



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 4, 2023
Research Paper

Voltage and reactive power control in distribution networks in capacitors and OLTC coordination using fuzzy logic

Mohadeseh Mokhtari¹, Mehdi Gholipur², Rahmat-Allah Hooshmand³, Abbas Marefat⁴

¹ MSc. Student, Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Associate professor, Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

³ Professor, Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

⁴ Engineer, Isfahan regional electric company, Isfahan, Iran

Abstract:

Lack of coordination between the operation of capacitors and OLTC to voltage control is one of the basic problems in distribution networks, which can cause problems in the control function. In this paper, a new control method is proposed to create coordination between the operation of capacitors and OLTC. The criterion of this coordination is based on fuzzy logic to determine the status of transformer and capacitor function, which reduces unnecessary switching. In this method, the control function is considered with more accuracy such that the quantity of voltage and power factor are set within the range of 0.98 to 1.02 p.u and between 0.95 lag and lead, respectively. Another advantage of the proposed method is that it is automatic and eliminates human resources to adjust the position of the transformer and capacitors. Simulation results are done on the 14-bus network by using two software MATLAB and DIGSILENT, that these results show the accuracy of the proposed method in the desired performance in distribution networks.

Keywords: OLTC, Reactive power, Capacitor, Power factor, Voltage control, Fuzzy logic.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2021.129178.1482>

مقاله پژوهشی

کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع با هماهنگی خازن و OLTC با استفاده از

منطق فازی

محدثه مختاری^۱، مهدی قلی پور^{۲*}، رحمت‌الله هوشمند^۳، عباس معرفت^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

mohaddesemokhtari9@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

e.gholipour@eng.ui.ac.ir

۳- استاد دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

hooshmand_r@eng.ui.ac.ir

۴- پرسنل برق منطقه‌ای اصفهان - اصفهان - ایران

abmarefat@chmail.ir

چکیده: یکی از مشکلات اساسی در شبکه‌های توزیع، نبود هماهنگی میان عملکرد خازن‌ها و ترانسفورماتورهای تپ‌چنجر دار به منظور کنترل ولتاژ است که این ناهماهنگی، عملکرد کنترل را با مشکل روبه‌رو می‌کند. در این مقاله یک روش کنترلی جدید برای ایجاد هماهنگی میان عملکرد خازن‌ها و تپ ترانسفورماتور ارائه شده است. معیار این هماهنگی براساس منطق فازی در تعیین تپ ترانس و عملکرد پله‌های خازنی بوده که موجب کاهش کلیدزنی‌های غیرضروری شده است. در این روش، عملکرد کنترل با دقت بیشتری در نظر گرفته شده است؛ به گونه‌ای که مقدار ولتاژ در محدوده ۰/۹۸ تا ۱/۰۲ پریونیت و مقدار ضریب توان در محدوده بین ۰/۹۵ پیش‌فاز و پس‌فاز تنظیم می‌شود. از دیگر مزیت‌های روش پیشنهادی، اتوماتیک‌بودن آن و حذف منابع انسانی به منظور تنظیم موقعیت تپ ترانسفورماتور و پله‌های خازن‌ها است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از دو نرم‌افزار MATLAB و DIGSILENT روی شبکه ۱۴ باسه انجام شده‌اند که این نتایج، صحت روش پیشنهادی را در عملکرد مطلوب کنترل ولتاژ در شبکه‌های توزیع نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: ترانسفورماتورهای تپ‌چنجر دار، توان راکتیو، خازن، ضریب توان، کنترل ولتاژ، منطق فازی.

۱- مقدمه

CB^۲ کند هستند و پاسخ‌دادن آنها به نوسانات ولتاژ، زمان‌بر است. همچنین، با افزایش کلیدزنی ممکن است عمر آنها کوتاه شود؛ بنابراین، در صورتی که تغییرات ولتاژ سریع باشد، استفاده از اینگونه وسایل مفید نیست و باید از روش‌های دیگری استفاده کرد. در بسیاری از مطالعات اخیر برای تنظیم ولتاژ از چند وسیله به‌طور هم‌زمان استفاده شده است. زمانی که از یک وسیله با عملکرد کند و یک وسیله با عملکرد سریع استفاده می‌شود، برای جبران هر نوسان از وسیله متناسب استفاده می‌شود. این امر موجب کاهش کلیدزنی تجهیزات با عملکرد کند می‌شود و طول عمر آنها

برای کنترل ولتاژ در شبکه توزیع با توجه به تغییر بار که می‌تواند سریع یا آرام باشد، از وسایل متنوعی استفاده می‌شود. بسیاری از وسایل تنظیم ولتاژ مانند OLTC^۱ و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

نام نویسنده مسئول: مهدی قلی پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی

هماهنگی بهینه‌تپ‌چنجر، SVR، خازن‌های سوئیچ‌شونده و ذخیره‌کننده‌های انرژی برای حداقل کردن تلفات انرژی و بهبود پروفیل ولتاژ، با استفاده از الگوریتم GA^۱ در [۱۱] ارائه شده است.

در [۱۲،۱۳] یک روش کنترل ولت / وار هم‌زمان با مقیاس زمانی چندگانه بیان شده است که به عملکرد هم‌زمان تپ‌چنجر، بانک‌های خازنی و اینورترهای منابع انرژی تجدیدپذیر برای مقابله با نوسان و انحراف ولتاژ کمک می‌کند. برای هماهنگی تپ‌چنجر، خازن و منابع انرژی توزیع‌شده، روش جدیدی با عنوان VAR-BIAS در [۱۴،۱۵] ارائه شده است که از آن برای اصلاح عملکرد تپ‌چنجر در مقابل تغییرات ولتاژ، با توجه به جریان اکتیو و راکتیو استفاده می‌شود. در [۱۶] به منظور کنترل ولت / وار، ساختاری سه سطحی بیان شده است که به صورت روزانه، ساعتی و دقیقه، میزان تولید مزرعه بادی را پیش‌بینی کرده است و در نهایت از عملکرد غیرضروری تجهیزات کنترل ولتاژ جلوگیری می‌شود. در [۱۷] یک روش دو مرحله‌ای به منظور هماهنگ‌سازی تپ‌چنجر، بانک‌های خازنی و DG ارائه شده است که از دو نوع کنترلر MAC^۲ و SAC^۳ برای ایجاد ارتباط استفاده می‌شود. در [۱۸] روشی برای انتخاب گروهی از متغیرهای کنترلی (DG, OLTC, CBs) با بیشترین تأثیر برای کنترل ولتاژ در شبکه توزیع ارائه شده است. در [۱۹] به منظور کنترل یکپارچه ولتاژ و توان راکتیو، ساختاری با هفده ناحیه کنترلی ارائه شده است. برای هر یک از نواحی به صورت تجربی سناریویی تعیین شده که این سناریوها براساس تغییر وضعیت خازن یا تپ ترانسفورماتور است. با به‌کارگیری این سناریوها، شبکه به صورت صفر و یک عمل می‌کند که مشکل اصلی این روش است.

در [۲۰] روشی دو مرحله‌ای برای کنترل وسایلی از قبیل OLTC, DER^۴ و CBs ارائه شده است. هدف مرحله اول، کاهش هزینه و هدف مرحله دوم، پایداری ولتاژ در شرایط بحرانی است. در [۲۱] به منظور رفع مشکل تجمع منابع تجدیدپذیر در شبکه توزیع، از تکنیک MSO^۱ استفاده شده است. با استفاده از این تکنیک، عملکرد

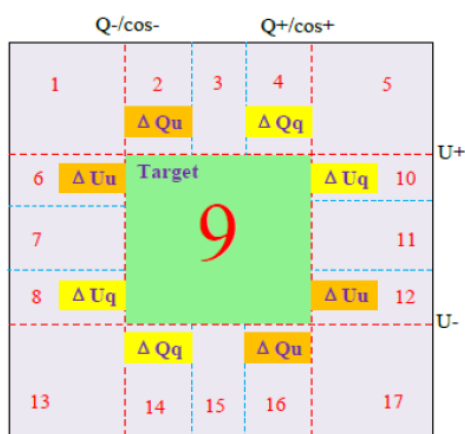
افزایش می‌یابد. استفاده هم‌زمان از OLTC و CB به منظور کنترل ولتاژ، یکی از مواردی است که مکرر از آن استفاده شده است. ورود خازن به شبکه موجب افزایش ولتاژ و کاهش توان راکتیو تزریقی توسط شبکه می‌شود. همچنین، افزایش موقعیت تپ موجب افزایش توان راکتیو تزریقی شبکه می‌شود و ولتاژ سمت ثانویه ترانسفورماتور افزایش می‌یابد. اگر در یک شبکه، خازن و OLTC وجود داشته باشند و مقدار ولتاژ تغییر کند، در صورت نبود هماهنگی میان این دو تجهیز، هر دو وارد عمل می‌شوند و ممکن است تداخل عملیاتی و حلقه کلیدزنی ایجاد شود. این اتفاق موجب پایین آمدن کیفیت ولتاژ و کاهش طول عمر تجهیزات می‌شود؛ بنابراین، برای رفع این مشکل هماهنگی میان این دو تجهیز الزامی است.

در [۱] الگوریتمی برای ورود و خروج خازن‌ها در شین ۲۴ کیلوولت در پست‌های فوق توزیع ارائه شده است که بدون نیاز به پخش بار در شبکه و صرفاً با داده‌های محلی با قابلیت پیاده‌سازی آسان و دقت کافی، موجب کنترل بهینه توان راکتیو، تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات در شبکه می‌شود. به منظور رفع مشکل کلیدزنی متناوب OLTC، در [۲-۴] روشی ارائه شده است تا بتوان در شرایطی که در شبکه سیستم‌های فتوولتائیک وجود دارند، با استفاده از هماهنگ‌سازی OLTC و باتری‌های ذخیره‌ساز انرژی، تعداد دفعات کلیدزنی OLTC و انحراف ولتاژ حداقل شود. در [۵،۶]، یک روش کنترل ولتاژ محلی مبتنی بر MPC^۲ ارائه شده است تا بتوان انحراف ولتاژ ناشی از عدم قطعیت DG^۳ را به حداقل رساند. استفاده از این روش موجب کاهش تلفات شبکه و کاهش محاسبات آن می‌شود که در [۷] روشی جهت کاهش محاسبات ارائه شده است. استفاده از توان راکتیو سیستم‌های فتوولتائیک یکی دیگر از روش‌های تنظیم ولتاژ است که در [۸] بیان شده است.

به منظور حداقل کردن ولتاژ و همچنین، کاهش تعداد دفعات عملکرد تجهیزات کنترل ولتاژ در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، روشی در [۹،۱۰] ارائه شده است که امکان هماهنگ‌سازی کلیدزنی چند OLTC در آن وجود دارد.

محور افقی، ضریب توان است. در این شکل هدف این است که مقدار ولتاژ و ضریب توان به صورت هماهنگ به ترتیب بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت و بین ۰/۹۵ پیش فاز و پس فاز کنترل شود؛ بنابراین، اگر مقدار ولتاژ و ضریب توان هر دو در محدوده تعریف شده باشد (ناحیه ۹)، شرایط مطلوب است. در غیر این صورت، اگر یکی از مقادیر ولتاژ و ضریب توان یا هر دوی آنها خارج از محدوده تعریف شده قرار داشته باشند، لازم است در این حالت سیستم کنترل واکنش نشان دهد.

با استفاده از خازن و ترانسفورماتور می توان ۴ سناریوی کلی برای تنظیم هماهنگ ولتاژ و توان راکتیو در نظر گرفت: ورود خازن، خروج خازن، افزایش تپ ترانسفورماتور و کاهش تپ ترانسفورماتور. اگر مقدار ولتاژ و ضریب توان به نحوی باشد که ناحیه مستقر، هر ناحیه ای غیر از ناحیه نهم باشد، سناریوی آن ناحیه باید به گونه ای باشد که با تغییر موقعیت خازن یا تپ ترانسفورماتور، مقدار ولتاژ و ضریب توان به ناحیه ۹ نزدیک شود یا به آن ناحیه برود. ناحیه ۹، ناحیه هدف نامیده می شود و طیف محدودی از مقادیر ولتاژ و ضریب توان را شامل می شود.



شکل (۱): هفده ناحیه کنترل ولتاژ و توان راکتیو [۱۹]

مطابق شکل ۱، اگر Q^+ ، ۰/۹، پس فاز و Q^- ، ۰/۹ پیش فاز باشد، می توان گفت: ➤ در ناحیه چهارم، ضریب توان در محدوده تعریف شده قرار دارد و مقدار ولتاژ بیشتر از محدوده مجاز

OLTC و منابع تجدیدپذیر هماهنگ می شود که در نهایت کاهش هزینه و همچنین کاهش انحراف ولتاژ را به همراه دارد. در [۲۲] روشی برای کنترل ولتاژ ارائه شده است که در آن با اندازه گیری ولتاژ محلی، هر باسی می تواند توان اکتیو و راکتیو به شبکه تزریق کند و ولتاژ شبکه بهبود یابد. در این روش از اندازه گیری ولتاژ محلی استفاده می شود. در [۲۳] یک مدل برنامه ریزی غیرخطی ارائه شده که با هماهنگی منابع تجدیدپذیر و تجهیزات کنترل ولتاژ، کاهش تعداد بارهای تأمین نشده و کاهش عملکرد سوئیچ زنی تجهیزات مدنظر است.

در [۲۴] به منظور کنترل بهینه میان OLTC و خازن های شبکه، روش جدیدی ارائه شده است که در آن مقدار ولتاژ باس ها بین ۰/۹۴ تا ۱/۰۵ پریونیت تنظیم می شود. در این روش بین OLTC و خازن های شبکه ارتباطی وجود ندارد. همچنین به منظور کاهش تعداد کلیدزنی OLTC و خازن های شبکه، از تأخیر زمانی استفاده شده است.

در این مقاله، روش جدیدی در کنترل هم زمان ولتاژ و ضریب توان شبکه پیشنهاد شده است. برای رسیدن به این هدف، عملکرد هم زمان تپ ترانسفورماتور و خازن به نحوی ارائه شده است تا از کلیدزنی غیرضروری جلوگیری شود. در این راستا برای تعیین وضعیت OLTC و خازن و اتوماتیک شدن فرایند، از سیستم کنترل فازی استفاده شده است؛ بنابراین، کنترل ولتاژ و ضریب توان در شبکه با دقت بیشتری انجام می شود تا مقدار ولتاژ در محدوده ۰/۹۸ تا ۱/۰۲ پریونیت و مقدار ضریب توان در محدوده بین ۰/۹۵ پیش فاز و پس فاز کنترل شود. نتایج شبیه سازی، عملکرد کنترل یکپارچه ولتاژ و توان راکتیو در شبکه های توزیع را به خوبی نشان می دهد.

۲- بیان مسئله

در برخی از مطالعات انجام شده به منظور کنترل یکپارچه ولتاژ و توان راکتیو، ساختاری مطابق شکل ۱ ارائه شده است [۱۹]. همان طور که مشاهده می شود شکل ۱ از ۱۷ ناحیه کنترلی تشکیل شده است. محور عمودی، ولتاژ و

پیشنهادی را نشان می‌دهد. این ساختار از ۲۵ ناحیه کنترلی تشکیل شده است و برای هر ناحیه سناریویی تعریف شده است. سناریوهای تعریف شده شامل ورود یا خروج خازن یا تغییر در موقعیت تپ ترانسفورماتور است.

	0.9 Lag	0.95 Lag	0.95 Lead	0.9 Lead	
V=1.05 p.u	1	2	3	4	5
V=1.02 p.u	16	17	18	19	6
V=0.98 p.u	15	24	25	20	7
V=0.95 p.u	14	23	22	21	8
	13	12	11	10	9

شکل (۲): ساختار روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی به چند اصل مهم توجه شده است:

- اگر محدوده استاندارد برای ولتاژ و ضریب توان به ترتیب ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت و بین ۰/۹ پیش‌فاز و پس‌فاز در نظر گرفته شود (ناحیه ۹ مطابق شکل ۱)، در این حالت اگر مقدار ولتاژ و ضریب توان به گونه‌ای باشند که نقطه مستقر در نزدیکی نقاط مرزی باشد، با کوچک‌ترین تغییرات در مقدار ولتاژ و ضریب توان، موقعیت از محدوده استاندارد دور می‌شود و کیفیت ولتاژ کاهش می‌یابد؛ بنابراین، در روش پیشنهادی، ناحیه هدف محدودتر می‌شود و تنها ناحیه ۲۵، ناحیه هدف است. در این صورت حتی با قراردادن در مرز ناحیه ۲۵، تغییرات اندک، کاهش کیفیت ولتاژ را به همراه نخواهد داشت. در صورتی که ناحیه مستقر، هریک از نواحی یکم تا بیست و چهارم باشد، از سناریوی مربوط به آن ناحیه استفاده می‌شود و مقدار ولتاژ و ضریب توان به مقدار ولتاژ و ضریب توان ناحیه هدف سوق داده می‌شوند. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که ناحیه مستقر، ناحیه ۲۵ باشد؛ بنابراین، همواره مقدار ولتاژ و ضریب توان در مرکز محدوده استاندارد قرار دارند و پایداری شبکه حفظ می‌شود.

است؛ بنابراین، اگر ناحیه مستقر، ناحیه چهارم باشد و بار سلفی مقاومتی وارد مدار شود، ممکن است مقدار ضریب توان از ۰/۹ پس‌فاز کمتر شود و به ناحیه ۵ یا ۱۰ میل کند.

➤ در ناحیه هشتم، مقدار ولتاژ در محدوده مجاز قرار دارد و مقدار ضریب توان در محدوده قرار ندارد و خازن زیادی در شبکه موجود است. در این صورت اگر ناحیه مستقر، ناحیه هشتم باشد، در صورت خارج شدن یک بار سلفی مقاومتی، ولتاژ افزایش می‌یابد و خازن شبکه بیشتر می‌شود؛ بنابراین، موقعیت به سمت چپ و بالای ناحیه هشتم تغییر می‌کند. در این صورت با خروج خازن می‌توان شرایط را کنترل کرد.

➤ در ناحیه چهاردهم، مقدار ولتاژ کمتر از محدوده تعریف شده است و ضریب توان در محدوده تعریف شده قرار دارد؛ بنابراین، با ورود بار به مدار، ولتاژ کاهش می‌یابد و موقعیت به پایین ناحیه چهاردهم متمایل می‌شود. در این صورت با افزایش تپ ترانسفورماتور شرایط بهبود می‌یابد [۱۹].

در تمامی نواحی شکل ۱، تصمیم جهت تغییر وضعیت خازن یا تپ ترانسفورماتور بسیار مهم است. اگر شرایط سیستم به گونه‌ای باشد که مقدار ولتاژ و ضریب توان در مرز ناحیه هدف قرار داشته باشد، با ایجاد کوچک‌ترین تغییرات در سیستم، ممکن است عملکرد سیستم از ناحیه هدف دور شود که این امر، کیفیت توان را کاهش می‌دهد. همچنین، متفاوت بودن سناریوهای تعریف شده به منظور اصلاح شبکه، ممکن است در بدترین شرایط ناپایداری ولتاژ را به همراه داشته باشد؛ بنابراین، به منظور حل مشکلات بیان شده، در بخش بعدی ساختار جدیدی پیشنهاد شده است که دقت بالاتری دارد و می‌تواند مقدار ولتاژ و ضریب توان را در نزدیکی عدد یک تنظیم کند.

۳- روش پیشنهادی

برای کنترل هم‌زمان ولتاژ و ضریب توان، در این مقاله پیشنهاد می‌شود همواره مقدار ولتاژ و ضریب توان در مرکز محدوده استاندارد قرار داشته باشند. شکل ۲، ساختار روش

یکی از مقادیر ولتاژ یا ضریب توان باس PCC در محدوده تعریف شده قرار نداشته باشند؛ در غیر این صورت، با قراردادن مقادیر ولتاژ و ضریب توان باس PCC در ناحیه ۲۵ (ناحیه هدف)، اولین مرحله کنترلی اجرا نمی شود و پیامی حاکی از «اتمام اولین مرحله کنترلی» نمایش داده و شرط اجرای دومین مرحله کنترلی بررسی می شود.

مرحله دوم، شامل N حلقه کنترلی است که ولتاژ باس های انتهایی در N فیدر را در محدوده ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت تنظیم می کند. در این مرحله برای کنترل ولتاژ اینگونه باس ها فقط می توان از خازن های همان فیدر استفاده کرد و روی تپ ترانسفورماتور و همچنین خازن های فیدر دیگر هیچ گونه تغییری نمی توان اعمال کرد. برای تنظیم ولتاژ باس های انتهایی در N فیدر، از تپ ترانسفورماتور نیز می توان استفاده کرد که به زیرساخت مخابراتی وسیعی نیاز است و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

ممکن است در دومین مرحله کنترلی، ولتاژ باس انتهایی فیدرها بهبود یابد؛ اما این احتمال وجود دارد که ولتاژ باس PCC تنظیم شده در اولین مرحله، از محدوده استاندارد خارج شود. به همین منظور در ادامه فلوچارت پیشنهادی، ولتاژ باس PCC برای دومین بار، در سومین مرحله کنترلی بررسی خواهد شد. در این مرحله تنها از تپ ترانسفورماتور برای تنظیم ولتاژ باس PCC در محدوده ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت استفاده می شود. تغییر تپ ترانسفورماتور تا زمانی ادامه می یابد که ولتاژ باس PCC در محدوده تعریف شده قرار گیرد. همچنین برای اینکه احتمال خارج شدن مقدار ولتاژ باس PCC از محدوده استاندارد کاهش یابد، خازن های مستقر روی فیدرها به صورت پله های کوچک تر وارد شبکه می شوند

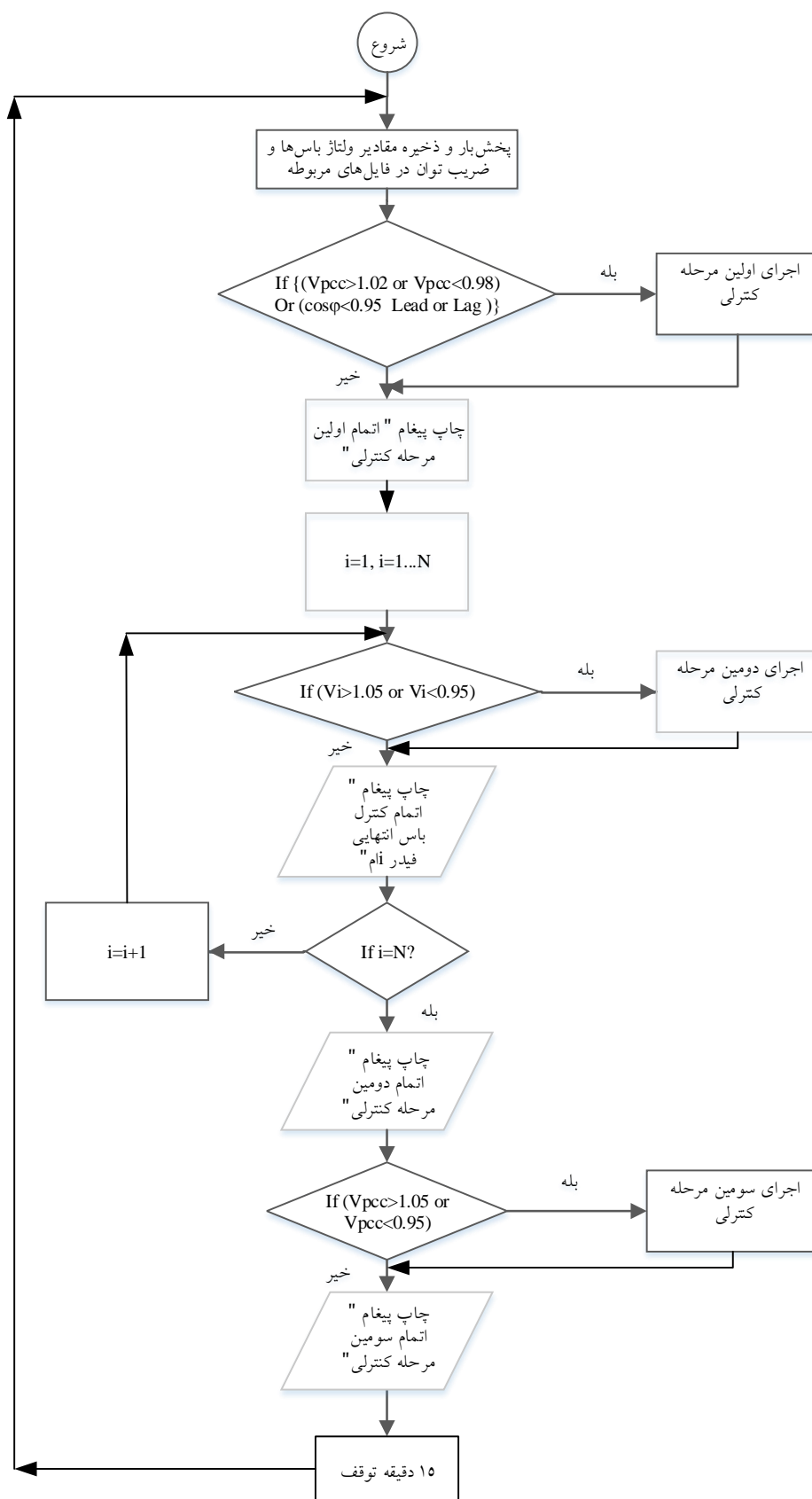
• قراردادن در مرز دو ناحیه که از لحاظ سناریو با یکدیگر تفاوت دارند، اپراتور را در تصمیم گیری دچار تردید می کند؛ بنابراین، برای کاهش خطای انسانی، روش پیشنهادی به صورت اتوماتیک با استفاده از منطق فازی انجام می شود.

• استفاده از منطق فازی باعث می شود در زمان تعیین وضعیت جدید برای خازن ها و تپ ترانسفورماتور، شبکه از حالت صفر و یک خارج شود و در شرایط مرزی، امکان تعیین وضعیت برای خازن ها و تپ ترانسفورماتور وجود داشته باشد.

۴- ساختار حلقه های کنترلی روش پیشنهادی

شکل ۳ روند نمای کلی روش پیشنهادی ۳ مرحله ای را نشان می دهد و برای یک شبکه با N فیدر تعریف شده است. در هر سه مرحله، منطق فازی براساس مقدار متغیرهای کنترلی و همچنین سناریوهای تعریف شده برای نواحی ساختار پیشنهادی، وضعیت جدیدی را برای تپ ترانسفورماتور و خازن تعریف می کند. سپس وضعیت جدید خازن یا تپ ترانسفورماتور به صورت اتوماتیک بر آنها اعمال می شود و مقدار ولتاژ و ضریب توان بهبود می یابند. این عمل تا زمانی ادامه دارد که مقدار ولتاژ و ضریب توان در ناحیه ۲۵ واقع شوند.

در اولین مرحله هدف، کنترل هم زمان ولتاژ و ضریب توان باس PCC^{۱۱} به ترتیب در محدوده ۰/۹۸ تا ۱/۰۲ پریونیت (ناحیه ۲۵) و بین ۰/۹۵ پیش فاز و پس فاز است. برای کنترل این دو مقدار، از تمام خازن ها و تپ ترانسفورماتور و ساختار 25 ناحیه ای پیشنهادی استفاده می شود. شرط اجرا شدن این مرحله این است که دست کم



شکل (۳): روندنمای کلی روش پیشنهادی

۵- ساختار کنترل کننده پیشنهادی فازی

۵-۱- قسمت فازی کننده

ولتاژ و ضریب توان باس PCC به منطق فازی مرحله اول داده می شود، تصمیم گیرنده منطق فازی برای ۲۵ قانون تعریف شده ارزیابی انجام می دهد و در نهایت، براساس میزان درستی هریک از قوانین، یک مجموعه خروجی فازی به دست می آید. مطابق جدول ۲، سه قانون برای دومین مرحله کنترلی تعریف می شود. تنظیم ولتاژ باس انتهایی فیدرها، تنها با استفاده از خازن های همان فیدر امکان پذیر است. جدول ۳ شامل قوانین سومین مرحله کنترلی است که تصمیم گیرنده منطق فازی براساس مقدار ولتاژ باس PCC، وضعیت جدیدی را برای تب ترانسفورماتور تعیین می کند.

۵-۳- قسمت دی فازی کننده

در سیستم های کنترل فازی لازم است در آخرین مرحله، مجموعه خروجی های فازی به اعداد قطعی تبدیل شوند. یکی از روش های مؤثر در دی فازی کردن، روش مرکز ثقل است. خروجی های اولین مرحله کنترلی، تعیین موقعیت تب ترانسفورماتور و پله های خازنی است که تابع عضویت آنها در شکل های ۶-الف و ۶-ب ارائه شده است. همچنین، خروجی دومین مرحله کنترلی فقط تغییر پله های خازنی براساس تابع عضویت شکل ۶-ب است. در انتها نیز خروجی سومین مرحله کنترلی، تغییر مجدد تب ترانسفورماتور براساس تابع عضویت شکل ۶-ج است. خروجی های هریک از مراحل کنترلی براساس روش غیرفازی کردن مرکز ثقل انجام می شود تا مقدار واقعی تغییر تب ترانسفورماتور و پله های خازن مشخص شود.

در اولین مرحله کنترلی هدف این است که مقدار ولتاژ و ضریب توان باس PCC به کمک تب ترانسفورماتور و تمامی خازن ها کنترل شود؛ بنابراین، مقدار ولتاژ و ضریب توان باس PCC ورودی های منطق فازی مرحله اول هستند. مطابق شکل ۴ مقدار ولتاژ باس PCC و ضریب توان نیز در پنج سطح مختلف طبقه بندی می شوند. گفتنی است محدوده مجاز برای ولتاژ باس PCC و ضریب توان به ترتیب در محدوده ۰/۹۸ تا ۱/۰۲ پریونیت و بین ۰/۹۵ پیش فاز و پس فاز (سطح Normal) تعریف شده است.

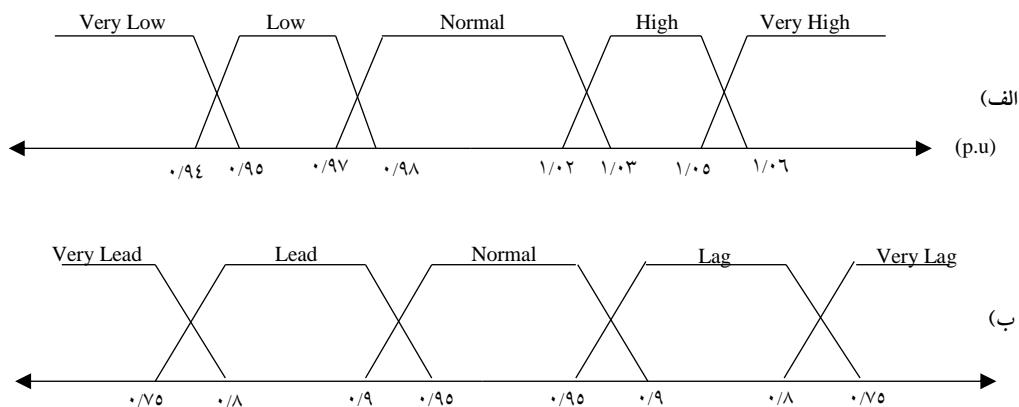
در دومین مرحله کنترلی، مقدار ولتاژ باس انتهایی فیدرها در محدوده ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت کنترل می شود؛ بنابراین، مقدار ولتاژ باس انتهایی فیدرها را می توان مطابق شکل ۵ در سه سطح ولتاژ زیاد (High)، ولتاژ نرمال (Normal) و ولتاژ کم (Low) طبقه بندی کرد.

پس از اتمام کنترل ولتاژ باس های انتهایی در N فیدر شبکه که در مرحله دوم انجام می شود، سومین مرحله کنترلی شروع می شود که در آن، ولتاژ باس PCC مجدداً کنترل می شود. به منظور جلوگیری از ایجاد یک حلقه کنترلی پایان ناپذیر در این مرحله، مقدار ولتاژ باس PCC در محدوده ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت کنترل می شود؛ بنابراین، می توان از شکل ۵ نیز برای سومین مرحله کنترلی استفاده کرد

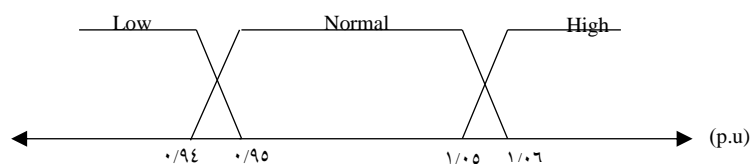
۵-۲- قسمت قواعد

جدول ۱ شامل قوانین مربوط به اولین مرحله کنترلی است که در آن به طور کلی چهار راهکار برای بهبود ولتاژ و ضریب توان در نظر گرفته شده است. زمانی که مقدار

کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه‌های توزیع با هماهنگی خازن و OLTC با استفاده از منطق فازی



شکل (۴): مجموعه فازی برای ورودی‌های اولین مرحله کنترل. الف) ولتاژ باس PCC، ب) ضریب توان باس PCC



شکل (۵): مجموعه فازی ولتاژ باس انتهایی فیدها و ولتاژ باس PCC برای ورودی دومین و سومین مرحله کنترل

جدول (۱): قوانین منطق فازی در اولین مرحله کنترل

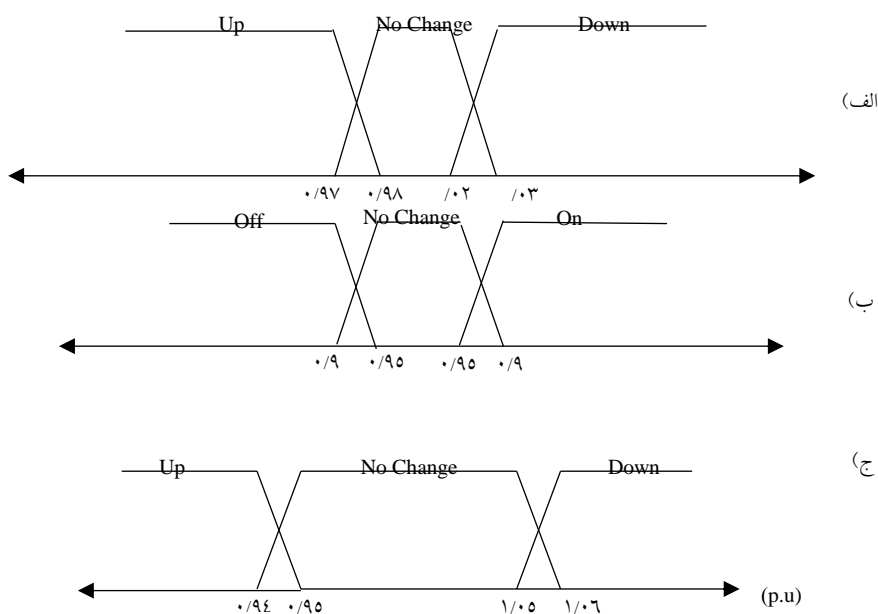
ولتاژ باس PCC ضریب توان باس PCC	Very Low	Low	Normal	High	Very High
Very Lead	افزایش تپ	افزایش تپ	خروج خازن	خروج خازن	خروج خازن
Lead	افزایش تپ	افزایش تپ	خروج خازن	خروج خازن	خروج خازن
Normal	افزایش تپ	افزایش تپ	بدون تغییر	کاهش تپ	کاهش تپ
Lag	ورود خازن	ورود خازن	ورود خازن	کاهش تپ	کاهش تپ
Very Lag	ورود خازن	ورود خازن	ورود خازن	کاهش تپ	کاهش تپ

جدول (۲): قوانین منطق فازی در دومین مرحله کنترل

ولتاژ باس انتهایی آمین فیدر از N فیدر	قوانین
High	قطع خازن فیدر مربوطه
Normal	بدون تغییر در وضعیت خازن فیدر مربوطه
Low	وصل خازن فیدر مربوطه

جدول (۳): قوانین منطق فازی در سومین مرحله کنترل

ولتاژ باس PCC	قوانین
High	کاهش تپ
Normal	بدون تغییر در وضعیت تپ
Low	افزایش تپ



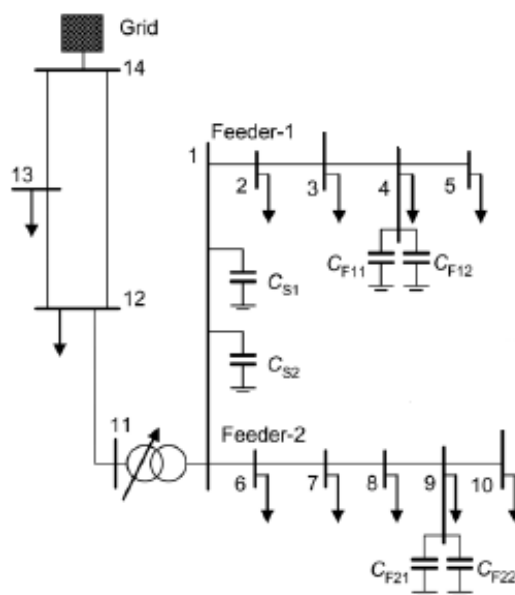
شکل (۶): مجموعه فازی برای خروجی‌های منطق فازی، الف) موقعیت تپ ترانسفورماتور در اولین مرحله کنترل، ب) وضعیت پله‌های خازنی در اولین و دومین مرحله کنترل، ج) موقعیت تپ ترانسفورماتور در سومین مرحله کنترل

۶- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، روش پیشنهادی ارائه شده در بخش سوم، روی شبکه مورد مطالعه شکل ۷ پیاده‌سازی می‌شود. شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزارهای MATLAB و DIGSILENT انجام شده‌اند.

۶-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه مطابق شکل ۷، شامل یک ترانسفورماتور ۷۰/۱۰ کیلوولت با ۳۲ موقعیت تپ است. روی باس PCC و هریک از فیدرها، بانک خازنی به ترتیب با مجموع ظرفیت ۴ مگاوار و ۲/۸ مگاوار قرار دارد. جزئیات اطلاعات شبکه مورد مطالعه در مرجع [۲۴] آمده است.



شکل (۷): شبکه مورد مطالعه [۲۴]

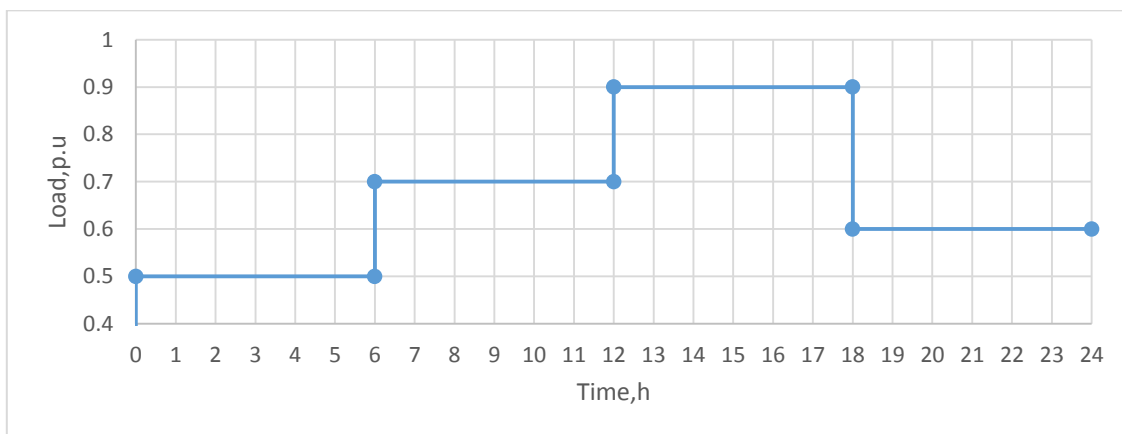
۲-۶- نتایج حالات مختلف شبیه‌سازی

برای تست الگوریتم پیشنهادی، پروفیل باری مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شده است که نتایج شبیه‌سازی در یک شبانه‌روز و در چهار سطح بار روی شبکه اجرا می‌شوند. سطح بار اول، ساعت صفر تا ۶ را شامل می‌شود که باری معادل ۰/۵ پریونیت در شبکه وجود دارد. در دومین سطح بار که ساعت ۶ تا ۱۲ را شامل می‌شود، میزان بار افزایش می‌یابد و مقدار آن به ۰/۷ پریونیت می‌رسد. سطح بار سوم در ساعت ۱۲ اتفاق می‌افتد و تا ساعت ۱۸ در شبکه وجود دارد. در این حالت، مقدار بار نسبت به حالت قبل افزایش می‌یابد و ۰/۹ پریونیت می‌شود. سطح بار چهارم در ساعت ۱۸ روی شبکه اعمال می‌شود که در آن مقدار بار کاهش می‌یابد و به ۰/۶ پریونیت می‌رسد. در ادامه، نتایج و تحلیل هر سطح بار به صورت جداگانه ارائه می‌شوند.

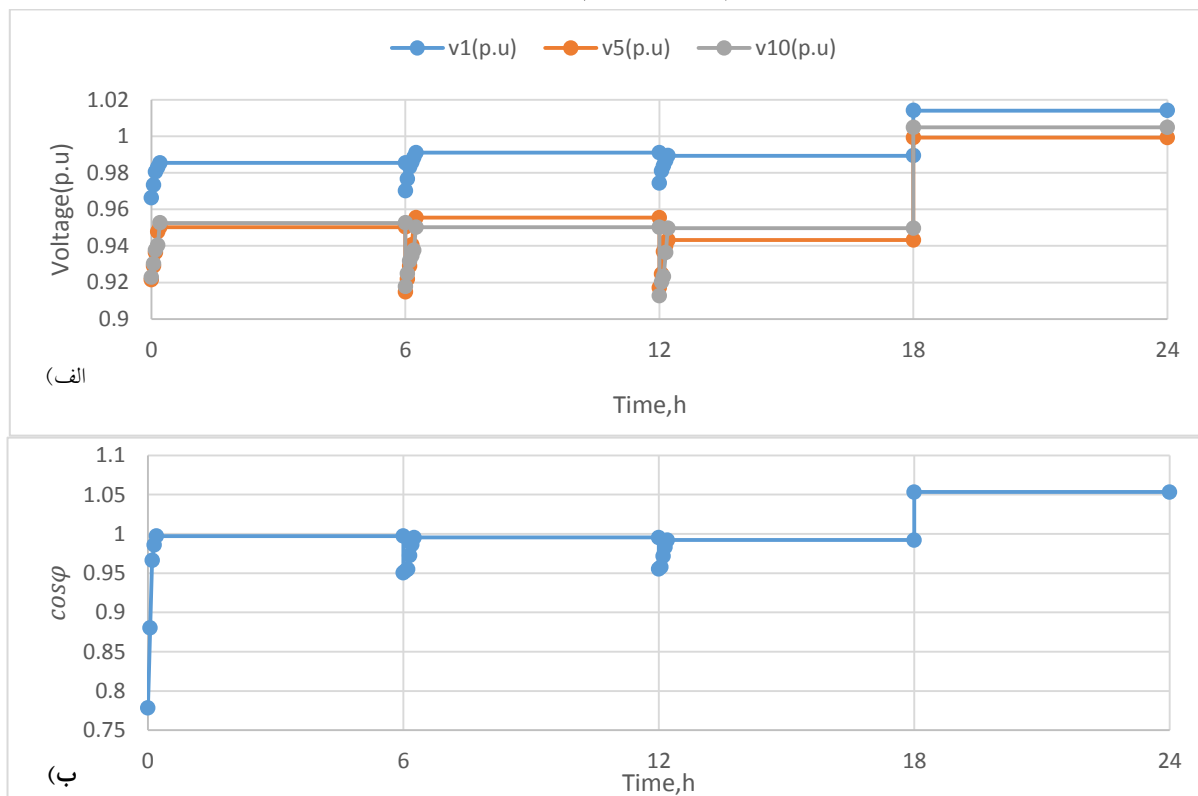
نتایج سطح بار اول

در اولین حالت شبیه‌سازی، ۵۰ درصد بار کل در شبکه

وجود دارد. در این حالت مطابق شکل ۹-الف مشاهده می‌شود که ولتاژ باس‌های نمونه اول، پنجم و دهم به ترتیب ۰/۹۶۶۲۷۴، ۰/۹۲۱۴۷۱ و ۰/۹۲۲۷۹۲ پریونیت است. همچنین مطابق شکل ۹-ب، مقدار ضریب توان، ۰/۷۷۸۳ پس‌فاز است. مقادیر ذکر شده خارج از محدوده مطلوب تعریف شده در روش پیشنهادی قرار دارند؛ بنابراین، به تصمیم سیستم منطق فازی برای بهتر شدن شرایط نیاز است. با اجرای اولین مرحله کنترلی و بررسی مقادیر ولتاژ باس اول و ضریب توان باس PCC، تصمیم منطق فازی، فعال‌شدن خازن‌های باس اول است. پس از فعال‌شدن خازن‌های باس اول مطابق شکل ۱۰-ب، مقدار ولتاژ باس اول و همچنین، ضریب توان باس PCC، مطابق شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، به ترتیب ۰/۹۸۰۴ پریونیت و ۰/۹۶۶۵ پس‌فاز می‌شود. پس از قرارگرفتن مقادیر ولتاژ باس اول و ضریب توان باس PCC در محدوده مطلوب، اولین مرحله کنترلی تمام می‌شود و شرط ورود به دومین مرحله کنترلی چک می‌شود.



شکل (۸): پروفیل بار در نظر گرفته شده برای تست الگوریتم پیشنهادی



شکل (۹): نتایج ارائه شده در شبیه سازی. الف) مقادیر ولتاژ، ب) مقدار ضریب توان

ولتاژ باس اول، خارج از محدوده ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت قرار داشته باشد. مطابق شکل ۹-الف، مقدار ولتاژ باس اول ۰/۹۸۵۴ پریونیت و مطلوب است و سومین مرحله کنترلی اجرا نمی شود. در نهایت، مطابق شکل های ۹-الف و ۹-ب، مقدار ولتاژ باس اول، پنجم و دهم به ترتیب به ۰/۹۸۵۴، ۰/۹۵۰۳، و ۰/۹۵۲۳ پریونیت و مقدار ضریب توان باس PCC به ۰/۹۹۷ پس فاز می رسد. گفتنی است هر یک از تصمیمات سیستم کنترل فازی، در کمتر از یک ثانیه روی شبکه اجرا می شود.

نتایج سطح بار دوم

در دومین حالت از بررسی نتایج شبیه سازی، مطابق شکل ۸ مقدار بار از ۰/۵ به ۰/۷ پریونیت می رسد و مقدار ولتاژها و ضریب توان باس PCC کاهش می یابد. مطابق شکل های ۹-الف و ۹-ب، مقدار ولتاژ باس اول و ضریب توان باس PCC، ۰/۹۷ پریونیت و ۰/۹۵۰۵ پس فاز است. مقدار ولتاژ باس اول کمتر از محدوده مطلوب است؛ بنابراین، اولین مرحله کنترلی اجرا می شود. در این مرحله، تصمیم منطق فازی افزایش تپ است. مطابق شکل ۱۰-الف، دو تپ افزایش می یابند که باعث افزایش مقدار ولتاژ و ضریب توان باس PCC خواهند شد. در این

شرط اجرای دومین مرحله کنترلی این است که مقدار ولتاژ باس پنجم و دهم در محدوده مطلوب قرار نداشته باشد. مطابق شکل ۹-الف، مقدار ولتاژ باس های پنجم و دهم به ترتیب ۰/۹۳۶۳ و ۰/۹۳۷۶ پریونیت است. این مقادیر کوچک تر از مقدار مطلوب است و بنابراین، دومین مرحله کنترلی اجرا می شود. در ابتدا باید مقدار ولتاژ باس پنجم تنظیم شود که مطابق شکل ۱۰-ب طبق تصمیم منطق فازی، یکی از خازن های فیدر مربوطه با نصف ظرفیت فعال می شود و مقدار ولتاژ باس پنجم مطابق شکل ۹-الف به ۰/۹۴۷۶ پریونیت می رسد. این مقدار از نظر سیستم فازی مطلوب است و کنترل ولتاژ باس پنجم به پایان می رسد. در این لحظه مطابق شکل ۹-الف، مقدار ولتاژ باس دهم ۰/۹۴۰۲ پریونیت است که کمتر از مقدار مطلوب است. در این حالت نیز طبق تصمیم منطق فازی، مطابق شکل ۱۰-ب، یکی از خازن های فیدر مربوطه با نصف ظرفیت فعال می شود و مطابق شکل ۹-الف، مقدار ولتاژ باس دهم به ۰/۹۵۲۵ پریونیت می رسد. مقدار ذکر شده مطلوب است؛ بنابراین، دومین مرحله کنترلی به پایان می رسد و شرط ورود به سومین مرحله کنترلی چک می شود. شرط ورود به سومین مرحله کنترلی این است که مقدار

ب، با فعال شدن تمامی خازن‌های غیرفعال فیدر اول، همان‌طور که در شکل ۹-الف نشان داده شده است، مقدار ولتاژ باس پنجم به 0.936 پریونیت می‌رسد. مقدار به دست آمده خارج از محدوده استاندارد است و نیاز به کنترل بیشتری دارد. با توجه به اینکه خازن دیگری برای فعال شدن وجود ندارد، امکان تنظیم بیشتر میسر نیست و حلقه کنترل مربوط به ولتاژ باس پنجم تمام می‌شود. در این حالت مطابق شکل ۹-الف، مقدار ولتاژ باس دهم، 0.923 پریونیت است. بنابراین، به کمک تصمیم منطق فازی، تمامی خازن‌های غیرفعال فیدر دوم فعال می‌شوند و مقدار ولتاژ باس دهم مطابق شکل ۹-الف، به 0.949 پریونیت می‌رسد که از نظر سیستم کنترل فازی مطلوب است؛ بنابراین، دومین مرحله کنترل به پایان می‌رسد. سومین مرحله کنترل به دلیل مطلوب بودن مقدار ولتاژ باس اول اجرا نخواهد شد.

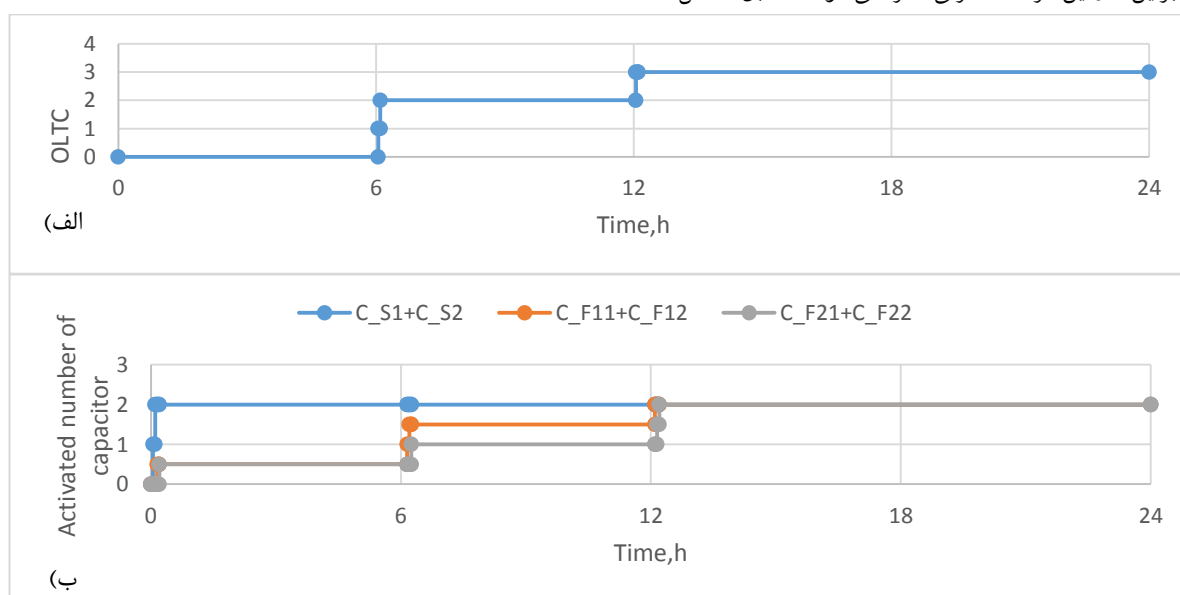
نتایج سطح بار چهارم

در ساعت ۱۸، مقدار بار کاهش می‌یابد و به 0.7 پریونیت می‌رسد. در چنین وضعیتی مطابق شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، مقدار ولتاژ باس اول، پنجم و دهم به ترتیب به 1.01 ، 0.99 و 1.00 پریونیت و مقدار ضریب توان باس PCC به 0.946 پیش‌فاز می‌رسد. تمامی مقادیر ذکر شده از نظر سیستم کنترل فازی طراحی شده مطلوب‌اند؛ بنابراین، هیچ‌یک از مراحل کنترل اجرا نخواهند شد.

حالت مطابق شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، مقدار ولتاژ باس اول و ضریب توان باس PCC به 0.9831 پریونیت و 0.955 پس‌فاز افزایش می‌یابد و سپس اولین مرحله کنترل تمام می‌شود. در چنین وضعیتی مطابق شکل ۹-الف، مقدار ولتاژ باس پنجم و دهم به ترتیب به 0.929 و 0.931 پریونیت می‌رسد که کمتر از محدوده مطلوب است؛ بنابراین، دومین مرحله کنترل اجرا می‌شود. در این مرحله مطابق شکل ۱۰-ب، مقداری از خازن‌های فیدرها فعال می‌شود و در نهایت، مقدار ولتاژ باس پنجم و دهم به ترتیب به 0.954 و 0.95 پریونیت می‌رسد و دومین مرحله کنترل به اتمام می‌رسد. گفتنی است به دلیل اینکه مقدار ولتاژ باس اول 0.99 پریونیت است، سومین مرحله کنترل اجرا نمی‌شود.

نتایج سطح بار سوم

در سومین سطح بار، مقدار بار به 0.9 پریونیت افزایش می‌یابد و مطابق شکل‌های ۹-الف و ۹-ب، مقدار ولتاژ باس اول، پنجم و دهم به ترتیب به 0.9743 ، 0.917 و 0.912 پریونیت و مقدار ضریب توان باس PCC، به 0.9553 پس‌فاز می‌رسد. در اولین مرحله کنترل، با افزایش یک تپ مطابق شکل ۱۰-الف، مقدار ولتاژ باس اول، پنجم و دهم به ترتیب 0.981 ، 0.924 و 0.920 پریونیت و مقدار ضریب توان باس PCC، 0.957 پس‌فاز می‌شود و اولین مرحله کنترل تمام می‌شود. مقدار ولتاژ باس پنجم و دهم کمتر از محدوده استاندارد است؛ بنابراین، دومین مرحله کنترل اجرا می‌شود. مطابق شکل ۱۰-ب



شکل (۱۰): نتایج ارائه شده در شبیه‌سازی. الف) وضعیت تپ ترانسفورماتور، ب) تعداد خازن فعال

۶-۳- مقایسه روش پیشنهادی با روش مرجع ۲۴

به منظور نشان دادن صحت روش پیشنهادی، نتایج روش پیشنهادی با روش ارائه شده در [۲۴] در جدول ۴ مقایسه شده اند. با توجه به نتایج جدول ۴، مشاهده می شود در تمامی شرایط از کمترین تا بیشترین مقدار بار در شبکه، روش پیشنهادی دقت بالاتری دارد و مقدار ولتاژها در نزدیکی عدد یک تنظیم می شود. با توجه به موقعیت تپ

ارائه شده در جدول ۴، کلیدزنی تپ ترانسفورماتور در روش ارائه شده نسبت به روش [۲۴] کمتر است که یکی مزایای روش پیشنهادی را نشان می دهد. با توجه به تعداد خازن های فعال فیدها در جدول ۴، در روش پیشنهادی به منظور اینکه ضریب توان شبکه پیش فاز نشود و مقدار ولتاژ باس اول از محدوده مطلوب خارج نشود، خازن ها به صورت پله هایی با نصف ظرفیت فعال شده اند.

جدول (۴): مقایسه نتایج بین روش پیشنهادی و روش ارائه شده در [۲۴]

بار کل در شبکه	۰/۵ پروینیت		۰/۷ پروینیت		۰/۹ پروینیت		۰/۶ پروینیت	
	روش پیشنهادی	روش [۲۴]	روش پیشنهادی	روش [۲۴]	روش پیشنهادی	روش [۲۴]	روش پیشنهادی	روش [۲۴]
موقعیت تپ	۰	۴	۲	۴	۳	۷	۳	۶
ولتاژ باس اول (پروینیت)	۰/۹۸۵۴	۱/۰۴	۰/۹۹۱	۱/۰۳۷	۰/۹۸۹۴	۱/۰۲۵	۱/۰۱	۱/۰۵
ولتاژ باس دهم (پروینیت)	۰/۹۵۲۵	۱/۰۱	۰/۹۵	۱/۰۲	۰/۹۴۹	۱/۰۲	۱	۱/۰۲۱
تعداد خازن های فعال فیدر اول	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲	۲	۲	۲
تعداد خازن های فعال فیدر دوم	۰/۵	۰	۱	۱	۲	۲	۲	۱

۷- نتیجه گیری

در این مقاله روشی به منظور هماهنگی عملکرد OLTC و خازن پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، ساختاری با ۲۵ ناحیه ارائه شده است که برای هر ناحیه، یک سناریو شامل تغییر موقعیت تپ ترانسفورماتور یا پله های خازنی تعریف شده است. معیار هماهنگی عملکرد OLTC و خازن، سیستم کنترلی فازی است. سیستم کنترلی فازی، براساس مقدار ولتاژ، ضریب توان و ساختار پیشنهادی، وضعیت جدیدی را برای تپ ترانسفورماتور و خازن تعیین می کند. با اعمال وضعیت جدید متغیرهای کنترلی (تپ ترانسفورماتور و خازن) روی شبکه، ولتاژ و ضریب توان بهبود می یابند و این فرایند تا زمان قرارگرفتن مقدار ولتاژ و ضریب توان در محدوده استاندارد ادامه دارد. نخستین مزیت روش پیشنهادی، افزایش دقت و قرارگرفتن مقدار ولتاژ باس ها و ضریب توان در محدوده مجاز است. دومین مزیت این روش، اتوماتیک شدن فرایند تعیین وضعیت جدید برای متغیرهای کنترلی است. به همین منظور، برای تأیید روش پیشنهادی، یک شبیه سازی تحت تغییرات مختلف بار انجام

شده است. همچنین مقایسه روش پیشنهادی با روش قبلی، نشان می دهد تنظیم ولتاژ و اصلاح ضریب توان، به شکل بهتری صورت گرفته است. در روش پیشنهادی، کلیدزنی تپ ترانسفورماتور نسبت به روش قبلی کمتر است که موجب کاهش هزینه و افزایش طول عمر ترانسفورماتور می شود. منظور از بهینه سازی مصرف انرژی انتخاب الگوها، اتخاذ و به کارگیری روش ها و سیاست هایی در مصرف انرژی الکتریکی است. ساختمان های مسکونی بخش مهمی از مصرف کنندگان انرژی الکتریکی به شمار می آیند. ورود تکنولوژی سیستم مدیریت هوشمند به ساختمان های مسکونی، تا حدودی مصرف انرژی الکتریکی را بهینه کرده است.

مراجع

- [1]. P. Souri, S.M. Shahrtash. "optimal planning of capacitor banks using local data to minimize the total losses" Journal of Electrical Engineering, university of Tabriz, 2018.
- [2]. T. Tewari, A. Mohapatra, S. Anand, "Coordinated Control of OLTC and Energy Storage for Voltage Regulation in Distribution Network with High PV Penetration", IEEE Transactions on Sustainable

- pp. 4398–4408, 2017.
- [14]. W. Zheng, W. Wu, B. Zhang, Y. Wang, "Robust reactive power optimization and voltage control method for active distribution networks via dual time-scale coordination", *IET Journals & Magazines*, Vol. 11, No. 6, pp. 1461 – 1471, 2017.
- [15]. D.S. Welton, J. Arp, S. Fischer, "A Case Study in Volt-VAR Optimization and Conservation Voltage Reduction without Costly Communications Systems", 2019 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC), 2019.
- [16]. W.G. Hartmann, "Implementing VVO with DER Penetration", 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), pp. 1–5, 2017.
- [17]. F. Xu, Q. Guo, H. Sun, B. Zhang, L. Jia, "A two level hierarchical discrete-device control method for power networks with integrated wind farms", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 7, No. 1, 2019.
- [18]. K. K. Mehmood, S. Ullah khan, S-J. Lee, Z.M. Haider, M.K. Rafique, Ch.H. Kim, "A real-time optimal coordination scheme for the voltage regulation of a distribution network including an OLTC, capacitor banks, and multiple distributed energy resources", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 94, pp. 1-14, 2018.
- [19]. Kh. Alzaareer, M. Saad, H. Mehrjerdi, D. Asber, S. Lefebvre, "Development of New Identification Method For Global Group of Controls For Online Coordinated Voltage Control In Active Distribution Networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 11, No. 5, pp. 3921-3931, 2020.
- [20]. A. Marefat, M. A. Abbasian, "unified control of voltage and reactive power in substations", 5th conference on new ideas in electrical engineering", 2016
- [21]. A. Pouladi, A. Khajeh Zadeh, A. Nouri, "Control of Parallel ULTC Transformers in Active Distribution Systems", *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 1 , pp. 960-970, 2020.
- [22]. P. Singh, S.K. Bishnoi, N.K. Meena, "Moth Search Optimization for Optimal DERs Integration in Conjunction to OLTC Tap Operations in Distribution Systems", *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 880-888, 2020.
- [23]. S. Magnusson, G. Qu, N. Li, "Distributed Optimal Voltage Control with Asynchronous and Delayed Communication", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 11, No. 4, pp. 3469-3482, 2020.
- [24]. R. Vargas, L.H. Macedo, J.M.H. Ortiz, J.R.S. Mantovani, R. Remero, "Optimal Restoration of Active Distribution Systems with Voltage Control and Closed-Loop Operation", *IEEE Transactions on Smart Grid (Early Access)*, 2021.
- [25]. F. ViaWan, D. Karlsson, "Voltage and Reactive Power Control in Systems With Synchronous Machine-Based Distributed Generation", Vol. 23, No. 2, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008.
- Energy, Vol. 12, No. 1, 2021.
- [3]. K. Mahmoud, M.M. Hussein, M.A. Nasser, M. Lehtonen, "Optimal Voltage Control in Distribution Systems With Intermittent PV Using Multiobjective Grey-Wolf-Lévy Optimizer", *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 1, 2020.
- [4]. X. Wang, Y. Peng, Ch. Weng, Y. Xia, W. Wei, M. Yu, "Decentralized and Per-Unit Primary Control Framework for DC Distribution Networks with Multiple Voltage Levels", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 11, No. 5, pp. 3993-4004, 2020.
- [5]. P. Li, J. Ji, J. Jian, F. Ding, J. Wu, Ch. Wang, "MPC-based Local Voltage Control Strategy of DGs in Active Distribution Networks", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 4, 2020.
- [6]. S. Maharjan, A.M. Khambadkone, J. Ch. Hseinpeng, " Robust Constrained Model Predictive Voltage Control in Active Distribution Networks", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 12, No. 1, pp. 400-411, 2021. [v].
- [7]. Z. K. Pecenak, H. Valizadeh hagh, Ch. Li, M. J. Reno, V. R. Disfani, J. Kleissl, "Aggregation of Voltage-Controlled Devices During Distribution Network Reduction", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 12, No. 1, pp. 33-42, 2021.
- [8]. Z. K. Pecenak, H. Valizadeh hagh, Ch. Li, M. J. Reno, V. R. Disfani, J. Kleissl, "Aggregation of Voltage-Controlled Devices During Distribution Network Reduction", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 12, No. 1, pp. 33-42, 2021.
- [9]. Y. Wang, M.H. Syed, E.G. Sansano, Y. Xu, G.M. Burt, "Inverter-based Voltage Control of Distribution Networks: A Three-Level Coordinated Method and Power Hardware-in-the-Loop Validation", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 11, No. 4, pp. 2380-2391, 2020.
- [10]. C. Li, V.R. Disfani, Z.K. Pecenak, S. Mohajeryami, J. Kleissl, "Optimal OLTC voltage control scheme to enable high solar penetrations", *Electric Power Systems Research*, vol. 160, pp. 318-326, July 2018.
- [11]. A. Joseph, K. Smedley, Sh. Mehraeen, "Secure High DER Penetration Power Distribution Via Autonomously Coordinated Volt/VAR Control", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 35, No. 5, pp. 2272-2284, 2020.
- [12]. M. Aryanezhad, " Management and coordination of LTC, SVR, shunt capacitor and energy storage with high PV penetration in power distribution system for voltage regulation and power loss minimization", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 100, pp. 178-192, 2018.
- [13]. Y. Xu, Z.Y. Dong, R. Zhang, D.J. Hill, " multi-timescale coordinated voltage/var control of high renewable-penetrated distribution system", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 32, No. 6,

-
- ¹ On Load Tap Changer
 - ² Capacitor Bank
 - ³ Model Predictive Control
 - ⁴ Distributed Generation
 - ⁵ Step Voltage Regulator
 - ⁶ Genetic Algorithm
 - ⁷ Master Controller
 - ⁸ Slave Controller
 - ⁹ Distributed Energy Resource
 - ¹⁰ Moth Search Optimization
 - ¹¹ Point of Common Coupling

