

# برنامه‌ریزی بهینه ورود و خروج بانک‌های خازنی با استفاده از اطلاعات محلی جهت کمینه‌سازی تلفات سراسری - مطالعه موردی در شبکه ولتاژ متوسط ایران

پروا سوری<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سیدمحمد شهرتاش<sup>۲</sup>، استاد

۱- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه قدرت - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - p\_soury@yahoo.com

۲- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه قدرت - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - shahrtash@iust.ac.ir

**چکیده:** در حال حاضر مهم‌ترین مسئله در طراحی و بهره‌برداری شبکه برق، کمینه‌سازی تلفات و هزینه‌ها است. برخلاف روش‌های موجود سراسری برای تعیین ورود و خروج بهینه بانک‌های خازنی که از حجم بالایی از اطلاعات موجود در سیستم قدرت جهت تصمیم‌گیری استفاده می‌کنند، در این مقاله روشی ارائه گردیده است که در آن صرفاً از داده‌های محلی که در یک پست فوق توزیع می‌توان به آن‌ها دسترسی داشت، استفاده می‌شود، اما ترکیب خازنی بهینه را برای کمینه‌سازی تلفات در شبکه بالادست تعیین می‌کند. این داده‌های محلی، مقدار اندازه‌گیری شده ولتاژ بر روی پایانه ۲۰ kV و ۶۳ kV، توان راکتیوی که بر روی خطوط ۶۳ kV متصل به پست فوق توزیع در حال عبور است و توان راکتیوی که در سمت ۲۰ kV ترانسفورماتور فوق توزیع در حال مصرف است، را شامل می‌شود. شبیه‌سازی‌ها در بخشی از شبکه واقعی فوق توزیع ایران مربوط به استان البرز با استفاده از نرم‌افزار DigSILENT 2018 انجام گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از اجرای روش محلی پیشنهادی این مقاله نسبت به روش‌های سراسری نشان از دقت نتایج روش پیشنهادی در کمینه‌سازی تلفات در شبکه ۶۳ کیلوولت است.

**واژه‌های کلیدی:** کمینه‌سازی تلفات، برنامه‌ریزی ورود و خروج خازن‌ها، داده‌های محلی، کنترل ولتاژ و توان راکتیو.

## Innovative optimal switching scheduling of capacitor banks using local data for global loss minimization—A case study in medium voltage network of IRAN

P. Soury<sup>1</sup>, MSc Student; S. Mohammad Shahrtash<sup>2</sup>, Professor

1- Center of Excellence for Power System Automation and Operation, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: p\_soury@yahoo.com

2- Center of Excellence for Power System Automation and Operation, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: shahrtash@iust.ac.ir

**Abstract:** The most important issue in power system designing and operating is minimizing losses and costs. Unlike existing methods which use a large amount of data across the entire network to determine optimal dispatch of shunt capacitors, this paper describes a method for optimal switching of capacitors in subtransmission substations only by using local data including voltage magnitude on 20kV and 63kV busbars, outgoing/incoming reactive powers on 63kV lines, and reactive load of 20kV side of subtransmission transformer. The simulations are carried out for Alborz Province MV network in IRAN using DigSILENT 2018. Simulation results show an acceptable accuracy to minimize power loss in 63kV network.

**Keywords:** Volt/var control & optimization, optimal scheduling and dispatching of capacitors, local data, loss minimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۳۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱

نام نویسنده مسئول: سید محمد شهرتاش

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق.

## ۱- مقدمه

مهم‌ترین مسئله در سیستم‌های توزیع پاسخ‌گویی همیشگی به بار است که به دلیل تغییر ساعت به ساعت بار و رفتار پیچیده بارهای غیرخطی امری مشکل است و اگر به خوبی مدیریت نشود موجب کیفیت نامطلوب برق، تغییرات ولتاژ و تلفات زیاد خواهد شد. خازن‌های قابل کلیدزنی نصب‌شده در پست و روی فیدرها، توان راکتیو عبوری از پست فوق توزیع و فیدر را کنترل می‌کنند. هدف از برنامه‌ریزی توان راکتیو، تأمین منبع راکتیو کافی در سیستم قدرت است به نحوی که میزان تلفات، و انحراف ولتاژ کمینه شود به بیان دیگر به دلیل تغییرات میزان انرژی مصرفی بار در طول زمان لازم است تا میزان توان راکتیو تزریق‌شده به وسیله خازن به مدار نیز تغییر کند [۱]. در غیر این صورت دو حالت پیش می‌آید:

۱) توان راکتیو کمتری نسبت به آنچه مورد نیاز است به مدار تزریق می‌شود که باعث جبران سازی ناقص توان راکتیو مصرفی بار می‌شود. به ناچار کمبود توان راکتیو از طریق شبکه تأمین می‌شود که هزینه‌ها و تلفات ناشی از توان راکتیو را در بر خواهد داشت.

۲) توان راکتیو بیش‌تری نسبت به آنچه مورد نیاز است به مدار تزریق می‌شود که اضافه ولتاژ و در مواردی هم افزایش تلفات را به همراه خواهد داشت.

بدیهی است برای آنکه ورود خازن در شبکه منجر به کاهش تلفات شود لازم است توان راکتیو عبوری از خطوط را کاهش دهد و در صورتی که ورود خازن، توان راکتیو خطوط را افزایش دهد لازم است از ورود آن جلوگیری شود.

با وجود موارد ذکرشده، لازم است برنامه‌ریزی بهره‌برداری از خازن‌ها در سیستم‌های توزیع و فوق توزیع با هدف برقرسانی به بارهای شبکه در یک حالت بهینه صورت گیرد. علاوه بر این، برای جلوگیری از تحمیل هزینه‌های اضافی، لازم است که این برنامه‌ریزی با حفظ ساختار محلی بودن نحوه تصمیم‌گیری و اقدام در ورود و خروج خازن‌ها و بدون نیاز به اضافه‌شدن زیرساخت‌های مخابراتی به منظور تبادل اطلاعات در سطح شبکه صورت گیرد. بنابراین در این مقاله روشی کارآمد و نوین که با استفاده از داده‌های محلی در هر پست بدون نیاز به پخش بار در شبکه، به منظور کمینه‌سازی تلفات کل شبکه، بهبود پروفیل ولتاژ و کارکرد در حالت عملکرد بهینه، نحوه ورود و خروج خازن‌ها را تعیین می‌کند، ارائه شده است.

## ۱-۱- نحوه بهره‌برداری کنونی از بانک‌های خازنی در ایران

کلید زنی خازن‌ها در شرکت‌های برق منطقه‌ای از روند تدوین شده و هماهنگی پیروی نمی‌کند به نحوی که در بسیاری موارد بهره‌بردار به طور سلیقه‌ای عمل می‌کند. در مواردی، بهره‌بردار بدون هیچ قیدی و فقط بر مبنای توان راکتیو بار (خوانده‌شده از روی مانیتور) اقدام به ورود و خروج دستی خازن‌ها می‌کند. برای افت ولتاژ نیز با استفاده از قرائت ولتاژ و تغییر تپ ترانسفورماتور کنترل انجام می‌گیرد. در واقع بهره‌بردار

تنها براساس تجربیات خود و با این هدف که سیستم به حالت پیش‌فازی نرود و توان راکتیو از شبکه پایین‌دست به سمت شبکه بالادست جاری نشود، تا زمانی که توان راکتیو مصرفی از توان راکتیو تولیدی نامی هر پله خازنی بیش‌تر نشود، خازن جدیدی وارد نمی‌کند. در روش معمول در پست‌های فوق توزیع ایران با استفاده از اندازه‌گیری توان راکتیو مصرفی بار تحت شرایطی که مقدار توان راکتیو قرائت شده از روی تجهیزات اندازه‌گیری به عدد از پیش تعیین‌شده‌ای (به اندازه ظرفیت نامی یک پله خازنی معمولاً ۲/۴ مگاوار) برسد، ورود یک پله از بانک خازنی به صورت دستی توسط نیروی بهره‌بردار صورت می‌گیرد و زمانی که مقدار توان راکتیو مصرفی بار از مقدار ظرفیت نامی یک پله از خازن کمتر شود، پله خازنی وارد شده از مدار خارج می‌شود. مشکل بزرگ این روش این است که در شرایط میان‌باری (که بازه زمانی قابل توجهی در هر سال است) که اگر توان راکتیو اندازه‌گیری شده در پست‌های فوق توزیع در بازه زمانی زیادی از سال کمی کمتر از ظرفیت نامی یک پله خازنی حدود ۲/۲ تا ۲/۴ مگاوار باشد، خازنی وارد مدار نمی‌شود و عدم ورود خازن موجب افزایش تلفات شبکه در شرایط میان‌باری خواهد بود.

براساس این نیاز، در این مقاله الگوریتمی برای ورود و خروج خازن‌ها در شین ۲۰ کیلوولت در پست‌های فوق توزیع، ارائه شده است که بدون نیاز به پخش بار در کل شبکه و صرفاً با داده‌های محلی با قابلیت پیاده‌سازی آسان و دقت کافی منجر به کنترل بهینه توان راکتیو و ولتاژ و هم‌چنین کمینه‌سازی تلفات در شبکه می‌گردد.

## ۲-۱- روش‌های سراسری مختلف جهت برنامه‌ریزی سراسری خازن‌ها

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و پخش بار در کل شبکه مر سوم‌ترین روش سراسری در برنامه‌ریزی کلیدزنی خازن‌ها به شمار می‌رود. در دو دهه گذشته روش‌های متعددی برای کنترل توان راکتیو و ولتاژ در سیستم‌های توزیع استفاده شده است. روش‌های قدیمی‌تر به صورت جدا از شبکه (offline) با هدف یافتن برنامه‌ریزی دیسپاچینگ خازن‌ها بر مبنای پیش‌بینی بار برای روز پیش‌رو انجام می‌گیرند. هم‌چنین روش برنامه‌ریزی دینامیک برای محاسبه دیسپاچینگ خازن‌ها استفاده شده است [۷-۲].

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی به صورت جدا از شبکه موجب عدم دسترسی به وضعیت واقعی و زمان حقیقی سیستم قدرت می‌گردد و هم‌چنین برنامه‌ریزی در حین سرویس دهی شبکه (online) با استفاده از روش‌های بهینه سراسری نیازمند استفاده از اطلاعات کل شبکه است، که در این صورت لازم است زیرساخت مخابراتی وجود داشته و اطلاعات بین پست‌های مختلف تبادل گردد که عیب عمده این روش‌ها محسوب می‌شود. برای مثال در [۸] برای برنامه‌ریزی بهینه خازن‌ها از الگوریتم ترکیبی فازی-ژنتیک استفاده شده است به نحوی که در ۲۴ ساعت شبانه‌روز با استفاده از یک منحنی بار نمونه و تحلیل پخش بار،

۲) کلیدزنی خازن‌های پست توسط کنترل‌کننده اتوماتیک خازن (ACC) که شامل بخش کنترل‌کننده خودکار ضریب توان (APFC) برای ورود و خروج خازن‌هاست؛ به این صورت که این تجهیز با تنظیم ضریب قدرت مطلوب ( $\cos\phi$ )، اقدام به ورود و خروج خازن‌ها خواهد نمود. در کل عواملی که در تصمیم‌گیری سیستم کنترل خازن‌ها و یا ACC نقش بازی می‌کنند شامل ضریب توان محلی، جریان بار، ولتاژ و شارش توان راکتیو، دما و زمان (ساعت و یا روز هفته) خواهند بود. زمانی که سیستم پایش محلی پست شامل ولتاژ، جریان، ضریب توان و غیره نیاز به تغییر را احساس می‌کند، تجهیزات مذکور وارد عمل می‌شوند [۱۴].

در مقاله حاضر نشان داده شده‌است که قرارگیری ضریب توان در یک مقدار مطلوب در هر پست لزوماً منجر به تلفات کمینه سراسری نخواهد شد و نهایتاً شرایط بهینه به دست نخواهد آمد.

## ۲- معیار محلی بودن (مزیت و نوآوری روش پیشنهادی)

این مقاله قصد دارد تا به‌جای استفاده از ساختارهای سنتی (روش‌های محلی و روش‌های بهینه‌سازی و پخش بار در کل شبکه) که در مقالات متعددی پیشنهاد شده‌است، ساختار متفاوتی را شبیه‌سازی و پیاده‌سازی کند. در صورتی که روش مورد استفاده ویژگی‌های زیر را دارا باشد، می‌توان آن را محلی و قابل استفاده در حین سرویس‌دهی شبکه در نظر گرفت.

- ۱- تنها به مقادیر اندازه‌گیری شده از ولتاژ، جریان و توان در پست مورد بررسی نیاز داشته باشد.
  - ۲- به هیچ‌گونه اطلاعات زمان واقعی از سایر پست‌ها و به تبع آن زیرساختار مخابراتی برای ارسال آن نیاز نداشته باشد.
  - ۳- از روش‌های بهینه‌سازی و بهره‌گیری از اطلاعات کل شبکه، استفاده نکند.
- بدیهی است روش محلی در شرایطی کاربردی و قابل استفاده است که نتایج آن از دقت مناسب در مقایسه با نتایج روش‌های پخش بار و بهینه‌سازی در کل شبکه برخوردار باشد.
- موارد ذکر شده تفاوت بنیادی روش پیشنهادی را نسبت به سایر روش‌های موجود بیان می‌کنند.

روش پیشنهادی در این مقاله که از نوع روش‌های محلی است، سعی دارد رویکرد و نگاهی متفاوت نسبت به داده‌های محلی شبکه ۶۳ کیلوولت شامل توان راکتیو عبوری از خطوط متصل به پست و تلفات آن‌ها در شبکه قدرت داشته باشد. مفاهیمی که در این مقاله بر آن تکیه و تأکید شده‌است، شامل موارد زیر می‌شود:

- ۱- برای ورود و خروج خازن‌های نصب شده در محل بار، علاوه بر توجه به توان راکتیو بار، به توان راکتیو خطوط ۶۳ کیلوولت متصل به پست فوق توزیع نیز توجه شود زیرا توان‌های عبوری از خطوط بالادست نماینده‌ای از وضعیت عرضه و تقاضای توان راکتیو در پست‌های مجاور هستند.

تعداد پله خازن‌های بهینه در شبکه به دست می‌آید. همین روند در [۹] با استفاده از سیستم‌های چندعاملی، در [۱۰] با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و در [۱۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام گرفته است. در کلیه مراجع ذکرشده، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی به صورت تلفات کلیه خطوط سیستم قدرت مورد بررسی در طول ۲۴ ساعت با در نظر گرفتن منحنی بار تعریف می‌شود. این تلفات به صورت ساعت به ساعت محاسبه می‌شود و تابعی از وضعیت خازن شنت و محل تپ ترانسفورماتور است، به‌نحوی که، تعداد کلیدزنی مجاز خازن در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز و تعداد تغییرات مجاز محل تپ نیز به صورت قیود مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌شود. همچنین برای ولتاژ نیز محدوده مجاز معمولاً بین ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ پریونیت در نظر گرفته می‌شود.

در واقع برای کنترل ولتاژ و توان راکتیو سه روند اصلی وجود دارد که شامل موارد زیر خواهد شد [۱۲]:

- عملکرد مستقیم کنترل‌کننده‌های ولتاژ و راکتیو (روش‌های متعارف)
  - سیستم VVO مبتنی بر سیستم SCADA<sup>۱</sup>
  - سیستم IVVC<sup>۲</sup> و یا سیستم بهینه‌سازی و کنترل یکپارچه ولتاژ و توان راکتیو (VVO مبتنی بر مدل DMS<sup>۳</sup>)
- روش IVVC پیشرفته‌ترین روش موجود برای VVO است به‌نحوی که برای کلیدزنی هماهنگ کلیه تجهیزات کنترلی شبکه از داده‌های زمان حقیقی شامل مدل سیستم توزیع، تابع محاسبات پخش بار و "عملگر بهینه‌سازی" استفاده می‌کند. دستورات کنترلی با استفاده از SCADA به کلیه تجهیزات کنترل‌کننده ارسال می‌شود. در واقع در روش پیشنهادی مرجع [۱۳] سیستم کنترلی یکپارچه IVVC با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و جمع‌آوری شده در MDMS<sup>۴</sup> وضعیت عملکردی مطلوب خازن و تپ‌چنجر را مشخص می‌سازد.

به‌طور کلی در خصوص عیب‌های ذکرشده می‌توان به هزینه بالا، پیچیدگی، دارای سرعت عملکرد کمتر از روش‌های محلی و امکان اختلال در زیرساختار ارتباطی آن اشاره نمود [۱۴].

## ۱-۳- روش‌های محلی جهت برنامه‌ریزی سراسری خازن‌ها

به کارگیری روش‌های محلی در کنترل بهینه ورود و خروج خازن‌ها بدین معناست که تصمیم‌گیری تنها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل نصب خازن بدون بهره‌گیری از اطلاعات هم‌زمان دیگر پست‌های موجود در سیستم قدرت انجام می‌گیرد که در این حوزه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱) تعیین مقدار آستانه توان راکتیو بار برای ورود و خروج یک پله از بانک خازنی به میزان ظرفیت نامی پله بانک خازنی (ساده‌ترین روش)

در این ساختار اطلاعاتی برای تصمیم‌گیری پیرامون نحوه ورود و خروج خازن‌ها در یک پست فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلوولت اطلاعات زیر استفاده می‌شود:

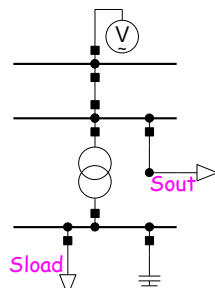
- اطلاعات پایه و یا مربوط به ساعت‌های قبل تصمیم‌گیری شامل: مشخصات خطوط متصل به پست، تعداد بانک خازنی موجود پست.
- اطلاعات در لحظه تصمیم‌گیری شامل: توان راکتیو ورودی یا خروجی خطوط متصل به پست، تعداد بانک خازنی وارد شده در پست، توان راکتیو مصرفی بارهای پست، ولتاژ شین ۶۳ و ۲۰ کیلوولت.

#### ۴- مبانی روش پیشنهادی

در این بخش برای رفع مشکل نحوه ورود و خروج خازن‌ها مبتنی بر داده‌های محلی که تضمین‌کننده کمینه‌شدن تلفات شبکه بالادست هم باشد، در ابتدا در یک شبکه ساده نشان داده می‌شود که خازنی با ظرفیت بزرگ‌تر از توان راکتیو مصرفی بار منجر به کمینه‌سازی تلفات می‌گردد تا ما فاهیم تازه‌ای موردتوجه قرار گیرد. پس از آن تلاش شده‌است تا رویکرد نوین در تصمیم‌گیری برای کلیدزنی خازن‌ها و کنترل ولتاژ و توان راکتیو با بهره‌گیری از داده‌های محلی به نمایش گذاشته شود.

#### ۴-۱- ایده اولیه

برای بررسی اثر توان راکتیو خروجی از پست، فرض بر آن است که علاوه بر بار  $S_{load}$  مربوط به باس ۲۰ kV در شکل ۲ توان خروجی با مقدار  $S_{out}$  نیز در باس ۶۳ kV نصب شده‌است که نماینده بارهای مربوط به پست‌های مجاور است.  $Q_{load}$  برابر با ۴/۶ MVar است. در روش‌های موجود که تنها به توان راکتیو بار یا ضریب توان توجه می‌شود، در شرایطی که  $S_{out}$  نیز وجود دارد، خازنی برابر با  $Q_{load}$  به شبکه وارد می‌شود. با افزایش مقدار  $S_{out}$  نتایج درج شده در جدول ۱ نشان‌گر تفاوت میزان خازن بهینه موردنیاز برای کمینه‌سازی تلفات از مقدار  $Q_{load}$  و روند تقریباً منظمی در مقدار بهینه خازن است.



شکل ۲: قرارگیری بار خارجی در باس ۶۳kV

چنان‌که در جدول مذکور دیده می‌شود، با  $k$  برابر شدن مقدار توان خروجی باس ۶۳ kV، مقدار خازن موردنیاز حالت پایه ( $k=0$ )، تقریباً  $k+1$  برابر می‌شود. (روش فعلی در تصمیم‌گیری پیرامون ورود و خروج

۲- تلفات خطوط ۶۳ کیلوولت متصل به پست فوق توزیع با در دست داشتن اطلاعات محلی به صورت تقریبی قابل محاسبه است به نحوی که این تلفات، نماینده‌ای از تأثیر ورود و خروج خازن‌ها بر تلفات کل شبکه بالادست است. از مزایای روش پیشنهادی نسبت به روش‌های سراسری و محلی ذکر شده، سرعت بالا، ارزان‌تر و آسان‌تر بودن برای پیاده‌سازی، عدم نیاز به شبکه ارتباطی به دلیل استفاده از داده‌های محلی و موفقیت در کمینه‌سازی سراسری تلفات است.

#### ۳- مبانی محلی بودن و فرضیات و محدودیت‌های روش پیشنهادی

از آنجایی که در این مقاله از روش‌های مرسوم بهینه‌سازی استفاده نمی‌شود، لذا تابع هدف و قیود مطابق این‌گونه روش‌ها در آن مطرح نیست. در روش پیشنهادی، تصمیم‌گیری پیرامون تزریق توان راکتیو توسط بانک‌های خازنی به صورت زمان واقعی انجام می‌گیرد (ذکر این نکته ضروری است که در این تصمیم‌گیری تنها ارزیابی فنی برنامه‌ریزی ورود و خروج خازن‌ها در شبکه مدنظر بوده است و اثرات اقتصادی تعداد مجاز کلیدزنی خازن‌ها مدنظر نبوده است). در واقع این موضوع که در روش پیشنهادی، از سیستم‌های SCADA، اندازه‌گیری سراسری و زیرساخت مخابراتی برای انتقال و تبادل داده‌ها استفاده نمی‌شود اما نتایج آن بر نتایج روش‌های سراسری منطبق است و کمینه‌سازی تلفات در کل شبکه انجام می‌گیرد از مزایای اقتصادی مهم به کارگیری این روش به حساب می‌آید.

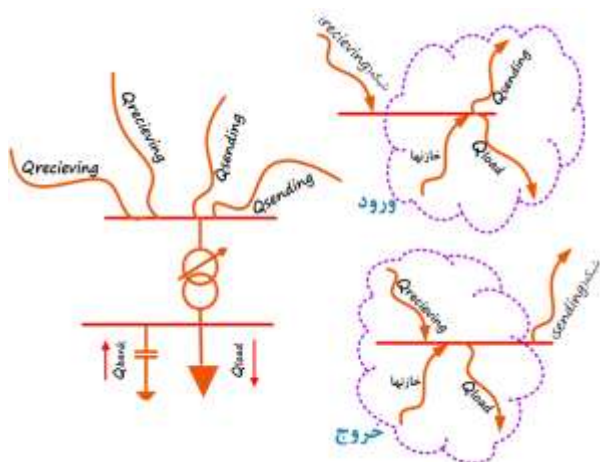
از آنجایی که شبکه‌های استاندارد موجود در سایر مقالات، از یک شبکه واقعی استخراج شده‌اند، این مقاله بر روی یک شبکه واقعی در ایران پیاده‌سازی شده است که عمومیت و ویژگی‌های یک شبکه فوق توزیع استاندارد را داراست.

ساختار اطلاعاتی این مقاله که صرفاً اطلاعات محلی را استفاده می‌کند در شکل ۱ نشان داده شده است، به نحوی که به کمک اندازه‌گیری‌های محلی و تصمیم‌گیری مبتنی بر همین داده‌ها، برنامه کلیدزنی خازن‌ها، با هدف کمینه‌کردن تلفات کل شبکه مشخص می‌شود ولی در تعیین مقدار خازن، شبکه بالادست متصل به پست به نوعی معادل‌سازی می‌شود که تأثیر پست‌های دیگر هم دیده شود.



شکل ۱: ساختار نوین اطلاعاتی این مقاله با استفاده از داده‌های محلی

محل مورد استفاده برای تعیین ورود و خروج خازن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایش داده‌های محلی مورد استفاده برای تعیین ورود و یا خروج خازن

در این شرایط مطابق بخش "ورود" در شکل ۳، ورود خازن‌ها کمک می‌کند که توان کمتری ( $Q_{recieving}$ ) از شبکه به سمت پست مذکور جاری شود بنابراین تلفات در شبکه کاهش خواهد یافت. در واقع ورود خازن‌ها منجر به تأمین بار پست ( $Q_{load}$ ) و توان راکتیو خروجی از پست ( $Q_{sending}$ ) خواهد شد.

لذا با استفاده از ایده ارائه شده در بخش ۴-۱ و انجام بررسی و شبیه‌سازی‌های مختلف، از رابطه (۱) برای تعیین تعداد بانک خازنی لازم که باید وارد شوند، استفاده می‌شود.  $Sum(Q_{load})$  به‌عنوان مجموع توان راکتیو بارهای موجود در پست مورد بررسی،  $N_{bank}$  به‌عنوان تعداد پله‌ای از بانک خازنی که باید وارد یا خارج شود و [ ] علامت گرد کردن به سمت نزدیک‌ترین عدد صحیح تعریف می‌شود.

$$N_{bank} = \left\lceil \frac{Sum(Q_{sending}) + Sum(Q_{load}) - N \times (Q_{bank})}{Q_{bank}} \right\rceil \quad (1)$$

همچنین مطابق بخش "خروج" در شکل ۳، خروج خازن‌ها کمک می‌کند که مقدار کمتری ( $Q_{sending}$ ) از پست به سمت پست‌های مجاور تزریق شود، بنابراین تلفات در بخش شبکه کاهش خواهد یافت. لذا رابطه (۲) برای تعیین تعداد بانک خازنی لازم که باید خارج شوند، استفاده می‌شود.

$$N_{bank} = \left\lceil \frac{N \times (Q_{bank}) + Sum(Q_{receiving}) - Sum(Q_{load})}{Q_{bank}} \right\rceil \quad (2)$$

#### ۴-۳- بررسی قید تلفات جهت تعیین صحیح تعداد پله

##### بانک‌خازنی

پس از اندازه‌گیری توان راکتیو بار، توان‌های ورودی و خروجی پست و محاسبه تعداد بانک خازنی‌ای که لازم است وارد و یا خارج گردند، از

خازن، بدون توجه به توان خروجی در پست ۶۳ کیلوولت است یعنی تصمیم‌گیری با فرض این است که همواره  $k=0$  است، درحالی‌که دیده می‌شود با افزایش توان خروجی در پست، میزان خازن بهینه بسیار متفاوت با حالت پایه است. این موضوع مشکل مهم در نحوه تصمیم‌گیری فعلی برای ورود خازن بهینه در پست‌های فوق توزیع است که به میزان توان تحویلی به شبکه مجاور توجه نمی‌شود.

جدول ۱: خازن مورد نیاز با افزایش بار متصل به باس ۶۳ کیلوولت

k	صفر	۱	۲	۳	۴	۵	۶
خازن بهینه (MVar)	۶/۲۵	۱۱/۵	۱۷/۷۵	۲۵	۳۲/۷۵	۴۱/۵	۵۱
تلفات روش موجود (kW)	۲۴۵	۹۰۳	۲۱۲۷	۴۰۵۸	۶۹۴۵	۱۱۱۸۲	۱۷۷۷۷
تلفات روش پیشنهادی (kW)	۲۴۰	۸۴۷	۱۹۱۰	۳۴۸۰	۵۶۲۰	۸۴۰۶	۱۱۹۳۸
درصد کاهش تلفات	۲/۱	۶/۳	۱۰/۳	۱۴/۳	۱۹	۲۴/۹	۳۲/۹

نتیجه فوق بدین معناست که مقدار توان راکتیو انتقالی از طریق خطوط متصل به پست‌های مجاور نیز در تعیین خازن بهینه پست اهمیت دارد. در این کار، از این نتیجه‌گیری، برای تصمیم‌گیری جهت برنامه‌ریزی ورود و خروج خازن‌ها با استفاده از داده‌های محلی استفاده شده است.

همان‌طور که ذکر شد، ایده این مقاله مبتنی بر کمینه‌سازی تلفات شبکه بالادست پایانه ۲۰ kV است. در جدول ۱ این موضوع نشان داده شده است که روش‌های موجود (روش APFC و تعیین مقدار آستانه) که تنها به ضریب توان و توان راکتیو مصرفی بار توجه می‌کنند، کاهش کمتری در تلفات موردنظر نسبت به ایده پیشنهادی ایجاد می‌کنند. در حقیقت روش‌های موجود بدون توجه به  $S_{out}$  خازنی معادل با توان مصرفی بار به شبکه وارد می‌کنند. روش‌های موجود منجر به کمینه‌سازی تلفات نشده‌اند بنابراین در این شرایط مزیت روش پیشنهادی کاملاً مشخص می‌گردد.

#### ۴-۲- روابط مورد استفاده برای ورود و خروج خازن

با گسترش ایده اولیه برای تعداد بانک خازنی موردنیاز، جهت کمینه‌سازی تلفات در شبکه فوق توزیع، می‌توان به روابط جامع‌تری برای محاسبه تعداد بانک خازنی بهینه مورد نیاز دست یافت.

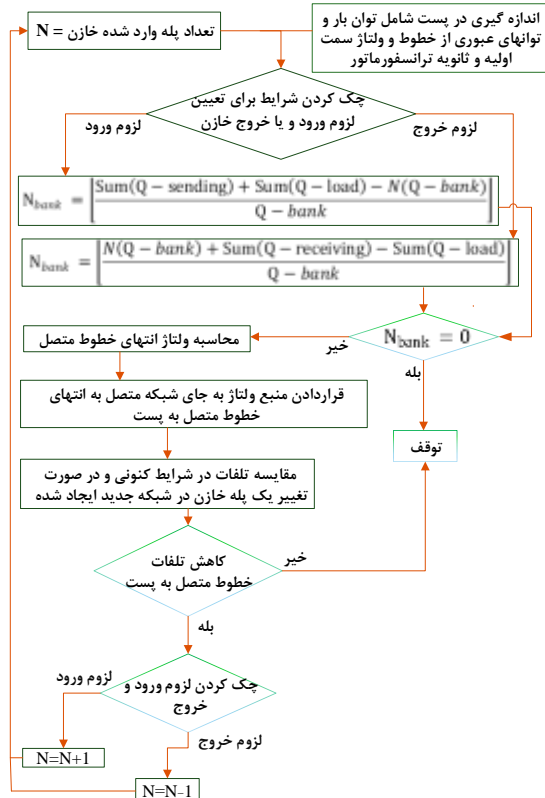
**گام اول** برای تعیین ورود و خروج خازن بدین‌صورت است که در زمان تصمیم‌گیری برای محاسبه برنامه بهینه کلیدزنی خازن‌ها لازم است اندازه‌گیری‌های موردنیاز شامل توان بار و توان‌های عبوری از خطوط و ولتاژ سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور و تعداد کل پله‌های خازنی وارد شده در کل پست دریافت شود. در **گام دوم**، باری که بر روی ترانسفورماتورهاست با باری که در مرحله قبل از اجرای الگوریتم در حال مصرف بوده است مقایسه می‌گردد. در شرایطی که مقدار بار رو به افزایش بوده است الگوریتم وارد مرحله ورود خازن می‌شود و در صورت کاهش بار، الگوریتم لزوم خروج خازن را بررسی می‌کند. داده‌های

$Y_i$ : ادمیتانس کل هر کدام از خطوط ۶۳ کیلوولت (البته قابل صرف نظر کردن است).

- در مرحله دوم از شکل ۴ ولتاژهای محاسبه شده در مرحله قبل به عنوان منبع ولتاژ در انتهای هر یک از خطوط به عنوان معادل شبکه بالادست قرار می گیرند.
- در مرحله سوم از شکل ۴ با قراردادن فازور ولتاژ محاسبه شده در انتهای خطوط به عنوان معادل شبکه انتهای هر خط و در نظر گیری ولتاژ ثابت در انتهای خطوط، تلفات خطوط متصل به پست از رابطه (۴) محاسبه می شود.

$$P_{loss} = |V_i|^2 \left( (Z_i^*)^{-1} + \frac{Y_i^*}{2} \right) - V_i V_i^* (Z_i^*)^{-1} + |V|^2 \left( (Z_i^*)^{-1} + \frac{Y_i^*}{2} \right) - V V_i^* (Z_i^*)^{-1} \quad (۴)$$

سپس پله خازنی بعدی در قالب محاسباتی وارد مدار یا خارج از مدار می شود. حال دوباره تلفات از رابطه (۴) محاسبه شده و با حالت قبل از تغییر پله خازنی مقایسه می گردد. در واقع ورود و خروج خازن در قالب محاسباتی نه به صورت واقعی منجر به تغییر توان راکتیو در شین ۲۰ kV و در نتیجه تغییر ولتاژ شین ۲۰ kV می گردد. در نتیجه تلفات محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴) کاهش و یا افزایش می یابد. مطابق فلوجارت شکل ۵ در صورت کاهش تلفات، پله خازنی بعدی وارد مدار یا از آن خارج می شود و روند الگوریتم برای ورود یا خروج پله های بعدی ادامه می یابد؛ در غیر این صورت الگوریتم متوقف می شود. این روند به طور مستقل در هر پست با استفاده از حداقل حجم داده ها با خطای بسیار کم در انتخاب بهینه خازن ها عمل می کند.

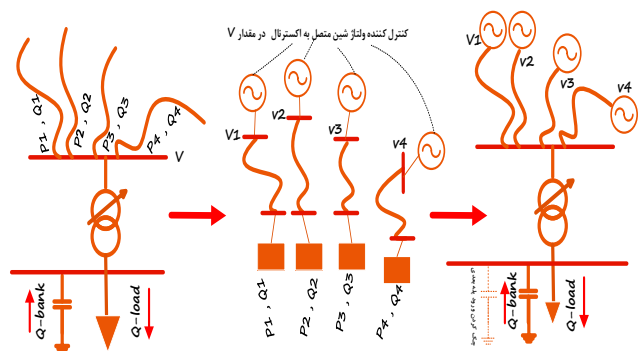


شکل ۵: الگوریتم پیشنهادی برای محاسبه تعداد پله بانک خازنی

آنجایی که هدف از برنامه ریزی خازن ها کمینه سازی تلفات است، لازم است قبل از ورود یا خروج هر پله از بانک خازنی این موضوع بررسی شود که آیا ورود یا خروج یک پله از بانک خازنی منجر به کاهش مجموع تلفات خطوط ۶۳ کیلوولت بالادست متصل به پست فوق توزیع خواهد شد یا خیر به نحوی که در صورت افزایش تلفات از کلیدزنی خازن ها ممانعت به عمل آید. در واقع پیش از ورود و خروج واقعی خازن، با استفاده از محاسبات افزایش و یا کاهش تلفات مشخص می گردد.

از آنجایی که مطابق روش پیشنهادی در این مقاله تنها داده های محلی در دسترس می باشند، جهت بررسی عدم افزایش تلفات در خطوط به وسیله تغییر پله بانک خازنی، شبکه خارجی در انتهای هر خط متصل به پست با استفاده از "مدل منبع ولتاژ ثابت" معادل سازی می شود (صحت سنجی این نحوه معادل سازی برای محاسبه تلفات و مقایسه آن با سایر روش ها در بخش ۸-۱ صورت گرفته است).

رویکرد مورد استفاده برای واریسی این قید مطابق شکل ۴ به ترتیب زیر است:



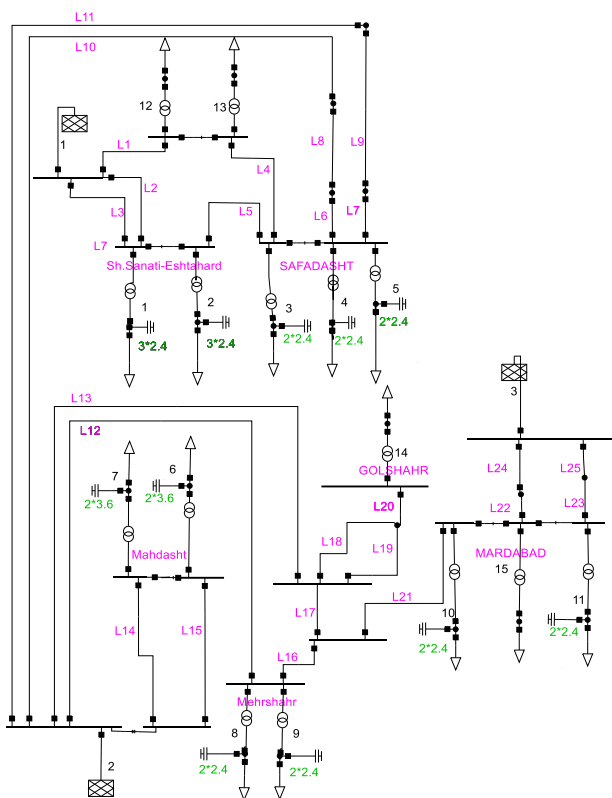
شکل ۴: روند واریسی کاهش تلفات خطوط متصل

- در مرحله اول از شکل ۴ با معلوم بودن مشخصات خطوط متصل به پست مورد بررسی و قرائت دامنه ولتاژ شین ۶۳ کیلوولت و با در نظر گیری زاویه صفر برای ولتاژ، و همچنین با قرائت توان های اکتیو و راکتیو هر خط ۶۳ کیلوولت متصل به پست مورد بررسی در سمت متصل به پست، مطابق شکل ۴، ولتاژ انتهای خطوط (به عنوان نمونه V1 تا V4) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شوند.

$$V_i = \left(1 + \frac{Z_i Y_i}{2}\right) V + Z_i \frac{P_i - jQ_i}{V^*} \quad (۳)$$

$P_i, Q_i$ : توان عبوری هر کدام از خطوط ۶۳ در سمت متصل به پست  
 $V$ : ولتاژ شین ۶۳ کیلوولت در پست مورد بررسی  
 $V_i$ : ولتاژ انتهای هر کدام از خطوط ۶۳ کیلوولت  
 $Z_i$ : ادمیتانس کل هر کدام از خطوط ۶۳ کیلوولت

بررسی از سه پست به شبکه خارجی که معادل شبکه بالادست در هر ناحیه هستند، متصل است.



شکل ۷: مورد مطالعه ۲

مقادیر بیشینه بارهای متصل در سمت فشار ضعیف هر ترانسفورماتور فوق توزیع در جدول ۲ نمایش داده شده است. در کلیه نتایج موجود در جدول‌های این مقاله به جای استفاده از مقادیر مستقیم توان اکتیو و راکتیو، از تعبیر ضریب بار به معنی نسبت بار کنونی به بیشینه بار متصل به ترانسفورماتور استفاده شده است.

جدول ۲: مقادیر بار (ضریب قدرت ۰/۹)

ترانسفورماتور	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
Q(MVar)	۱۲/۹	۱۲/۹	۱۱/۳	۷/۸۱	۷/۵۴	۷/۷	۵/۸	۱۳/۵
P(Mw)	۲۶/۷	۲۶/۷	۲۳/۴	۱۶/۱	۱۵/۶	۱۶	۱۲	۲۷/۸
ترانسفورماتور	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	
Q(MVar)	۱۰/۲	۱۱/۸	۹/۷	۶/۵	۶/۵	۵/۱	۷/۵۴	
P(MW)	۲۱/۱	۲۴/۵	۲۰	۱۳/۳	۱۳/۳	۱۰/۶	۱۵/۸	

### ۶- روند صحت سنجی پاسخ‌ها

روند شبیه‌سازی‌ها بدین صورت بوده است که در مرحله اول و برای ایجاد نتایج دقیق با تغییر توان مصرفی بار در پست‌های مختلف، قرار دادن ترکیب‌های مختلف بار و تغییر شرایط بهره‌برداری و کلیه ترکیب‌های خازنی ممکن، تلفات شبکه در حالات مختلف به کمک نرم‌افزار DiGSILENT محاسبه گردیده تا ترکیب بهینه خازنی متناظر

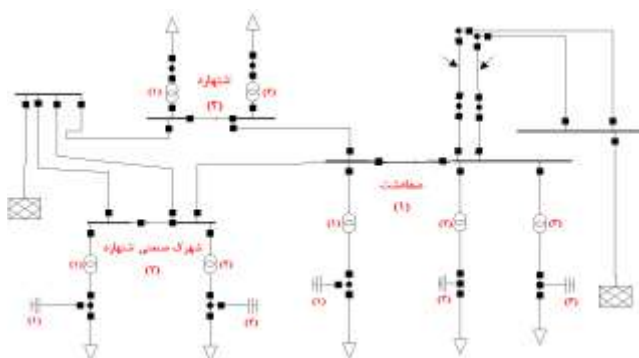
شایان ذکر است در کلیه الگوریتم‌های این مقاله، در پست‌هایی که دارای چند ترانسفورماتور هستند، روند ورود بانک خازنی در هر پست به ترتیب از ترانسفورماتور با بار بیشتر به ترانسفورماتور با بار کمتر انجام می‌گیرد و خروج خازن نیز، از ترانسفورماتور با بار کمتر به ترانسفورماتور با بار بیشتر انجام می‌گیرد.

همان‌طور که در روند فلوجارت شکل ۵ نشان داده است، روش نوین این مقاله با بهره‌گیری از توان‌های راکتیو عبوری بر روی خطوط بالا دست، تعداد پله خازنی مورد نیاز برای ورود و یا خروج را با رعایت قید تلفات خطوط متصل واری می‌کند.

### ۵- معرفی شبکه‌های فوق توزیع مورد بررسی

برای صحت سنجی الگوریتم ذکر شده، بخشی از شبکه برق فوق توزیع استان البرز در دو سطح، شامل شبکه‌های تست ۱ و ۲ در نظر گرفته شد. همچنین شبکه‌های خارجی موجود در سیستم تست ۱ و ۲ دارای ولتاژ و زاویه ثابت برابر با مقداری واقعی از کل شبکه برق تهران می‌باشند. فرض بر آن است که شبکه بالادست در هر یک از شبکه‌های خارجی آن قدر قوی است که تغییرات در شرایط بهره‌برداری شبکه‌های تست، تأثیر چندانی بر ولتاژ شبکه‌های خارجی ندارد (برای صحت‌سنجی این موضوع که تغییر ولتاژ شبکه‌های خارجی در روند تصمیم‌گیری برای تعیین خازن بهینه تأثیری ندارد، در حالات مختلف شبیه‌سازی، مقادیر متفاوتی برای مقدار و زاویه فازور ولتاژ شبکه خارجی قرار داده شده است که هم‌چنان نتایج صحیحی حاصل شده است [۱۵]).

در وهله اول پیاده‌سازی روش‌های ذکر شده بر روی شبکه مورد مطالعه ۱ نمایش داده شده در شکل ۶، دارای ۳ پست فوق توزیع و ۵ بانک خازنی ۲۰ kV، انجام گرفته است. این شبکه مورد مطالعه از دو پست به شبکه خارجی متصل است.



شکل ۶: شبکه مورد مطالعه ۱

سپس به منظور اعتباربخشی بیشتر به روش‌های ذکر شده، بررسی‌ها بر روی بخش بزرگ‌تری از شبکه فوق توزیع استان البرز انجام گرفته است که مطابق شکل ۷، چندین پست دیگر را شامل می‌شود. شبکه مورد مطالعه ۲ دارای ۷ پست فوق توزیع و ۱۱ بانک خازنی با ظرفیت‌های ۴/۸ و ۷/۲ مگاوار است. همچنین شبکه دارای ۱۵ ترانسفورماتور با مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۴۰ مگاوات آمپر است. شبکه مورد

برای آن که نشان داده شود ترتیب اجرای الگوریتم در پست‌های مختلف تأثیری در رویکرد مورد استفاده پیشنهادی ندارد چند مورد از سخت‌گیرانه‌ترین حالات مورد بررسی قرار گرفته است تا این موضوع اثبات گردد که در روند ورود خازن در پست‌های مختلف تفاوتی نمی‌کند کدام پست دیگری را تعقیب کند.

در مورد هشتم از جدول ۳ که پست ۱ بر روی ضریب ۰/۵ و پست ۲ بر روی ضریب ۰/۱ قرار دارد حالت خاصی که بررسی شد این است که حتی تحت شرایطی که هیچ خازنی از صفادشت (پست ۱) وارد نشده باشد و شروع ورود خازن از سمت شهرک صنعتی اشتهارد (پست ۲) انجام گیرد، قید کاهش تلفات اجازه ورود خازن دوم مربوط به شهرک صنعتی اشتهارد را نمی‌دهد. زیرا ترکیب ۲۲۲ و ۱۰ دارای تلفات کمتری نسبت به ترکیب ۲۲۱ و ۱۱ است و همان نتیجه مندرج در جدول ۳ از روش پیشنهادی به دست می‌آید.

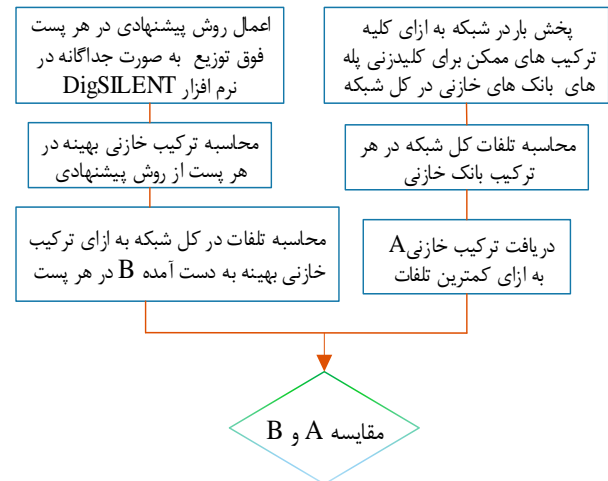
در مورد پنجم از جدول ۳ که پست ۱ بر روی ضریب ۱ و پست ۲ بر روی ضریب ۰/۲ قرار دارد، در صورتی که در پست ۱ هیچ خازنی وارد نشده باشد و شروع ورود خازن از سمت پست ۲ انجام گیرد، قید کاهش تلفات اجازه رفتن از ترکیب خازنی ۲۲ به ترکیب خازنی ۳۲ را نمی‌دهد و نتایج روش پیشنهادی بدون تغییر مطابق مندرجات جدول ۳ باقی می‌ماند.

در مورد سوم که پست ۱ و ۲ هر دو بر روی ضریب ۰/۲ قرار دارد، در صورتی که در پست ۱ هیچ خازنی وارد نشده باشد و شروع ورود خازن از سمت پست ۲ انجام گیرد، قید کاهش تلفات اجازه رفتن از ترکیب خازنی ۲۱ به ترکیب خازنی ۲۲ را نمی‌دهد و همان نتیجه به دست می‌آید.

نتایج جدول ۳ در ابتدا با شروع ورود خازن از سمت صفادشت شکل گرفته است. اما علاوه بر موارد ذکر شده بالا، شروع ورود خازن از سمت پست شهرک صنعتی اشتهارد برای کلیه حالات بهره‌برداری جدول ۳ بررسی شده است. نهایتاً نتایج یکسانی با حالتی که شروع ورود خازن از پست صفادشت انجام گرفته است، حاصل شد [۱۵].

هم‌چنین حالت خاص دیگری نیز بررسی شده است با این رویکرد که پس از ورود یک پله خازنی در صفادشت، ورود خازن صفادشت متوقف شود و پله اول مربوط به شهرک صنعتی اشتهارد وارد شود و دوباره ورود خازن در شهرک صنعتی اشتهارد متوقف شود و پله دوم در صفادشت اقدام به ورود کند و همچنان این روند ورود پله به پله خازن از هر پست به پست بعدی ادامه یابد، نهایتاً باز هم نتایج یکسانی با آنچه که در حالت بهینه جدول ۳ نشان داده شد، حاصل می‌شود که نشان از صحت عملکرد روش پیشنهادی در شرایط افزایش تدریجی بار و ورود پله به پله خازن‌ها هم دارد [۱۵].

با تلفات کمینه مشخص گردد. سپس ترکیب خازنی به دست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی با ترکیب بهینه خازنی فوق مقایسه و در خصوص صحت سنجی نتایج اقدام شده (همان‌گونه که در شکل ۸ آمده است)، که صحیح بودن پاسخ در همه حالات مورد بررسی تأیید گردیده است.



شکل ۸: روند صحت‌سنجی پاسخ‌ها

#### ۷- نتایج شبیه‌سازی در شبکه مورد مطالعه ۱

به ازای ترکیب‌های بار مختلف در شبکه مورد مطالعه ۱، مقدار خازن بهینه در پست‌های صفادشت و شهرک صنعتی اشتهارد با استفاده از داده‌های محلی و روند گفته شده در روندنمای شکل ۵ محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. برای مثال ترکیب ۲۱۱ در جدول ۳ به معنای دو پله از خازن شماره ۱ موجود در پست شماره ۱ (صفادشت) و یک پله از هر یک از دو خازن دیگر همان پست است. برای پست شماره ۲ (شهرک صنعتی اشتهارد) که دارای دو خازن است نیز ترکیب‌های خازنی به همین صورت محاسبه شده است.

چنان‌که در جدول ۳ نشان داده شده است، صحت سنجی نتایج به روشی که در بخش ۶ ارائه شد، انجام گرفت و حاکی از دقت قابل قبول نتایج روش پیشنهادی است. از سوی دیگر، بین تعداد پله خازنی در روش کنونی مورد استفاده توسط بهره‌بردار (روش تعیین مقدار آستانه برابر با ظرفیت هر پله بانک خازنی) و نتایج بهینه از پخش بار، در اکثر حالات اختلاف وجود دارد که وجود این اختلاف موجب عدم کمینه‌سازی صحیح تلفات در شرایط مختلف، به‌ویژه در شرایط میانبری که بازه زمانی زیادی از سال را تشکیل می‌دهد، خواهد شد.

#### ۷-۱- بررسی عدم تأثیر کلیدزنی در پست‌های مختلف



جدول ۳: مقایسه مقدار خازن به دست آمده در روش پیشنهادی با مقدار خازن واقعی مورد نیاز در شبکه مورد مطالعه ۱

نسبت بار موجود به پیک بار	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۴ ۰/۴ ۰/۶	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۳ ۰/۳ ۰/۳	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۲ ۰/۲ ۱	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۱ ۱ ۰/۳
محل خازن	پست ۱ پست ۲	۰/۷۲ ۰/۷۲	پست ۱ پست ۲	۰/۲ ۰/۲	پست ۱ پست ۲	۰/۳ ۰/۳	پست ۱ پست ۲	۰/۵ ۰/۵
خازن بهینه با روش موجود	۲۱۱ ۲۲۲	۲۲ ۳۳	۱۱۱ ۲۱۱	۲۱ ۲۲	۱۱۰ ۲۲۱	۱۱ ۲۱	۱۱۰ ۲۲۱	۳۳ ۳۳
خازن بهینه با روش پیشنهادی	۲۱۱ ۲۲۲	۲۲ ۳۳	۱۱۱ ۲۱۱	۲۱ ۲۲	۱۱۰ ۲۲۱	۱۱ ۲۱	۱۱۰ ۲۲۱	۳۳ ۳۳
خازن بهینه با روش پخش بار	۲۱۱ ۲۲۲	۲۲ ۳۳	۱۱۱ ۲۱۱	۲۱ ۲۲	۱۱۰ ۲۲۱	۱۱ ۲۱	۱۱۰ ۲۲۱	۳۳ ۳۳
خطای روش پیشنهادی نسبت به پخش بار	—	—	—	—	—	—	—	—
درصد بهبود تلفات (روش پیشنهادی نسبت به روش موجود)	۰/۷۲	۰/۴	۱/۰۵	۰/۴۸	—	—	—	—
نسبت بار موجود به پیک بار	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۲ ۰/۲ ۱	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۲ ۰/۵ ۰/۲	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۳ ۱ ۰/۳	پست ۱ پست ۲ پست ۳	۰/۵ ۰/۱ ۰/۵
محل خازن	پست ۱ پست ۲	۰/۳ ۰/۳	پست ۱ پست ۲	۰/۲ ۰/۲	پست ۱ پست ۲	۰/۳ ۰/۳	پست ۱ پست ۲	۰/۵ ۰/۱
خازن بهینه با روش موجود	۲۲۲ ۲۲۲	۱۱ ۲۲	۱۱۰ ۲۲۲	۳۲ ۳۳	۱۱۱ ۲۲۲	۳۳ ۳۳	۱۱۱ ۲۲۲	۱۰ ۱۰
خازن بهینه با روش پیشنهادی	۲۲۲ ۲۲۲	۲۲ ۳۳	۱۱۰ ۲۲۲	۳۳ ۳۳	۱۱۰ ۲۲۲	۳۳ ۳۳	۲۲۲ ۲۲۲	۱۰ ۱۰
خازن بهینه با روش پخش بار	۲۲۲ ۲۲۲	۲۲ ۳۳	۱۱۰ ۲۲۲	۳۳ ۳۳	۱۱۰ ۲۲۲	۳۳ ۳۳	۲۲۲ ۲۲۲	۱۰ ۱۰
خطای روش پیشنهادی نسبت به پخش بار	—	—	—	—	—	—	—	—
درصد بهبود تلفات (روش پیشنهادی نسبت به روش موجود)	۰/۳	۱/۲۸	۰/۷	۰/۹	—	—	—	—

روش پیشنهادی در این مقاله با پاسخ بهینه از روش پخش بار یکسان به دست می‌آید.

## ۸- نتایج بررسی روش پیشنهادی در شبکه مورد مطالعه ۲

حال جهت صحت‌سنجی بیش‌تر و اطمینان یافتن از الگوریتم پیشنهادی، ادامه روند شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه مورد مطالعه ۲ که شامل بخش بزرگ‌تری از شبکه فوق توزیع ۶۳kV است انجام گرفته است. در این شرایط ترکیب خازنی بهینه در دو حالت باری نمونه با استفاده از روند ذکر شده در روندنما محاسبه خواهد شد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در صورتی که قید تلفات چک شود، ترکیب خازنی به دست آمده دقیقاً برابر با بهینه‌ترین ترکیب خازنی ممکن است. در واقع در این حالت، واریسی قید تلفات مانع از آن شده است تا تعداد خازن ورودی بیش از تعداد خازن مورد نیاز بهینه در شبکه شود.

جدول ۴: ترکیب خازنی بهینه با در نظر گرفتن مقادیر باری مختلف

باسبار	ضریب بار	ترکیب خازنی با روش پخش بار	ترکیب خازنی بدون واریسی قید تلفات	ترکیب خازنی همراه با واریسی قید تلفات
صفادشت	۰/۳	۲۱۱	۲۱۱	۲۱۱
مردآباد	۰/۲	۱۱	۲۲	۱۱
مهر شهر	۰/۴	۲۲	۲۲	۲۲
ماهدشت	۰/۳۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱
شهرک	۰/۸	۳۳	۳۳	۳۳

واریسی قید تلفات در پست مردآباد تحت مقادیر بار ذکر شده در جدول ۴، زمانی که خازن‌های پست مردآباد بر روی حالت ۱۱ قرار دارند، افزایش تعداد بانک‌های خازنی را اجازه نمی‌دهد و بدین ترتیب پاسخ

### ۸-۱- قرار دادن مدل تونن در انتهای خطوط متصل به پست مردآباد

مطابق روند ذکر شده در شکل ۴، به منظور شبیه‌سازی ورود پله خازنی بعدی، در انتهای هر یک از خطوط متصل، منبع ولتاژ ثابت در نظر گرفته شده است. هدف از معادل‌سازی شبکه بالادست در انتهای خطوط متصل، مدل‌سازی شبکه قدرت با استفاده از داده‌های محلی پیش از ورود پله بعدی از بانک خازنی است که نهایتاً واریسی قید تلفات امکان‌پذیر گردد. در روند ارزیابی این روش، این سؤال می‌تواند مطرح شود که به جای منبع ولتاژ ثابت، از مدار معادل تونن برای شبکه متصل در انتهای هر یک از خطوط استفاده شود. برای محاسبه مدار معادل تونن انتهای هر خط، مراحل زیر انجام می‌گیرد:

- قرائت دامنه ولتاژ در باس ۶۳ کیلوولت و در نظرگیری زاویه صفر برای آن ( $V_{63}$ )
- محاسبه ولتاژ انتهای هر خط با استفاده از دامنه ولتاژ قرائت شده
- محاسبه امپدانس معادل تونن انتهای خط ( $Z_{th-i}$ ) با استفاده از اطلاعات نسبت  $R/X$  و سطح اتصال کوتاه انتهای خط
- محاسبه منبع ولتاژ معادل تونن ( $E_{th-i}$ ) با استفاده از رابطه (۵):

$$E_{th-i} = Z_{th-i} I_i + V_i \quad (5)$$

در حالی که  $V_i$  از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. همچنین ( $I_i$ ) مطابق رابطه (۶) به دست می‌آید.

### ۸-۳- تغییر ولتاژ شبکه خارجی

همان‌طور که ذکر شد، در شبکه مورد مطالعه ۱ و شبکه مورد مطالعه ۲، شبکه‌های خارجی به صورت منابع ولتاژ با بهره‌گیری از مقادیر واقعی ولتاژ در آن بخش از شبکه برق تهران، مدل شده‌اند و در هر مرحله از شبیه‌سازی (جدول ۳، جدول ۴ و جدول ۵) برای سناریوهای باری هر جدول، ولتاژهای متفاوتی اعم از ۰/۹۸ با زاویه ۳۰ درجه، ۰/۹۹ با زاویه ۱۰ درجه، ۱ با زاویه صفر درجه برای شبکه‌های خارجی قرار داده شده‌است، با این حال نتایج صحیحی منطبق بر روش پخش بار در کل شبکه حاصل شده‌است [۱۵].

### ۸-۴- بررسی خروج خازن‌ها در شبکه مورد مطالعه ۲

برای آنکه صحت رویکرد مقاله برای خروج خازن مطابق روند فلوجارت شکل ۵ بررسی گردد، چندین شرایط باری مختلف در پست‌های شبکه مورد مطالعه ۲ تحت شرایطی که توان مصرفی بار در پست شهرک صنعتی اشتهارد رو به کاهش است و خروج خازن جهت کاهش تلفات، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای مثال، جدول ۶ شرایطی را نشان می‌دهد که بار کلیه پست‌ها و هم‌چنین بار شهرک صنعتی اشتهارد بر روی ضریب ۰/۲ قرار دارد و ترکیب خازنی در پست شهرک صنعتی اشتهارد در حالت ۲۱ قرار دارد. در این حالت با هدف کمینه‌سازی سراسری تلفات، ترکیب خازنی ۱۱، به‌عنوان ترکیب بهینه در شهرک صنعتی اشتهارد به دست می‌آید. بدین معنا که خروج یک پله بانک خازنی ضروری است. در صورت استفاده از روندنمای شکل ۵، پس از محاسبه رابطه مربوط به لزوم خروج، در مرحله وارسی قید تلفات، خروج یک پله بانک خازنی (از شرایط ۲۱) کاهش تلفات را نشان می‌دهد و خروج یک پله دیگر خازن موجب افزایش تلفات می‌شود (همان‌گونه که در جدول ۶ ارائه شده است). لذا ترکیب بهینه ۱۱ حاصل می‌شود.

### جدول ۶: روند تغییر تلفات با خروج خازن در شهرک صنعتی اشتهارد

ترکیب خازنی در شهرک صنعتی اشتهارد	۱۰	۱۱	۲۱
تلفات خط ۲ (kW)	۱۵/۵۲	۱۳/۴۲	۱۲/۹۴
تلفات خط ۳ (kW)	۱۵/۵۲	۱۳/۴۲	۱۲/۹۴
تلفات خط ۵ (kW)	۱۴/۲۶	۱۵/۶۳	۱۷/۶۶
تلفات کل خطوط متصل (kW)	۴۵/۳۱	۴۲/۴۸	۴۲/۵۳

تحت شرایطی که بار همه پست‌ها در شبکه مورد مطالعه ۲ بر روی ضریب ۰/۶ قرار گرفته و در شهرک صنعتی اشتهارد بار درحال کاهش از ضریب بار ۰/۸ به ضریب بار ۰/۳۷ و سپس ۰/۱۸ باشد، روند به دست آوردن تعداد پله خازنی که لازم است خارج شود، در جدول ۷ و ۸ نشان داده شده است. ترکیب بهینه سراسری در این شرایط برابر با ۵ پله خازنی در ضریب بار ۰/۳۷ و ۲ پله خازنی در ضریب بار ۰/۱۸ برای شهرک صنعتی اشتهارد است که روند تصمیم‌گیری پیشنهادی در این مقاله مطابق جدول‌های ۸ و ۹ نیز همین نتیجه را دربردارد.

$$I_i = Z_i \left(1 + \frac{Z_i Y_i}{4}\right) V + (1 + Z_i Y_i) \left(\frac{P_i - jQ_i}{V^*}\right) \quad (6)$$

پس از اعمال قید تلفات با استفاده از مدار معادل تونن در برخی موارد نتایج صحیحی حاصل نمی‌شود به این معنا که کاهش و یا افزایش تلفات به‌درستی تعیین نمی‌گردد. به‌عنوان نمونه، همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده شد ورود دو پله خازنی در پست مردآباد حالت بهینه است، درحالی‌که در صورت استفاده از مدار معادل تونن و وارسی قید تلفات، اجازه ورود پله سوم نیز داده می‌شود که صحیح نیست [۱۵]. این در حالی است که استفاده از منبع ولتاژ ثابت در انتهای خطوط پاسخ‌های دقیق‌تری دارد و لزومی به در دسترس بودن سطح اتصال کوتاه و نسبت R/X شبکه نیز نیست.

### ۸-۲- مقادیر باری نزدیک به ظرفیت نامی پله بانک خازنی

در مرحله بعد، مطابق جدول ۵ ضریب بار مربوط به توان راکتیو مصرفی هر ترانسفورماتور به‌صورتی در نظر گرفته شده است که توان راکتیو سمت ثانویه هر ترانسفورماتور کمی کمتر از ۲/۴ MVar به دست آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شرایط در صورت بهره‌گیری از روش تعیین آستانه برای ورود خازن، هیچ خازنی در شبکه وارد نمی‌شود. در واقع در این شرایط، دلیل وقوع تلفات بالا در شرایط میانباری پست‌های فوق توزیع به‌وضوح مشخص می‌شود.

### جدول ۵: ترکیب خازنی بهینه با در نظرگیری توان راکتیو کمی کمتر از ۲/۴ MVar در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور

پست	صفادشت	مردآباد	مهر شهر	ماه‌دشت	شهرک صنعتی اشتهارد
شماره ترانسفورماتور	۵	۴	۳	۱۱	۱۰
توان راکتیو	۱/۸	۲	۲/۱	۲/۱	۲/۱
ترکیب خازنی پیشنهادی و ترکیب بهینه	۱۱۱	۱۱	۱۱	۰۱	۱۱
ترکیب خازنی روش موجود	...	...	...	...	...

بنابراین مطابق ترکیب خازنی جدول ۵ در صورت استفاده از الگوریتم پیشنهادی که نتیجه آن منطبق بر روش بهینه از پخش بار است، تلفات برابر با ۳۸۷/۹۱ kW خواهد بود و در صورت بهره‌گیری از روش موجود در صنعت برق، تلفات برابر با ۴۲۶/۱ kW به دست خواهد آمد. در این شرایط، استفاده از روش موجود دارای ۹/۸۵٪ خطا نسبت به تلفات کمینه است.

- [2] F. C. Lu and Y. Y. Hsu, "Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming," *IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 6, pp. 639–645, 1995.
- [3] R.-H. Liang and C.-K. Cheng, "Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 4, pp. 625–630, 2001.
- [4] Y. Liu, P. Zhang, and X. Qiu, "Optimal reactive power and voltage control for radial distribution system," *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 85–90, 2000.
- [5] Z. Hu, X. Wang, H. Chen, and G. A. Taylor, "Volt/Var control in distribution systems using a time-interval based approach," *IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 5, pp. 548–554, 2003.

[۶] محمودرضا شاکرمی، مسعود طرهانی "مکان‌یابی و تعیین ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده و خازن‌ها به‌طور هم‌زمان در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن مدل بار چندسطحی و وابسته به ولتاژ"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۲، شماره ۱، صفحات ۱۲۳-۱۳۹، ۱۳۹۶.

[۷] رحمت‌الله هوشمند، حسین محکمی و امین خدابخشیان "روشی جدید در جایابی بهینه خازن‌ها و ژنراتورهای توزیع شده در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتری جهت داده شده با PSO"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۳۹، شماره ۲، صفحات ۶۱-۷۲، ۱۳۸۸.

- [8] A. Ulinuha, M. A. S. Masoum, and S. Islam, "Hybrid genetic-fuzzy algorithm for volt/var/total harmonic distortion control of distribution systems with high penetration of non-linear loads," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 4, pp. 425–439, April 2011.
- [9] Y. Zhang and Z. Ren, "Real-time optimal reactive power dispatch using multi-agent technique," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 69, no. 2, pp. 259–265, May 2004.
- [10] S. Auchariyamet and S. Sirisumrannukul, "Optimal dispatch of ULTC and capacitors for volt/Var control in distribution system with harmonic consideration by particle swarm approach," *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp. 1–7, 2009.
- [11] A. Ulinuha, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam, "Optimal Dispatch of LTC and Shunt Capacitors in the Presence of Harmonics using Genetic Algorithms," *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 733–740, 2006.
- [12] S. Rahimi, K. Zhu, S. Massucco, and F. Silvestro, "Stochastic Volt-Var optimization function for planning of MV distribution networks," *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2015.
- [13] S. Rahimi, S. Massucco, and F. Silvestro, "Coordinated closed-loop voltage control by using a real-time Volt/VAR Optimization function for MV distribution Networks," *IEEE 15<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 1222–1228, 2015.
- [14] M. A. Brown and S. Zhou, *Electrical Transmission Systems and Smart Grids*, Springer Science & Business Media, 2013.

[۱۵] پروا سوری، "برنامه‌ریزی کلیدزنی خازن‌ها در پست‌های فوق توزیع در حضور هارمونیکها" *دانشگاه علم و صنعت ایران*، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۷.

### جدول ۷: روند تغییر تلفات با خروج خازن (۰/۸ به ۰/۳۷)

ضریب بار ۰/۸ ترکیب خازنی ۳۳		ضریب بار ۰/۳۷ ترکیب خازنی ۳۲		✓	خروج ۵ به ۶
Q <sub>receiving</sub>	N-bank	تلفات پله ۶	تلفات پله ۵		
۰	۲	۱۶۶/۲۶	۱۶۲/۵		
ضریب بار ۰/۳۷ ترکیب خازنی ۳۳		ضریب بار ۰/۸ ترکیب خازنی ۳۲		×	خروج ۴ به ۵
Q <sub>receiving</sub>	N-bank	تلفات پله ۵	تلفات پله ۴		
۱/۲۲ MVar	۲	۱۶۳/۰۶	۱۶۳/۴۴		

### جدول ۸: روند تغییر تلفات با خروج خازن (۰/۳۷ به ۰/۱۸)

ضریب بار ۰/۳۷ ترکیب خازنی ۳۳		ضریب بار ۰/۲ ترکیب خازنی ۱۱		✓	خروج ۴ به ۵
Q <sub>receiving</sub>	N-bank	تلفات پله ۵	تلفات با فرض پله ۴		
۰	۳	۲۰۹/۶۵	۱۹۹/۵۵		
ضریب بار ۰/۳۷ ترکیب خازنی ۳۳		ضریب بار ۰/۲ ترکیب خازنی ۱۱		✓	خروج ۳ به ۴
Q <sub>receiving</sub>	N-bank	تلفات پله ۴	تلفات با فرض پله ۳		
۰	۲	۶۳/۷۳	۶۳/۷۳		
ضریب بار ۰/۳۷ ترکیب خازنی ۳۳		ضریب بار ۰/۲ ترکیب خازنی ۱۱		✓	خروج ۲ به ۳
Q <sub>receiving</sub>	N-bank	تلفات پله ۳	تلفات با فرض پله ۲		
۰/۲۸ MVar	۱	۵۸/۳	۵۷/۷۸		
ضریب بار ۰/۳۷ ترکیب خازنی ۳۳		ضریب بار ۰/۲ ترکیب خازنی ۱۱		×	خروج ۱ به ۲
Q <sub>receiving</sub>	N-bank	تلفات پله ۲	تلفات با فرض پله ۱		
۲/۲۵ MVar	۱	۵۵/۶	۵۹/۳		

## ۹- نتیجه‌گیری

مطابق رویکرد نوین این مقاله، جهت بهره‌برداری از بانک‌های خازنی تحت شرایطی که زیرساخت‌های مخابراتی و سیستم‌های متمرکز پردازش‌گر برای پردازش اطلاعات جمع‌آوری شده از کل شبکه وجود نداشته باشد، نیز می‌توان به کمک آثاری که وضعیت عرضه و تقاضای توان راکتیو در پست‌های مجاور بر مقادیر توان راکتیو عبوری از خطوط متصل به پست می‌گذارد، خازن بهینه مورد نیاز را جهت کمینه‌سازی تلفات سراسری به دست آورد. در واقع روند مورد استفاده در پست‌های فوق توزیع که در صورت رسیدن عدد توان راکتیو بار به مقدار آستانه ظرفیت نامی پله بانک خازنی اقدام به ورود خازن می‌شود، منجر به تلفات کمینه در شبکه نمی‌گردد و لازم است در مقادیر کمتری از توان راکتیو مصرفی بار، خازن وارد مدار شود. استفاده از روش این مقاله، در مواردی موجب کاهش حدوداً ۱۰ درصدی تلفات نسبت به نتایج روش موجود می‌گردد که نشان از مؤثر بودن و کارایی روش پیشنهادی است. همچنین مطابق بررسی‌های صورت گرفته، ترتیب کلیدزنی، در پست‌های مختلف و تغییر ولتاژ شبکه‌های خارجی تأثیری بر صحت نتایج روش پیشنهادی ندارد.

## مراجع

- [1] R. Natarajan, *Power system capacitors*, CRC Press, Taylor & Francis Group, vol. 22, no. 4, 2006.

## زیر نویس ها

---

- <sup>4</sup> Distribution Management System (DMS)
- <sup>5</sup> Meter Data Management System (MDMS)

- <sup>1</sup> Volt/Var Optimization (VVO)
- <sup>2</sup> Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
- <sup>3</sup> Integrated Volt/Var control (IVVC)