

کنترل توزیع شده توان راکتیو در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن

مصرف کننده‌های نهایی

احد عابسی¹، وحید وحیدی نسب^{2*}، محمدصادق قاضی زاده³

¹ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

ahadabessi@yahoo.com

² استادیار دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

v_vahidinasab@sbu.ac.ir

³ دانشیار دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m_ghazizadeh@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، با توجه به توسعه زیرساخت‌های شبکه هوشمند در شبکه‌های مدرن امروزی، از مصرف‌کنندگان نهایی به‌عنوان ابزاری برای مشارکت در کنترل ولتاژ شبکه توزیع استفاده می‌شود. در این راستا، به‌منظور کنترل توان راکتیو در شبکه‌های هوشمند، از روشی کارآمد موسوم به کنترل توزیع شده استفاده شده که موجب کاهش چشمگیر بار محاسباتی مسئله می‌شود. بدین منظور، در ابتدا با استفاده از روش تجزیه اِپسیلون (ϵ -decomposition)، ماتریس ضرایب حساسیت ولتاژ شین‌های مختلف شبکه توزیع نسبت به توان راکتیو تزریقی در آن محاسبه می‌شود. به این ترتیب، شین‌هایی که از لحاظ ولتاژی وابستگی بیشتری به یکدیگر دارند، در یک ناحیه قرار می‌گیرند. در مرحله بعد، بر مبنای نتایج حاصل از ناحیه‌بندی شین‌های سیستم، به شناسایی شین‌های کاندیدا تزریق توان راکتیو پرداخته می‌شود. ویژگی شین‌های کاندیدا این است که تزریق توان راکتیو در آن‌ها تأثیر بیشتری بر بهبود پروفیل ولتاژ می‌گذارد. در پایان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه تزریق توان راکتیو شین‌های کاندیدا در هر ناحیه محاسبه می‌شود. به‌منظور ارزیابی چارچوب پیشنهادی این مقاله از شبکه آزمایش 33 شینه IEEE که در مراجع متعددی استفاده شده، بهره گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از تأثیر مدل ارائه شده در بهبود چشمگیر پروفیل ولتاژ شبکه است.

واژه‌های کلیدی: کنترل توزیع شده توان راکتیو، روش تجزیه اِپسیلون، شین‌های کاندیدا تزریق توان راکتیو، مصرف‌کنندگان نهایی، شبکه‌های توزیع هوشمند.

1. مقدمه

کنترل توان راکتیو و ولتاژ به منظور تامین اهدافی از قبیل حفظ ولتاژ در محدوده مجاز، کاهش تلفات و بهره‌برداری مناسب‌تر از شبکه‌های انتقال، رویکردی اساسی در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت مرسوم و نیز شبکه‌های توزیع هوشمند است [1].

مسئله نگه‌داشتن ولتاژ در محدوده مورد نیاز با توجه به این واقعیت که سیستم قدرت بارهای بی‌شماری را تغذیه می‌کند و از طریق واحدهای ژنراتوری زیادی نیز تغذیه می‌شود، مسئله پراهمیتی است. به علت ناکارآمد بودن انتقال توان راکتیو در طی مسافت‌های طولانی، کنترل ولتاژ باید توسط ابزارهای خاصی که در سراسر سیستم نصب و گسترده شده‌اند، صورت گیرد. انتخاب و هماهنگی مناسب تجهیزات برای کنترل کردن توان راکتیو و ولتاژ، یکی از چالش‌های اصلی پیش روی مهندسان و پژوهشگران سیستم قدرت است [1].

امروزه با توجه به ظهور و گسترش زیرساخت‌های شبکه هوشمند، مباحث جدیدی در نحوه برخورد با مسائل کنترل ولتاژ و توان راکتیو ایجاد شده است که امکان استفاده از ظرفیت‌های موجود در شبکه‌های توزیع را به نحوه مطلوب‌تری فراهم می‌کند. در مرجع [2]، ایده استفاده از مصرف‌کننده‌های نهایی در بحث کنترل توان راکتیو مطرح شده است. طبق مباحث مطرح شده در این مرجع، مصرف‌کننده‌های نهایی می‌توانند مجهز به ادوات اصلاح‌کننده ضریب قدرت¹ شوند که در حال حاضر در بسیاری از مصرف‌کننده‌های نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این مصرف‌کننده‌ها می‌توان به خودروه‌های الکتریکی، تلویزیون، یخچال و رایانه اشاره کرد که با تغییر مدل کنترلی این ادوات، می‌توان آن‌ها را دارای قابلیت تزریق یا جذب توان راکتیو کرد. بر این اساس، یک مدل کنترلی اصلاح‌کننده ضریب قدرت قابل کنترل مناسب در مرجع [2] پیشنهاد شده است.

با مطرح شدن بارهای نهایی به‌عنوان یک پشتیبان توان راکتیو مباحثی جدیدی مطرح می‌شود که در مراجع [3] و [4] به بررسی این مفهوم در شبکه‌های انتقال پرداخته شده است. این مراجع یک ساختار کنترلی را مطرح کرده‌اند که می‌تواند برای کنترل توان راکتیو مصرف‌کننده‌های نهایی به کار رود. ساختار کنترل هوشمند پیشنهادی مبتنی بر سیستم مدیریت فرمان در حوادث² است که برای فرمان‌دادن، هماهنگی و کنترل پاسخ‌های اضطراری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نکته‌ای که در این مراجع به آن توجه نشده، شبکه توزیع و مسئله کنترل ولتاژ در این نوع شبکه‌هاست. مرجع [5] در ادامه کار مرجع [3] بوده و علاوه بر بررسی شبکه انتقال، استفاده از ساختار چندعاملی³ را به‌عنوان بستری مناسب برای اجرای سیستم مدیریت فرمان در حوادث معرفی کرده است. در این سیستم، رله‌های فیدر به‌عنوان مراکز هستند که اطلاعات و فعالیت‌های کنترلی مورد نیاز در لایه‌های کنترلی مورد نظر را مدیریت می‌کنند. این مرجع نحوه مدل‌سازی شبکه توزیع را نیز بررسی کرده، اما نحوه به‌دست‌آوردن شین‌های کاندیدا را بررسی نکرده و نیز از مدلی استفاده کرده که به‌صورت کنترل مرکزی بوده و نیازمند زیرساخت‌های مخابراتی بالایی است. همین موضوع موجب می‌شود که مدل ارائه شده از کارایی خوبی در شبکه‌های هوشمند برخوردار نباشد.

مرجع [6] یک ساختار تنظیم غیرسلسله‌مراتبی و غیرمتمرکز را ارائه کرده که بدون هیچ فرایند مرکزی، مقادیر واقعی تابع هدف را محاسبه می‌کند. این روش با هماهنگ کردن بهره‌برداری منابع تولید پراکنده با ادوات متعارف کنترل ولتاژ، بهره‌برداری کارآمد و مطمئن را برای شبکه تضمین می‌کند. در این روش، از کنترل‌کننده‌های توزیع شده استفاده شده و در آن، هر کنترل‌کننده مقدار ولتاژ شین مشخصی از شبکه هوشمند را که مجهز به منابع تولید پراکنده است، کنترل می‌کند. در این مرجع، بحثی از مصرف‌کنندگان نهایی نشده و نحوه مدل‌سازی این منابع مورد بررسی قرار نگرفته است.

مرجع [7] یک ساختار کنترلی غیرمتمرکز برون‌خط⁴ را برای واحدهای تولید پراکنده پیشنهاد کرده است. طبق تحلیل انجام شده در این مرجع، هماهنگی برون‌خط نیاز به اعمال تغییر و اصلاح سیستم‌های کنترلی را از میان برداشته و تبادل اطلاعات نیز تنها در صورتی نیاز است که تغییرات مهمی در ساختار سیستم توزیع اتفاق افتاده باشد. این مرجع تنها منابع تولید پراکنده بادی و فتوولتایی را بررسی کرده و بحثی از مصرف‌کنندگان نهایی و پشتیبانی توان راکتیو توسط این منابع مطرح نکرده است.

مرجع [8] الگوریتمی برای کنترل ولتاژ بهینه شبکه توزیع ثانویه ارائه کرده که طبق بحث صورت گرفته در این مقاله، در نظر گرفتن تمام شین‌ها در سیستم‌های بزرگ، بار محاسباتی سنگینی را تحمیل می‌کند و در نتیجه غیرعملیاتی است. از این رو، کنترل توزیع شده بهینه ولتاژ با

مناسب، شبکه به چند ناحیه کنتری تجزیه شده و در انتها مقادیر بهینه تزریق توان راکتیو شین‌های کاندیدا، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود. به علت بالا بودن نرخ R/X در شبکه‌های توزیع نسبت به خطوط انتقال، روش‌های پخش بار سنتی از قبیل نیوتن-رافسون² را که مناسب سیستم‌های انتقال اند، نمی‌توان در سیستم توزیع به کار برد؛ از این رو برای محاسبه پخش بار و ماتریس حساسیت، باید از روش‌هایی که متناسب با خصوصیات شبکه توزیع است، استفاده کرد.

1.2. پخش بار شبکه‌های توزیع

روش پخش بار مورد استفاده در این مقاله، روش پخش بار سیستم‌های توزیع مبتنی بر ماتریس‌های جریان تزریقی شین به جریان شاخه³ (BIBC) و جریان شاخه به ولتاژ شین⁴ (BCBV) است [10]. این نوع پخش بار در مقایسه با پخش بارهای دیگر مطرح در سیستم‌های توزیع، سرعت بالایی دارد و از کارآمدی خوبی برخوردار است و برای تجزیه و تحلیل‌های زمان واقعی⁵ مناسب است. مبنای کار براساس دو ماتریس جریان تزریقی شین به جریان شاخه و جریان شاخه به ولتاژ شین است که با توجه به ساختار شبکه و نحوه ارتباط شین‌ها با خطوط و شماره‌گذاری آن‌ها به دست می‌آیند.

ماتریس‌های BIBC و BCBV براساس ساختار شبکه توزیع تشکیل می‌شوند. فرایند تشکیل این دو ماتریس که در مرجع [10] به طور کامل توضیح داده شده، در ادامه آورده شده است. در رابطه (1)، ماتریس BIBC نشان‌دهنده ارتباط بین جریان شین‌ها و جریان شاخه‌هاست که در این رابطه، B جریان شاخه و I جریان بار را نشان می‌دهد. از این طریق میزان تغییرات جزئی در جریان شاخه‌ها را که توسط تغییرات در جریان تزریقی شین‌ها روی می‌دهد، می‌توان به صورت مستقیم توسط ماتریس BIBC محاسبه کرد. طبق رابطه (2)، ماتریس BCBV ارتباط بین جریان شاخه‌ها و ولتاژ شین‌ها را بیان می‌کند. در این رابطه، ΔV میزان اختلاف ولتاژ را نشان داده و توسط این ماتریس می‌توان میزان تغییرات ولتاژ شین‌ها به واسطه تغییر جریان شاخه‌ها را به دست آورد.

$$[B] = [BIBC][I] \quad (1)$$

لحاظ کردن منابع تولید پراکنده ارائه شده است. این مرجع، تنها از منابع تولید پراکنده به عنوان ابزاری برای کنترل ولتاژ استفاده کرده و منابع کنترل توان راکتیو موجود در مصرف‌کننده‌های نهایی را مورد بررسی قرار نداده است. در مرجع [9] برای کنترل ولتاژ در شبکه‌های هوشمند، مدلی مبتنی بر حساسیت ولتاژ و استفاده از منابع تولید پراکنده ارائه شده است. ابزارهای کنترل توان راکتیو در این مرجع تنها منابع تولید پراکنده هستند و بحثی از منابع توان راکتیو موجود در مصرف‌کننده‌های نهایی نشده است.

با توجه به فعالیت‌های اشاره شده در مراجع و به علت عدم پوشش مصرف‌کنندگان نهایی در الگوریتم‌های کنترل ولتاژ ارائه شده و همچنین به علت نبود معیاری مناسب در انتخاب شین‌های کاندیدا با حضور مصرف‌کنندگان نهایی، نوآوری‌ها و نیز جنبه‌های بدیع مورد توجه این مقاله به قرار زیر است:

در این مقاله، روشی موسوم به کنترل ولتاژ توزیع شده¹ مبتنی بر منابع توان راکتیو موجود در مصرف‌کننده‌های نهایی، به عنوان روشی کارآمد پیشنهاد شده است. همچنین در چارچوب پیشنهادی معیاری جدید برای تعیین شین‌های کاندیدا ارائه می‌شود. با توجه به مدل‌های ارائه شده در مراجع و براساس بررسی‌های به عمل آمده توسط نویسندگان این مقاله، تاکنون چنین چارچوب جامعی برای مدل‌سازی کنترل ولتاژ شبکه‌های توزیع هوشمند که هم‌زمان بتواند مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی را نیز مدل نماید، ارائه نشده است.

در ادامه مقاله و در بخش 2، به نحوه مدل‌سازی مسئله، محاسبه ماتریس حساسیت، روش پخش بار توزیع استفاده شده و نیز روش شناسایی شین‌های کاندیدا پرداخته می‌شود. پس از آن در بخش 3، روش کنترل توزیع شده، توابع هدف مسئله و قیود مربوط به آن توضیح داده می‌شود. سپس در بخش 4، نحوه شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن بررسی می‌شود. در نهایت در بخش 5، نتایج کلی حاصل از اجرای روش پیشنهادی روی سیستم آزمایش نمونه بیان شده و تجزیه و تحلیل می‌شود.

2. مدل‌سازی مسئله

به منظور کنترل توزیع شده ولتاژ در شبکه‌های توزیع، ابتدا باید با استفاده از ماتریس حساسیت و پخش بار شبکه‌های توزیع، شین‌های کاندیدا تزریق توان راکتیو تعیین شود. سپس با استفاده از روشی

2. Newton-Raphson

3. Bus-Injection to Branch-Current (BIBC)

4. Branch-Current to Bus-Voltage (BCBV)

5. Real Time

1. Distributed Voltage Control

1. شین مرجع همیشه به عنوان شین شماره 1 نام گذاری می شود.
2. اندازه ولتاژ شین مرجع همیشه ثابت است.

در سیستم توزیع شعاعی تک منبعی، تمام شین‌ها به جز شین مرجع به عنوان شین بار (PQ) در نظر گرفته می شود. مطابق با محاسباتی که در مرجع [11] صورت گرفته، برای به دست آوردن ماتریس حساسیت $[Y_k]$ که شامل حساسیت توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ به توان راکتیو در شین‌های مختلف است، مطابق با رابطه (8)، نیاز به دو ماتریس $[C]$ و $[RC]$ است.

$$[Y_k] = \left[\frac{\partial P_1}{\partial Q_k} \dots \frac{\partial P_{N_{Br}}}{\partial Q_k} \frac{\partial Q_1}{\partial Q_k} \dots \frac{\partial Q_{N_{Br}}}{\partial Q_k} \frac{\partial V_2}{\partial Q_k} \dots \frac{\partial V_{N_{Br}+1}}{\partial Q_k} \right]^T \quad (7)$$

$$[C][Y_k] = [RC_k] \quad (8)$$

در رابطه (7)، N_{Br} تعداد شاخه‌های شبکه و ماتریس $[C]$ یک ماتریس مربعی به اندازه $3N_{Br}$ است. ماتریس $[C]$ از مشخصات شبکه بوده و ضرایب آن به ساختار شبکه بستگی دارد. روندنمای محاسبه ماتریس $[C]$ در مرجع [11] توضیح داده شده است. بردار ستونی $[RC_k]$ به اندازه $3N_{Br}$ بوده و تمام عناصر آن به جز عنصر $N_{Br} + k$ که تزریق توان راکتیو در شین شاخه k را نشان می دهد، صفر هستند. بردار ستونی $[Y_k]$ توسط روش فاکتورگیری LU¹ ماتریس $[C]$ که در مرجع [12] آمده است، به دست می آید. مطابق با رابطه (7)، حساسیت ولتاژ به تزریق توان راکتیو که در این مقاله مورد نیاز است، N_{Br} عنصر انتهایی ماتریس $[Y_k]$ را شامل می شود.

3.2. به دست آوردن شین‌های کانیددا

حال با دانستن نحوه محاسبه ماتریس حساسیت ولتاژ به توان راکتیو تزریقی در شین‌های مختلف، روند تعیین شین‌های کانیددا بیان می شود. برای به دست آوردن شین‌های کانیددا، باید شین‌هایی را مشخص کرد که نسبت به شین‌های دیگر در تابع هدف، تأثیر بیشتری دارند. تابع هدف مورد بررسی در این مقاله، اختلاف ولتاژ از مقدار مرجع خود است:

$$f = \sum_{i=1}^{N_b} [V_i - V_{spec}]^2 = \sum_{i=1}^{N_b} [\eta_i]^2 \quad (9)$$

که در آن:

$$\eta_i = V_i - V_{spec} \quad (10)$$

1. LU Factorization

$$[\Delta V] = [BCBV][B] \quad (2)$$

با ترکیب عبارت‌های (1) و (2)، رابطه (3) به دست می آید که ارتباط بین جریان و ولتاژ شین‌ها را مشخص می کند:

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I] = [DLF][I] \quad (3)$$

برای حل پخش بار توزیع از عبارت‌های (4) تا (6) به صورت تکراری برای تمام شین‌ها استفاده می شود:

$$I_i^k = I_i^r(V_i^k) + jI_i^i(V_i^k) = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (4)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF][I^k] \quad (5)$$

$$[V^{k+1}] = [V^0] + [\Delta V^{k+1}] \quad (6)$$

در روابط اخیر، I_i^r و I_i^i به ترتیب مقادیر حقیقی و موهومی جریان I_i^k هستند. با توجه به رابطه (4) مشاهده می شود که برای به دست آوردن جریان تزریقی ناشی از بار واقع شده روی شین شماره i در تکرار شماره k ، به توان اکتیو و راکتیو کشیده شده از این شین و ولتاژ این شین در همان تکرار نیاز است. بار هر شین در ابتدای مسئله مشخص است و برای تکرار اول این پخش بار، باید مقدار ولتاژ را به صورت پیش فرض در نظر گرفت و در تکرارهای بعدی، از ولتاژ به دست آمده از تکرار قبل استفاده کرد. در مرحله بعد، از رابطه (5) استفاده می شود که در این رابطه، ماتریس DLF مشخص و ثابت است و بردار جریان‌ها نیز از رابطه (4) به دست می آید. به این ترتیب اختلاف ولتاژ ناشی از این جریان‌ها برای تمامی شین‌ها به دست می آید. این مقادیر برای محاسبه ولتاژ شین‌ها در تکرار بعدی توسط رابطه (6) استفاده می شود. همان طور که در این رابطه مشاهده می شود، ولتاژ شین در مرحله بعدی از جمع ولتاژ اولیه با اختلاف ولتاژ حاصل به دست می آید. در تکرار بعد، مجدداً جریان‌ها با استفاده از رابطه (4) محاسبه می شوند. این فرایند تا جایی ادامه می یابد که مقادیر اختلاف ولتاژ برای تمامی شین‌ها از آستانه خطای مورد نظر کمتر شوند.

2.2. روش محاسبه ماتریس حساسیت

با توجه به مباحث ذکر شده در ابتدای این بخش، برای به دست آوردن ماتریس حساسیت، نمی توان از روش معکوس ماتریس ژاکوبین استفاده کرد. از این رو در این بخش، از روش محاسباتی جدیدی برای به دست آوردن ماتریس حساسیت استفاده می شود [11]. برای اجرای الگوریتم برای محاسبه ماتریس حساسیت در شبکه توزیع، فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

برای به دست آوردن توان راکتیو در دسترس، در ابتدا باید به این مسئله توجه کرد که یک بار الکتریکی چه مدت زمانی به شبکه متصل است که عملاً بتوان آن را با مفهوم ضریب مشارکت یکسان دانست. با توجه به فناوری‌های موجود در ادوات الکترونیک قدرت در نسل جدید بارهای الکتریکی، این امکان فراهم شده که بار الکتریکی بتواند در حالت خاموشی هم به شبکه توان راکتیو تزریق کند [13 و 14]. باید به این مسئله توجه داشت که دسترس پذیری توان راکتیو در حالت خاموشی بار الکتریکی نسبت به حالت روشن بودن بیشتر است، به این معنا که یک مصرف‌کننده نهایی در حالت خاموشی، به دلیل اینکه هیچ ظرفیتی از ادوات الکترونیک قدرت آن توسط توان راکتیو اشغال نشده، می‌تواند ظرفیت بیشتری را در اختیار شبکه قرار دهد؛ ولی در حالت روشن بودن مصرف‌کننده مقداری از ظرفیت ادوات، توسط توان راکتیو اشغال شده و باقی‌مانده آن توسط توان راکتیو اشغال می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده، از رابطه (13) می‌توان متوسط توان راکتیو قابل تحویل به شبکه Q^{avg} را به دست آورد:

$$Q^{avg}(i) = P_{on,i} \times Q_{on,i}^{accessible} + (1 - P_{on,i}) \times Q_{off,i}^{accessible} \quad (13)$$

که در آن، P_{on} ضریب مشارکت، Q_{on} توان راکتیو در دسترس در حالت روشن بودن واحد، Q_{off} توان راکتیو در دسترس در حالت خاموش بودن واحد است.

با توجه به گروه‌بندی بارها، انتخاب شین‌های کانیدیا علاوه بر ماتریس حساسیت از عامل دیگری نیز تأثیرپذیر است. با توجه به توان راکتیو متوسط به دست آمده در بخش قبل، رابطه (14) حاصل می‌شود:

$$\nabla f = |2\eta\Lambda_{VQ} \times Q^{avg}(i)| \quad (14)$$

شین‌هایی با حساسیت بالاتر، کنترل بهتری را بر روی پروفیل ولتاژ دارند، ولی شین‌هایی با حساسیت صفر هیچ اثری بر روی پروفیل ولتاژ ندارند. با تشخیص شین‌هایی با بالاترین مقدار حساسیت بر روی تابع هدف g ، شین‌های کانیدیا به دست می‌آیند. روندنمای به دست آوردن شرایط اولیه برای محاسبه ماتریس حساسیت و انتخاب شین‌های کانیدیا تزریق توان راکتیو، به صورت شکل (1) است.

در رابطه (9)، V_{spec} ولتاژ مرجع مطلوب (ولتاژ مرجع در این مقاله یک می‌باشد) است. تابع هدف مذکور، هدف اصلی کنترل ولتاژ را ارضا می‌کند؛ اما باید توجه کرد که این کنترل ولتاژ توسط توان‌های راکتیو تزریق شده شین‌های کانیدیا تأمین می‌شود؛ از این رو مقادیر توان راکتیو تزریق شده در تمام شین‌ها تا حد امکان باید کمینه شود تا طرح پیشنهادی مطلوب و قابل اجرا باشد. بر این اساس، عبارتی که تغییرات توان راکتیو در تمام شین‌های کانیدیا را نشان می‌دهد، به تابع هدف اضافه شده و رابطه (9) به صورت رابطه (11) اصلاح می‌شود.

$$g = \min \left(\sum_{i=1}^{N_b} [V_i - V_{spec}] + \alpha \sum_{j=1}^M |\Delta Q_j| \right) \quad (11)$$

در رابطه اخیر، $|\Delta Q_j|$ تغییرات خالص توان راکتیو شین M, j تعداد شین‌های کانیدیا و α ضریب جریمه برای تغییرات توان راکتیو هستند. باید توجه داشت که به منظور بهینه‌کردن تابع هدف مذکور، متغیرهای کنترلی، توان راکتیو تزریق شده در شین‌های کانیدیا هستند. مشتق تابع هدف g نسبت به ولتاژ شین‌های مختلف می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین شین‌های کانیدیا انتخاب شود.

$$\nabla f = |2\eta\Lambda_{VQ}| \quad (12)$$

با این حال، این معیار به تنهایی نمی‌تواند شرایط واقعی را پوشش دهد؛ زیرا ممکن است شینی از حساسیت بالایی برخوردار باشد، ولی در حالت بهره‌برداری، توان راکتیو کمی برای تزریق به شبکه در اختیار داشته باشد. از این رو معیاری باید در نظر گرفت که توان راکتیو در دسترس شین را نیز در تعیین شین‌های کانیدیا در نظر بگیرد. به همین دلیل گروه‌بندی بارها مطرح می‌شود.

1.3.2. گروه‌بندی بارها

گروه‌بندی بار عاملی است که بر انتخاب شین‌های کانیدیا به عنوان شین‌های تزریق‌کننده توان راکتیو تأثیر بسزایی دارد. بار الکتریکی را می‌توان از نظر توانایی مشارکت در تزریق توان راکتیو، به گروه‌هایی تقسیم کرد. نحوه گروه‌بندی بر اساس ساختار کنترلی ادوات الکترونیک قدرت به کاررفته در مصرف‌کننده‌های نهایی و میزان توان راکتیو در دسترس است. ساختار ادوات الکترونیک قدرت به کاررفته میزان مشارکت توان راکتیو بار را از نظر سیستم کنترلی تعیین می‌کند. در این مقاله، به علت در دسترس نبودن اطلاعات مربوط به نحوه کنترل پذیری ادوات مورد استفاده در مصرف‌کننده‌های نهایی، تنها از معیار توان راکتیو در دسترس برای گروه‌بندی استفاده شده است.

از هم تقسیم می‌کند، سیستم مخابراتی مورد نیاز در شبکه نیز به زیرسیستم‌هایی تقسیم می‌شود. تقسیم سیستم مخابراتی به چند زیرسیستم، موجب کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در سیستم مخابراتی مورد نیاز شده و روش کنترل توزیع‌شده را به‌عنوان یک روش قابل اجرا تبدیل می‌کند.

3. کنترل توزیع‌شده

پس از تعیین شین‌های کاندیدها، نحوه مدل‌سازی مسئله کنترل توزیع‌شده ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌علت ناکارآمدی کنترل مرکزی در شبکه‌های هوشمند و توجه‌پذیر نبودن پوشش دادن تمام شین‌ها از نظر اقتصادی، کنترل توزیع‌شده به‌عنوان گزینه‌ای که زیرساخت ارتباطی کمتری نسبت به کنترل مرکزی دارد، مطرح می‌شود. به‌منظور کنترل توزیع‌شده ولتاژ در یک شبکه، ابتدا باید شبکه از نظر کنترلی به چند ناحیه تقسیم شود [8]. از این‌رو در این مقاله، ابتدا توسط تجزیه اپسیلون ماتریس حساسیت، شبکه به چند ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مقادیر بهینه توان راکتیو تزریقی توسط شین‌های کاندیدها محاسبه می‌شود.

تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی به‌صورت روابط (16) تا (18)

هستند:

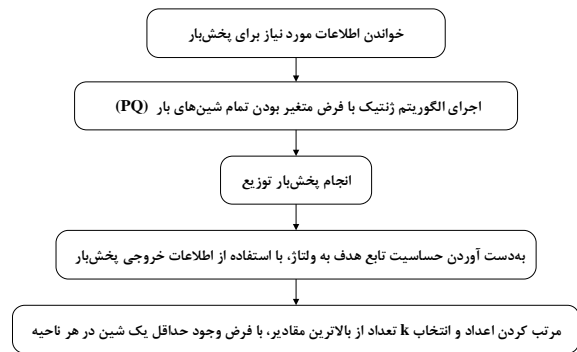
$$Objective = \min \left(\sum_{i=1}^{N_b} [V_i - V_{spec}] + \alpha \sum_{j=1}^M [\Delta Q_j] \right) \quad (16)$$

$$V_l < V_i < V_{up}, i = 1, \dots, N_{sub-network} \quad (17)$$

$$\Delta Q_j < Q_j^{accessible}, j = 1, \dots, M \quad (18)$$

در این روابط، V_l و V_{up} به‌ترتیب، مقادیر ولتاژ مجاز بالا و پایین، V_{spec} ولتاژ مرجع مطلوب (ولتاژ مرجع در این مقاله یک است) ΔQ_j توان راکتیو تزریق‌شده در شین‌های کاندید، α ضریب جریمه، M تعداد شین‌های کاندید، N_b تعداد شین‌ها و $Q_j^{accessible}$ بیشینه توان راکتیو قابل تزریق است. برای محاسبه مقدار توان راکتیو در دسترس، باید تجزیه و تحلیل مجزایی در یک خانه هوشمند و طی مدت زمان معینی انجام شده و روابط بین توان اکتیو، راکتیو و ظرفیت کانورترهای موجود به‌دست آید. اما با توجه به این نکته که چنین ارزیابی‌هایی خارج از چارچوب بحث این مقاله است، به‌منظور ارزیابی روش کنترلی پیشنهادی، توان راکتیو در دسترس به‌صورت رابطه (19) در نظر گرفته شده است.

$$Q_j^{accessible} = 0.5 \times (P_j + Q_j), j = 1, \dots, M \quad (19)$$



شکل (1): روندنمای به‌دست‌آوردن شین‌های کاندیدها

مطابق الگوریتم نشان‌داده‌شده در شکل (1)، ابتدا با فرض قابلیت تزریق توان راکتیو در تمام شین‌های بار، میزان تزریق بهینه شین‌ها برای بهبود تابع هدف، توسط الگوریتم ژنتیک به‌دست می‌آید. سپس با محاسبه مقدار بهینه تزریق توان راکتیو در هر شین، ماتریس حساسیت و رابطه (13) به‌دست می‌آید. پس از محاسبه ∇f ، تعداد k عنصر از بالاترین مقادیر آن به‌عنوان شین‌های کاندید انتخاب می‌شود.

3.2. تجزیه اپسیلون

به‌منظور بخش‌بندی یک شبکه به ناحیه‌های کنترلی، باید از روشی برای تجزیه شبکه استفاده کرد. در این مقاله، از روش تجزیه اپسیلون به‌عنوان یک روش کارآمد برای تجزیه شبکه به نواحی کنترلی استفاده شده است [8 و 15].

$$\Lambda_{VQ} = \Lambda'_{VQ} + \varepsilon R \quad (15)$$

در رابطه (15)، Λ'_{VQ} ماتریس حساسیتی با عناصر بزرگ‌تر از مقدار اپسیلون است که به مفهوم حفظ وابستگی‌های قوی در شبکه است. همچنین، عبارت εR ماتریس باقی‌مانده است که به مفهوم وابستگی‌های ضعیف در شبکه است. تمام عناصر ماتریس R کوچک‌تر یا مساوی یک هستند. حال از طریق ماتریس Λ'_{VQ} می‌توان ساختار نواحی ایجادشده توسط تجزیه اپسیلون را به‌دست آورد. پس از تجزیه شبکه به نواحی مجزا، ممکن است شین‌هایی وجود داشته باشند که در هیچ ناحیه‌ای قرار نگرفته‌اند. محدوده پوشش این نواحی با کوچک و بزرگ کردن مقدار اپسیلون تغییرپذیر است.

از آنجاکه تجزیه اپسیلون، سیستم را به نواحی کوچک‌تر و مستقل

4. شبیه‌سازی و ارائه نتایج

در این قسمت، به منظور شبیه‌سازی کنترل توزیع شده و ارزیابی روش پیشنهادی، روش مذکور روی شبکه نمونه 33 شینه IEEE اجرا می‌شود. داده‌های مربوط به این شبکه از مراجع [16] و [17] استخراج شده‌اند. در بحث تجزیه نواحی دو سناریو برای مقدار عددی اپسیلون مطرح است:

○ سناریوی اول: مقدار اپسیلون برابر با 0/00005 است.

○ سناریوی دوم: مقدار اپسیلون برابر با 0/00025 است.

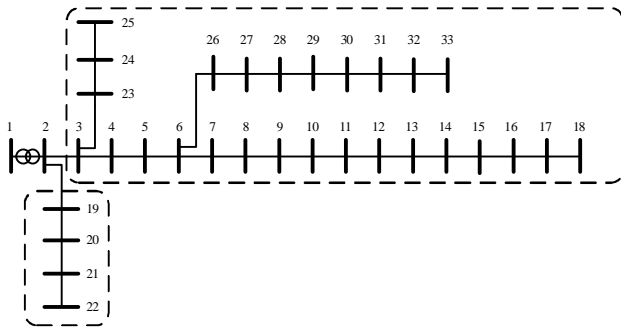
به منظور بررسی تأثیر افزایش تعداد شین‌های کاندیدا بر روی پروفیل ولتاژ، دو تعداد شین کاندیدا 12 و 20 در نظر گرفته شده است.

در این بخش از مقاله، با توجه به انجام مطالعه روی یک شبکه آزمایش نوعی و به دلیل عدم وجود اطلاعات واقعی نظیر ضرایب مشارکت و توان راکتیو در دسترس در حالت روشن و خاموش بودن مصرف‌کنندگان نهایی، متوسط توان راکتیو در دسترس، مطابق با جدول ارائه شده در بخش ضمایم استفاده شده است. بدیهی است برای استفاده از مدل ارائه شده در سیستم‌های واقعی، می‌توان بدون هیچ محدودیتی از اطلاعات واقعی مربوط استفاده کرد. گفتنی است مقدار ضریب α با استفاده از سعی و خطا محاسبه شده و مقداری برابر با 9×10^{-8} است.

با استفاده از تجزیه اپسیلون، نواحی به وجود آمده در دو سناریوی مطرح شده به صورت شکل (2) و (4) هستند. در ادامه، سناریوهای مختلف مطرح شده به صورت مجزا بررسی می‌شوند.

1.4. سناریوی اول

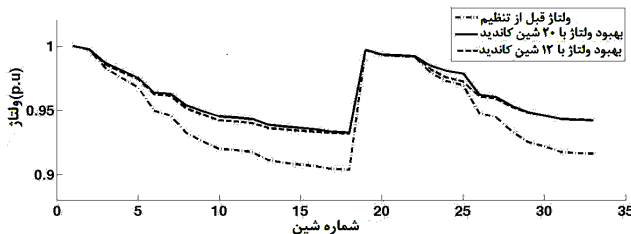
همان‌طور که در شکل (2) مشاهده می‌شود، براساس تجزیه اپسیلون تعداد دو ناحیه حاصل می‌شود. با استفاده از روندنمای توضیح داده شده در شکل (1)، شین‌های کاندیدا تزریق‌کننده توان راکتیو به دست می‌آیند که نتایج آن در جدول (2) آورده شده است. اکنون، به منظور اجرای کنترل توزیع شده و محاسبه مقادیر بهینه تزریق توان راکتیو شین‌های کاندیدا، از الگوریتم ژنتیک [18] استفاده می‌شود. پارامترهای الگوریتم ژنتیک مورداستفاده در جدول (1) آورده شده است.



شکل (2): حالت شبکه در حالت تجزیه با مقدار اپسیلون 0/00005

جدول (1): پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم ژنتیک

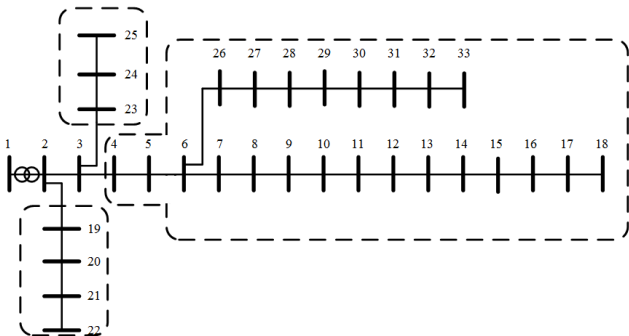
جاب‌جایی	تولید مجدد	جهش	تقاطع	جمعیت	تعداد نسل
0/1	0/1	0/7	0/1	100	200



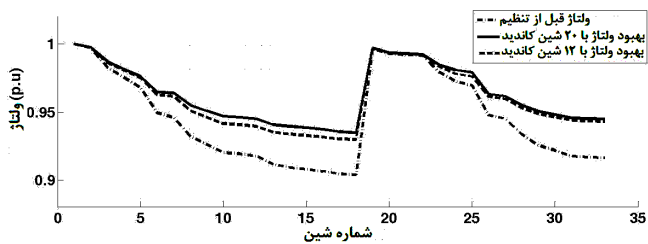
شکل (3): مقدار ولتاژ قبل و بعد از کنترل ولتاژ توزیع شده با 12 و 20 شین کاندیدا

جدول (2): شین‌های کاندیدا در سناریو دوم با مقدار اپسیلون 0/00005

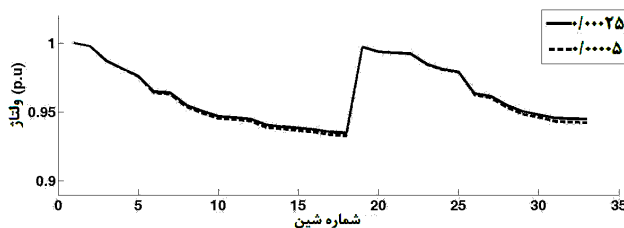
شین‌های کاندیدا	
12 شین	7 8 13 14 16 17 18 22 29 30
	31 32 - - - - -
20 شین	7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
	17 18 22 24 25 29 30 31 32 33



شکل (4): حالت شبکه در حالت تجزیه با مقدار اپسیلون 0/00025



شکل (5): مقدار ولتاژ قبل و بعد از کنترل ولتاژ توزیع شده



شکل (6): مقایسه پروفیل ولتاژ شین‌ها در دو سناریوی مختلف شبیه‌سازی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از 20 شین کاندیدا بهبود بیشتری را نسبت به 12 شین ایجاد می‌کند. به‌منظور مقایسه میزان بهبود ولتاژ در دو سناریو، نمودارهای پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن 20 شین کاندیدا در دو سناریو مطابق با شکل (6) رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی دوم پروفیل ولتاژ نسبت به سناریوی اول بهبود بیشتری دارد و علت آن وجود نواحی بیشتر در سناریو دوم است که باعث می‌شود کنترل ولتاژ بیشتر به‌صورت محلی بررسی شود.

5. نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل توزیع شده ولتاژ با استفاده از مصرف‌کنندگان نهایی پیشنهاد شده است. ابتدا با استفاده از پخش‌بار شبکه‌های توزیع و روندنمای پیشنهادی، مکان‌های مناسب برای تزریق توان راکتیو مشخص شده و سپس با استفاده از تجزیه اپسیلون، شبکه به چند ناحیه‌ی کنترلی تقسیم می‌شود. با اجرای کنترل توزیع شده، مقادیر بهینه توان راکتیو تزریقی در شین‌های کاندیدا در هر ناحیه به‌دست می‌آیند. برای اجرای کنترل توزیع شده پیشنهادی و محاسبه مقادیر بهینه تزریق توان راکتیو شین‌های کاندیدا، کنترل توزیع شده توسط الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود. روش کنترل پیشنهادی، پروفیل ولتاژ را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد شین‌های کاندیدا، میزان بهبود ولتاژ نیز بیشتر می‌شود. همچنین مطابق

جدول (3): شین‌های کاندیدا در سناریوی دوم با مقدار اپسیلون

0/00025

شین‌های کاندیدا

	7	8	13	14	16	18	22	25	29	30
12 شین	31	32	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
20 شین	17	18	22	24	25	29	30	31	32	33

همان‌طور که در شکل (3) مشاهده می‌شود، پروفیل ولتاژ با اجرای کنترل توزیع شده، بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. این بهبود اکثراً در شین‌هایی است که ولتاژ پایینی دارند. به‌همین دلیل تزریق توان راکتیو، بیشتر در شین‌های کاندیدی صورت می‌گیرد که به بهبود پروفیل ولتاژ این شین‌ها کمک افزون‌تری کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از 20 شین کاندیدا، بهبود ولتاژ بیشتری را نسبت به 12 شین کاندیدا ایجاد می‌کند.

2.4. سناریوی دوم

مطابق با شکل (4)، تعداد نواحی حاصل از تجزیه اپسیلون، سه ناحیه است. با استفاده از روندنمای توضیح داده شده در شکل (1)، شین‌های کاندیدی تزریق‌کننده توان راکتیو به‌دست می‌آیند که نتایج آن در جدول (3) آورده شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، کنترل توزیع شده انجام شده و مقادیر بهینه تزریق توان راکتیو به‌دست می‌آیند.

مطابق با شکل (5)، پروفیل ولتاژ با انجام کنترل توزیع شده، بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده و تغییرات قابل توجه پروفیل ولتاژ بیشتر در شین‌هایی اتفاق می‌افتد که قبل از اجرای کنترل توزیع شده از ولتاژ پایینی برخوردار بوده‌اند. از این‌رو تزریق توان راکتیو بیشتر در شین‌های کاندیدی انجام می‌شود که به بهبود ولتاژ این شین‌ها کمک بیشتری کند.

6	23/95	22	55/97
7	130/35	23	56/25
8	125/53	24	370/13
9	38/29	25	261/19
10	33/85	26	36/33
11	33/15	27	35/55
12	40/24	28	35/05
13	39/86	29	75/54
14	91/04	30	340/57
15	31/84	31	95/08
16	37/07	32	136/54
17	23/19	33	43/35

با نتایج به دست آمده، افزایش تعداد نواحی موجب هدایت مسئله به سمت تجزیه و تحلیل محلی شده و در نتیجه، تأثیر مستقیمی بر روی بهبود مضاعف پروفیل ولتاژ می‌گذارد.

ضمایم

مقادیر متوسط توان راکتیو در دسترس برای سیستم آزمایش تحت مطالعه، در جدول الف ارائه شده است.

جدول الف: مقادیر متوسط توان راکتیو در دسترس سیستم تحت مطالعه			
شماره شین	توان راکتیو متوسط در دسترس (KVar)	شماره شین	توان راکتیو متوسط در دسترس (KVar)
2	74/5	18	52/76
3	52/85	19	55/33
4	90/16	20	55/92
5	37/252	21	60/88

مراجع

- [1] Kundur, P., *Power System Stability and Control*: Tata McGraw-Hill Education, 1994.
- [2] RECIO, C. J., "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, IL, 2012.
- [3] Rogers, R. K. K. M., Khurana, H., Overbye, T. J., "Smart-Grid – enabled load and distributed generation as a reactive resource", presented at the IEEE PES Conf. Innovative Smart Grid Technol, Jan. 2010.
- [4] Rogers, R. K. K. M., Khurana, H., Aquino-Lugo, A., Overbye, T. J., "An authenticated control framework for distributed voltage support on the smart grid", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, pp. 40–47, Jun. 2010.
- [5] Aquino-Lugo, A. A., Klump, R., Overbye, T. J., "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, Mar. 2011.
- [6] Vaccaro, A. V., Velotto, G., Zobaa, A. F., "A decentralized and cooperative architecture for optimal voltage regulation in smart grids", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 10, pp. 4593 – 4602, Oct. 2011.
- [7] Anna, G. F., Fazio, R. D., Russo, M., "Decentralized control of distributed generation for voltage profile optimization in smart feeders", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 3, pp. 1586 – 1596, Sep. 2013.
- [8] Yu, L., Czarkowski, D., León, F. D., "Optimal distributed voltage regulation for secondary networks with DGs", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 2, pp. 959-967, Jun. 2012.
- [9] Brenna, M. D. B., et. al., "Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 2, pp. 877 – 885, Jun. 2013.
- [10] Teng, J. H., "A direct approach for distribution system load flow solutions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, pp. 882-887, Jul. 2003.
- [11] Khatod, D. K., Pant, V., Sharma, J., "A novel approach for sensitivity calculations in the radial distribution system", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, Oct. 2006.
- [12] Tewarson, R. P., *Sparse Matrices*, New York: Academic Press, pp.1-10-83-94, 1973.
- [13] Cody, J., Göl, Ö., Nedic, Z., Nafalski, A., Mohtar, A., "Regenerative braking in an electric vehicle" Branzowy Condo Research and Development Electrical Machines, Komel, 2009.
- [14] Rashid, M. H., *Power Electronics handbook*: Academic Pr, 2001.
- [15] Sezer, M., Šiljak, D., "Nested ϵ -decompositions and Clustering of Complex Systems", Automatica, Vol. 22, pp. 321-331, 1986.
- [16] Babu, P. R., Rakesh, C., Kumar, M., Srikanth, G., Reddy, D. P., "A novel approach for solving distribution networks", Annual IEEE India Conference (INDICON), pp. 1-5, Dec. 2009.

23 کنترل توزیع‌شدهٔ توان راکتیو در شبکه‌های هوشمند با در نظر گرفتن مصرف‌کننده‌های نهایی

- [17] Baran, M. E., Wu, F. F., "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, Apr. 1989.
- [18] Rao, S. S., Rao, S., *Engineering Optimization: theory and Practice*: John Wiley & Sons, 2009.