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

هادی یوسفی'، دانشجوی دکترا، سید اصغر غلامیان'، دانشیار، علیرضا ذکریازاده۲، 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 می کند. در روش پیشنهادی، با توجه به تاثیر ناحیهای توان راکتیو، ابتدا شبکه توزیع با استفاده از یک روش خوشهبندی به بخشهای کوچکتری تقسیم می شود. سپس، از الگوریتم توزیع شده مسیر متناوب ضرایب (ADMM) برای برنامه مدیریت ولتاژ و توان راکتیو به صورت توزیع شده در بخشهای مختلف استفاده می شود. 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 می دهد استفاده از روش

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 نویسنده ی مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - ایران

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 قـرار میگرفـت [۱]. در شـبکههای فعلـی امـا چـالش دیگـری بـرای 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 [7]. در حالت خاص، اگر تزریق توان این مولدها در زمان کمباری یا میانباری سیستم باشد احتمال بروز این پديده افزايش مىيابد. براى مثال، زمان اوج توليد مولدهاى فتوولتائيك در ساعات میان روز است که عموماً مقارن با ساعات کمباری است و نتيجه آن افزايش ولتاژ در نقاط تزريق توان است [٣]. لذا نياز 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 اینـورتر بر روی بهرهبرداری، کنترل، حفاظت و برنامهریزی شبکههای توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. این مرجع دید مناسبی پیرامون

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، تنظیم کننده 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 شده است. در مرجع [۷]، روش احتمالی تنظیم کنندههای 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 تنظیم کنندههای 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 [11]، یک روش کنترل ولتاژ با بهره گیری 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 [17]، یک روش کنترل ولتاژ بر اساس الگوریتم خوشهبندی طیفی، برای بخشبندی شبکه توزیع ارائه شده 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 بكارگیری ضرایب لاگرانژ جداسازی می شوند كه موجب ایجاد قابلیت جداسازی قسمتهای مسئله می شود. 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 می کند که موجب افزایش همگرایی آن نسبت به روش رهاسازی لاگرانـژ اسـتاندارد میشود. در ادامـه، روش مسـیر متنـاوب ضرایب (ADMM) بیشتر مورد توجه قرار گرفت که سازگاری بیشتری با بهینه سازی 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 اینور ترهای سیستم فتوولتائیک نیز استفاده شده است. در مرجع [۲۵]، یک روش غیرمتمرکز کنترل توان راکتیو با استفادہ از قانون تصمیم گیری 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

کاهش نوسانات ولتاژی که به علت تغییرات توان اکتیو تحویلی سیستم فتوولتائیک رخ میدهد تمرکز میکند. روش مبتنی بر قاعـده بـه 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 MDM 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 ارائـه شده است که شبکه توزیع بزرگ و پیچیده را به چندین شبکه کوچک بخشبندی میکند؛

۲) روش توزیع شده کنتـرل ولتـاژ بـا اسـتفاده از الگـوریتم ADMM پیشنهاد شده است.

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

ساختار ادامه مقاله بدین صورت تنظیم شده است. در بخش ۲، روابط روش بخش بندی 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 تقسیم بندی 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 MDMA، هماهنگی فرایند کنترل ولتاژ بین بخشهای مختلف ساماندهی شده است. رونددمای روش

پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده و جزئیات مـدل پیشـنهادی در ادامه شرح داده شده است.



شکل(۱) روندنمای کنترل ولتاژ با روش پیشنهادی

۱-۲- مدلسازی شبکه توزیع شعاعی

شبکه توزیع شعاعی با درخت $(X, \zeta) = \Phi$ را در نظر بگیرید که در آن mathackarrow mathaction (Mathaction (Mathactity (Mathaction (Mathaction (Mathactio

برای شبکه توزیع شعاعی، مدل شـارش شـاخه گزینـه مناسـبی بـرای معادلات پخش بار است که در روابط زیر داده شده است [۲۷].

$$P_i - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_{\pi_i}^2} r_i + p_i = \sum_{i \in C_i} P_j \tag{1}$$

$$Q_{i} - \frac{P_{i}^{2} + Q_{i}^{2}}{V_{\pi_{i}}^{2}} x_{i} + q_{i} = \sum_{j \in C_{i}}^{j \in C_{i}} Q_{j}$$
^(Y)

$$V_{\pi_i}^2 - V_i^2 = 2(r_i P_i + x_i Q_i) - (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_{\pi_i}^2}$$
(7)

که در این روابط $p_i e_i p_i$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی روی خط i در این روابط $p_i e_i q_i$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی روی خط i دیده شده از شین ارسال i است؛ $r_i r_i (1) e_i (1)$ 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) نشان دهنده 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

DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3

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

$$P_i - \sum_{i \in C_i} P_j = -p_i \tag{(f)}$$

$$Q_i - \sum_{i \in C_i}^{j \to i} Q_j = -q_i \tag{(a)}$$

$$V_{\pi_i} - V_i = r_i P_i + x_i Q_i \tag{9}$$

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.

$$0 \le p_i^s \le p_i^m \tag{Y}$$

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

که در این روابط، $p_i^s q e^s p_i^s$ 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.

$$\underline{q}_i \le q_i^s \le \overline{q}_i \tag{9}$$

 $\overline{q}_i = \sqrt{S_i^2 - (p_i^m)^2}$ کـــــه در ایـــــن رابطــــه $\overline{q}_i = \sqrt{S_i^2 - (p_i^m)^2}$. $\underline{q}_i = -\overline{q}_i$

۲-۳- بخشبندی شبکه

شبکه توزیع با تعداد زیاد واحدهای فتوولتائیک، شبکهای پیچیده محسوب می شود. 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، می توان به طور عملی شینهایی که تاثیر پذیری بیشتری از هم دارند را در قالب ناحیههایی با هدف اجرای کنترل ولتاژ بخش بندی نمود. به بیان دیگر، گرههایی که در یک بخش قرار داده شدهاند در مقایسه با سایر شینهای شبکه، تاثیر پذیری 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 (م) کیفیت شکلگیری بخشها را اندازه میگیرد. این شاخص به صورت رابطه (۱۰) تعریف میشود:

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_{i} \sum_{j} \left[W_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \Psi(i, j)$$
^(1.)

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

در این مقاله، ماتریس حساسیت توان اکتیو-ولتاژ (P-V) یا توان راکتیو-جریان (P-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 می شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\delta P} & \Gamma_{\delta Q} \\ \Gamma_{V P} & \Gamma_{V Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$
(11)

که در این رابطه $\Delta 0$ ، $\Delta 0$ ، $\Delta 0$ به ترتیب نشان دهنده تغییرات افزایشی توان اکتیو، توان راکتیو، دامنه ولتاژ و زاویه فاز ولتاژ است؛ افزایشی توان اکتیو توان راکتیو و توان راکتیو هستند. یک ضریب 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 می شود:

$$\Psi_{ij}^{VQ} = \frac{\Gamma_{VQ}^{ij} + \Gamma_{VQ}^{ji}}{2} \tag{11}$$

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 پیش بینی 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 می شود [۳۱]. تابع بتا (.) f_b بر حسب شدت تابش ϕ در رابطه (۱۳) تعریف شده است.

 $\begin{aligned} f_{b}(\phi) &= \\ \begin{cases} \Gamma(\alpha + \beta) \\ \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta) \\ 0 \end{cases} \times \phi^{(\alpha - 1)} \times (1 - \phi)^{(\beta - 1)} \text{ for } 0 \le \phi \le 1, \alpha \ge 0, \beta \ge 0 \\ 0 \text{ otherwise} \end{aligned}$

که در این رابطه φ نشان دهنده شدت تابش برحسب (*kW/m²). α* و β پارامترهای تابع β

۴

Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18

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

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1\right) \tag{14}$$

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \tag{10}$$

تابع احتمال شدت تابش (ϕ) برای شدت تابش ϕ در طول یک ساعت خاص به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می شود.

$$p(\phi) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} f_b(\phi) \, d\phi \tag{19}$$

$$P_{pv}(\phi) = \eta^{pv} \times S^{pv} \times \phi \tag{1}$$

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

در این مقاله فرض میشود که سیستمهای فتوولتائیک مجهز به اینورتر قابل کنترل هستند که آنها را قـادر میسـازد تـا تـوان راکتیـو تـامین نمایند. تابع هدف مسئله (OF) با هدف کمینهسـازی تلفـات شـبکه و تامین توان راکتیـو سیسـتمهای فتوولتائیـک بـه صـورت زیـر تعریـف میشود:

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

که در این رابطه، ۶ نشان دهنده شماره سناریو است. Q_i^{PV} توان راکتیو جذب شده توسط سیستم فتوولتائیک شین i است. قیـود ایـن مسـئله شامل روابط شارش توان و قیود ولتاژی است.

(۱۹) $v_{C_k}^i \leq 1.05 \ p.u.$ (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 می شود به طوری که ولتاژ شینها در محدوده مجاز باقی نگه داشته شوند.

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:

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

که در این رابطه، (.) L_{ρ} تابع لاگرانژ ارتقاء یافته است؛ $C_n(x_n)$ تابع هدف زیرسیستم n است؛ هدف زیرسیستم n است؛ هدف زیرسیستم n است؛ x_n هدف زیرسیستم n است؛ تشاندهنده متغیرهای زیرسیستم \overline{x} است؛ \overline{x}_n است؛ \overline{x}_n مثانده شاه مناه متغیرهای محلی \overline{x}_n و متغیرهای اتصال \overline{x} است؛ \overline{x}_n نشاندهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ $\overline{\lambda}$ ضرایب λ_n نشاندهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ $\overline{\lambda}$ ضرایب λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ $\overline{\lambda}$ ضرایب λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n نیان دهنده متغیرهای جامع مرتبط با زیرسیستم n است؛ λ_n معنوان مورن ملکه من واین می مربا با زیرسی مرابع مای در است. از مان ماست که مقدار آن بر روی تعداد تکرارهای الگوریتم تاثیرگذار است. λ_n (۲۱)–(۲۲) تعریف می شود: (۲۱)

$$\sum_{x_n \in \chi_n} \left(\left(\frac{\rho_n \langle x_n \rangle + \lambda_n \rangle \langle x_n \rangle - x_n \rangle}{1 + \left(\frac{\rho}{2}\right)} \right) \|\tilde{x}_n - x_n^i\|_2^2 \right) \forall n \in \mathbb{N}$$

$$z_{g}^{i+1} = \frac{\sum_{G(n,w)=g} (x_{n} - j_{w})}{\sum_{G(n,w)=g} 1}, \forall g \in Z$$
(11)

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

$$z_2 = (\theta_j^{S_1} + \theta_j + \theta_{nj}^{S_3})/3 \tag{(14)}$$

که در این روابط، *i* نشان دهنده شاخص تکرار الگوریتم ADMM است؛ متغیرهای تصمیم گیری *Z* و *X* به صورت مجزا در روابط (۲۱) و (۲۲) بهینه می شوند. برای مسئله توزیع شده کنترل توان راکتیو، تابع هدف کل شبکه (۱۸) می تواند به صورت مجموع توابع هدف هر یک از زیرسیستمها در رابطه (۲۰) بیان شده و متغیر *nX* قیود (۲۱) تا (۲۴) را برای زیرسیستم *n* برآورده کند. جمله ($0 = (n - z_n)$) تضمین را برای زیرسیستم *n* برآورده کند. جمله ($0 = (\tilde{x}_n - x_n)$) تضمین می کند که متغیرهای یکسان تعریف شده در زیرسیستمهای مختلف می کند که متغیرهای یکسان تعریف شده در زیرسیستمهای مختلف باهم برابر هستند. رابطه (۲۲) بیان می کند که متغیر جامع *Z* برابر (\tilde{x}_n) با متوسط همه (\tilde{x}_n) در ارتباط هستند. $(\tilde{x}_n)_W$ نشان دهنده متغییر *M*th از *n* آست. (*n*, *w*) معنون متغیرهای جامع متفیرهای اتصال دو گانه *n* آروی *n x* به عنوان متغیرهای جامع متغیرهای اتصال دو گانه *n* آر روی *n x* به عنوان متغیرهای جامع هست. یعنی (\tilde{x}_n) مرتبط با متغییر جامع *Z* است.

شاخص همگرایی الگوریتم ADMM بر اساس رابطه باقی مانده اولیه شاخص همگرایی الگوریتم ADMM بر اساس رابطه باقی مانده اولیه (۲۵) و باقی مانده دوگان (۲۶) تعیین میشود که در آن $3 e^2 - c_2 - c_e$ و 2^3 میزان آستانه یا محدوده دقت الگوریتم را مشخص مینمایند. مقادیر کوچکتر ٤ 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 شده است. همچنین، پارامتر r باقیمانده اولیه به وسیله متغیرهای اولیه x و z محاسبه می شوند. معیار توقف زمانی حاصل می شود که باقی ماندهای اولیه و دوگان در هر سیستم n به اندازه کافی کوچک شوند.

$$\|r_{n}^{i+1}\|_{2}^{2} = \|\lambda^{i+1} - \lambda^{i}\|_{2}^{2} \le \varepsilon_{1},$$
^(Y\Delta)

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

Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-18

۳- مطالعه عددی

در این بخش، روش پیشنهادی کنترل ولتاژ بر روی شبکه توزیع واقعی ۲۹ 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 (۹/۰- 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 m و w در تابع هدف برابر ۵/۰درنظر گرفته شده است. پارامترهای تعریف شده الگوریتم ADMM برای ρ برابر ۹ و برای r3 و z برابر ۲۰۰۰ لحاظ شده است.



شکل (۲): توپولوژی شبکه آزمایشی ۳۳ شینه IEEE

جدول(۱) دادههای بار شبکه در ساعت ۱۲					
توان راكتيو	توان اكتيو	شماره	توان راكتيو	توان اكتيو	شماره
(kVar)	(kW)		(kVar)	(kW)	
۹۸/۲۳	۲۸۹/۷۵	M14	2.94/92	8201/98	M1
49/90	۱۵۲	M15	49/98	۱۵۲	M2
۶۴/۰۱	۱۹۴/۷۵	M16	٣/١٢	۹/۵	M3
46/82	142/0	M17	۱ • ۶/۵ •	۱۸۷/۹۲	M4
۴۰/۵۹	۱۲۳/۵	M18	4.0/29	۷۱۵/۱۴	M5
376/38	۱۰۴/۵	M19	411./8.	31/11/20	M6
۴۸/۳۹	147/20	M20	۵۰۷/۹۸	۵۷۶	M7
۶۷/۱۳	۲۰۴/۲۵	M21	•	١٩	M8
۱۵/۶۱	۴۷/۵	M22	9/14	١٩	M9
۱۸/۷۳	۵۷	M23	46/14	۱۴۲/۵۰	M10
V11/97	5188	M24	۵۳/۰۸	181/00	M11
26/04	٨٠/٧۵	M25	۲/۸۱	۲۳/۷۵	M12
۹/۵	٣/١٢	M26	10/81	۴۷/۵۰	M13

بر طبق روش پیشنهادی، ابتدا باید شبکه توزیع به بخشهای مختلف تقسیم بندی شود. بخش بندی 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 *Ω* تعیین شده است. برای شبکه مورد بررسی، به ازای تعداد خوشههای متفاوت، مقدار *Ω* 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 *Ω* برای بخش بندی، ۴ میباشد.

ی تعداد مختلف بخشبندی	ِ شاخص ρ به ازا	جدول(۲): مقادیر
-----------------------	-----------------	-----------------

شاخص ρ	تعداد بخش ها (خوشه)
•/17	٢
۰/۵۳	٣
۰/۷۲	۴
• /۶۵	۵
۰ /۶ ۱	۶
۰/۵۴	۷
• /۵ ۱	٨
•/47	٩
۰/۳۸	۱.
•/74	11
•/\٨	١٢
٠/•٩	١٣
• / • ١	١۴

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

9

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 امکان پذیری 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.

سازی ژنتیک	بهينه	الگوريتم	نرهای	پارامت	:(٣)	جدول
------------	-------	----------	-------	--------	------	------

مقدار	پارامتر		
۵۰	تعداد جمعيت		
بردار دوگانه	نوع جمعيت		
توزيع يكنواخت تصادفى	عملگر انتخاب		
گوسی	عملگر جهش		
۲۰٪.	درصد جهش		

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.



توان راكتيو فتوولتائيك	تلفات (kWh)	
(kVar)		
1•11	٨٩۴	روش متمركز
۱۰۲۵	٨٨٩	روش پیشنهادی



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



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

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،

DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.3.1.3

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

جدول (۵): تلفات شبکه در حالت

تلقات سبکه (۱۱ ۲۷ ۸)		
1.94	بدون كنترل ولتاژ	
٨٩۴	با روش متمر کز	
٨٨٩	با روش پیشنهادی	

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

زمان (ثانیه)	روش تنظيم ولتاژ
۹/۲۵	روش پیشنهادی
187/42	روش متمركز

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 ₁² و ₂² برابر ۰/۰۰۰۱ لحاظ شد.

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

نرخ همگرایی	$oldsymbol{ ho}$ مقدار
275	٢
171	۴
۴۸	٩
۶۵	۱۵
١١٣	۲.
187	۵۰
۲۱۸	۱۰۰

ho نتایج ارائه شده در جدول بالا نشان داد که انتخاب مقدار نامناسب ممجنی بروهشها نشان منجر به کندشدن روند همگرایی می شود. همچنین، پژوهشها نشان

میدهد که یک مقدار مناسب برای م در یک مسئله ممکن است برای مسئله دیگر مقدار مناسبی نباشد [۳۷]. لذا نیاز است مقادیر مختلفی از م، 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 م در محدوده ۹ تا ۲۰ میتواند انتخاب مناسبی باشد.

تاثیر مقادیر پارامترهای ₁ء و ₂ء 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 ٤٦ و ٤2 بر تعداد تكرارهای الگوریتم

تعداد تكرار	مقادیر ۵ ع و2 ع
٣٢	٠/• ١
41	• / • • ١
۴۸	• / • • • ١
۵۹	• / • • • • ١

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 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 خارنی سوئیچشونده، تپ ترانسفورماتورها، برنامههای پاسخگویی بار و راکتورهای توزیع در کنار ارزش توان اکتیو کاهش داده شده منابع فتوولتائیک سنجید.

٨

- [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.
- Brooks, J., Trevizan, R.D., Barooah, P. and Bretas, A.S., [16] 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.
- M. Chamana, B. H. Chowdhury, F. Jahanbakhsh. [24] "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.
- "Robust Volt/VAr Control with [26] R. A. Jabr, 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.
- H. Zhu and H. J. Liu, "Fast local voltage control under [28] 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.
- R. Chedid, H. Akiki, S. Rahman. A decision support [32] technique for the design of hybrid solar-wind power systems. IEEE Trans Energy Convers 1995; 13:76-83.

- [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 standalone 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.
- A. Yazdaninejadi, A. Hamidi, S. Golshannavaz, F. [4] 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.
- Akagi, Satoru, Ryo Takahashi, Akihisa Kaneko, [5] 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.
- Wang, Licheng, Ruifeng Yan, and Tapan Kumar Saha. [6] "Voltage management for large scale PV integration into weak distribution systems." IEEE Transactions on Smart Grid 9, no. 5 (2018): 4128-4139.
- H. Pezeshki, A. Arefi, G. Ledwich, P. Wolfs. [7] "Probabilistic voltage management using OLTC and in distribution networks." dSTATCOM IEEE Transactions on Power Delivery 33, no. 2 (2018): 570-580.
- P. Li, H. Ji, H. Yu, J. Zhao, C. Wang, G. Song, J. Wu. [8] "Combined decentralized and local voltage control strategy of soft open points in active distribution networks." Applied Energy 241 (2019): 613-624.
- M. Monadi, H. Hooshyar, L. Vanfretti, F. Mahmood, J. I. [9] Candela, P. Rodriguez. "Measurement-based Network Clustering for Active Distribution Systems." IEEE Transactions on Smart Grid (2019).
- Nayeripour, H. Fallahzadeh-Abarghouei, E. [10] M. 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.

- [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.