

جایابی بهینه خازن های ثابت و قابل کلیدزنی در شبکه های الکتریکی با بار متغیر: مطالعه موردی، شبکه فوق توزیع مازندران

سید محسن قاضی طباطبائی^۱ سعید غلامی^۱ محمودرضا حقی فام^۱ عایشه قره طوقه^۲ تقی بارفروشی^۲

۱- دانشگاه تربیت مدرس - بخش مهندسی برق
۲- شرکت برق منطقه ای مازندران - معاونت برنامه ریزی

واژه های کلیدی: خازن گذاری، الگوریتم ژنتیک

چکیده:

جایابی بهینه خازن در شبکه های انرژی الکتریکی، به منظور کاهش تلفات انرژی، کاهش تلفات در پیک مصرف، آزاد سازی ظرفیت تجهیزات نصب شده و بهبود پروفیل ولتاژ یکی از مسائل مهم و قدیمی در بهره برداری مؤثر از شبکه های انرژی الکتریکی می باشد. در این مقاله الگوریتم جدیدی برای جایابی همزمان خازن های ثابت و قابل کلیدزنی ارائه شده و برای جایابی در یک شبکه واقعی استفاده شده است.

در این الگوریتم با دریافت اطلاعات الکتریکی شبکه، اطلاعات اقتصادی و اطلاعات بار به صورت تعداد سطوح اختیاری دریافت و با کدینگ جدید تعریف شده برای الگوریتم ژنتیک مقدار و محل بهینه خازن ها تعیین می گردد. با استفاده از روش فوق در شبکه فوق توزیع برق منطقه ای مازندران مطالعات خازن گذاری انجام شده که نتایج ارائه شده نشانگر مؤثر بودن روش پیشنهادی می باشد

۱- مقدمه:

مطالعات نشان می دهد که حدود ۱۳٪ از توان تولید شده در سیستم قدرت بصورت تلفات اهمی در بخش توزیع تلف می گردد [۱]. جریان های راکتیو درصدی از این تلفات را به خود اختصاص می دهند و با افزایش جریان راکتیو بارها، تلفات سیستم نیز افزایش می یابد. نصب مناسب خازن ها با جبران راکتیو مصرفی، علاوه بر کاهش تلفات انرژی و تلفات پیک مصرف، می تواند باعث آزاد سازی ظرفیت تجهیزات نصب شده در سیستم و نیز بهبود پروفیل ولتاژ گردد. روش های جایابی خازن به چهار گروه اصلی: تحلیلی، برنامه ریزی، عددی، ابتکاری و هوش مصنوعی دسته بندی می شوند [۲]، پرکاربردترین این روش ها، روش تحلیلی است، این روش فرض می کند که فیدر فاقد شاخه های فرعی است. سطح مقطع آن در تمام بخش ها یکسان است و همچنین بار بصورت یکنواخت

$$P_{\text{loss } i} = R_i \cdot I_i^2$$

در نتیجه برای تلفات کل شبکه در یک سال داریم:

$$P_{\text{loss-total}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{loss } i}$$

با توجه به قیمت هر کیلووات ساعت انرژی هزینه تلفات ایجاد شده برابر است با:

$$\text{COST}_{\text{loss}} = C_e \cdot P_{\text{loss-total}}$$

C_e : قیمت کیلووات ساعت انرژی

با توجه به روابط اقتصاد مهندسی هر یک از مقادیر به سال مبنا منتقل می‌گردد و کل محاسبات در سال مبنا انجام می‌شوند.

۲-۲- هزینه خازن‌گذاری:

برای اینکه هزینه خازن‌ها دارای انعطاف زیادی باشد روند کاملی برای هزینه خازن‌ها در نظر گرفته شده است بدین صورت که هزینه خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی بطور مستقل از هم بوده و هر کدام دارای دو جزء می‌باشد که یک قسمت از هزینه‌ها برای هر بانک نصب شده بصورت ثابت و قسمت دیگر بصورت ضریبی از مقدار خازن نصب شده می‌باشد:

C_{ff} : هزینه ثابت خازن‌های ثابت (واحد پول) برای هر kvar

C_{vf} : هزینه هر kvar خازن ثابت (واحد پول)

C_{fi} : مقدار خازن نصب شده در پست i (kvar)

C_{fs} : هزینه ثابت خازن قابل کلیدزنی (واحد پول)

C_{vs} : هزینه هر kvar خازن قابل کلیدزنی (واحد پول)

C_{si} : مقدار خازن قابل کلیدزنی نصب شده در باس

I_m (واحد پول)

با توجه به تعاریف فوق هزینه خازن نصب شده در پست i برابر است با:

و پیوسته در طول فیدر توزیع شده است [۳]. روش‌های تحلیلی، به اطلاعات کمی از سیستم توزیع نیاز دارند و بکارگیری آنها در عمل بسیار آسان است. از این رو، با وجود فرضیات غیر واقعی موجود در آنها هنوز تعدادی از شرکت‌های برق منطقه‌ای، اساس برنامه‌های جایابی خازن خود را بر این قانون بنا نهاده‌اند [۴]، و یا پاره‌ای از کارخانجات سازنده خازن، این قانون را در راهنمای کار محصولات خود، توصیه می‌کنند [۵]. معروفترین نتیجه روش فوق قانون (۲/۳) است. بر اساس این قانون برای کسب بیشترین کاهش در تلفات، باید خازنی با قدرت (۲/۳) توان راکتیو کشیده شده از ابتدای فیدر، در محلی به فاصله (۲/۳) طول فیدر نسبت به ابتدای فیدر نصب گردد. فرضیات ساده کننده در روش فوق، به طور حتم باعث ایجاد خطا در کسب بهترین نتیجه می‌گردند. مرجع [۶] نشان می‌دهد که چگونه اعمال قانون (۲/۳) می‌تواند حتی باعث افزایش تلفات گردد.

در این تحقیق از روشی جدید استفاده شده است که با جایابی همزمان خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی و با استفاده از سطوح مختلف بار و با استفاده از پله‌های خازنی مورد نظر مقدار و محل بهینه خازن‌ها و نقاط کاندید مشخص می‌گردد.

۲- تابع هزینه:

توابع هزینه مختلفی وجود دارند که در خازن‌گذاری از آنها استفاده می‌شود در روش ارائه شده تابع هزینه شامل بخشهای زیر می‌باشد:

۲-۱- تلفات:

در این قسمت مقدار تلفات در کل فیدر از جمع تلفات در تک تک سکشن‌ها بدست می‌آید که در هر سکشن مقدار تلفات برای هر سال برابر است با:

$$COST_{total} = COST_{loss} + COST_{capacitor} + COST_{up}$$

$$COST_{total} = \sum_{i=1}^n R_i * I_i^2 + \sum_{i=1}^n C_{fi} + \sum_{i=1}^n C_{vf} * C_{fi} + \sum_{i=1}^n C_{fs} + \sum_{i=1}^n C_{vs} * C_{si} + (p_{loss1} - p_{loss2}) * C_{up}$$

۳- قیود موجود:

۳-۱- قید ولتاژ:

قید موجود در این الگوریتم مقدار ماکزیمم ولتاژ می‌باشد که برای تمام کروموزم‌ها لحاظ می‌شود و چنانچه به ازای خازن‌گذاری، ولتاژ از مقدار مشخص که توسط کاربر تعیین می‌شود بیشتر گردد، جهت جلوگیری از مشکلات ناشی از اضافه ولتاژ در شبکه، مقادیر خازن‌های قابل کلیدزنی با تعویض پله‌ها و خازن‌های ثابت با خروج از شبکه تغییر می‌یابد.

۳-۲- قید مقدار خازن:

مقدار ماکزیمم خازن نصب شده در یک فیدر به عنوان یک پارامتر محدود کننده در ابتدا دریافت می‌گردد و در اجرای الگوریتم برای هر کروموزم چک می‌شود تا مقدار کلی خازن‌ها از ماکزیمم در نظر گرفته شده بیشتر نگردد.

۴- ساختار الگوریتم ژنتیک:

با توجه به ماهیت الگوریتم ژنتیک که یک روش مناسب برای بدست آوردن نقطه بهینه توابع پیچیده و چند متغیره می‌باشد این روش می‌تواند از نقاط مختلف فضای جستجو شروع شده و با روندی که اساس روشهای الگوریتم ژنتیک بر آن استوار است به نقطه بهینه نزدیک شود، با توجه به اینکه الگوریتم از نقاطی متعدد شروع می‌شود و این نقاط نیز در هر بار اجرا شدن یکسان نمی‌باشند بنابراین اگر الگوریتم به جواب نهائی نرسیده باشد در دفعات مختلف اجرا شدن مشخص می‌گردد بنابراین وقتی که روند مشخص برای سیر تکاملی الگوریتم ژنتیک صحیح باشد الگوریتم

$$COST_{CAPACITOR} = C_{fi} + C_{vf} * C_{fi} + C_{fs} + C_{vs} * C_{si}$$

لازم به ذکر است که هر کدام از اجزاء فوق فقط در صورت وجود در یک باس لحاظ می‌گردند. بنابراین هزینه کل خازن‌گذاری در شبکه برابر است با:

$$COST_{CAPACITOR-total} = \sum_{i=1}^n COST_{CAPACITOR} i$$

n: تعداد باس‌های می‌باشد که در آن‌ها خازن وجود دارد.

دو قسمت ارائه شده در قبل بصورت اجباری می‌باشند و باید تابع هزینه شامل دو مقدار فوق باشد ولی قسمت سری نیز برای تابع هدف در نظر گرفته می‌شود که بصورت اختیاری می‌باشد.

۳-۲- ظرفیت آزاد شده تجهیزات:

این قسمت برای مدل‌کردن کاهش هزینه‌های ناشی از خازن‌گذاری در شبکه توزیع و کاهش تلفات می‌باشد که منجر به آزادسازی ظرفیت شبکه‌های بالادستی می‌گردد. با توجه به پیچیدگی، این قسمت اختیاری در نظر گرفته می‌شود. تابع هزینه ظرفیت آزاد شده تجهیزات بصورت حاصل ضرب یک هزینه ثابت در ظرفیت آزاد شده شبکه می‌باشد.

$$COST_{up} = (P_{loss1} - P_{loss2}) * C_{up}$$

C_{up}: هزینه احداث برای هر کیلووات شبکه‌های بالادستی

P_{loss1}: مقدار تلفات قبل از خازن‌گذاری

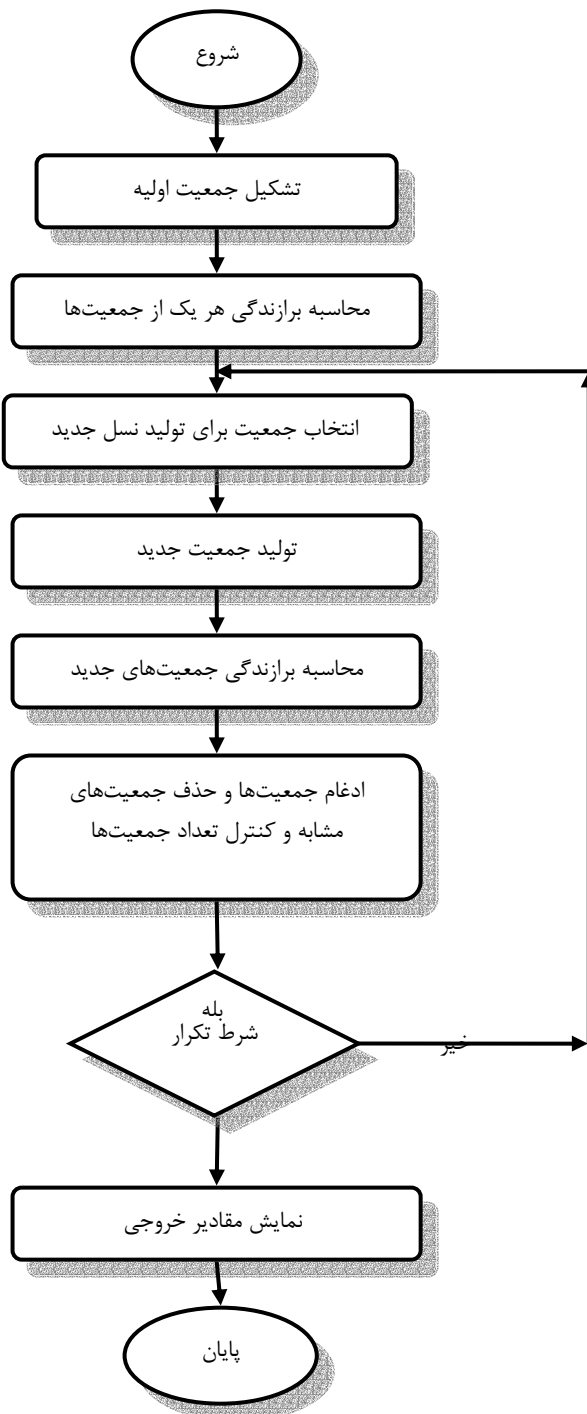
P_{loss2}: مقدار تلفات بعد از خازن‌گذاری

رابطه فوق برای هر سال با توجه به تلفات کاهش یافته، محاسبه شده و به سال اول که سال مبنا در نظر گرفته شده منتقل می‌گردد.

در نهایت تابع هزینه کل بصورت زیر می‌باشد:

حد مشخص کمتر گردد روند تکرار الگوریتم متوقف شود.

پس از متوقف شدن الگوریتم مقادیر نهائی بدست آمده نمایش داده می‌شود. فلوجارت الگوریتم ارائه شده در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱) فلوجارت الگوریتم ژنتیک

می‌تواند به نقطه بهینه مطلق برسد و گرنه در نقاط محلی گیر کرده و نمی‌تواند به حرکت خود ادامه دهد. ساختارهای متفاوتی برای الگوریتم ژنتیک وجود دارد که بنا به شرایط مسئله و نوع کدینگ و انتخاب و تولید تعریف می‌گردند، یکی از مسائل مهم در الگوریتم ژنتیک هارمونی صحیح بین قسمت‌های مختلف الگوریتم می‌باشد که اگر باهم مطابقت نداشته باشند پاسخ خوبی بدست نمی‌آید در ذیل روند تکاملی الگوریتم ژنتیک در این مقاله ارائه شده است که از ترکیب روشهای قبلی موجود با یکسری نوآوریها بدست آمده است.

در این روند ابتدا یکسری جمعیت اولیه تولید می‌گردد که نحوه تولید و تعداد آنها قابل انتخاب و کنترل می‌باشد پس از تولید جمعیت اولیه مقدار برازندگی هر یک از جمعیت‌ها محاسبه می‌گردد، سپس جمعیت‌های مورد نظر برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند تا با استفاده از آنها نسل جدید جمعیت تولید گردد، برای انتخاب جمعیت‌ها از روشهای جدید و متنوعی استفاده شده که توضیح داده خواهد شد، پس از انتخاب جمعیت‌ها عمل تولید جمعیت جدید که با استفاده از جهش و جابجائی‌های خاص تعریف شده می‌باشند نسل جدید تولید می‌گردد سپس مقدار برازندگی هر یک از جمعیت‌های نسل جدید محاسبه می‌شوند و جمعیت نسل قدیم با نسل جدید ادغام می‌گردد و روندی اجرا می‌شود تا جمعیت‌های مشابه حذف گردند بگونه‌ای که از هر جمعیت فقط یک نمونه در مجموعه باقی بماند برای اینکه تعداد جمعیت کنترل شود یک روند تعداد کل جمعیت را کنترل می‌نماید و چنانچه جمعیت از تعداد مشخص شده بیشتر شود از جمعیت‌های دارای کمترین برازندگی شروع به حذف می‌نماید تا تعداد کل جمعیت در محدوده مشخص شده باقی بماند.

با انجام مراحل فوق در واقع یک مرحله از الگوریتم کامل شده است بنابراین برای رسیدن به پاسخ به تعداد دفعات مشخص شده روند فوق تکرار می‌گردد. یکی دیگر از روشهای کنترل تکرار با استفاده از مقایسه پاسخهای بدست آمده در چند مرحله می‌باشد تا اگر از

۵- مطالعه شبکه فوق توزیع استان مازندران:

شبکه مازندران مشتمل بر سه قسمت می‌باشد: ۱- منطقه گلستان ۲- مرکز مازندران ۳- غرب مازندران می‌باشد که دارای ۱ پست ۴۰۰kV، ۱۳ پست ۲۳۰kV و ۷۰ پست ۶۳kV می‌باشد که پست‌های ۲۳۰ و ۴۰۰ به صورت حلقه بوده ولی پست‌های فوق توزیع بصورت شعاعی بهره‌برداری می‌شود بنا به ساختار شبکه که به صورت طولی می‌باشد و نوع‌هادی‌ها و مقدار زیاد بار در این منطقه افت ولتاژ زیادی مشاهده می‌شود که بعنوان نمونه می‌توان به پست‌های نمک‌آبرود، رستم‌کلا، بندرگز، زیراب، کارمزد و چالوس اشاره نمود که ولتاژ آنها تا مقدار $0.8^{P.U}$ نیز کاهش می‌یافت. با توجه به مشکلات شبکه، مطالعاتی برای بهبود پروفیل ولتاژ انجام گرفته که با توجه به نیاز ضروری منطقه در پیک بار سال ۸۲ و زمانبری احداث پروژه‌های در دست ساخت، مطالعات خازن‌گذاری با همکاری دانشگاه تربیت مدرس و برق منطقه‌ای مازندران برای جایابی بهینه خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی جهت بهبود پروفیل ولتاژ انجام گرفت. این مطالعه با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیر انجام شده است:

- مقدار خازن منصوبه در هر پست از مقدار مجاز آن بر حسب ظرفیت ترانس بیشتر نباشد.
 - در پست‌های سیار امکان نصب خازن وجود ندارد.
 - پله‌های خازنی با مقادیر [۱/۲، ۲/۴، ۳] مگاوار می‌باشد.
- با توجه به شرایط فوق و اطلاعات بار موجود، مطالعه خازن‌گذاری در یک دوره سه ساله (۸۴-۸۲) انجام گرفت، اطلاعات دریافتی و نحوه پردازش آنها و همچنین نتایج بدست آمده برای منطقه ارائه می‌گردد.

۵-۱- اطلاعات دریافت شده از شبکه:

- اطلاعات الکتریکی
 - مشتمل بر اطلاعات ساختار شبکه منطقه (دیاگرام تک خطی)
 - اطلاعات پخش بار مورد نیاز (R, X, Y)
- اطلاعات بار
 - اطلاعات بار موجود در منطقه بصورت پیک بار روزانه پست‌های فوق توزیع به مدت یکسال
 - اطلاعات مینیمم بار ۱۵ روزه پست‌های فوق توزیع به مدت یکسال
- اطلاعات رشد بار پست‌های فوق توزیع
- ضریب بار پست‌های فوق توزیع
- مکان‌های کاندید نصب خازن‌ها
- پله‌های خازن‌های مورد استفاده
- اطلاعات اقتصادی

۵-۲- پردازش اطلاعات:

با استفاده از اطلاعات بار منطقه که بسیار محدود بود اطلاعات پیک بار روزانه تبدیل به پیک متوسط ماهیانه گردید با این روش ۱۲ سطح بار در طول سال برای هر پست به وجود آمد و ضریب بار منطقه مقادیر متوسط بار ماهیانه هر پست استخراج گردید و از مقادیر بدست آمده با توجه به رشد بار منطقه در سال‌های آینده سطوح ۱۲ گانه بار در سال‌های آینده (در طول مدت مطالعه) بدست آمده با استفاده از مقادیر بدست آمده که شامل ۳۶ سطح بار در مدت ۳ سال بود خازن‌گذاری در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت و سپس در پیک بار ماهیانه و حداقل بار ماهیانه تست گردید تا نتایج خازن‌گذاری برای تمامی شرایط مورد بررسی قرار گرفته باشد.

۵-۳- نتایج مطالعات:

نتایج بهبود پروفیل ولتاژ قبل و بعد از خازن‌گذاری بر روی کلیه پست‌های فوق توزیع مازندران در بخش مرکز مازندران در نمودار شکل (a-۴)، غرب مازندران در نمودار شکل (b-۴) و گلستان در نمودار شکل (c-۴) مشخص شده است.

نتایج بدست آمده از مطالعات با استفاده از نرم افزار جدیدی که بر اساس الگوریتم ارائه شده تهیه گردیده و قابلیت انجام مطالعات خازن‌گذاری با خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی به صورت همزمان را دارا می‌باشد، خروجی این نرم‌افزار مشتمل بر مقدار خازن نصب شده برای هر نقطه کاندید در هر سطح بار، و همچنین مقادیر ولتاژ و جریان قبل و بعد از خازن‌گذاری می‌باشد که به عنوان نمونه در زیر برای دو پست ارائه می‌گردد:

۶- نتیجه گیری

نتایج خازن‌گذاری با برنامه پخش‌بازی که کل شبکه سراسری در آن مدل شده بود تست شد و صحت نتایج تصدیق گردید.

نتایج بدست آمده از نرم‌افزار در پست فوق توزیع نمک آبرود از پست ۲۳۰ کیلوولت حسن‌کیف منطقه غرب مازندران در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مقادیر خازن‌های نصب شده

نام پست	مقدار خازن انتخاب شده (MVAR)
نمک آبرود	$2 \times 2/4 + 3$
نشتارود	$4 \times 1/2$
چالوس	$2 \times 2/4$

چنانچه از نتایج حاصله ملاحظه می‌گردد، خازن‌گذاری در بسیاری از پست‌ها در حداکثر ممکن می‌باشد. به نظر می‌رسد که در سال‌های آتی در صورت عدم تغذیه شبکه، با افزایش بار شاهد فروپاشی ولتاژ در برخی از پست‌های غرب مازندران خواهیم بود. البته در صورت ورودی پست ۲۳۰ kv ناریوران و دانیال و اصلاح شبکه فوق توزیع، مشکل پرفیل ولتاژ و نیز ناپایداری آن مرتفع خواهد شد.

مقادیر خازن در ۴۸ سطح بار در شکل (a-۲) آمده است ولتاژ و جریان پست قبل و بعد از خازن‌گذاری در شکل (b-۲ و c-۲) نشان داده شده است.

۷- فهرست مراجع

- [1] Capacitor Subcommittee of the IEEE Transmission and Distribution Committee, Bibliography on power capacitors 1975– 1980," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 7, pp. 2331– 2334, July 1983.
- [2] Ng H. N., Salama M. M. A., and Chikhani A. Y., "Classification of Capacitor Allocation Techniques," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No.1, 2000.
- [3] IEEE VAR Management Working Group of the IEEE System Control Subcommittee, "Bibliography on reactive power and voltage control," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 361– 370, May 1997.
- [4] N. M. Neagle and D. R. Samson, "Loss reduction from capacitors on primary feeders," *AIEE Trans.*, vol. 75, pp. 950–

نتایج بدست آمده از خازن‌گذاری در پست فوق توزیع تنکابن از پست ۲۳۰ کیلوولت چابکسر منطقه غرب مازندران در جدول (۲) ارائه شده است، مقادیر خازن در ۴۸ سطح بار در شکل (a-۳) آمده است. ولتاژ و جریان پست قبل و بعد از خازن‌گذاری در شکل (b-۳ و c-۳) نشان داده شده است.

جدول (۲) مقادیر خازن‌های نصب شده

نام پست	مقدار خازن انتخاب شده (MVAR)
تنکابن	$2 \times 2/4 + 2 \times 1/2$
رامسر	$4 \times 1/2$
کتالم	.

230, May 1997.
 [8] K. N. Miu, H. D. Chiang, and G. Darling, "Capacitor placement, and control in large-scale distribution systems by a GA-based re-placement two-stage algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1160–1166, Aug. 1997.

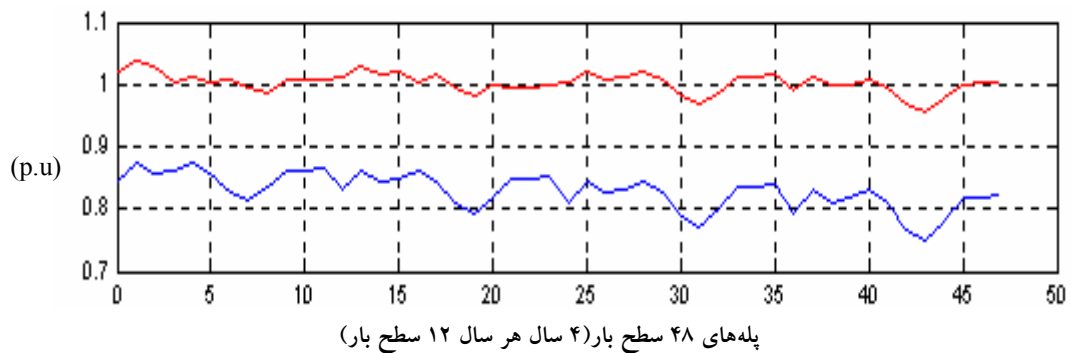
[۹] سید محسن قاضی طباطبایی، "جایابی بهینه خازن در حضور بارهای غیر قطعی"، پایان نامه کارشناسی ارشد

959, Oct. in-stalled 1956.
 [5] optimal capacitor placement in radial distribution networks," *IEEE Trans. Power system*, Vol. 16, No.4, November 2001.
 [6] A. Dwyer, "The use of shunt capacitors applied for line loss savings," in Proc. 1992 CEA Conference, Apr. 1992.
 [7] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 2, pp. 225–

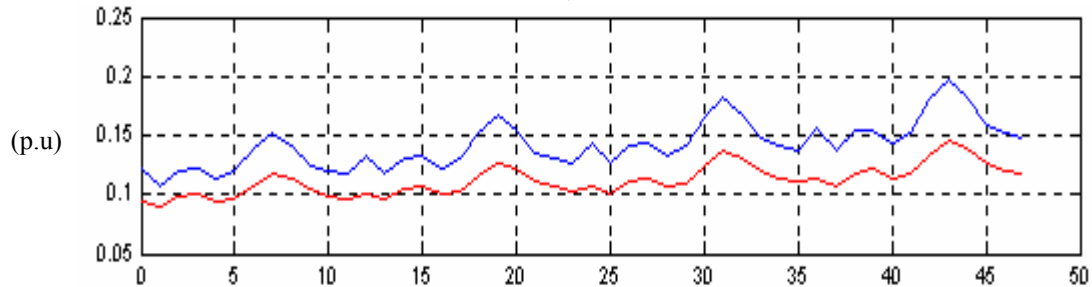
پله‌های خازن مورد نیاز پست نمک‌آبرود (a-۲)



ولتاژ پست نمک آبرود (b-۲)

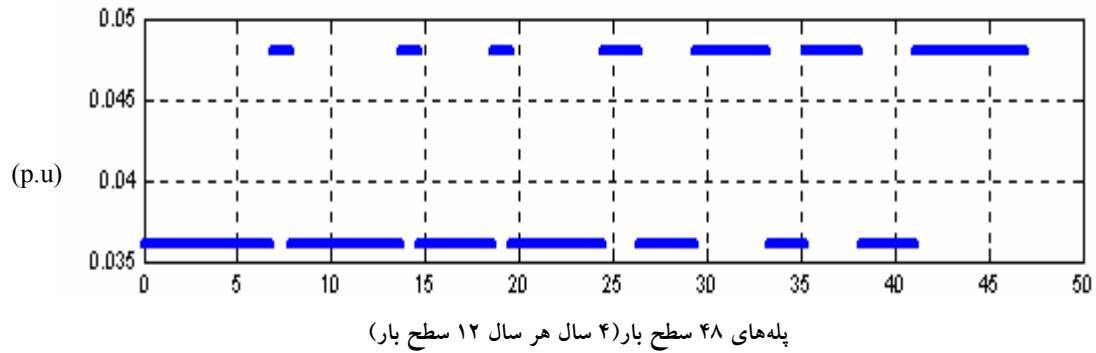


جریان پست نمک آبرود (c-۲)

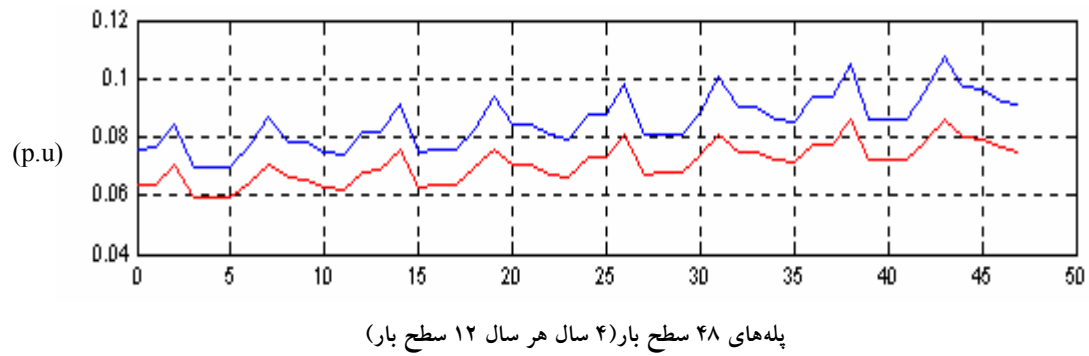


شکل (۲): مقادیر خازن در سطوح بار (a) ولتاژ در سطوح بار (b) جریان در سطوح بار (c)

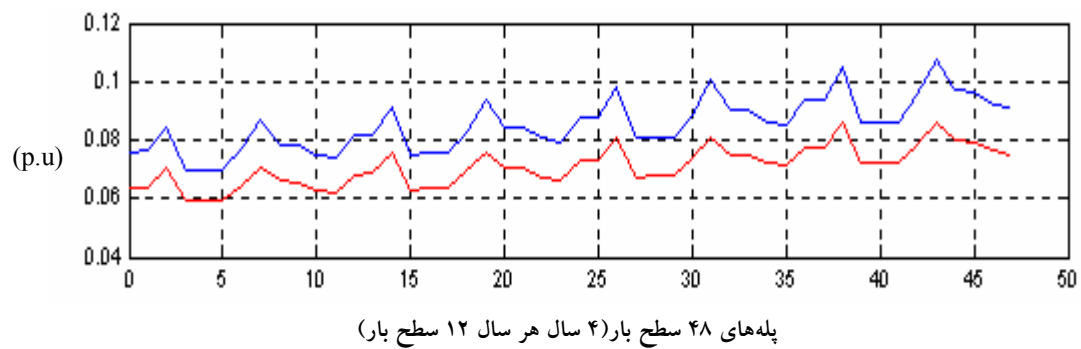
۳-ا) پله‌های خازن مورد نیاز پست تنکابن



۳-ب) ولتاژ پست تنکابن

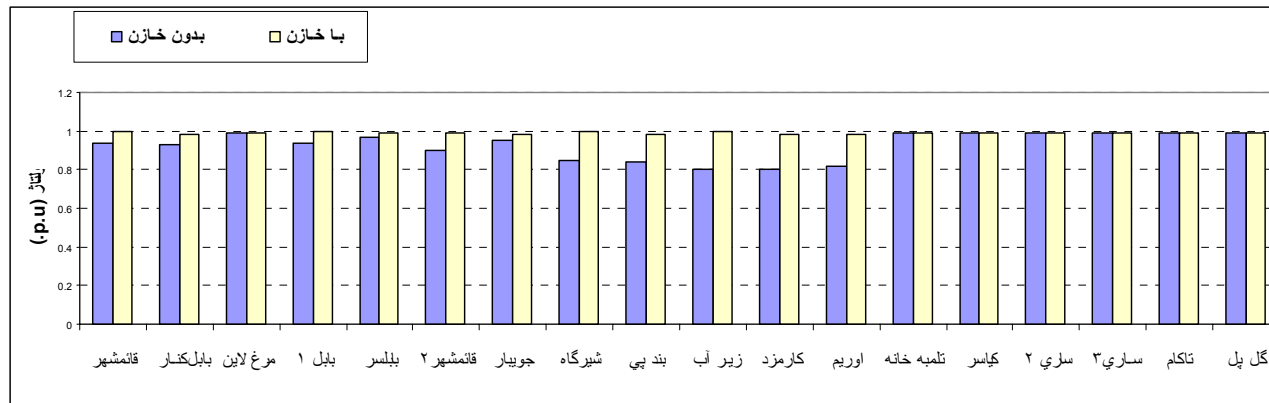


۳-ج) جریان پست تنکابن

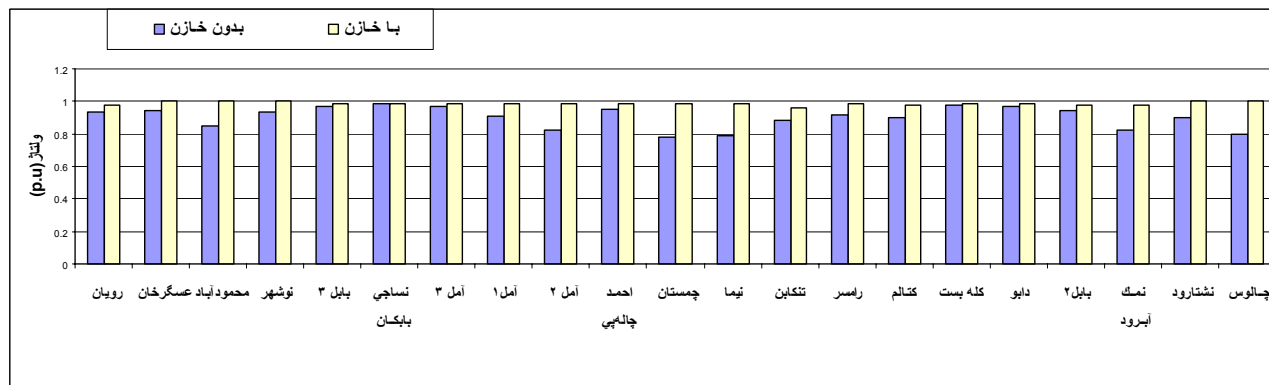


شکل (۳): مقادیر خازن در سطوح بار (a) ولتاژ در سطوح بار (b) جریان در سطوح بار (c)

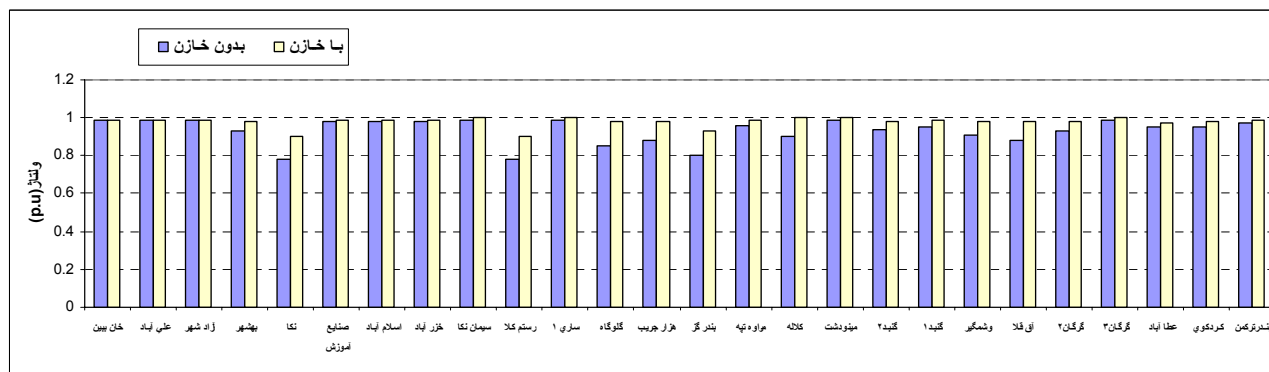
(a) مرکز مازندران



(b) غرب مازندران



(c) گلستان



شکل (۴): نمودار ستونی ولتاژهای قبل و بعد از خازن گذاری: (a) مرکز مازندران (b) غرب مازندران (c) گلستان