شده است.



شکل (۲): توپولوژی شبکه آزمایشی ۳۳ شینه IEEE

جدول(۱) داده‌های بار شبکه در ساعت ۱۲

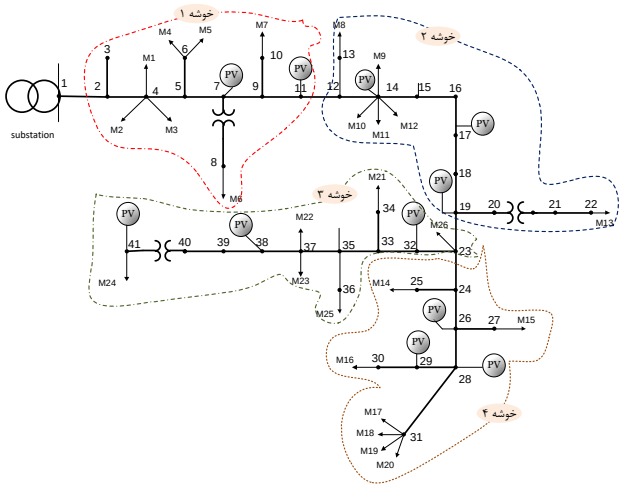
شماره	توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVar)	شماره	توان اکتیو (kW)	توان راکتیو (kVar)
M1	۶۲۵۱/۹۶	۲۰۵۴/۹۲	M14	۲۸۹/۷۵	۹۸/۲۳
M2	۱۵۲	۴۹/۹۶	M15	۱۵۲	۴۹/۹۵
M3	۹/۵	۳/۱۲	M16	۱۹۴/۷۵	۶۴/۰۱
M4	۱۸۷/۹۲	۱۰۶/۵۰	M17	۱۴۲/۵	۴۶/۸۳
M5	۷۱۵/۱۴	۴۰۵/۲۹	M18	۱۲۳/۵	۴۰/۵۹
M6	۳۱۸۷/۲۵	۴۷۱۰/۶۰	M19	۱۰۴/۵	۳۴/۳۴
M7	۵۷۶	۵۰۷/۹۸	M20	۱۴۷/۲۵	۴۸/۳۹
M8	۱۹	۰	M21	۲۰۴/۲۵	۶۷/۱۳
M9	۱۹	۶/۲۴	M22	۴۷/۵	۱۵/۶۱
M10	۱۴۲/۵۰	۴۶/۸۴	M23	۵۷	۱۸/۷۳
M11	۱۶۱/۵۰	۵۳/۰۸	M24	۲۱۶۶	۷۱۱/۹۲
M12	۲۳/۷۵	۷/۸۱	M25	۸۰/۷۵	۲۶/۵۴
M13	۴۷/۵۰	۱۵/۶۱	M26	۳/۱۲	۹/۵

بر طبق روش پیشنهادی، ابتدا باید شبکه توزیع به بخش‌های مختلف تقسیم‌بندی شود. بخش‌بندی بهینه شبکه بر اساس روش بیان شده در بخش ۲-۳ انجام شد و شین‌ها با بیشترین درجه ارتباط ولتاژی در یک بخش (خوشه) قرار گرفتند. همانطور که در جدول (۲) نمایش داده شده است، تعداد مناسب خوشه‌ها بر اساس شاخص ρ تعیین شده است. برای شبکه مورد بررسی، به ازای تعداد خوشه‌های متفاوت، مقدار ρ محاسبه و آن تعداد خوشه که بیشترین مقدار این شاخص را دارا می باشد به عنوان تعداد بهینه خوشه‌ها برای بخش‌بندی شبکه استفاده شده است. برای شبکه واقعی مورد بررسی، حداکثر مقدار ρ برای بخش بندی، ۴ می‌باشد.

جدول(۲): مقادیر شاخص ρ به ازای تعداد مختلف بخش‌بندی

تعداد بخش ها (خوشه)	شاخص ρ
۲	۰/۱۲
۳	۰/۵۳
۴	۰/۷۲
۵	۰/۶۵
۶	۰/۶۱
۷	۰/۵۴
۸	۰/۵۱
۹	۰/۴۲
۱۰	۰/۳۸
۱۱	۰/۲۴
۱۲	۰/۱۸
۱۳	۰/۰۹
۱۴	۰/۰۱

نتایج این بخش‌بندی روی شکل (۳) نشان داده شده است که در شبکه آزمایشی تعداد ۴ بخش به نام‌های خوشه ۱ تا خوشه ۴ نمایش داده شده است.



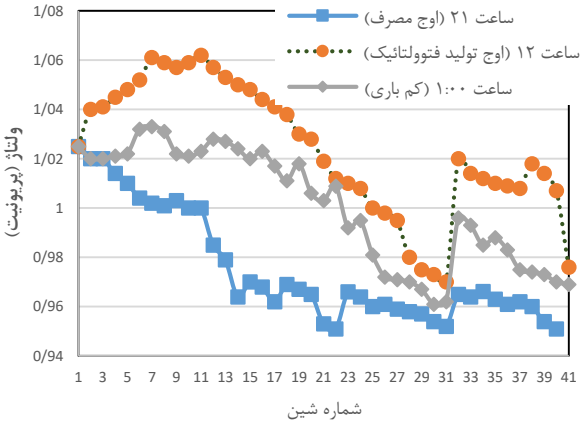
شکل (۳) بخش‌بندی شبکه توزیع آزمایش

اثر اضافه شدن منابع فتوولتائیک بر پروفیل ولتاژ شبکه در ساعات اوج شدت تابش خورشید نمایان می‌شود. در شکل (۴)، پروفیل ولتاژ شبکه برای سه ساعت مختلف از روز نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، در ساعت ۲۱ که اوج بار شبکه است، پروفیل ولتاژ نسبت به ساعت کم باری (نیمه شب) تا حدودی افت دارد. با این وجود، در هنگام ظهر که تولید مولدهای فتوولتائیک در حداکثر مقدار

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

خود است و بار شبکه نیز در وضعیت غیر اوج است، افزایش ولتاژ را شاهد خواهیم بود.

به منظور نشان دادن اثر اتصال تعداد قابل توجه منابع فتوولتایک به شبکه توزیع، سه مورد بدین صورت تعریف شده است. مورد ۱، که مورد پایه نامیده می‌شود مرتبط با شبکه توزیع پیش از اضافه شدن منابع فتوولتائیک است. مورد ۲ و ۳ برای شبکه توزیع با نفوذ قابل توجه منابع فتوولتائیک تعریف شده است که به ترتیب برای حالت‌های با و بدون استفاده از کنترل ولتاژ پیشنهادی است. پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه در هر سه مورد در شکل (۵) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، روش پیشنهادی کنترل ولتاژ قادر است تا ولتاژ را در محدوده مجاز خود نگه دارد.



شکل(۴) پروفیل ولتاژ شبکه در سه ساعت مختلف یک شبانه روز

به منظور نشان دادن امکان‌پذیری و استواری روش کنترل ولتاژ پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها در شرایط برابر با استفاده از روش کنترل ولتاژ متمرکز مرسوم نیز انجام شد. از الگورتیم ژنتیک جهت بهینه‌سازی در روش متمرکز استفاده شده است. همچنین، پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورد استفاده جهت بهینه‌سازی تابع هدف در جدول (۳) داده شده است. پروفیل ولتاژ شبکه در هر روش در شکل (۶) نمایش داده شده است. نتایج تلفات شبکه و توان راکتیو جذب شده توسط اینورتر سیستم‌های فتوولتائیک در هر دو روش متمرکز و توزیع شده در جدول (۴) نمایش داده شده است. کل توان راکتیو جبران شده در روش متمرکز ۱۰۱۱ کیلووار بوده که مقدار معادل آن در روش پیشنهادی ۱۰۲۵ کیلووار است.

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم بهینه سازی ژنتیک

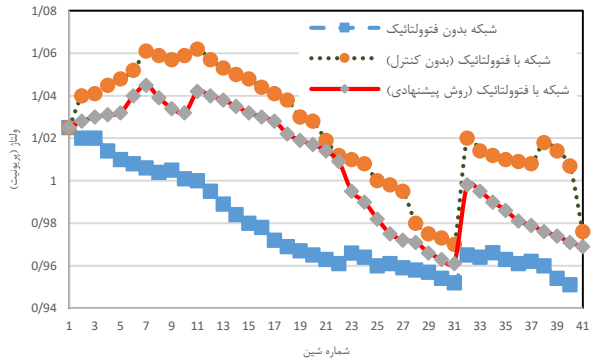
پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت	۵۰
نوع جمعیت	بردار دوگانه
عملگر انتخاب	توزیع یکنواخت تصادفی
عملگر جهش	گوسی
درصد جهش	۲۰٪

نتایج نشان می‌دهد که روش توزیع شده پیشنهادی میزان توان راکتیو تقریبا نزدیک به میزان معادل آن در روش متمرکز داشته است. لذا روش پیشنهادی در یافتن جواب بهینه سراسری مسئله به خوبی عمل کرده است. همچنین، روش پیشنهادی موجب کاهش تلفات نسبت به روش متمرکز شده است.

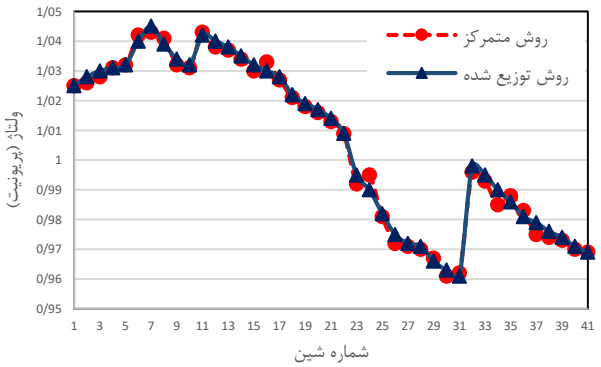
در شکل (۵)، پروفیل دامنه ولتاژ شبکه را برای هر دو روش کنترل ولتاژ متمرکز و پیشنهادی نشان داده شده است. نتایج نشانگر توانایی روش پیشنهادی در نگه داشتن ولتاژ در محدوده‌ی نزدیک به مقدار یک پریونیت است. شایان ذکر است که روش متمرکز کنترل ولتاژ، با تغییر شرایط بهره‌برداری، نیازمند اجرای کل فرایند بهینه‌سازی برای تغییر نقطه تنظیم اینورترهای همه سیستم‌های فتوولتائیک است. بنابراین، نقطه تنظیم توان اکتیو و راکتیو همه اینورترها به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی باید در برنامه بهینه شوند. به همین جهت، مدل کنترل ولتاژ متمرکز در شرایط گذرای آب و هوایی مانند عبور سایه ابرها پاسخ دینامیکی ضعیفی از خود نشان می‌دهد.

جدول (۴): میزان توان راکتیو جذب شده در دو روش

	تلفات (kWh)	توان راکتیو فتوولتائیک (kVar)
روش متمرکز	۸۹۴	۱۰۱۱
روش پیشنهادی	۸۸۹	۱۰۲۵



شکل (۵): پروفیل ولتاژ شبکه در سه مورد مطالعه



شکل (۶) پروفیل ولتاژ شبکه در دو روش متمرکز و توزیع‌شده

میزان تلفات شبکه در سه حالت بدون کنترل ولتاژ، روش متمرکز و روش پیشنهادی در جدول (۵) نشان داده شده است. با توجه به نتایج،

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

روش توزیع شده پیشنهادی دارای کمترین تلفات شبکه نسبت به روش متمرکز و بدون کنترل است.

جدول (۵): تلفات شبکه در حالت

	تلفات شبکه (kWh)
بدون کنترل ولتاژ	۱۰۹۴
با روش متمرکز	۸۹۴
با روش پیشنهادی	۸۸۹

مهمترین مزیت روش کنترل ولتاژ پیشنهادی در این است که تنها اینورترهای بخشی که در آن ولتاژ شین‌ها از محدوده در حال خارج شدن است را کنترل می‌کند. بنابراین، نقطه تنظیم اینورترهای سایر بخش‌ها می‌تواند بدون تغییر باقی بماند. با این رویکرد، مسئله پیچیده و بزرگ کنترل ولتاژ به چند زیرمسئله کوچک و نسبتا ساده‌تر تبدیل می‌شود که با سرعت و سهولت بیشتر قابل حل است.

به منظور مقایسه، زمان اجرای برنامه کنترل ولتاژ برای هر دو روش متمرکز و پیشنهادی در جدول (۶) داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، روش پیشنهادی زمان اجرای کمتری دارد چرا که مسئله بزرگ با تعداد متغیرهای زیاد را به چند مسئله کوچک با متغیرهای کمتر تبدیل می‌کند.

جدول (۶) مقایسه زمان اجرای برنامه در دو روش

روش تنظیم ولتاژ	زمان (ثانیه)
روش پیشنهادی	۹/۲۵
روش متمرکز	۱۸۲/۴۲

به منظور بررسی تاثیر پارامتر ρ بر روی عملکرد همگرایی الگوریتم، شبیه‌سازی با مقادیر مختلفی از ρ انجام و نرخ همگرایی آنها در جدول (۷) آورده شده است. مقدار پارامترهای ε_1 و ε_2 برابر ۰/۰۰۰۱ لحاظ شد.

جدول (۷) تاثیر پارامتر ρ بر روی عملکرد همگرایی الگوریتم

مقدار ρ	نرخ همگرایی
۲	۲۷۶
۴	۱۲۷
۹	۴۸
۱۵	۶۵
۲۰	۱۱۳
۵۰	۱۶۲
۱۰۰	۲۱۸

نتایج ارائه شده در جدول بالا نشان داد که انتخاب مقدار نامناسب ρ منجر به کندشدن روند همگرایی می‌شود. همچنین، پژوهش‌ها نشان می‌دهد که یک مقدار مناسب برای ρ در یک مسئله ممکن است برای مسئله دیگر مقدار مناسبی نباشد [۳۷]. لذا نیاز است مقادیر مختلفی از ρ، برای یک مسئله خاص مورد آزمایش قرار گرفته و مقداری که موجب افزایش سرعت همگرایی می‌شود انتخاب گردد. تجربه این مقاله برای حل مسئله کنترل ولتاژ در شبکه توزیع نشان داد که مقادیر ρ در محدوده ۹ تا ۲۰ می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

تاثیر مقادیر پارامترهای ε_1 و ε_2 در سرعت همگرایی در جدول (۸) ارائه شده است. هماهنطور که نتایج نشان می‌دهد، برای دست یافتن به جواب‌ها با دقت بالا، نیاز به تعداد تکرارهای بیشتر الگوریتم است.

جدول (۸) تاثیر پارامترهای ε_1 و ε_2 بر تعداد تکرارهای الگوریتم

مقادیر ε ۱ و ε ۲	تعداد تکرار
۰/۰۱	۳۲
۰/۰۰۱	۴۱
۰/۰۰۰۱	۴۸
۰/۰۰۰۰۱	۵۹

۴- نتیجه‌گیری

به جهت تغییر ناگهانی در خروجی توان مولدهای فتوولتائیک، نیاز به تغییر در رویکرد آنلاین کنترل ولتاژ شبکه‌های توزیع است. در این مقاله، یک روش کنترل ولتاژ غیرمتمرکز با استفاده از دو رویکرد بخش‌بندی شبکه و الگوریتم توزیع شده ADMM ارائه شده است که مشکل افزایش ولتاژ شبکه در شرایط نفوذ بالای مولدهای فتوولتائیک را به شکل بهینه مرتفع می‌کند. همچنین، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی و یک روش کنترل ولتاژ متمرکز انجام شده است. نتایج تصدیق کرد که روش پیشنهادی قادر به کنترل ولتاژ شبکه همانند روش متمرکز بوده اما با این تفاوت که زمان اجرای برنامه و حجم محاسبات آن کاهش یافته است. بنابراین روش پیشنهادی، رویکرد مناسبی برای کنترل ولتاژ آنلاین شبکه توزیع ارائه می‌دهد که برای شبکه‌های توزیع مجهز به ظرفیت بالای منابع فتوولتائیک پاسخگو است.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود تا مقدار بهینه پارامتر ρ در الگوریتم ADMM با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نظیر الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی تعیین شود. همچنین، تاکنون بر روی ارزشگذاری سهم توان راکتیو فراهم شده از سوی اینورترهای منابع فتوولتائیک پژوهش منسجمی انجام نشده است. لذا در ادامه این کار، می‌توان سهم ارزشگذاری توان راکتیو در شبکه توزیع را با معادل‌سازی ارزش توان راکتیو چند منبع مختلف توان راکتیو نظیر بانک‌های خازنی سوئیچ‌شونده، تپ ترانسفورماتورها، برنامه‌های پاسخگویی بار و راکتورهای توزیع در کنار ارزش توان اکتیو کاهش داده شده منابع فتوولتائیک سنجید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

مراجع

[1] S. Golshannavaz "Cooperation of electric vehicle and energy storage in reactive power compensation: An optimal home energy management system considering PV presence." Sustainable cities and society 39 (2018): 317-325.

[2] S. Moradian, O. Homaee, S. Jadid, P. Siano. "Optimal placement of switched capacitors equipped with stand-alone voltage control systems in radial distribution networks." International Transactions on Electrical Energy Systems 29, no. 3 (2019): e2753.

[3] S. Jashfar, S. Esmaeili. "Volt/var/THD control in distribution networks considering reactive power capability of solar energy conversion." International journal of electrical power & energy systems 60 (2014): 221-233.

[4] A. Yazdaninejadi, A. Hamidi, S. Golshannavaz, F. Aminifar, S. Teimourzadeh. "Impact of inverter-based DERs integration on protection, control, operation, and planning of electrical distribution grids." The Electricity Journal 32, no. 6 (2019): 43-56.

[5] Akagi, Satoru, Ryo Takahashi, Akihisa Kaneko, Masakazu Ito, Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Hiroshi Asano, and Hiromi Konda. "Upgrading Voltage Control Method Based on Photovoltaic Penetration Rate." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 5 (2018): 3994-4003.

[6] Wang, Licheng, Ruifeng Yan, and Tapan Kumar Saha. "Voltage management for large scale PV integration into weak distribution systems." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 5 (2018): 4128-4139.

[7] H. Pezeshki, A. Arefi, G. Ledwich, P. Wolfs. "Probabilistic voltage management using OLTC and dSTATCOM in distribution networks." IEEE Transactions on Power Delivery 33, no. 2 (2018): 570-580.

[8] P. Li, H. Ji, H. Yu, J. Zhao, C. Wang, G. Song, J. Wu. "Combined decentralized and local voltage control strategy of soft open points in active distribution networks." Applied Energy 241 (2019): 613-624.

[9] M. Monadi, H. Hooshyar, L. Vanfretti, F. Mahmood, J. I. Candela, P. Rodriguez. "Measurement-based Network Clustering for Active Distribution Systems." IEEE Transactions on Smart Grid (2019).

[10] M. Nayeripour, H. Fallahzadeh-Abarghouei, E. Waffenschmidt, S. Hasanvand. "Coordinated online voltage management of distributed generation using network partitioning." Electric Power Systems Research 141 (2016): 202-209.

[11] B. Zhao, Z. Xu, C. Xu, C. Wang, F. Lin. "Network Partition-Based Zonal Voltage Control for Distribution Networks with Distributed PV Systems." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 5 (2018): 4087-4098.

[12] J. Ding, Q. Zhang, S. Hu, Q. Wang, Q. Ye. "Clusters partition and zonal voltage regulation for distribution networks with high penetration of PVs." IET Generation, Transmission & Distribution 12, no. 22 (2018): 6041-6051.

[13] P. N. Biskas, A. G. Bakirtzis, N. I. Macheras, and N. K. Pasialis, "A decentralized implementation of DC optimal power flow on a network of computers," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 1, pp. 25–33, Feb. 2005.

[14] A. G. Bakirtzis and P. N. Biskas, "A decentralized solution to the DC-OPF of interconnected power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 3, pp. 1007–1013, Aug. 2003.

[15] M. Anjos, A. Lodi, M. Tanneau. "A decentralized framework for the optimal coordination of distributed energy resources." IEEE Transactions on Power Systems 34, no. 1 (2018): 349-359.

[16] Brooks, J., Trevizan, R.D., Barooah, P. and Bretas, A.S., 2019. Analysis and evaluation of a distributed optimal load coordination algorithm for frequency control. Electric Power Systems Research, 167, pp.86-93.

[17] Duan, Jie, and Mo-Yuen Chow. "A Novel Data Integrity Attack on Consensus-Based Distributed Energy Management Algorithm Using Local Information." IEEE Transactions on Industrial Informatics 15, no. 3 (2018): 1544-1553.

[18] S. G. M. Rokni, M. Radmehr, A. Zakariazadeh. "Optimum energy resource scheduling in a microgrid using a distributed algorithm framework." Sustainable cities and society 37 (2018): 222-231.

[19] Lai, Kexing, and Mahesh S. Illindala. "A distributed energy management strategy for resilient shipboard power system." Applied Energy 228 (2018): 821-832.

[20] P. Sulc, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Optimal distributed control of reactive power via the alternating direction method of multipliers," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 29, no. 4, pp. 968-977, Dec. 2014.

[21] Nguyen HK, Khodaei A, Han Z. Incentive mechanism design for integrated microgrids in peak ramp minimization problem. IEEE Trans Smart Grid 2017;3053.

[22] T. Erseghe, "Distributed optimal power flow using ADMM," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 5, pp. 2370–2380, Sep. 2014.

[23] V. Bhattacharjee, I. Khan. "A non-linear convex cost model for economic dispatch in microgrids." Applied energy 222 (2018): 637-648.

[24] M. Chamana, B. H. Chowdhury, F. Jahanbakhsh. "Distributed control of voltage regulating devices in the presence of high PV penetration to mitigate ramp-rate issues." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 2 (2018): 1086-1095.

[25] R. A. Jabr. "Linear decision rules for control of reactive power by distributed photovoltaic generators." IEEE Transactions on Power Systems 33, no. 2 (2018): 2165-2174.

[26] R. A. Jabr, "Robust Volt/VAr Control with Photovoltaics." IEEE Transactions on Power Systems (2019).

[27] M. Farivar and S. H. Low, "Branch flow model: Relaxations and convexification part I," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 2554–2564, 2013.

[28] H. Zhu and H. J. Liu, "Fast local voltage control under limited reactive power: Optimality and stability analysis," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 5, pp. 3794–3803, 2016.

[29] E. Dall'Anese, S. V. Dhople, and G. B. Giannakis, "Optimal dispatch of photovoltaic inverters in residential distribution systems," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 2, pp. 487–497, 2014.

[30] M. Girvan and M. E. J. Newman, "Community structure in social and biological networks," Proc. Natl. Acad. Sci., vol.99, no.12, pp. 7821-7826, 2002.

[31] F. Youcef , A. Mefti, A. Adane, M. Y. Bouroubi. Statistical analysis of solar measurements in Algeria using beta distributions. Renew Energy 2002;26: 47–67.

[32] R. Chedid, H. Akiki, S. Rahman. A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems. IEEE Trans Energy Convers 1995; 13:76–83.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]

[33] S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, and J. Eckstein, “Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers,” Foundations Trends in Machine Learning, vol. 3, no. 1, pp. 1–122, Jan. 2011.

[34] Y. Atwa, E. F. El-Saadany. "Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems." IET Renewable Power Generation 5, no. 1 (2011): 79-88.

[35] J. W. Smith, R. Dugan, and W. Sunderman, “Distribution modeling and analysis of high penetration PV,” 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, United states, Jul. 2011, pp.1-7.

[36] H. Konno. "Maximization of a convex quadratic function under linear constraints." Mathematical programming 11, no. 1 (1976): 117-127.

[37] E. Ghadimi, A. Teixeira, I. Shames, and M. Johanson, “Optimal parameter selection for the alternating direction method of multipliers (ADMM): Quadratic problems,” IEEE Trans. Autom. Control, vol. 60, no. 3, pp. 644–658, Mar. 2015.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-04]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.31]