تاریخ : ۱۳۹۹/۱۲/۲۷
شماره : ۹۹/۳۱۳/٤٤٨١
پیوست : دارد

بسمه تعالی

«سال ۹۹ جهش تولید»
(مقام معظم رهبری)

کلیه شرکت های توزیع نیروی برق

موضوع: ابلاغ دستوالعمل خازن گذاری در شبکه های توزیع

باسلام و احترام؛

نظر به ابلاغ مأموریت ویـژه "تدوین دستورالعمل خازن‌گذاری در شبکه های توزیـع" و بـا توجه به اهمیت ایجاد وحدت رویه در تعیین استراتژی خـازن‌گـذاری در شـبکه‌هـای توزیـع، دستورالعمل پیوست جهت اجرا ابلاغ می گردد.

مقتضی است ترتیبی اتخاذ فرمایید تا از تاریخ ابلاغ ، کلیه مطالعـات مربـوط بـه تعیـین ظرفیت و مکان خازن‌های شبکه توزیع مبتنی بر مفاد این دستورالعمل صورت پذیرد و هرگونـه نقطه نظر و پیشنهاد اصلاحی را جهت بررسی به دفتر نظارت بـر توزیـع (مهندسـی و راهبـری شبکه) این معاونت ارسال فرمایند.

لازم به ذکر است نسخه الکترونیکی دستورالعمل در وب سایت شرکت توانیر بـه نشـانی http://www.tavanir.org.ir/dm/dmnezarat/ **قابل دسترسی است.**

غلامعلی رخشانی مهر
معاون هماهنگی توزیع

رونوشت:
- جناب آقای مهندس متولی‌زاده، رئیس محترم هیئت مدیره و مدیر عامل، جهت استحضار (به انضمام پیوست)
- کلیه دفاتر معاونت هماهنگی توزیع، جهت اطلاع و اقدام لازم (به انضمام پیوست)
- دفتر مهندسی و راهبری شبکه، جهت اطلاع و اقدام لازم (به انضمام پیوست)
- جناب آقای مهندس صادقیان، جهت اطلاع و قراردادن فایل دستورالعمل در وبسایت دفتر مهندسی و راهبری شبکه توزیع (به انضمام پیوست)
- اقدام کننده: بی آزار ۲۷۹۳۵۰۸۷

شرکت توانیر
معاونت هماهنگی توزیع
دفتر مهندسی و راهبری شبکه

دستورالعمل خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع برق

کد سند:

شرکت مدیریت تولید، انتقال و توزیع نیروی برق ایران(توانیر)

دستورالعمل خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع برق

دریافت کنندگان سند:

- ✓شرکت توانیر
- ✓شرکت مدیریت شبکه برق ایران
- ✓سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق
- ✓شرکت‌های برق منطقه‌ای
- ✓شرکت‌های توزیع نیروی برق

کد سند	تاریخ تهیه	تاریخ بازنگری	شماره آخرین بازنگری
TAV111-01/00	۱۳۹۹/۱۲/۲۶	۱۳۹۹/۱۲/۲۶	۰۰

تهیه کننده	تائید کننده	تصویب کننده
دفتر مهندسی و راهبری شبکه- معاونت مهندسی	مدیر کل دفتر مهندسی و راهبری شبکه – مسعود صادقی خمامی	معاونت هماهنگی توزیع غلامعلی رخشانی‌مهر
امضاء:	امضاء:	امضاء:

http://www.tavanir.org.ir/dm/dmnezarat/

فهرست مطالب

عنوان _____ **صفحه**

۱- مقدمه ۵
۲- اهداف و دامنه کاربرد ۵
۳- محدوده اجرا ۷
٤- مسئولیت نظارت و اجرا ۷
۵- تعاریف ۷
٦- اهداف خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع [۹] ۷
۷- طرح‌های مختلف خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع ۱۱
۷-۱- عوامل مؤثر بر انتخاب طرح‌های خازن‌گذاری ۱۱
۸- محاسبات خازنگذاری ۱۳
۸-۱- محاسبات خازن‌گذاری ثابت در طول شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف ۱۳
۸-۲- محاسبات خازنگذاری در شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف به روش زون‌بندی (تقریبی) ۱۹
۸-۳- محاسبات خازن‌گذاری متغیر در پست‌های توزیع [۲] ۲٤
۸-٤- محاسبات خازن‌گذاری متغیر در محل مصرف مشترکین ۲۸
۹- ساختار و مشخصات بانکهای خازنی ۳۰
۱۰- حفاظت خازن ۳۲
۱۰-۱- حفاظت خازنهای فشار متوسط ۳۲
۱۰-۲- حفاظت خازن‌های فشار ضعیف [۱] ۳۷
۱۰-۳- حفاظت اضافه ولتاژ خازن‌های فشار متوسط ٤۰
۱۱- الزامات نصب خازن در محیط‌های دارای هارمونیک ٤۰
۱۲- الزامات بهره‌برداری ٤۵
۱۲-۱- شرایط بهره‌برداری نرمال ٤۵
۱۲-۲- الزامات تعمیر و نگهداری ۵۰
۱۳- پیوست ها ۵٤
پیوست ۱- اثبات روش زون بندی ۵٤
پیوست ۲- صحت سنجی و آنالیز حساسیت روش زون بندی ۵٦
پیوست ۳- راهنمای مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع بر اساس نرم‌افزار DigSILENT ۵۹
- روش انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع ۵۹
- بررسی نتایج خروجی مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع: ٦۹

۱۴- فهرست منابع و مراجع ۷۴
۱۵- اعضاء کارگروه تهیه کننده دستورالعمل ۷۵

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱- بهبود پروفیل ولتاژ با نصب خازن ۸
شکل ۲- تغییرات پروفیل ولتاژ با افزایش ظرفیت خازن ۸
شکل ۳- تغییرات پروفیل ولتاژ با تغییر محل خازن ۹
شکل ٤- مقدار تلفات بر اساس تغییر ظرفیت خازن ۹
شکل ٥- تأثیر خازن‌گذاری بر ظرفیت شبکه ۱۰
شکل ٦- طرحهای مختلف خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع ۱۱
شکل ۷- مقایسه مزایا و معایب طرح‌های مختلف خازن‌گذاری در شبکه توزیع ۱۲
شکل ۸- روندنمای محاسبات خازن‌گذاری در شبکه ۱۷
شکل ۹- منحنی توان راکتیو سالانه فیدر نمونه ۱۸
شکل ۱۰- انتخاب ظرفیت خازن بر مبنای منحنی راکتیو سالانه فیدر ۱۹
شکل ۱۱- روندنمای خازن‌گذاری به روش زون‌بندی ۲۲
شکل ۱۲- شماتیک فیدر فشار ضعیف نمونه ۲۳
شکل ۱۳- منحنی توان راکتیو هفتگی فیدر نمونه ۲۳
شکل ۱٤- ناحیه بندی فیدر فشار ضعیف نمونه ۲٤
شکل ۱٥- جبران‌سازی توان راکتیو توسط خازن‌های ثابت و متغیر ۲٥
شکل ۱٦- انواع اتصال خازن ۳۰
شکل ۱۷ بانک خازنی با اتصال ستاره (Wye)- زمین شده/نشده ۳٤
شکل ۱۸- انواع فیوز خارجی ۳٥
شکل ۱۹- نمونه‌ای از منحنی انفجار بانک خازنی ۳۷

۱- مقدمه

رشد روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی منجر به افزایش درصد بارگذاری تجهیزات شبکه برق و درنتیجه بروز مشکلاتی مانند افزایش تلفات و کاهش ولتاژ انتهای شبکه شده است؛ ازآنجایی‌که بیشتر بارهای سیستم قدرت و تجهیزات انتقال و توزیع برق (مانند خطوط و ترانسفورماتورها) مصرف‌کننده توان راکتیو هستند، یکی از راهکارهای مؤثر و سریع بهبود شاخص‌های شبکه و رفع مشکلات ذکرشده، جبران‌سازی توان راکتیو با استفاده از خازن است. با توجه به اهمیت کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ به‌ویژه در ساعات پیک بار شبکه، **تعیین محل نصب** و **ظرفیت بهینه خازن** در شبکه‌های توزیع از چالش‌های مهم شرکت‌های توزیع محسوب می‌شود. معمولاً، مطالعات خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل شبکه صورت می‌گیرد؛ که خروجی مطلوب، به صحت و دقت اطلاعات ورودی نرم‌افزار نظیر دینامیک بار و GIS شبکه توزیع بستگی دارد. خازن‌گذاری بهینه در شبکه‌های توزیع باید با در نظر گرفتن قیود فنی شبکه، هزینه نصب خازن و ارزش تلفات انجام گیرد.

در این دستورالعمل ابتدا هدف از خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع شرح داده می‌شود. در بخش بعدی، حالات مختلف خازن‌گذاری معرفی شده، سپس نحوه محاسبات خازن‌گذاری به‌منظور تعیین ظرفیت، تعداد و محل نصب خازن ارائه می‌شود. درنهایت الزامات فنی خازن، حفاظت خازن، الزامات نصب خازن در محیط‌های هارمونیکی، الزامات تعمیر و نگهداری و... مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به امکان در دسترس نبودن اطلاعات ورودی موردنیاز به طور کامل و عدم پوشش مناسب این مهم در دستورالعمل‌های موجود، ارائه راهکاری برای تخمین این اطلاعات ضروری است. همچنین در صورت عدم امکان استفاده از نرم‌افزارهای مطالعات خازن‌گذاری، می‌توان از روش‌های تقریبی خازن‌گذاری که در مقالات مختلف ارائه شده است استفاده نمود؛ اما با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده در این روش‌ها و همچنین شرایط واقعی شبکه‌های توزیع، نتایج حاصل از این روش‌ها ممکن است از دقت کامل برخوردار نباشد. در این دستورالعمل علاوه بر پوشش مباحث دستورالعمل‌های پیشین، به نحوه تخمین اطلاعات ورودی، اصلاح روش‌های تقریبی خازن‌گذاری و بررسی الزامات مربوط به بهره‌برداری خازن نیز پرداخته شده است.

۲- اهداف و دامنه کاربرد

این دستورالعمل با هدف ارائه روش‌های اجرایی و بهبود فرآیند خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع، در راستای اجرای مأموریت ویژه ابلاغ‌شده از سوی شرکت توانیر به شرکت توزیع نیروی برق استان کردستان تهیه‌شده و در سومین نشست «کمیته راهبری برنامه‌ریزی فنی و مطالعات سیستم در شبکه‌های برق

ایران» مورخ ۲۶/ ۹/ ۹۹ مورد تصویب قرار گرفت. این دستورالعمل به بررسی خازن‌گذاری در سطوح مختلف شبکه‌های توزیع شامل:

- خازن‌گذاری ثابت در سطح شبکه فشار متوسط
- خازن‌گذاری ثابت در سطح شبکه فشار ضعیف
- خازن‌گذاری ثابت و متغیر (رگلاتوری) در پست‌های توزیع
- خازن‌گذاری ثابت و متغیر (رگلاتوری) در سمت مشترکین

با هدف بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان می‌پردازد. همچنین الزامات حفاظت از خازن، الزامات نصب خازن در محیط‌های هارمونیکی و الزامات تعمیر و نگهداری نیز موردبررسی قرار گرفته است.

۳- محدوده اجرا

محدوده اجرای این دستورالعمل معاونت هماهنگی توزیع و شرکت‌های توزیع نیروی برق کشور می‌باشد.

٤- مسئولیت نظارت و اجرا

مسوولیت اجرای مفاد این دستورالعمل به عهده مدیران عامل شرکت های توزیع نیروی برق بوده و نظارت عالیه بر حسن اجرای آن برعهده دفتر مهندسی و راهبری شبکه معاونت هماهنگی توزیع شرکت توانیر می باشد.

٥- تعاریف

بانک خازنی: تعدادی از واحدهای خازنی متصل شده به یکدیگر به منظور عملکرد توأم یا جدا

واحد خازنی: تعدادی از المان‌های خازنی واقع در یک محفظه همراه با پایانه‌های مشترک

المان خازنی: تجهیزی شامل دو الکترود مجزا به همراه یک دی‌الکتریک که تشکیل یک خازن می‌دهند

تجهیز دشارژ: تجهیزی با قابلیت کاهش ولتاژ بین پایانه‌های خازن به مقدار صفر در یک زمان مشخص پس از قطع خازن از شبکه

جریان هجومی: جریان گذرای عبوری از خازن در زمان اتصال خازن به شبکه

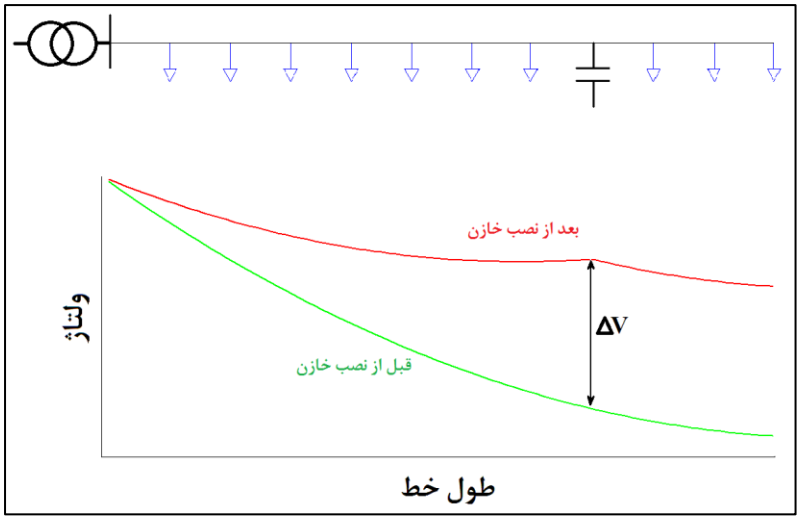
دمای هوای محیط: دمای هوا در محل نصب خازن

پله بانک خازنی: ترکیبی از یک یا چند واحد خازنی که با یک قطع کننده، فیوز یا کلید در مدار قرار می‌گیرند.

٦- اهداف خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع [۹]

خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع عموماً با هدف بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات توان و آزادسازی ظرفیت سیستم صورت می‌گیرد.

- **بهبود پروفیل ولتاژ**: مطابق شکل ۱، استفاده از خازن موازی در سیستم منجر به افزایش ولتاژ می‌شود. مقدار افزایش ولتاژ در محل نصب خازن تقریباً برابر حاصل‌ضرب جریان خازن در راکتانس این مسیر است. نصب خازن موازی منجر به افزایش ولتاژ نقاط واقع در مسیر بالادست نیز می‌شود که مقدار آن به راکتانس بین منبع و آن نقطه وابسته است. در یک سیستم شعاعی، ولتاژ نقاط بعد از خازن نیز افزایش می‌یابد که با مقدار افزایش ولتاژ در محل نصب خازن برابر است.



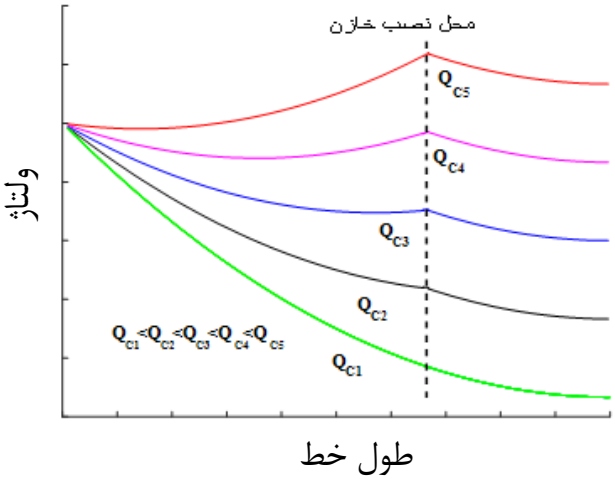
شکل ۱- بهبود پروفیل ولتاژ با نصب خازن

مقدار تقریبی افزایش ولتاژ در اثر نصب خازن از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آید [٤ و ٥]:

$$\Delta V \approx I_C X_L \qquad (۱)$$

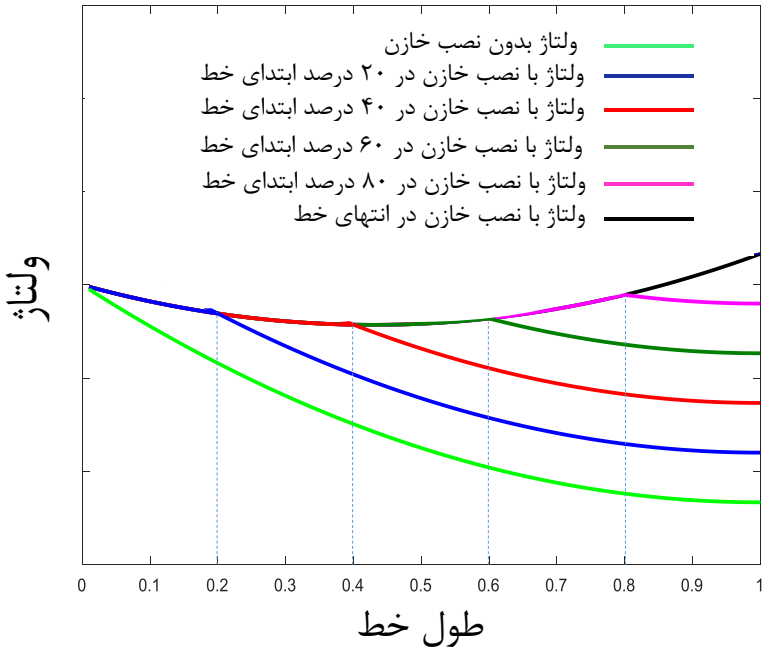
$$V_{rise} = \frac{\Delta V}{V_{old}} \approx \frac{I_C}{I_{SC}} = \frac{Q_C}{S_{SC}} \qquad (۲)$$

که ΔV مقدار افزایش ولتاژ در محل نصب خازن، I_C جریان خازن، X_L راکتانس مسیر بین محل نصب خازن تا محل تولید، V_{rise} نسبت افزایش ولتاژ، V_{old} ولتاژ قبل از نصب خازن، Q_C توان راکتیو خازن و S_{SC} قدرت اتصال کوتاه سیستم در محل نصب خازن است. با افزایش ظرفیت خازن، پروفیل ولتاژ شبکه افزایش بیشتری خواهد یافت (شکل ۲).



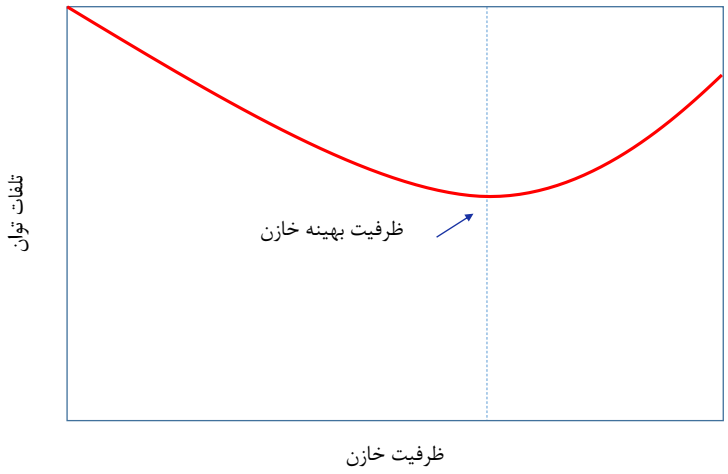
شکل ۲- تغییرات پروفیل ولتاژ با افزایش ظرفیت خازن

همچنین انتقال محل نصب خازن به نقاط انتهای فیدر موجب افزایش بیشتر پروفیل ولتاژ شبکه خواهد شد (شکل ۳).



شکل ۳- تغییرات پروفیل ولتاژ با تغییر محل خازن

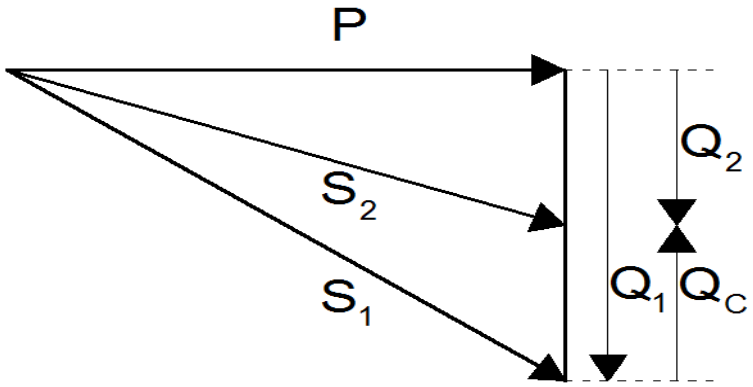
- **کاهش تلفات توان:** همان‌طور که ذکر شد، نصب خازن‌های موازی موجب کاهش جریان عبوری سیستم از محل نصب خازن تا محل تولید می‌شود. ازآنجایی‌که تلفات با مجذور جریان رابطه مستقیم دارد، کاهش جریان منجر به کاهش تلفات توان می‌شود. خازن‌ها معمولاً تا حد امکان نزدیک به بار مصرفی نصب می‌شوند.



شکل ٤- مقدار تلفات بر اساس تغییر ظرفیت خازن

توجه شود که نصب خازن بیش از حد موردنیاز می‌تواند موجب افزایش تلفات گردد (شکل ٤). ظرفیت و محل نصب خازن‌های می‌تواند بر میزان تلفات کاهش یافته اثرگذار باشد.

- **آزادسازی ظرفیت سیستم:** مطابق شکل ٥، خازن‌های موازی، با جبران‌سازی توان راکتیو مصرفی بارها (از Q_1 تا Q_2 از طریق تولید Q_c)، بار سیستم را از S_1 به S_2 کاهش می‌دهند.



شکل ٥- تأثیر خازن‌گذاری بر ظرفیت شبکه

با افزایش ضریب توان، بخشی از ظرفیت شبکه بالادست آزاد می‌شود که توسط رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$S_{release} = \frac{S_{old} - S_{new}}{S_{old}} = 1 - \frac{PF_{old}}{PF_{new}} \quad (٣)$$

در رابطه بالا PF_{old}، ضریب قدرت سیستم قبل از نصب خازن و PF_{new}، ضریب قدرت سیستم با حضور خازن و $S_{release}$، نسبت توان ظاهری آزادشده به مقدار توان ظاهری قبل از نصب خازن است.

البته به‌منظور دستیابی به اهداف ذکرشده، می‌توان از روش‌های دیگر به شرح زیر نیز استفاده نمود:

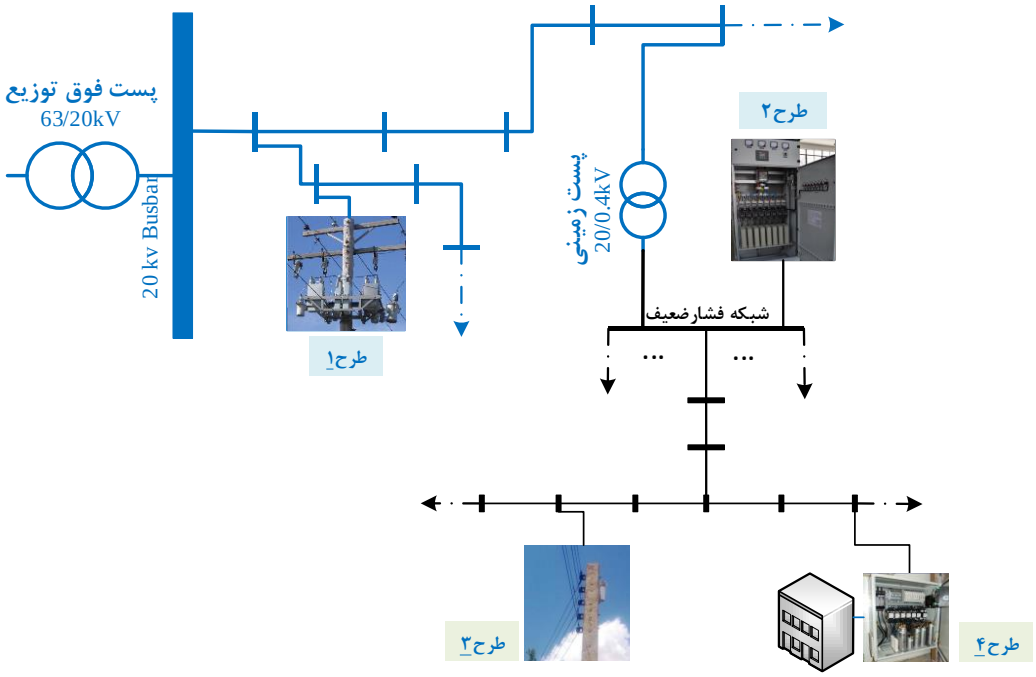
- تعادل فاز
- افزایش سطح مقطع شبکه
- بازآرایی شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف

به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش برای رسیدن به هدف موردنظر (بهبود پروفیل ولتاژ یا کاهش تلفات توان)، بایستی مقایسه‌ای بین روش‌های ذکر شده، با در نظر گرفتن هزینه، زمان و قیود فنی انجام گیرد. خازن‌گذاری یک روش نسبتاً سریع به‌منظور رفع ضعف ولتاژ و کاهش تلفات است و در شبکه‌های دارای

نرخ سریع رشد بار، می‌تواند مؤثر واقع شود. در این شرایط پیشنهاد می‌شود در زمان مناسب آتی، روش‌های بهتر بررسی و در صورت نیاز و امکان، جایگزین شود.

۷- طرح‌های مختلف خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع

خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع در سطوح مختلف شبکه (شامل شبکه فشار متوسط، پست توزیع، شبکه فشار ضعیف و در سمت مشترکین)، به دو صورت **ظرفیت ثابت** و **رگلاتوری** مطابق شکل ٦ صورت می‌گیرد [۹].



شکل ٦- طرح‌های مختلف خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع

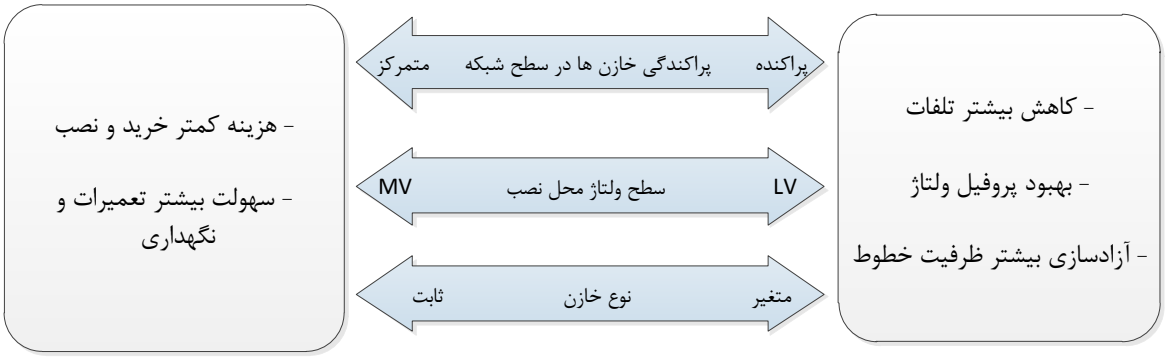
۷-۱- عوامل مؤثر بر انتخاب طرح‌های خازن‌گذاری

- **پراکندگی خازن در سطح شبکه:** به‌منظور دستیابی به نتیجه مطلوب، خازن باید تا حد امکان به محل بارهای القایی نزدیک بوده و ظرفیت آن برابر با توان راکتیو بارهای محدوده نصب خازن باشد. این امر نیازمند وجود تعداد کافی خازن با ظرفیت‌های مختلف است. از طرفی، الزامات فنی- اقتصادی و محدودیت ظرفیت‌های استاندارد خازن‌ها موجب می‌شود که معمولاً جبران‌سازی توان راکتیو بارها به صورت گروهی انجام شده و خازن در طول شبکه و در مرکز ثقل بار نصب شود. استفاده از خازن‌های توزیع شده (با ظرفیت کوچک و تعداد بیشتر) در نزدیکی محل مصرف، در مقایسه با استفاده از خازن‌های متمرکز (با ظرفیت بالا و تعداد کمتر) در سطح شبکه، منجر به

کاهش جریان راکتیو عبوری از خطوط و درنتیجه بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان به مقدار بیشتر می‌گردد؛ اما هزینه خرید و نصب خازن را افزایش خواهد داد.

- **انتخاب سطح ولتاژ مناسب خازنگذاری:** استفاده از خازن فشار متوسط به دلیل نیاز به سطح عایقی بالاتر نسبت به خازن فشار ضعیف، مستلزم صرف هزینه بیشتری است. از طرف دیگر در ظرفیت برابر، جریان عبوری از تجهیزات بانک خازنی فشار ضعیف بیشتر بوده و موجب افزایش هزینه ناشی از افزایش سطح مقطع و سایز تجهیزات می‌شود.
- **انتخاب نوع خازن:** استفاده از خازن‌های رگلاتوری به دلیل قابلیت تغییر ظرفیت خازن متناسب با منحنی بار راکتیو مصرفی، منجر به کاهش بیشتر تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه شده و از بروز اضافه ولتاژ در شرایط کم باری شبکه جلوگیری می‌کند.

شکل ۷ مقایسه‌ای بین طرح‌های مختلف خازن‌گذاری در شبکه توزیع از لحاظ هزینه خرید و نصب خازن، هزینه تعمیرات و نگهداری خازن، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و آزادسازی ظرفیت خطوط را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مقایسه مزایا و معایب طرح‌های مختلف خازن‌گذاری در شبکه توزیع

با توجه عوامل مذکور، ٤ طرح خازنگذاری در شبکه های توزیع انتخاب می گردد:

طرح ۱: نصب خازن ثابت در طول خطوط شبکه فشار متوسط

طرح۲: نصب خازن رگولاتوری در پست های توزیع

طرح۳: نصب خازن ثابت در طول خطوط شبکه فشار ضعیف

طرح٤: نصب خازن ثابت یا رگولاتوری در سمت مشترکین

انتخاب هریک از طرح های فوق یا ترکیبی از آن‌ها بر اساس شرایط شبکه مورد بررسی و با توجه به میزان تلفات، پروفیل ولتاژ، بار راکتیو و طول شبکه فشار متوسط و شبکه فشار ضعیف، هزینه تلفات، هزینه نصب و بهره برداری از خازن و ... صورت می گیرد.

در انتخاب طرح می توان به جدول ۱ توجه کرد:

جدول ۱- کاربرد و چالش های طرح های خازنگذاری

	کاربردها	چالش ها
طرح ۱	• در شبکه های فشار متوسط با ضریب توان پایین که نسبت میانگین توان راکتیو به حداقل توان راکتیو زیاد نبوده و چگالی بار در انتهای شبکه بیشتر باشد. • شبکه های فشار متوسط طولانی که ولتاژ انتهای شبکه فشار متوسط پایین باشد	• تنها در کاهش تلفات شبکه فشار متوسط موثر است که این تلفات نسبت به تلفات شبکه فشار ضعیف بسیار کمتر است. • با توجه به احتمال اضافه ولتاژ در شرایط کم باری، ظرفیت خازن قابل نصب در شبکه ممکن است بسیار محدود شود.
طرح ۲	• مشابه کاربردهای طرح۱ در شرایطی که تغییرات بار راکتیو زیاد باشد.	• تنها در کاهش تلفات شبکه فشار متوسط و ترانسفورماتور موثر است که این تلفات نسبت به تلفات شبکه فشار ضعیف بسیار کمتر است. • هزینه نصب و بهره‌برداری بالا • ضرورت بررسی تاثیر هارمونیک شبکه • نیازمند فضای کافی در پست زمینی
طرح ۳	• در شبکه های فشار ضعیف طولانی که تغییرات بار زیاد نباشد.	• با توجه به احتمال اضافه ولتاژ در شرایط کم باری، ظرفیت خازن قابل نصب در شبکه ممکن است بسیار محدود شود. • ضرورت بررسی تاثیر هارمونیک شبکه
طرح ۴	• در محل مصرف مشترکین دیماندی با هدف افزایش ضریب توان به مقدار ۰/۹	• حضور خازن خارج از محدوده مورد بهره برداری شبکه توزیع و نیازمند راهکارهای پایش دوره ای عملکرد این خازن ها

۸- محاسبات خازن‌گذاری

۸-۱- محاسبات خازن‌گذاری ثابت در طول شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف

مساله خازنگذاری یک مساله بهینه سازی غیرخطی با یک تابع هدف و قیود مرتبط است که بر اساس آن طرح، ظرفیت و محل نصب خازن تعیین می گردد.

$$\begin{aligned} & min\, f(x) \\ & subject\ to \quad g_i(x) \le 0 \quad i = 1, \dots, m \\ & \qquad\qquad h_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, p \end{aligned} \tag{٤}$$

. حل این مساله بهینه‌سازی می‌تواند با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل شبکه انجام شود. این نرم‌افزارها با قرار دادن بانک‌های خازنی با ظرفیت‌های مختلف در طول شبکه و محاسبه تلفات و ارزیابی اقتصادی، بهترین محل نصب خازن را (با رعایت قیدهای فنی شبکه) تعیین می‌کنند.[1]

- **اهداف:**

با توجه نیازسنجی صورت گرفته، تابع هدف می تواند هزینه، میزان تلفات، انحراف ولتاژ از مقدار نامی، ظرفیت خازن منصوبه و ... باشد. در محاسبات خازن‌گذاری به منظور کاهش تلفات، تابع هدف به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$B_t = R^E_{Loss} - C_{cap} \qquad (۵)$$

B_t سود کلی ناشی از خازن‌گذاری، R^E_{Loss} درآمد ناشی از کاهش تلفات انرژی در طول زمان بهره-برداری و C_{Cap} هزینه خرید و نگهداری خازن است. در رابطه فوق، علاوه بر تلفات انرژی در طول زمان بهره‌برداری، می‌توان تلفات توان در پیک بار را نیز به صورت مجزا مد نظر قرار داد؛ چرا که، ارزش تلفات در زمان پیک بار می‌تواند بیشتر از زمان‌های دیگر باشد. درآمدهای ناشی از کاهش تلفات انرژی و توان بستگی به ارزش تلفات انرژی و توان داشته و می‌تواند بر اساس «دستورالعمل جامع محاسبه ارزش تلفات توان و انرژی در شبکه‌های توزیع» تعیین شود.

از آنجایی که عمر تقریبی خازن ۱۰ سال است، مطالعات مذکور باید در یک دوره ۱۰ ساله با در نظر گرفتن نرخ تنزیل انجام شود. در صورتی که انجام این روش امکان‌پذیر نباشد با سرشکن نمودن هزینه خرید خازن، می‌توان با تقریب مناسبی مطالعات را در دوره یک‌ساله انجام داد.

در صورتی که اطلاعات کافی در دسترس نباشد می توان مقدار تلفات را به عنوان تابع هدف انتخاب نمود

- **قیود:**

- **ولتاژ مجاز در شرایط پیک بار شبکه:** بررسی ولتاژ نقاط انتهایی شبکه در شرایط پیک بار به منظور عدم وجود افت ولتاژ غیرمجاز
- **ولتاژ مجاز در شرایط کم باری شبکه:** بررسی ولتاژ شبکه در شرایط کم باری (خصوصاً در نقاط نصب خازن) به منظور عدم وجود اضافه ولتاژ غیرمجاز . در بعضی از نرم افزارهایی مطالعاتی،

[1] راهنمای استفاده از نرم‌افزار Power Factory DIgSILENT در محاسبات خازن‌گذاری در پیوست شماره ۳ ارائه شده است.

ممکن است قیود ولتاژ توسط یک ضریب جریمه به تابع هدف افزوده شود. در نتیجه بررسی مقادیر ولتاژ شبکه توصیه می شود.

- **حداکثر خازن مجاز به نصب در شبکه:** در اکثر استانداردها توصیه شده است که خازن بیشتر از حداقل بار راکتیو فیدر نصب نشود [۹]؛ عدم رعایت این قید منجر به جبران‌سازی مازاد در شرایط کم باری و احتمال وقوع اضافه ولتاژ خارج از حد مجاز می‌شود. البته از آنجایی که افت ولتاژ شبکه علاوه بر جریان راکتیو خطوط به جریان اکتیو نیز بستگی دارد، جبرانسازی مازاد (ضریب توان پیش فاز) لزوماً منجر به اضافه ولتاژ نخواهد شد و در عمل می توان حداکثر خازن مجاز را از رابطه تقریبی زیر بدست آورد:

$$Q_{C\,min} < Q_{t\,min}\left(1 + \frac{\frac{P_{t\,min}}{Q_{t\,min}} R}{X}\right) \qquad (٦)$$

که $Q_{C\,min}$ حداکثر خازن مجاز، $P_{t\,min}$ و $Q_{t\,min}$ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو شبکه در شرایط کم باری و R ، X به ترتیب مقاومت و راکتانس غالب شبکه است.

- **اطلاعات ورودی:**

اطلاعات ورودی موردنیاز به‌منظور شبیه‌سازی شبکه شامل موارد زیر است:

- اطلاعات استاتیکی شبکه که می‌تواند از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) شرکت استخراج شود که شامل طول و مشخصات خطوط، محل بارها و ... است.
- اطلاعات دینامیکی شبکه شامل توان اکتیو و راکتیو هر یک از بارها است که می‌توان از طریق روش‌های زیر استخراج شود:

۱) اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو هر یک از بارها: این روش نیازمند نصب تجهیزات اندازه‌گیری مناسب در محل تمام بارها بوده و تقریباً در حال حاضر بسیار مشکل است.

۲) استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده در ابتدای فیدر و محاسبه تقریبی اطلاعات هریک از بارها: این اطلاعات در شبکه‌های فشار متوسط از طریق تجهیزات اندازه‌گیری نصب شده در پست‌های فوق توزیع و در شبکه‌های فشار ضعیف از طریق ثبات‌های نصب شده در خروجی پست‌های توزیع استخراج می‌شود. در این روش ضریب بار و ضریب توان تمام بارهای فیدر، یکسان و به ترتیب برابر با ضریب بار کلی شبکه و ضریب توان ابتدای فیدر فرض می‌شود.

(۷) ضریب بار کلی شبکه = ضریب بار هر یک از بارها

$$= \frac{\text{بار کل فیدر}}{\text{کل ظرفیت منصوبه فیدر}}$$

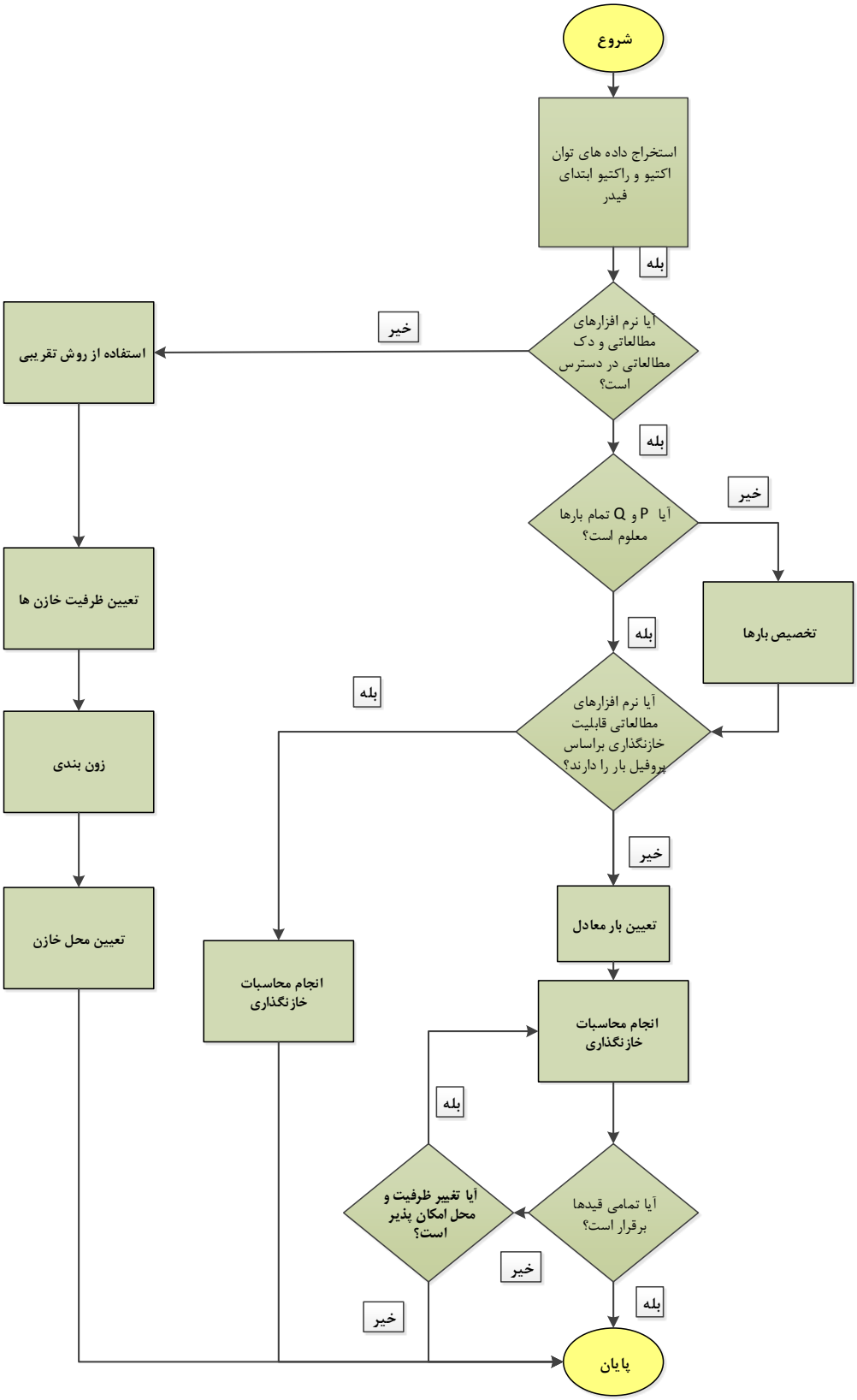
(۸) ضریب توان کلی شبکه = ضریب توان هر یک از بارها

$$= \frac{\text{بار اکتیو کل فیدر}}{\text{بار ظاهری کل فیدر}}$$

پس از تخصیص هریک از بارها، به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی پیشنهاد می‌شود نتایج حاصل از پخش بار با بار ابتدای فیدر مقایسه شود. در صورتی که مقدار دقیق بعضی از بارها مشخص باشد می توان ضرایب فوق را تنها به بارهای نامشخص اعمال نمود.

در صورتی که اطلاعات پروفیل بار در دسترس نباشد یا نرم افزار مطالعاتی قابلیت خازنگذاری بر اساس پروفیل بار را نداشته باشد، خازنگذاری بر اساس یک بار معادل (به عنوان مثال بار میانگین) انجام شده و به منظور بررسی قیود افت ولتاژ در پیک بار و اضافه ولتاژ در کم باری، نتایج خازنگذاری در زمان کم باری و پیک بار شبکه نیز بررسی می شود.

با توجه به هدف خازن‌گذاری (کاهش تلفات انرژی یا رفع مشکلات شبکه در پیک بار)، بار میانگین یا بار حداکثر در محاسبات مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در صورت وجود منابع تولید پراکنده در فیدر، توان تزریقی ناشی از آن نیز باید در محاسبات تخمین بار در نظر گرفته شود. فرآیند انجام مطالعات خازن‌گذاری به صورت خلاصه در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- روندنمای محاسبات خازن‌گذاری در شبکه

یادداشت ۱: اطلاعات بار باید در یک دوره حداقل یک‌ساله استخراج شود. در شبکه‌های فشار ضعیف که ممکن است اطلاعات یک سال اخیر در دسترس نباشد، می‌توان با نصب تجهیزات اندازه‌گیری استاندارد کالیبره و قابل‌اطمینان، به جمع‌آوری اطلاعات در مدت حداقل یک هفته در فصول کم باری بسنده نمود. اندازه‌گیری باید با واسطه ترانسفورماتور جریان و بدون نیاز به ترانسفورماتور ولتاژ صورت گیرد.

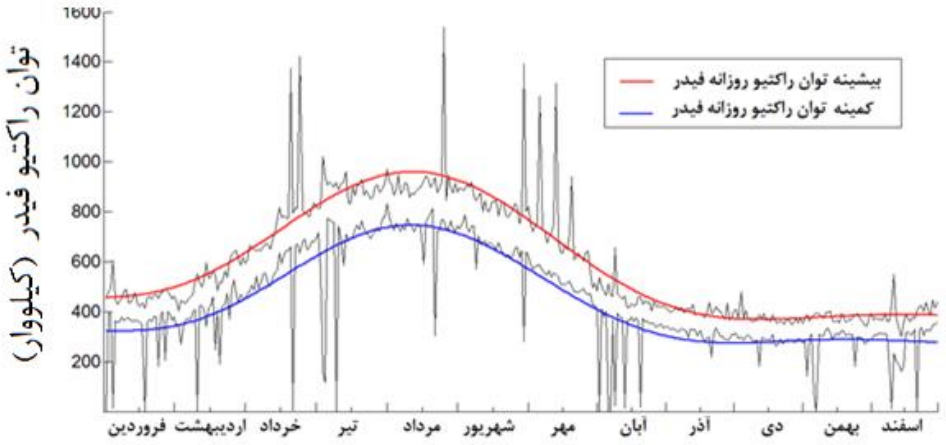
یادداشت ۲: استخراج داده‌های مربوط به ولتاژ انتهای فیدر می‌تواند مفید واقع شود.

یادداشت ۳: داده‌های غیرمعمول که اغلب به دلیل مانورهای موقت فیدر رخ می‌دهد نباید در مطالعات خازن‌گذاری در نظر گرفته شود.

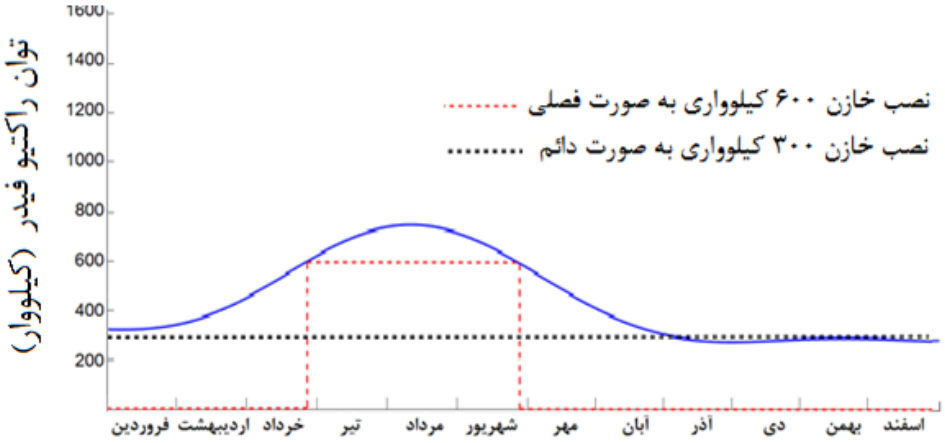
یادداشت ٤: در صورتی که هدف از خازن‌گذاری کاهش تلفات انرژی باشد می‌توان به‌جای استفاده از منحنی بار، میانگین درصد بارگذاری فیدر را به تمام بارها تعمیم داده و اگر هدف از خازن‌گذاری رفع ضعف ولتاژ در شرایط پیک بار باشد می‌توان به‌جای استفاده از منحنی بار، حداکثر درصد بارگذاری فیدر را به تمام بارها تعمیم داد.

یادداشت ٥: در صورتی که هدف از خازن‌گذاری بهبود پروفیل ولتاژ با کمترین مقدار خازن باشد، می‌توان ارزش تلفات را در محاسبات ناچیز در نظر گرفت.

مثال ۱: اطلاعات بار راکتیو مصرفی یک فیدر نمونه در یک سال اخیر در شکل ۹ نشان داده شده است. در این حالت با توجه به حداقل بار راکتیو فیدر، توصیه می‌شود که حداکثر ۳۰۰ کیلووار خازن در طول فیدر نصب شود که محل بهینه نصب آن بر مبنای شرایط بار میانگین یا بار پیک فیدر تعیین می‌شود.



شکل ۹- منحنی توان راکتیو سالانه فیدر نمونه



شکل ۱۰- انتخاب ظرفیت خازن بر مبنای منحنی راکتیو سالانه فیدر

مطابق منحنی حداقل بار راکتیو روزانه این فیدر در شکل ۱۰، یکی از حالت‌های زیر می‌تواند انتخاب شود:

- نصب یک خازن ۳۰۰ کیلوواری به صورت دائم در فیدر
- نصب یک خازن ٦۰۰ کیلوواری به صورت فصلی (زمان ورود و خروج خازن با توجه به منحنی بار راکتیو سالانه تعیین می‌شود. در منحنی نمونه شکل ۱۰، خازن در اواخر خرداد باید به شبکه متصل و اواخر شهریور از مدار خارج شود)
- نصب یک خازن ۳۰۰ کیلوواری به صورت دائم و یک خازن ۳۰۰ کیلوواری فصلی

۸-۲- محاسبات خازن‌گذاری در شبکه فشار متوسط و فشار ضعیف به روش زون‌بندی (تقریبی)

در صورتی که در محاسبات خازن‌گذاری با هدف کاهش تلفات امکان استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل شبکه (به دلایلی مانند نبود اطلاعات GIS)، وجود نداشته باشد، می‌توان بر اساس روش‌های تقریبی و سریع به پاسخی نسبتاً مناسب دست یافت.

- **مبنای روش زون‌بندی خازن‌گذاری ثابت در شبکه‌های فشار متوسط و فشار ضعیف**

درصورتی‌که یک فیدر مستقیم دارای توزیع یکنواخت بار و سطح مقطع یکسان باشد، ظرفیت بهینه خازن به‌منظور دستیابی به حداکثر کاهش تلفات بر اساس رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$q_{c_n} = \frac{Q_{c_n}}{n} = \frac{2}{2n+1} Q_{ave} \qquad (۹)$$

به منظور جلوگیری از جبران‌سازی مازاد در شرایط کم باری، رابطه فوق به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$q_{c_n} = \frac{Q_{c_n}}{n} = min\left(\frac{Q_{min}}{n} \ ، \frac{2}{2n+1}Q_{ave}\right) \quad (۱۰)$$

$$k = \frac{Q_{c_n}}{Q_{ave}} \quad (۱۱)$$

که q_{c_n} ظرفیت هر خازن، Q_{c_n} ظرفیت کل خازن‌ها، Q_{ave} بار راکتیو میانگین کل فیدر، n تعداد خازن‌ها و k نسبت جبران‌سازی است. همچنین، فاصله محل نصب خازن‌ها از انتهای فیدر از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۱]:

$$y_i = \frac{2i-1}{2n}kL \qquad i = 1,2,\dots,n \quad (۱۲)$$

که L طول خط و y_i فاصله خازن i ام از انتهای فیدر است. ازآنجایی‌که خازن‌ها در ظرفیت‌های مشخص و استاندارد (۵، ۷/۵، ۱۰ کیلووار و ....) تولید می‌شوند و ممکن است ظرفیت خازن q_{c_n} (محاسبه‌شده از رابطه ۱۰) در دسترس نباشد، بایستی نزدیک‌ترین ظرفیت استاندارد خازن به q_{c_n} جایگزین شود. در این صورت نسبت جبران‌سازی بر اساس ظرفیت‌های جدید مجدداً محاسبه می‌شود.

درصورتی‌که خازن‌ها در محل مناسب نصب شود، مقدار تلفات کاهش یافته ناشی از نصب این خازن‌ها را با استفاده از رابطه ۱۳ می‌توان محاسبه نمود.

$$\Delta P_{Loss} = rI_q^2 L\left(1-(1-k)^3 - \frac{(k)^3}{4n^2}\right) \quad (۱۳)$$

که r مقاومت خط در واحد طول، I_q جریان راکتیو کل فیدر، L طول فیدر، k نسبت جبران‌سازی و n تعداد خازن‌ها است[۱].

- **استفاده از روش زون‌بندی خازن‌گذاری ثابت در شبکه‌های فشار متوسط و فشار ضعیف**

در شبکه‌های توزیع معمولاً فرضیات روش مذکور (توزیع یکنواخت بار و ...) به‌طور کامل برآورده نمی‌شود اما استفاده از روش زیر با تقریب بسیار مناسبی[۲] محل بهینه نصب خازن را تعیین می‌کند:

- **مرحله ۱: تعیین اطلاعات ورودی موردنیاز**

۱) اطلاعات استاتیکی شبکه: شامل محل بارها، مقاومت و طول خطوط

[۱] اثبات روابط در پیوست ۱ ارائه شده است.

[۲] صحت سنجی و آنالیز حساسیت روش زون‌بندی در پیوست ۲ ارائه شده است.

۲) اطلاعات دینامیکی شبکه: بار راکتیو هر مشترک بر اساس درصد بارگذاری فیدر در زمان میان باری و ضریب توان ابتدای فیدر مشخص می‌شود.

- **مرحله ۲: تعیین تعداد و ظرفیت خازن‌ها**

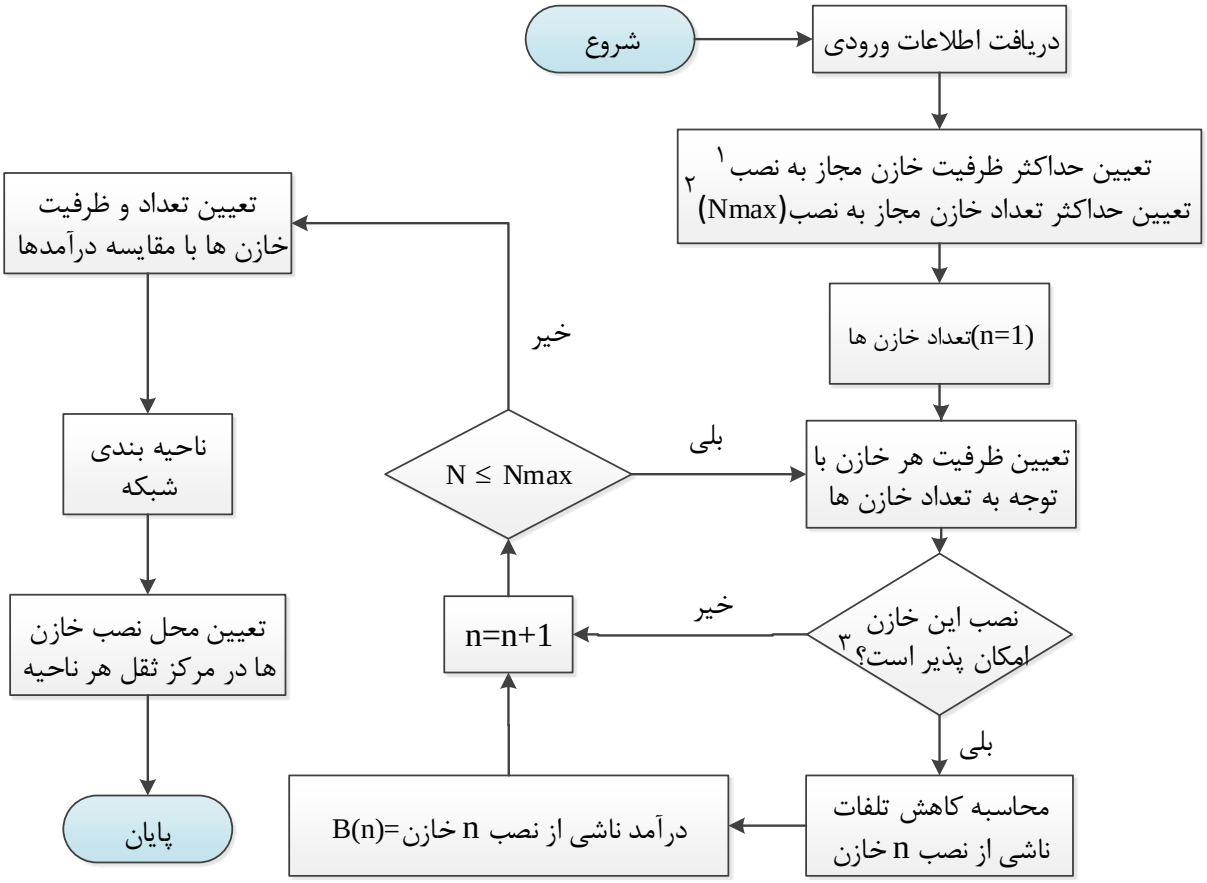
در صورتی که تأمین توان راکتیو موردنیاز با تعداد و ظرفیت‌های مختلف خازن امکان‌پذیر باشد، بهترین حالت با مقایسه هزینه‌های ناشی از خرید، نصب، تعمیرات و نگهداری خازن‌ها و سود ناشی از کاهش تلفات مشخص خواهد شد.

- **مرحله ۳: تعیین محل نصب خازن‌ها**

به‌منظور تعیین محل بهینه نصب خازن، باید فیدر بر اساس میانگین بار راکتیو روزانه تقسیم‌بندی شود. تقسیم‌بندی شبکه به‌گونه‌ای انجام می‌شود که بار راکتیو مصرفی هر ناحیه برابر با ظرفیت یک خازن باشد. سپس خازن باید در مرکز ثقل (بر اساس بار راکتیو) این محدوده نصب شود. در صورتی که تعداد خازن‌ها از تعداد نواحی کمتر باشد، نصب خازن در ناحیه‌های انتهایی فیدر و در آنتن‌های متفاوت، دارای اولویت بالاتری است.

ناحیه بندی شبکه فشار ضعیف می‌تواند با اندازه‌گیری میدانی در زمان کم باری شبکه نیز انجام شود. در این روش اندازه‌گیری از انتهای فیدر شروع شده و نقطه‌ای که توان راکتیو پایین‌دست فیدر با ظرفیت یک خازن برابر باشد، به عنوان محل نصب خازن انتخاب می‌شود و مجدداً این فرآیند ادامه پیدا می‌کند. در این روش حتی‌الامکان از تجمع خازن‌ها در یک آنتن خودداری شود [۱].

روند انجام محاسبات خازن‌گذاری با استفاده از روش ارائه شده، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- روندنمای خازن‌گذاری به روش زون‌بندی

- **مثال ۲. خازن‌گذاری به روش زون‌بندی:**

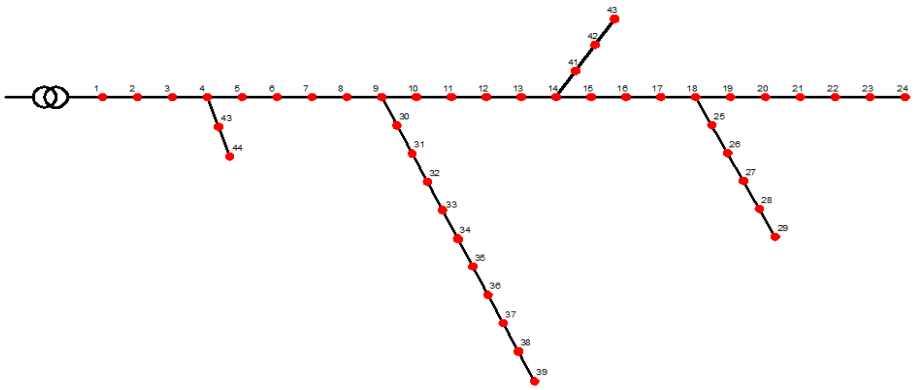
در صورت استفاده از روش زون‌بندی به منظور خازن‌گذاری با هدف کاهش تلفات در شبکه نمونه شکل ۱۲، ابتدا منحنی بار راکتیو کل فیدر در یک دوره هفت‌روزه در فصل کم باری (شکل ۱۳) استخراج می‌شود. مطابق شکل، حداقل و میانگین بار راکتیو این فیدر به ترتیب ۲۵ و ۴۲ کیلووار است. در مرحله بعد ظرفیت و تعداد موردنیاز خازن با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین می‌شود. توجه شود که مجموع ظرفیت خازن‌ها نباید از بار راکتیو حداقل (۲۵ کیلووار) بیشتر شود. در صورتی که حداقل ظرفیت خازن در دسترس ۵ کیلووار باشد، حداکثر ۵ خازن (Nmax) می‌توان نصب نمود. ظرفیت خازن‌ها به ازای تعداد مختلف خازن (۱ تا ۵) تعیین و کاهش تلفات و درآمد ناشی از آن در هر حالت محاسبه می‌شود. به عنوان مثال در صورت نصب یک خازن، ظرفیت بهینه برابر است با $42 \times \frac{2}{3} = 28$؛ اما چون این ظرفیت بیشتر از بار راکتیو حداقل

یادداشت ۱: بر مبنای حداقل بار راکتیو شبکه

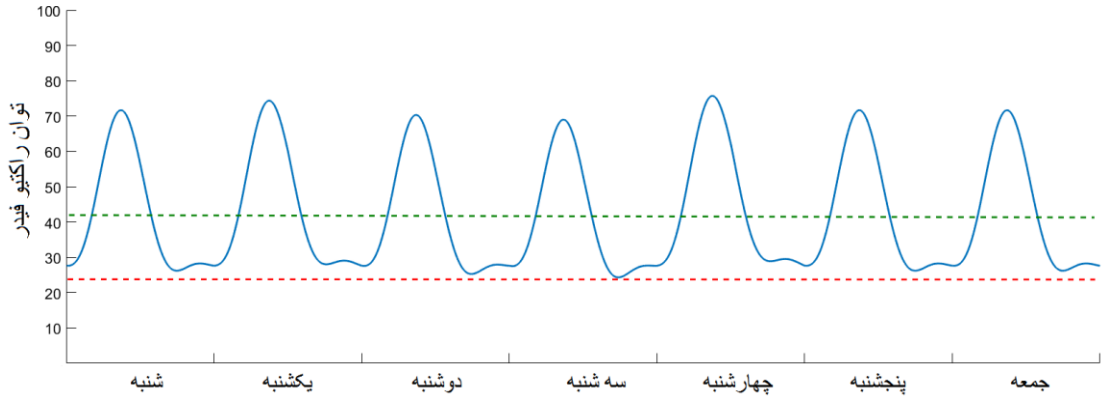
یادداشت ۲: $N_{max} = \text{round}(\frac{\text{حداقل بار راکتیو فیدر}}{\text{کوچک‌ترین ظرفیت خازن در دسترس}})$

یادداشت ۳: بررسی در دسترس بودن ظرفیت خازن پیشنهادی

است، ظرفیت بهینه ۲۵ کیلووار انتخاب می‌شود. به همین ترتیب می‌توان از دو خازن ۱۲,۵ کیلووار، سه خازن ۷,۵ کیلووار یا پنج خازن ۵ کیلووار استفاده نمود[۱]. انتخاب حالت بهینه بر اساس مقایسه درآمد ناشی از نصب خازن‌ها در حالات مختلف صورت می‌گیرد.



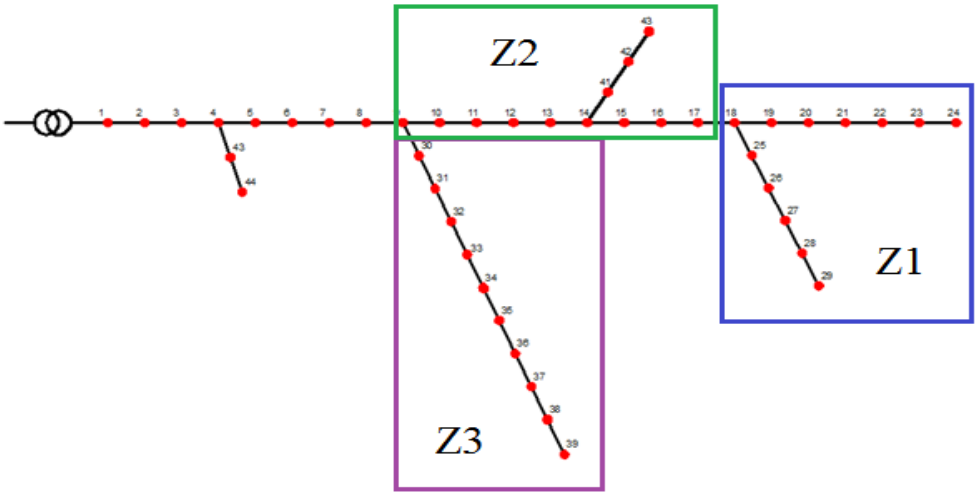
شکل ۱۲- شماتیک فیدر فشار ضعیف نمونه



شکل ۱۳- منحنی توان راکتیو هفتگی فیدر نمونه

در صورتی که فرض شود انتخاب دو خازن ۱۲,۵ کیلوواری بهترین حالت است، ناحیه بندی فیدر مطابق شکل ۱٤ به‌گونه‌ای انجام می‌شود که بار راکتیو هر ناحیه در شرایط میان باری برابر با ظرفیت یک خازن (۱۲,۵ کیلووار) شود. با توجه به اولویت نصب خازن در نواحی انتهایی در آنتن‌های متفاوت، خازن‌های ۱۲,۵ کیلوواری در نواحی Z_1 و Z_3 نصب می‌شود.

[۱] معمولاً خازن‌های سه فاز فشار ضعیف در ظرفیت‌های ۲,۵ ، ۵ ، ۷,۵ ، ۱۰ و ۱۲,۵ کیلووار تولید می‌شوند.



شکل ١٤- ناحیه بندی فیدر فشار ضعیف نمونه

۸-۳- محاسبات خازن‌گذاری متغیر در پست‌های توزیع [۲]

جبران‌سازی توان راکتیو در پست‌های توزیع در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور و معمولاً به صورت متغیر (پله‌ای) انجام می‌شود. استفاده از خازن‌های متغیر نیازمند رگلاتور و سیستم کلیدزنی است. درصورتی‌که تغییرات توان راکتیو پست توزیع کم باشد، می‌توان از خازن‌گذاری ثابت در جبران‌سازی توان راکتیو پست توزیع استفاده کرد.

یکی از مزایای بانک‌های خازنی رگلاتوری جبران حداکثر توان راکتیو در پیک بار و حذف مشکل جبران‌سازی بیش از حد[1] در کم باری است؛ بنابراین مزایای حاصل از خازن‌گذاری در این روش به حداکثر می‌رسد.

- **اطلاعات ورودی:**

در پست‌های توزیع، ظرفیت خازن‌های ثابت بر مبنای حداقل بار راکتیو و ظرفیت بانک‌های خازنی رگلاتوری بر مبنای حداکثر بار راکتیو تعیین می‌شود [۹]. پله‌های موردنیاز بانک خازنی رگلاتوری با توجه به منحنی بار راکتیو انتخاب می‌شود. بدین منظور اندازه‌گیری توان راکتیو در بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای در طول یک هفته متوالی الزامی است. همچنین به دلیل تغییر ظرفیت توان راکتیو خازن‌ها متناسب با مجذور ولتاژ شبکه، لازم است اطلاعات ولتاژ شبکه در بازه زمانی متناظر اندازه‌گیری و ثبت شود. توصیه می‌شود اندازه‌گیری‌ها در فصل پرباری انجام شود و در مواردی که اندازه‌گیری در فصل کم باری انجام می‌شود، استفاده از ضریب تصحیح مناسب بر حسب نظر واحدهای مهندسی شرکت‌های توزیع ضروری است.

[1] Over Compensation

دستگاه‌های اندازه‌گیری باید استاندارد (کلاس A و B)، کالیبره و قابل‌اطمینان باشد. نصب دستگاه باید با واسطه ترانسفورماتور جریان و بدون نیاز به ترانسفورماتور ولتاژ انجام شود.

شکل ۱۵- جبران‌سازی توان راکتیو توسط خازن‌های ثابت و متغیر

- **تعیین ظرفیت کل بانک خازنی**

ازآنجایی‌که ظرفیت نامی راکتیو خازن‌ها در ولتاژ نامی آن‌ها تولید می‌شود، ظرفیت خازن موردنیاز باید بر مبنای رابطه زیر تعیین شود:

$$Q_{install} = Max(Q_k) \times (\frac{V_n}{Min\ V_i})^2 \quad (١٤)$$

که در آن $Q_{install}$ ظرفیت کل بانک خازنی موردنیاز، Q_k مقادیر توان راکتیو سه فاز ثبت‌شده در پیک بار طی هفت روز اندازه‌گیری متوالی، V_n ولتاژ نامی خازن‌ها (٤٠٠ یا ٤٤٠ ولت) و V_i ولتاژهای ثبت‌شده در پیک بار طی هفت روز اندازه‌گیری متوالی است. باید توجه شود که ولتاژ نامی خازن باید از حداکثر ولتاژ ثبت‌شده در دوره اندازه‌گیری بیشتر باشد در غیر این صورت باید خازن‌های با ولتاژ بالاتر استفاده شود.

- **تعیین تعداد و ظرفیت پله‌های بانک خازنی**

یکی از مسائل مهم در طراحی بانک‌های خازنی، تعیین تعداد و ظرفیت پله‌های بانک خازنی است. رگلاتورهای بانک خازنی یا رله‌های توان راکتیو معمولاً به صورت ٦ خروجی (پله) یا ١٢ خروجی (پله) تولید می‌شوند.[1] پله بندی ورود و خروج خازن‌ها به سه نوع حسابی[2]، ترکیبی[1] و هندسی[2] در رگلاتورهای

[1] البته شرکت‌های محدودی نیز این رگلاتورها را با تعداد ٧ و ١٤ پله تولید می‌کنند.

[2] Arithmetic

خازنی قابل پیاده‌سازی است. تعداد پله‌های رگلاتور بانک خازنی و ظرفیت هر پله به‌طور کلی به صورت زیر تعیین می‌شود:

- در مواردی که ظرفیت کل بانک خازنی کمتر از ۲۰۰ کیلووار باشد، از رگلاتورهای ٦ پله از نوع هندسی یا ترکیبی استفاده می‌شود.
- در مواردی که ظرفیت کل بانک خازنی برابر یا بیشتر از ۲۰۰ کیلووار باشد، از رگلاتورهای ۱۲ پله از نوع حسابی استفاده می‌شود.

حداقل مدار خازن که در پله اول قرار می‌گیرد باید کمتر از ۱,۲۵ برابر حداقل توان راکتیو ثبت‌شده باشد:

$$Q_1^{Module} \leq 1.25(Min\ Q_i) \qquad (۱۵)$$

در رابطه فوق Q_1^{Module}، ظرفیت توان راکتیو پله اول و Q_i مقادیر توان راکتیو ثبت‌شده در کم باری است. اگر برقراری رابطه فوق ممکن نباشد، انجام تغییراتی مانند جبران‌سازی قسمتی از توان راکتیو با خازن ثابت و قرار دادن آن در خارج از سیستم کنترل رگلاتور (ترکیب خازن ثابت و رگلاتوری) الزامی است.

در مواقع خاص که انتخاب پله‌های کوچک‌تر برای بانک خازنی به دلایل مختلف (مانند کاهش اثرات گذرا به دلیل مجاورت با بارهای حساس) ضروری باشد، یا به دلایل دیگر تعداد پله‌ها کافی نباشد، می‌توان حداقل توان راکتیو را با استفاده از خازن ثابت و خارج از سیستم کنترلی رگلاتور طراحی کرد. ظرفیت کل بانک خازنی باید بزرگ‌تر یا مساوی پیک توان راکتیو اندازه‌گیری شده باشد.

---

[1] Mixed

[2] Geometric

جدول ۲- انواع پله بندی بانک‌های خازنی

نوع توالی	ظرفیت هر پله	ترتیب کلیدزنی						
		۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷
توالی حسابی ... : ۱ : ۱ : ۱	۱۰	■	■	■	■	■	■	■
	۱۰		■	■	■	■	■	■
	۱۰			■	■	■	■	■
	۱۰				■	■	■	■
	۱۰					■	■	■
	۱۰						■	■
	۱۰							■
ظرفیت خازن در مدار		۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	٥۰	٦۰	۷۰
توالی ترکیبی ... : ۲ : ۲ : ۱	۱۰	■		■		■		■
	۲۰		■	■	■	■	■	■
	۲۰				■	■	■	■
	۲۰						■	■
ظرفیت خازن در مدار		۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	٥۰	٦۰	۷۰
توالی هندسی ... : ٤ : ۲ : ۱	۱۰	■		■		■		■
	۲۰		■	■			■	■
	٤۰				■	■	■	■
ظرفیت خازن در مدار		۱۰	۲۰	۳۰	٤۰	٥۰	٦۰	۷۰

فاصله زمانی بین کلیدزنی پله‌ها (در صورت امکان) حداقل ۲ دقیقه انتخاب شود تا زمان کافی برای تخلیه خازن‌ها از طریق مقاومت میراکننده فراهم شود. (این زمان معمولاً از ۱۰ ثانیه تا ٦۰۰ ثانیه قابل تنظیم است)

- **تنظیم رگلاتور**: در برخی از رگلاتورهای بانک خازنی قدیمی، باید آستانه تغییر پله توسط رگلاتور (نسبت $\frac{C}{K}$) بر حسب جریان راکتیو، تنظیم شود. معمولاً راکتورهای جدید به صورت

نیمه‌خودکار و خودکار هستند که نیاز به تنظیم دستی نسبت $\frac{C}{K}$ ندارند. مقدار $\frac{C}{K}$ باید حداکثر ۰/۸۵ و حداقل ۰/۶۵ جریان راکتیو کوچک‌ترین پله بانک خازنی باشد [۲].

$$0.65\frac{Q_C}{\sqrt{3}.U.a} \le \frac{C}{K} \le 0.85\frac{Q_C}{\sqrt{3}.U.a} \quad (۱۶)$$

که Q_C توان راکتیو کوچک‌ترین پله، U ولتاژ خط و a نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان است.

- **هادی‌ها و شینه‌ها:** هادی‌ها و شینه‌ها باید متناسب با سایز فیوز طراحی شوند. جریان نامی هر پله خازن و بانک خازنی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I_n = \frac{Q}{\sqrt{3}U_n} \quad (۱۷)$$

که در آن I_n جریان خط، Q توان راکتیو بانک خازنی یا پله، U_n ولتاژ خط است.

- **محاسبه راکتورهای DeTune** : استفاده از راکتورهای DeTune در بانک‌های خازنی رگلاتوری ضروری است. طراحی و نصب راکتور DeTune برای هارمونیک پنجم ضروری است. نحوه محاسبه راکتورهای DeTune در بخش ۱۱ توضیح داده شده است.

۸-٤- محاسبات خازن‌گذاری متغیر در محل مصرف مشترکین

بسیاری از مشترکین دیماندی به دلیل دارا بودن موتور در تأسیسات خود، دارای ضریب توان پایینی هستند. در نتیجه نصب خازن به منظور بهبود ضریب توان توسط این مشترکین ضروری است. مطابق قوانین موجود، حداقل ضریب توان مشترکین دیماندی باید حداقل ۰,۹ باشد[۲]. ضریب توان قبل از جبران‌سازی اندازه‌گیری شده یا بر اساس نوع مصارف داخلی مشترک تخمین زده می‌شود.

مقدار خازن موردنیاز برای بهبود ضریب توان از $\cos\varphi_1$ به $\cos\varphi_2$ از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (۱۸)$$

که $\cos\varphi_1$ ضریب توان قبل از جبران‌سازی، $\cos\varphi_2$ ضریب توان بعد از جبران‌سازی، P توان اکتیو مشترک و Q_C خازن موردنیاز است. به‌جای رابطه فوق می‌توان از رابطه $Q_C = KP$ نیز استفاده نمود که مقدار K از جدول ۳ مشخص می‌شود.

جدول ۳- محاسبه ضریب K به منظور محاسبه خازن موردنیاز

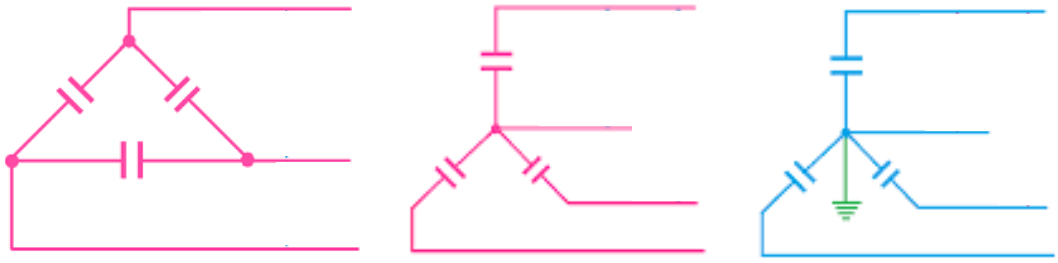
cos φ1	cos φ2												
	0.8	0.86	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.5	0.98	1.23	1.25	1.28	1.3	1.34	1.37	1.4	1.44	1.48	1.53	1.59	1.73
0.51	0.94	1.09	1.2	1.23	1.26	1.29	1.32	1.36	1.4	1.44	1.48	1.54	1.69
0.52	0.89	1.04	1.16	1.19	1.22	1.25	1.28	1.32	1.35	1.39	1.44	1.5	1.64
0.53	0.85	1	1.12	1.14	1.17	1.21	1.24	1.27	1.31	1.35	1.4	1.46	1.6
0.54	0.81	0.96	1.08	1.1	1.13	1.16	1.2	1.23	1.27	1.31	1.36	1.42	1.56
0.55	0.77	0.92	1.04	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.23	1.27	1.32	1.38	1.52
0.56	0.73	0.88	1	1.02	1.05	1.09	1.12	1.15	1.19	1.23	1.28	1.34	1.48
0.57	0.69	0.84	0.96	0.99	1.01	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.3	1.44
0.58	0.67	0.81	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.08	1.11	1.15	1.2	1.26	1.41
0.59	0.62	0.77	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.08	1.12	1.17	1.23	1.37
0.6	0.58	0.73	0.85	0.88	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.08	1.13	1.19	1.33
0.61	0.55	0.7	0.82	0.84	0.87	0.9	0.94	0.97	1.01	1.05	1.1	1.16	1.3
0.62	0.52	0.67	0.78	0.81	0.84	0.87	0.9	0.94	0.97	1.01	1.06	1.12	1.27
0.63	0.48	0.63	0.75	0.78	0.8	0.84	0.87	0.9	0.94	0.98	1.03	1.09	1.23
0.64	0.45	0.6	0.72	0.74	0.77	0.81	0.84	0.87	0.91	0.95	1	1.06	1.2
0.65	0.42	0.57	0.69	0.71	0.74	0.77	0.81	0.84	0.88	0.92	0.97	1.01	1.17
0.66	0.39	0.54	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.81	0.85	0.89	0.94	1	1.14
0.67	0.36	0.51	0.62	0.65	0.68	0.71	0.75	0.78	0.82	0.86	0.91	0.97	1.11
0.68	0.33	0.48	0.6	0.62	0.65	0.68	0.72	0.75	0.79	0.83	0.88	0.94	1.08
0.69	0.3	0.45	0.57	0.59	0.62	0.65	0.69	0.72	0.76	0.8	0.84	0.91	1.05
0.7	0.27	0.42	0.54	0.56	0.59	0.63	0.66	0.69	0.73	0.77	0.81	0.88	1.02
0.71	0.24	0.39	0.51	0.54	0.56	0.6	0.63	0.66	0.7	0.74	0.78	0.85	0.99
0.72	0.21	0.36	0.48	0.51	0.53	0.57	0.6	0.63	0.67	0.71	0.75	0.82	0.96
0.73	0.19	0.34	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.61	0.65	0.69	0.73	0.79	0.94
0.74	0.16	0.31	0.43	0.45	0.48	0.51	0.55	0.58	0.62	0.66	0.7	0.77	0.91
0.75	0.13	0.82	0.4	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.59	0.63	0.67	0.74	0.88
0.76	0.11	0.26	0.37	0.4	0.43	0.46	0.49	0.53	0.56	0.6	0.65	0.71	0.86
0.77	0.08	0.23	0.35	0.37	0.4	0.43	0.47	0.5	0.54	0.58	0.62	0.69	0.83
0.78	0.05	0.2	0.32	0.35	0.37	0.41	0.44	0.47	0.51	0.55	0.59	0.66	0.8
0.79	0.03	0.18	0.29	0.32	0.35	0.38	0.41	0.45	0.49	0.53	0.57	0.63	0.78
0.8		0.15	0.27	0.29	0.32	0.36	0.39	0.42	0.46	0.5	0.54	0.61	0.75
0.81		0.12	0.24	0.27	0.3	0.33	0.36	0.4	0.43	0.47	0.52	0.58	0.72
0.82		0.1	0.21	0.24	0.27	0.3	0.34	0.37	0.41	0.45	0.49	0.56	0.7
0.83		0.07	0.19	0.22	0.24	0.28	0.31	0.34	0.38	0.42	0.46	0.53	0.67
0.84		0.05	0.16	0.19	0.22	0.25	0.28	0.32	0.36	0.4	0.44	0.5	0.65
0.85		0.02	0.14	0.16	0.19	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.62
0.86			0.11	0.14	0.17	0.2	0.23	0.26	0.3	0.34	0.39	0.45	0.59
0.87			0.08	0.11	0.14	0.17	0.2	0.24	0.28	0.32	0.36	0.42	0.57
0.88			0.05	0.09	0.11	0.14	0.18	0.21	0.25	0.29	0.34	0.4	0.54
0.89			0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.23	0.26	0.31	0.37	0.51
0.9				0.03	0.06	0.09	0.12	0.16	0.19	0.23	0.28	0.34	0.48

۹- ساختار و مشخصات بانک‌های خازنی

- **انواع آرایش سه فاز بانک‌های خازنی**

واحدهای خازنی معمولاً به صورت اتصال مثلث، ستاره با نوترال زمین نشده، ستاره با نوترال زمین شده و ستاره دوگانه (با اتصال مرکز هر کدام از اتصال‌های ستاره به هم) وجود دارند. در شبکه‌های فشار ضعیف معمولاً از واحدهای خازنی با اتصال مثلث و در شبکه‌های فشار متوسط از خازن با اتصال ستاره استفاده می‌شود. انتخاب نوع اتصال ستاره زمین شده یا ستاره زمین نشده به عوامل مختلفی شامل موارد زیر بستگی دارد:

- در اتصال ستاره با نوترال زمین شده، مسیری برای جریان‌های هارمونیک سوم ایجاد شده که موجب اغتشاش در سیستم‌های مخابراتی و افزایش جریان عبوری از واحدهای خازنی می‌شود.
- در اتصال ستاره با نوترال زمین شده، امپدانس مؤلفه صفر شبکه با قطع و وصل گروه خازنی تغییر خواهد کرد. درنتیجه، تنظیم حفاظت‌های زمین در حالت‌های قطع و وصل گروه‌های خازنی متفاوت خواهد بود.
- با زمین کردن نوترال اتصال ستاره، جریان اتصال به زمین شبکه افزایش پیدا کرده و همین عامل، موجب افزایش جریان اتصال به زمین تجهیزات حفاظتی شبکه شامل فیوز و کلیدها می‌شود.
- مزایای اتصال نوترال آرایش ستاره به زمین شامل تعادل فازها، حفاظت بهتر، کاهش ولتاژ برگشتی مربوط به کلیدزنی خازن و کاهش اضافه ولتاژهای سیستم در حالت‌های گذرا ناشی از کلیدزنی و صاعقه است.



شکل ۱۶- انواع اتصال خازن

با توجه به عوامل فوق، استفاده از بانک خازنی با اتصال ستاره زمین نشده در شبکه فشار متوسط به دلایل زیر ترجیح داده می‌شود:

- عدم عبور جریان هارمونیک سوم از واحدهای خازنی
- عدم تغییر امپدانس مؤلفه صفر شبکه در اثر قطع و وصل خازن
- رفع مشکلات اضافه ولتاژ اتصال ستاره زمین نشده با استفاده از برقگیرها

در پست‌های توزیع که خازن‌ها به صورت مجتمع و به شکل indoor نصب می‌شوند وجود سیستم خنک‌کننده الزامی است.

- **تجهیزات بانک خازنی رگلاتوری**

به‌طور کلی بانک خازنی شامل قسمت‌های زیر بوده و باید هر قسمت بر اساس استاندارد مربوطه طراحی شود:

- کنترل‌کننده ضریب توان یا رگلاتور بانک خازنی (RPC[1] PFR[2] PFC[3])
- شینه‌ها
- سوئیچگیر
- کابل‌ها
- سیستم حفاظت
- کنتاکتورها
- راکتورهای DeTune کننده
- خازن‌ها

به دلیل کلیدزنی‌های مکرر بانک خازنی، باید شرایط گذرا، نظیر جریان هجومی و اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی در انتخاب کنتاکتور و سایر اجزا بانک خازنی مورد توجه قرار گیرد.

- **کنتاکتورها:** کنتاکتورها باید از نوع خازنی[4] بوده و دارای ماژول محدودساز جریان هجومی باشند (سری AC-6b). مقدار جریان نامی این کنتاکتورها به‌جای آمپر، بر حسب توان راکتیو پله خازنی قابل اتصال مشخص می‌شود. در برخی از بانک‌های خازنی مدرن ممکن است به‌جای کنتاکتور از ماژول‌های تایریستوری استفاده شود که طراحی و انتخاب آن‌ها در این دستورالعمل ارائه نشده است.
- **سیستم تهویه هوا**: برای عملکرد مناسب سیستم تهویه هوا، باید نکات زیر را مدنظر قرار داد:

[1] Reactive Power Controller
[2] Power Factor Relay
[3] Power Factor Controller
[4] Capacitor Duty Conductor

- سیستم تهویه به یک ورودی و یک خروجی در بالا و پایین تابلو نیاز دارد که یکی از آن‌ها باید مجهز به فن باشد.
- در صورت طراحی محل فن‌ها در بالای تابلو، باید از فن دمنده و در صورت طراحی محل فن‌ها در پایین تابلو باید از فن‌های مکنده استفاده شود.
- حتی‌الامکان بین خازن‌ها و راکتورها فاصله بیشتری را ایجاد نمود.
- حتی‌الامکان از راکتورهای با نصب عمودی استفاده نمود، زیرا تبادل حرارتی بهتری را انجام می‌دهند.
- در صورت لزوم استفاده از فیلتر هوا برای فن‌ها، از فیلترهای فلزی با دانه‌بندی بزرگ استفاده نمود.
- حتی‌الامکان کنترل دما توسط سنسورهای دارای پروب قابل اتصال به بدنه خازن انجام شود؛ زیرا عملکرد ترموستات‌ها دقیق و قابل اعتماد نیست.

به منظور دسترسی به مشخصات تکمیلی خازن‌های فشار متوسط و فشار ضعیف می‌توان به [۱٤ و ۱۵] مراجعه نمود.

۱۰- حفاظت خازن

۱۰-۱- حفاظت خازن‌های فشار متوسط

حفاظت اتصال کوتاه واحدهای خازنی می‌تواند با استفاده از فیوز داخلی یا فیوز خارجی انجام شود که در شبکه‌های توزیع از فیوز خارجی برای حفاظت خازن استفاده می‌شود. در این حالت باید از فیوز با ولتاژ و نرخ قطع مناسب استفاده شود. نرخ جریان و ولتاژ فیوز به مشخصات خازن و همچنین پارامترهای مدار تغذیه وابسته است.

به‌طور کلی عملکرد یک فیوز خارجی توسط دو عامل زیر تعیین می‌شود:

- جریان خطا در فرکانس قدرت ناشی از یک خطای جزئی یا کامل در خازن
- انرژی دشارژ ناشی از هر واحد خازنی موازی با خطا و به نوعی مشارکت در تأمین جریان خطا

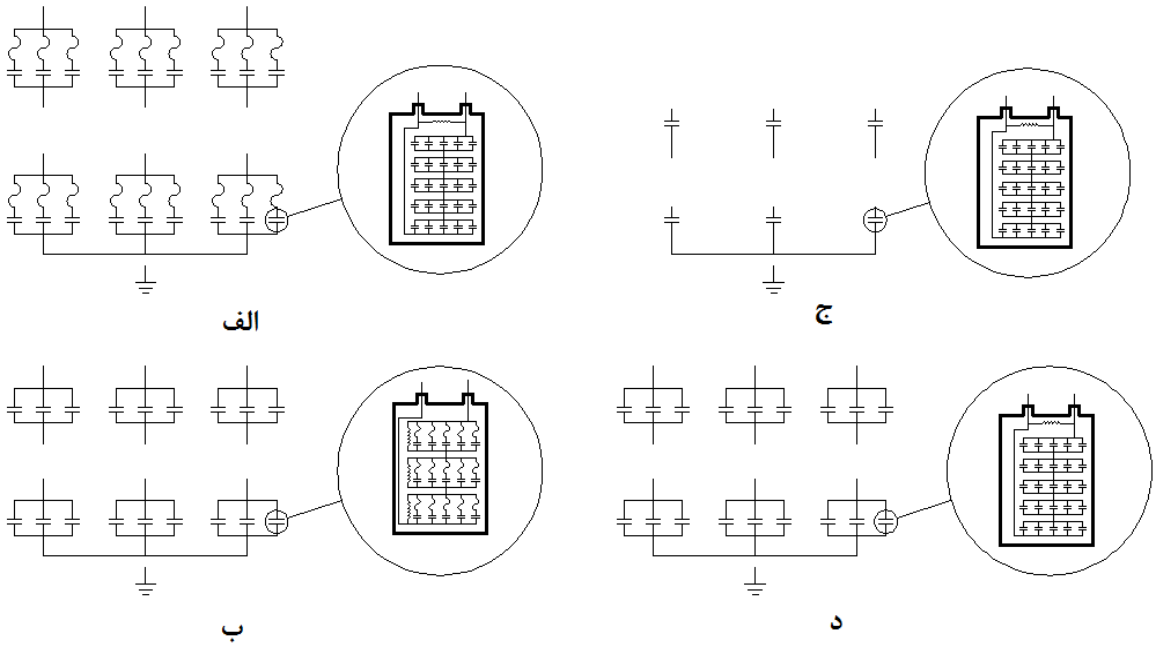
- **انواع فیوزگذاری بانک‌های خازنی** [۱۱]

به‌طور کلی، هر بانک خازنی[1] از مجموعه واحدهای خازنی[2] که در آرایش‌های موازی و سری قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. همچنین، هر واحد خازنی شامل تجهیزات دشارژ داخلی، بوشینگ، محفظه و المان‌های خازنی[3] است. در داخل هر واحد خازنی، آرایش‌های مختلف موازی و سری از المان‌های خازنی وجود دارد. حفاظت بانک‌های خازنی موازی به ساختار، ظرفیت و محدودیت‌های هرکدام از واحدهای خازنی بستگی دارد. به‌طور کلی، سه نوع از اتصالات مربوط به واحدهای خازنی (تأثیرگذار بر عملکرد حفاظتی رله‌ها) شامل موارد زیر است:

- بانک‌های خازنی با فیوز خارجی: فیوزهای مجزا که با هر واحد خازنی سری هستند.
- بانک‌های خازنی با فیوز داخلی: فیوزهای مجزا که با هر المان خازنی در داخل هر واحد خازنی سری هستند.
- بانک خازنی بدون فیوز: ساختار اول این بانک‌ها دارای واحدهای خازنی متصل شده به صورت سری در هر فاز بدون فیوز داخلی یا خارجی است. ساختار دوم این بانک‌ها دارای واحدهای خازنی متصل شده در ساختارهای متنوع سری و موازی در هر فاز بدون فیوز داخلی یا خارجی است.

در شبکه‌های توزیع از بانک‌های خازنی با فیوز خارجی استفاده می‌شود.

[1] Capacitor Bank
[2] Capacitor Units
[3] Element



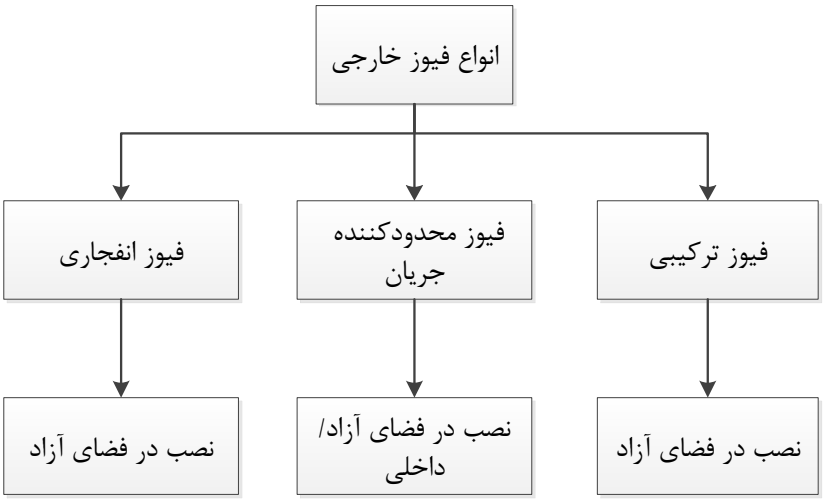
شکل ۱۷ بانک خازنی با اتصال ستاره (Wye)- زمین شده/نشده

الف) فیوز خارجی ب) فیوز داخلی ج) بدون فیوز نوع اول د)بدون فیوز نوع دوم

- **مشخصات فیوز خارجی [۳]**

- جریان نامی: از دیدگاه استانداردهای مختلف، حداقل جریان نامی قابل قبول فیوز ۱/۳۵ برابر و حداکثر ۱/٦۵ برابر جریان نامی خازن است. استاندارد IEC 60549 مشخص می‌کند که جریان نامی فیوز می‌تواند ۱/٤۳ برابر جریان نامی خازن باشد که بین دو عدد ۱/۳۵ و ۱/٦۵ قرار دارد. همچنین برای برخی از بانک‌های خازنی به‌منظور جلوگیری از عملکرد نادرست فیوز ناشی از گذراهای کلیدزنی و یا دلایل مکانیکی، جریان نامی فیوز ممکن است بیشتر از ۱/٦۵ برابر جریان نامی خازن در نظر گرفته شود.
- ولتاژ نامی: مطابق استانداردIEC 60549، ولتاژ نامی فیوز نباید کمتر از ۱/۱ برابر ولتاژ نامی خازن باشد.
- ظرفیت دشارژ: فیوز خارجی باید قادر به تحمل انرژی حاصل از جریان هجومی به دلیل اتصال کوتاه خارجی باشد.

- **انواع فیوز خارجی [۳]**



شکل ۱۸- انواع فیوز خارجی

- *فیوز انفجاری*[1]: ***اطلاعات زیر در مورد فیوزهای انفجاری باید مورد توجه قرار گیرد:***

۱) این نوع از فیوزها به دلیل ایجاد صدا و انتشار گاز در طول عملکرد، در فضای بیرونی[2] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲) این نوع از فیوزها دارای ظرفیت محدود جریان خطا در فرکانس سیستم هستند؛ بنابراین، زمانی که جریان اتصال کوتاه در فیوز از ۱۸۰۰ آمپر بیشتر شود، باید با کارخانه سازنده مشورت شده یا از فیوزهای محدودکننده جریان استفاده شود.

۳) این نوع فیوز دارای توانایی محدود جهت عملکرد در برابر انرژی ناشی از دشارژ خازن-های موازی با خازن اتصال کوتاه شده است. انرژی قابل تحمل فیوزهای استاندارد معمولاً ۱۵ کیلوژول یا کمتر است.

٤) لینک‌های فیوز انفجاری در نوع کند سوز[3] و تند سوز[4] است.

- **فیوزهای محدودکننده جریان**[5]: اطلاعات زیر در مورد فیوزهای محدودکننده جریان باید مورد توجه قرار گیرد:

[1] Expulsion fuse
[2] Outdoor
[3] Type T
[4] Type K
[5] Current-limiting fuses

۱) فیوزهای محدودکننده جریان ممکن است در فضای بیرونی یا داخلی[1] مورد استفاده قرار بگیرند.

۲) این نوع از فیوزها جریان اتصال کوتاه در فرکانس سیستم را به کمتر از مقدار مورد انتظار محدود خواهند کرد.

۳) برخلاف فیوزهای انفجاری، معمولاً این نوع از فیوزها در برابر انرژی ناشی از دشارژ خازن‌های موازی با خازن اتصال کوتاه شده، دارای محدودیت عملکرد نیستند. هرچند، برخی از فیوزهای محدودکننده جریان دارای حداکثر محدودیت برای انرژی موازی هستند که در این صورت باید با سازنده فیوز مشورت شود.

- **فیوزهای ترکیبی**[2]: با توجه به نام به کار برده شده، این فیوزها در مجموع ترکیبی از یک فیوز انفجاری و یک فیوز محدودکننده جریان است.

۱) مشابه با فیوزهای انفجاری، فیوزهای ترکیبی نیز به دلیل ایجاد صدا و انتشار گاز، به‌طور معمول در فضای بیرونی استفاده می‌شود.

۲) مشابه با فیوزهای محدودکننده جریان، فیوزهای ترکیبی، جریان اتصال کوتاه در فرکانس سیستم را به کمتر از مقادیر مورد انتظار محدود می‌کنند.

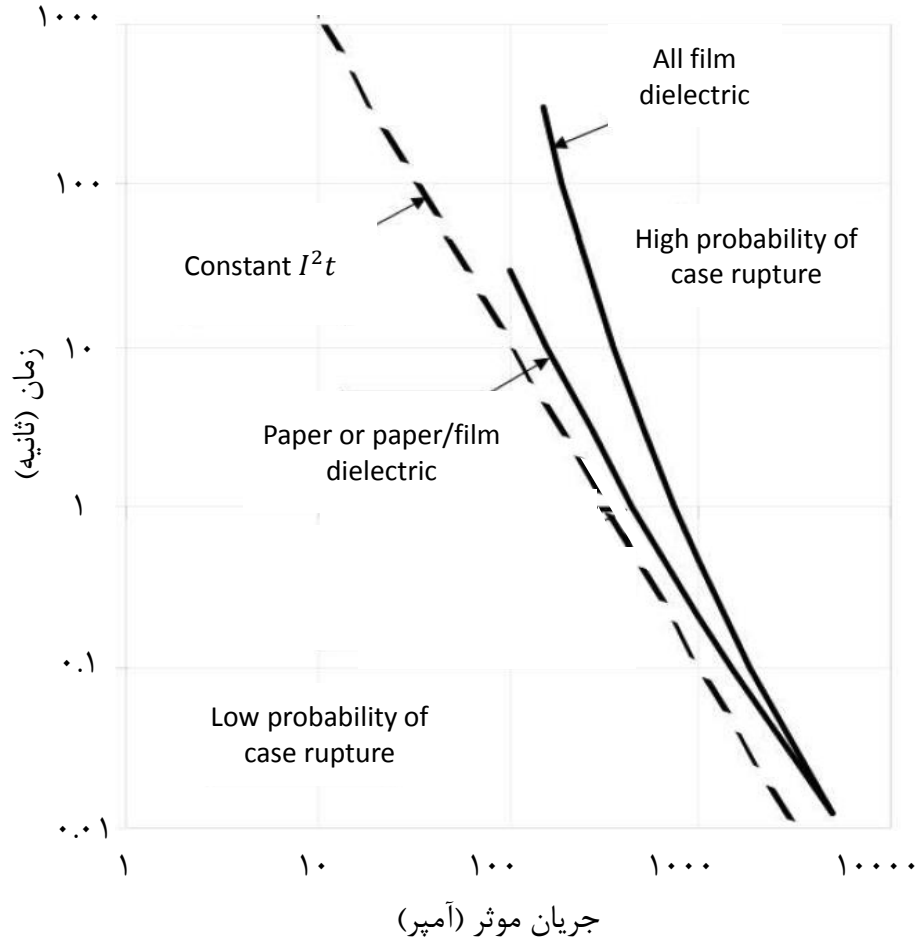
۳) مشابه با فیوزهای محدودکننده جریان، معمولاً این نوع از فیوزها در برابر انرژی ناشی از دشارژ خازن‌های موازی با خازن اتصال کوتاه شده، دارای محدودیت عملکرد نیستند. هرچند، برخی از فیوزهای ترکیبی دارای حداکثر محدودیت برای انرژی موازی هستند که در این صورت باید با سازنده فیوز مشورت شود.

- **تأثیر آرایش بانک خازنی بر انتخاب فیوز [۳]**

- در بانک‌های با اتصال ستاره زمین شده و مثلث، از آنجایی که خازن اتصال کوتاه شده در معرض جریان‌های خطای شدید و انفجار نگهدارنده فیوز یا بدنه خازن قرار می‌گیرند، به‌طور معمول استفاده از فیوزهای ترکیبی و محدودکننده جریان موردنیاز است.
- در بانک خازنی دارای اتصال ستاره زمین نشده، وجود خازن‌های موازی تعیین‌کننده نوع فیوز (انفجاری یا محدودکننده جریان) است.

[1] Indoor
[2] Combination current-limiting/expulsion fuses

- علاوه بر ملاحظات فوق، فیوز باید با منحنی انفجار بانک‌های خازنی هماهنگ شود. این منحنی‌ها در برخی از استانداردها و مستندات ارائه شده توسط سازنده خازن‌ها موجود هستند.



شکل ۱۹- نمونه‌ای از منحنی انفجار بانک خازنی

۱۰-۲- حفاظت خازن‌های فشار ضعیف [۱]

حفاظت اتصال کوتاه هر پله از بانک خازنی توسط فیوز انجام می‌شود. فیوزها باید از نوع HRC[1] باشند. عملکرد مطمئن این فیوزها نیازمند در نظر گرفتن ملاحظات زیر است:

- قابلیت تحمل جریان هجومی تا ۱۰۰ برابر جریان نامی خازن
- قابلیت تحمل جریان بهره‌برداری پیوسته تا ۱/۵ برابر جریان نامی خازن (با در نظر گرفتن هارمونیک)

[1] High Rapture Capacity

- قابلیت تحمل افزایش ولتاژ تا ۱/۲ برابر در حین دوره‌های کم باری به مدت ۵ دقیقه
- قابلیت تحمل تلرانس ظرفیت (و درنتیجه تلرانس جریان) ۱۵٪+
- قابلیت تحمل نوسان معمولی ولتاژ تا ۱/۱ برابر در مدت ۸ ساعت

بنابراین جریان نامی فیوز به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که:

- جریان‌های هجومی، المنت فیوز را ذوب یا تخریب نکنند.
- اضافه جریان‌های بالقوه، منجر به عملکرد نابهنگام فیوز نشوند.

به‌منظور حفاظت اتصال کوتاه مطمئن از خازن، جریان نامی فیوزهای gG و gN، ۱/٦ تا ۱/۸ برابر جریان نامی واحد خازنی یا بانک خازنی انتخاب می‌شود. در صورت نیاز به حفاظت اضافه‌بار، روش‌های مناسب دیگری باید در نظر گرفته شود. [۱۲]

توجه: سطح مقطع کابل‌ها، بر اساس جریان نامی فیوز انتخاب می‌شوند.

فیوزهای مناسب برای خازن‌های فشار ضعیف با ظرفیت و سطح ولتاژ مختلف در جدول ٤ پیشنهاد داده شده است.

جدول ٤- انتخاب فیوز بر اساس ظرفیت خازن فشار ضعیف

ولتاژ نامی سیستم (V)	٤٠٠	٥٢٥	٦٩٠
ولتاژ نامی فیوز (V)	٥٠٠ (β=٢/٥)	٦٩٠ (β=٢)	١٠٠٠ (β=١/٥)
توان راکتیو خازن (kVAR)	جریان نامی فیوز (A)		
Q ≤ ٥ kVAR	١٦		
٥ < Q ≤ ٧,٥ kVAR	٢٠		
٧,٥ < Q ≤ ١٢,٥ kVAR	٣٢(٣٥)	٣٢(٣٥)	
١٢,٥ < Q ≤ ٢٠ kVAR	٥٠		٣٢(٣٥)
٢٠ < Q ≤ ٢٥ kVAR	٦٣	٥٠	
٢٥ < Q ≤ ٣٠ kVAR	٨٠	٦٣	٥٠
٣٠ < Q ≤ ٤٠ kVAR	١٠٠	٨٠	٦٣
٤٠ < Q ≤ ٥٠ kVAR	١٢٥	١٠٠	٨٠
٥٠ < Q ≤ ٦٠ kVAR	١٦٠	١٢٥	١٠٠
٦٠ < Q ≤ ٨٠ kVAR	٢٠٠	١٦٠	١٢٥
٨٠ < Q ≤ ١٠٠ kVAR	٢٥٠	٢٠٠	١٦٠
١٠٠ < Q ≤ ١٢٥ kVAR	٣١٥	٢٥٠	٢٠٠
١٢٥ < Q ≤ ١٦٠ kVAR	٤٠٠	٣١٥	٢٥٠
١٦٠ < Q ≤ ٢٠٠ kVAR	٥٠٠	٤٠٠	٣١٥
٢٠٠ < Q ≤ ٢٥٠ kVAR	٦٣٠	٥٠٠	٤٠٠

همچنین می‌توان از فرمول تقریبی زیر برای محاسبه جریان نامی فیوز استفاده کرد:

$$I_n^{fuse} = \beta \times Q_C \qquad (١٩)$$

که I_n^{fuse} جریان نامی فیوز، Q_C ظرفیت نامی خازن بر حسب کیلووار است و ضریب β (با واحد $\frac{A}{kvar}$) با توجه به سطح ولتاژ و بر اساس جدول فوق تعیین می‌شود.

توجه شود که در صورت استفاده از راکتورهای سری با خازن، تغییرات جریان خازن باید در نظر گرفته شود.

همچنین باید از یک کلید اتوماتیک (MCCB) برای حفاظت کل بانک خازنی استفاده نمود [۱].

۱۰-۳- حفاظت اضافه ولتاژ خازن‌های فشار متوسط

خازن‌هایی که در معرض اضافه ولتاژهای بسیار شدید قرار می‌گیرند باید توسط برقگیر حفاظت شوند. هدف از نصب برقگیر، محدود کردن اضافه ولتاژها به سطوحی قابل قبول برای حفاظت تجهیزات است. برقگیرهای مورد استفاده باید تا حد امکان نزدیک خازن نصب شوند [٤ و ٥]. این اضافه ولتاژهای شامل موارد زیر است [۳]:

اضافه ولتاژ ناشی از موج صاعقه: در گذشته برقگیرها، بین فاز و زمین یا نقطه خنثی و زمین، با هدف حفاظت در مقابل موج‌های صاعقه مورد استفاده قرار می‌گرفتند. برقگیرها بر مبنای حداکثر جریان صاعقه و مشخصات سیستم شامل امپدانس خط، سطح عایقی خط و ... انتخاب می‌شود. ازآنجایی‌که خازن‌ها اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه را کاهش می‌دهند، برقگیرها عموماً به‌منظور حفاظت از بانک خازنی استفاده نمی‌شوند.

اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی: گذراهای ناشی از کلید زنی به دلیل فرکانس کمتر نسبت به صاعقه، ممکن است منجر به آسیب دیدن خازن شود که در این حالت استفاده از برقگیر می‌تواند مفید باشد.

اضافه ولتاژهای موقت: خازن‌های در معرض اضافه ولتاژهای موقت با فرکانس سیستم می‌تواند توسط اتصال موازی برقگیرها با هریک از خازن‌ها، حفاظت شود.

ولتاژ بهره‌برداری پیوسته تجهیزات نباید از ۸۰ درصد ولتاژ نامی برقگیر مورد استفاده بیشتر باشد. [۳] همچنین به‌منظور رعایت محدودیت ولتاژ گام، توصیه می‌شود از حلقه پد نیز در سیستم زمین استفاده شود.

۱۱- الزامات نصب خازن در محیط‌های دارای هارمونیک

گسترش استفاده از بارهای غیرخطی موجب به وجود آمدن آلودگی هارمونیکی در شبکه‌های توزیع می‌شوند. این آلودگی هارمونیکی ممکن است باعث رخداد پدیده تشدید در بانک‌های خازنی گردد. یک بانک خازنی یک مدار رزونانس را با المان‌های اندوکتیو سیستم تشکیل می‌دهد. فرکانس رزونانس طبیعی ممکن است زمانی که کلیدزنی یک بانک خازنی انجام می‌شود، به وجود آید و موجب افزایش ولتاژ و جریان و همچنین آسیب به دیگر خازن‌ها، برقگیرها، ترانسفورماتورها و فیوزها شود. این اثرات مخرب ناشی از رزونانس زمانی رخ می‌دهد که بانک خازنی مجهز به کلید دارای زمان قوس طولانی باشد.

فرکانس رزونانس طبیعی به‌طور ساده به اندوکتانس سیستم و ظرفیت بانک خازنی مربوط است:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (۲۰)$$

f فرکانسی است که در آن دامنه راکتانس سلفی سیستم با راکتانس خازنی بانک برابر است و مسیری با امپدانس پایین، برای عبور جریان فراهم می‌کند. اگر فرکانس نامی سیستم برابر f_0 باشد، فرکانس رزونانس (تشدید) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = n\omega_0 \qquad (۲۱)$$

در این فرمول n یک مقدار مثبت است و $\omega = 2\pi f$ و $\omega_0 = 2\pi f_0$.

$$n = \frac{1}{\omega_0\sqrt{LC}} \qquad (۲۲)$$

درنتیجه، رزونانس هارمونیکی بانک خازنی با توجه به اندازه و ظرفیت اتصال کوتاه سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n = \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2 LC}} = \sqrt{\frac{1/\omega_0 C}{\omega_0 L}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \approx \sqrt{\frac{Z_c}{Z_{sys}}} \qquad (۲۳)$$

نصب خازن در شبکه دارای هارمونیک باعث افزایش اندازه هارمونیک‌ها می‌شود. به منظور جلوگیری از مشکلات رزونانس، فرکانس رزونانس تا حد امکان بایستی از فرکانس‌های هارمونیک با دامنه‌های قابل توجه دور نگه داشته شود. رایج‌ترین راه‌حل برای جلوگیری از مشکلات رزونانس نصب یک راکتور به صورت سری با خازن (با فرکانس رزونانس سری کمتر از پایین‌ترین فرکانس هارمونیک ولتاژ و جریان در شبکه) است. در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس tuning، امپدانس مجموعه خازن و راکتور دارای ماهیت خازنی و در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس tuning، امپدانس ذکرشده دارای ماهیت اندوکتیو است [۷].

به طور کلی خازن دارای راکتور سری نباید با خازن بدون راکتور، موازی شود.

در صورتی که هارمونیک جریان خارج از محدود مجاز باشد، راهکارهای زیر می‌توان مورد استفاده قرار گیرد [۸ و ۹]:

- تغییر محل نصب یا ظرفیت خازن
- اتصال راکتور سری با خازن
- خارج کردن خازن از مدار در زمان‌هایی که احتمال وقوع پدیده رزونانس وجود دارد
- عدم اتصال نقطه خنثی خازن‌ها به زمین
- استفاده از فیلتر در صورتی که راهکارهای فوق مؤثر نباشند.

- **محاسبه راکتور موردنیاز در خازن‌گذاری فشار ضعیف [۱]:**

یکی از راهکارهای مقابله با اثر هارمونیک بر خازن نصب راکتور سری با خازن است. درصورتی‌که THD جریان بیشتر از ۱۰ درصد باشد، باید راکتورهای Detune با خازن سری شود. در صورت استفاده از راکتورهای با هسته آهنی، اشباع احتمالی و گرمای مازاد هسته ناشی از هارمونیک باید مورد توجه قرار گیرد. در دوره کم باری که افزایش ولتاژ بیشتری ناشی از وجود خازن وجود دارد، اشباع هسته ترانسفورماتورها می‌تواند قابل توجه باشد. در این حالت، هارمونیک‌های با دامنه‌های غیر نرمال تولید می‌شوند که ممکن است یکی از آن‌ها به دلیل رزونانس بین ترانسفورماتور و خازن تقویت شود [٤].

در طول فیدرهای کابلی فشار ضعیف (در جعبه شالترها، تابلوهای تقسیم و ...)،فیلتر Detune، خازن و راکتور باید در محفظه مناسب با درجه حفاظت خارجی IP54 مورد استفاده قرار گیرند. این محفظه که شامل خازن و راکتور و فیوزهای حفاظتی خواهد بود، اصطلاحاً محفظه واحد یا Unipak نامیده می‌شود.

کلیه بانک‌های خازنی نصب شده در پست‌های توزیع (که دارای اتصال مثلث می‌باشند)باید همراه با راکتورهای Detune هارمونیک پنجم مورد استفاده قرار گیرند. افزایش مداوم مقدار هارمونیک در شبکه‌های مدرن موجب الزام نصب راکتور سری Detune در خازن‌گذاری پست‌های توزیع شده است. در شبکه توزیع فشار ضعیف، به دلیل استفاده از اتصال مثلث برای خازن‌ها، جریان هارمونیک مرتبه سوم از خازن‌ها عبور نمی‌کند، درنتیجه توصیه می‌شود که Detune نمودن برای فرکانس‌های هارمونیک پنجم و بالاتر انجام شود. به‌کارگیری راکتورهای Detune کننده باعث می‌شود که خازن در فرکانس نامی شبکه رفتار خازنی و در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس رزونانس، رفتار سلفی داشته باشد. لذا بانک خازنی دیگر در معرض عبور جریان‌های هارمونیکی بزرگ و مرتبه بالا قرار نخواهد داشت. فرکانس Detune باید کمتر از فرکانس هارمونیک‌های غالب شبکه انتخاب شود.

برای طراحی راکتور Detune کننده، ابتدا باید ضریب Detune را از رابطه زیر محاسبه نمود:

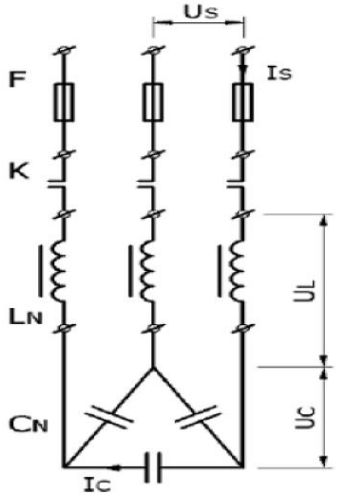
$$p\% = 100 \times \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2 \qquad (۲٤)$$

که در این رابطه f_n، فرکانس نامی شبکه و f_r، فرکانس رزونانس یا Detune است.

معمولاً فرکانس رزونانس در رابطه فوق، ۱۸۹ هرتز انتخاب می‌شود . بدین ترتیب:

$$p\% = 100 \times \left(\frac{50}{189}\right)^2 = 7\% \qquad (۲۵)$$

لذا در جبران‌سازی خازنی شبکه، اعم از فشار ضعیف، فشار متوسط و پست‌ها، از این پس ضریب Detune برابر ۷ درصد انتخاب خواهد شد.



شکل ۲۰- مدار بانک خازنی دارای راکتور

پس از محاسبه ضریب Detune (p%)، راکتانس خازن محاسبه می‌شود:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_n C} \quad (۲۶)$$

سپس راکتانس سلف از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$X_L = p\% \frac{X_c}{3} \quad (۲۷)$$

درنتیجه اندوکتانس موردنیاز برابر است با:

$$L_d = \frac{X_L}{2\pi f_n} \quad (۲۸)$$

همچنین، سایر پارامترهای نشان داده شده در شکل ۲۰ که مدار طراحی‌شده به صورت acceptor را نمایش می‌دهد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_s^{new} = \frac{U_s}{\sqrt{3}\left(\frac{X_c}{3} - X_L\right)} \quad (۲۹)$$

تبصره: خازن به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که حداقل ۱/۳ برابر جریان RMS نامی خود را تحمل کند. بیشتر سازندگان این مقدار را ۱/۵ برابر اعلام می‌کنند که در تیپ‌های مختلف تا حدود ۳ برابر نیز افزایش می‌یابد. در انتخاب راکتور باید به هماهنگی و تطابق جریان آن با جریان خازن توجه داشت.

$$U_C^{new} = \frac{U_S}{1-p} \quad (۳۰)$$

$$Q_C^{new} = 3\frac{(U_C^{new})^2}{X_c} = 3\frac{(U_S)^2}{X_c(1-p)^2} = \frac{Q_C^{old}}{(1-p)^2} \quad (۳۱)$$

$$Q_L = 3X_L {I_s}^2 \quad (۳۲)$$

$$Q_{Total} = Q_{CNew} - Q_L = \frac{Q_C^{old}}{1-p} \quad (۳۳)$$

مثال: با فرض وجود مؤلفه‌های هارمونیکی غیرمجاز ۵، ۷، ۱۱ و ۱۳، محاسبات راکتور سری با یک خازن ۱۲٫۵ کیلووار سه فاز با اتصال مثلث و ولتاژ نامی ٤٤٠ به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\mathbf{X_c} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2\pi f_n C}} = \frac{3U_n^2}{Q_c} = \frac{3(440)^2}{12500} = 46.47\ \Omega$$
$$\mathbf{X_L} = \mathbf{p\%}\frac{\mathbf{X_c}}{\mathbf{3}} = 7\%\frac{46.47}{3} = 1.084\ \Omega$$
$$\mathbf{L_d} = \frac{\mathbf{X_L}}{\mathbf{2\pi f_n}} = \frac{1.084}{100\pi} = 3.451\ \text{mH}$$

برای سهولت در انجام محاسبات می‌توان از جدول ۵ برای تعیین میزان اندوکتانس استفاده کرد.

جدول ۵- اندوکتانس راکتور (P=7%)

توان راکتیو خازن (kVar)	ولتاژ نامی خازن: ٤٠٠ ولت			ولتاژ نامی خازن: ٤٤٠ ولت		
	راکتانس خازن (Ω)	راکتانس سلف (Ω)	اندوکتانس سلف (mH)	راکتانس خازن (Ω)	راکتانس سلف (Ω)	اندوکتانس سلف (mH)
۵	۹٦	۲٫۲٤	۷٫۱۳	۱۱٦٫۱٦	۲٫۷۱	۸٫٦۳
۷٫۵	٦٤	۱٫٤۹	٤٫۷۵	۷۷٫٤٤	۱٫۸۱	۵٫۷۵
۱۰	٤۸	۱٫۱۲	۳٫۵۷	۵۸٫۰۸	۱٫۳٦	٤٫۳۱
۱۲٫۵	۳۸٫٤	۰٫۹۰	۲٫۸۵	٤٦٫٤٦	۱٫۰۸	۳٫٤۵
۲۰	۲٤	۰٫۵٦	۱٫۷۸	۲۹٫۰٤	۰٫٦۸	۲٫۱٦
۲۵	۱۹٫۲	۰٫٤۵	۱٫٤۳	۲۳٫۲۳	۰٫۵٤	۱٫۷۳
۳۰	۱٦	۰٫۳۷	۱٫۱۹	۱۹٫۳٦	۰٫٤۵	۱٫٤٤
٤۰	۱۲	۰٫۲۸	۰٫۸۹	۱٤٫۵۲	۰٫۳٤	۱٫۰۸
۵۰	۹٫٦	۰٫۲۲	۰٫۷۱	۱۱٫٦۲	۰٫۲۷	۰٫۸٦

با فرض این‌که ولتاژ سیستم ٤۰۰ ولت باشد، جریان خط بانک خازنی قبل و پس از نصب راکتور برابر است با:

$$I_s^{old} = \frac{\sqrt{3}\,U_s}{X_C} = \frac{\sqrt{3}(400)}{46.47} = 14.9\ A$$
$$\mathrm{I_s^{new}} = \frac{\mathrm{I_s^{old}}}{1-\mathrm{p\%}} = \frac{14.9}{1-0.07} = 16.02\ \mathrm{A}$$

مشاهده می‌شود که پس از نصب راکتور سری، جریان خط ۷,۵ درصد افزایش یافته است.

و ولتاژ خازن پس از نصب راکتور برابر است با:

$$U_C^{new} = \frac{U_S}{1-p\%} = \frac{400}{1-0.07} = 430.1\ v$$

توان راکتیو خازن‌ها و توان راکتیو مجموعه خازن و راکتور به ترتیب ۱۵,٦ و ۷,۵ درصد افزایش یافته است.

$$Q_C^{old} = Q_n \left(\frac{U_s}{U_n}\right)^2 = 12.5 \left(\frac{400}{440}\right)^2 = 10.33\ kvar$$

$$Q_C^{new} = \frac{Q_C^{old}}{(1-p\%)^2} = \frac{10.33}{(1-0.07)^2} = 11.94\ kvar$$

$$Q_T^{new} = \frac{Q_C^{old}}{1-p\%} = \frac{10.33}{1-0.07} = 11.1\ kvar$$

۱۲- الزامات بهره‌برداری

۱۲-۱- شرایط بهره‌برداری نرمال

برخلاف اکثر تجهیزات سیستم قدرت، خازن‌های موازی در زمان برق‌دار بودن، به طور مداوم در بار کامل (یا با کمی اختلاف به دلیل تغییرات ولتاژ و فرکانس) بهره‌برداری می‌شوند. طول عمر یک خازن توسط تنش‌های بیش از حد، گرمای زیاد، تغییرات شیمیایی، آسیب‌های فیزیکی و تغییرات مکرر دما تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در نتیجه کنترل شرایط بهره‌برداری (دما، ولتاژ و جریان) خازن باید همواره مورد توجه قرار گیرد. خازن‌های موازی موجب افزایش ولتاژ در نقطه‌ای که نصب شده می‌شوند و معمولاً در یک اضافه ولتاژ بیشتر نسبت به دیگر تجهیزات قرار می‌گیرند. در نتیجه، ولتاژ نامی خازن و اضافه ولتاژ مجاز بهره‌برداری از خازن‌ها نسبت تجهیزات دیگر سیستم بیشتر در نظر گرفته می‌شود [٦ و ۹]. شرایط بهره‌برداری عادی از خازن‌ها شامل موارد زیر است [٤ و ۵]:

- ولتاژ باقیمانده در زمان اتصال مجدد خازن به شبکه: این ولتاژ نباید از ۱۰ درصد ولتاژ نامی تجاوز کند.
- ارتفاع محل نصب خازن: ارتفاع خازن‌های فشار ضعیف نباید از ۲۰۰۰ متر و ارتفاع خازن‌های فشار متوسط نباید از ۱۰۰۰ متر تجاوز کند.
- دسته‌بندی دمای محیط: خازن‌ها در دسته‌بندی‌های دمایی تقسیم می‌شوند که هر کدام توسط یک عدد (نشان دهنده کمترین دمای مجاز محیط) و یک حرف (نشان دهنده بیشترین دمای مجاز

محیط) مطابق جدول ۵ مشخص می‌شود. دسته‌بندی‌های دمایی بازه ۵۰- تا ۵۵+ درجه سانتی‌گراد را پوشش می‌دهد.

کمترین دمای محیط برای بهره‌برداری از خازن می‌تواند یکی از مقادیر ۵+، ۵-، ۲۵-، ۴۰-، ۵۰- انتخاب شود. برای استفاده indoor، مقدار حداقل دمای ۵-، پیشنهاد می‌شود.

مقادیر جدول ٦، مبتنی بر شرایطی است که در آن خازن بر روی دمای محیط تأثیر نمی‌گذارد (برای مثال نصب به صورت outdoor). اگر خازن بر روی دمای هوا تأثیر داشته باشد، تهویه و یا انتخاب خازن باید طوری باشد که محدودیت این جدول حفظ شود. دمای هوای خنک‌کننده در این حالت نباید محدودیت‌های دمایی موجود در جدول را بیش از ۵ درجه سانتی‌گراد نقض کند. هر ترکیبی از مقادیر بیشینه و کمینه می‌تواند برای دسته‌بندی دمای استاندارد خازن انتخاب شود. برای مثال، ۴۰/A- یا ۵/C- . دسته‌بندی دمای معمول شامل ، ۴۰/A- ، ۲۵/A- ، ۵/A- و ۵/C- است.

جدول ٦- دسته‌بندی دماهای استاندارد خازن

نماد	دمای محیط		
	بیشینه	بیشترین میانگین طی دوره	
		۲٤ ساعت	۱ سال
A	٤۰	۳۰	۲۰
B	٤۵	۳۵	۲۵
C	۵۰	٤۰	۳۰
D	۵۵	٤۵	۳۵

مقادیر دمای بیشتر از مقادیر فوق می‌توانند در کاربردهای خاصی با توافق سازنده و خریدار در نظر گرفته شود. در چنین حالتی، دسته‌بندی دما باید توسط ترکیبی از دمای بیشینه و کمینه مشخص شود. برای مثال ۴۰/٦۰-

زمانی که دمای محل نصب خازن کمتر از مقدار مجاز گردد، ممکن است تخلیه جزئی اولیه در دی‌الکتریک رخ دهد. این شرایط در عملکردهای کلیدزنی دارای اهمیت است.

- **ولتاژ نامی خازن**

ولتاژ نامی خازن (با در نظر گرفتن تأثیر حضور خود خازن) باید حداقل برابر با ولتاژ بهره‌برداری (سرویس) شبکه در نقطه اتصال خازن باشد. در صورت استفاده از راکتورهای سری با خازن به منظور کاهش تأثیر هارمونیک، ولتاژ در ترمینال خازن افزایش بیشتری خواهد داشت. برای تعیین ولتاژ مورد انتظار روی ترمینال خازن، ملاحظات زیر باید در نظر گرفته شود [٤ و ۵]:

- خازن‌های موازی موجب افزایش ولتاژ از منبع تا محل نصب خازن می‌شوند. این افزایش ولتاژ ممکن است به دلیل وجود هارمونیک، بیشتر هم باشد؛ بنابراین، خازن‌ها باید توانایی بهره‌برداری در یک ولتاژ بالاتر از مقدار اندازه‌گیری قبل از متصل کردن خازن‌ها را داشته باشند.
- ولتاژ روی ترمینال خازن ممکن است در شرایط کم باری شبکه به طور ویژه‌ای بالا باشد. در چنین حالتی، برخی یا کل خازن‌ها باید به منظور جلوگیری از استرس روی خازن‌ها و افزایش اضافه ولتاژ در شبکه، از مدار خارج شوند.

تنها در حالت اضطراری خازن‌ها می‌توانند در بیشینه ولتاژ مجاز و بیشینه دمای محیط به طور همزمان بهره‌برداری شوند. از در نظر گرفتن حاشیه اطمینان بیش از حد در انتخاب ولتاژ نامی باید خودداری شود؛ چون این عامل منجر به کاهش در توان راکتیو خروجی در مقایسه با توان راکتیو نامی خواهد شد.

- **حداکثر ولتاژ مجاز**
- **ولتاژهای بلندمدت**

واحدهای خازنی باید قادر به تحمل ولتاژ بهره‌برداری مطابق جدول ۷ باشند [٤ و ٥].

جدول ۷- ولتاژ قابل تحمل خازن در فرکانس نامی

ولتاژ پریونیت قابل تحمل در فرکانس نامی	بیشینه دوره
۱	پیوسته
۱/۱۰	۸ ساعت از ٢٤ ساعت *
۱/۱۵	۳۰ دقیقه از ٢٤ ساعت
۱/۲۰	۵ دقیقه
۱/۳۰	۱ دقیقه

*در خازن‌های فشار متوسط ۱۲ ساعت در ٢٤ ساعت در نظر گرفته شود.

تعداد مجاز تحمل اضافه ولتاژ بیشتر از ۱/۱۵ برابر ولتاژ نامی، حداکثر ۲۰۰ بار در طول عمر خازن است.

- **اضافه جریان مجاز**

واحدهای خازنی باید قادر به تحمل ۱/۳ برابر جریان نامی خازن (در فرکانس و ولتاژ نامی) باشند. این مقدار با در نظر گرفتن تلرانس ظرفیت خازن (۱/۱ برابر ظرفیت نامی)، می‌تواند به ۱/٤۳ برابر جریان نامی برسد [۵ و ٦].

اضافه جریان‌ها ممکن است به دلیل افزایش ولتاژ در فرکانس سیستم یا وجود هارمونیک‌ها ایجاد شود. یکسوسازها، تریستورها و هسته‌های ترانسفورماتور اشباع شده، منبع اصلی هارمونیک‌ها است [٤].

اگر جریان خازن از مقدار مجاز فراتر برود، درحالی‌که ولتاژ در محدوده مجاز باشد، تمهیدات لازم جهت حذف هارمونیک غالب باید صورت گیرد [٤]. روش‌های زیر ممکن است در کاهش جریان تأثیرگذار باشند:

- جابه‌جایی برخی یا کل خازن‌ها به بخش‌های دیگر سیستم
- اتصال یک راکتور سری با خازن برای کاهش فرکانس رزونانس مدار به یک مقدار کمتر از هارمونیک اعوجاجی
- افزایش مقدار ظرفیت خازن در جایی که خازن نزدیک به یکسوساز وصل شده است.

- **ظرفیت خازن**

تفاوت ظرفیت خازن فشار ضعیف با ظرفیت نامی آن باید در محدوده زیر باشد [٤]:

- ٥- تا ١٠+ برای واحدها و بانک‌های تا ١٠٠ کیلووار
- ٥- تا ٥+ برای واحدها و بانک‌های بیشتر از ١٠٠ کیلووار

در واحدهای ٣ فاز فشار ضعیف، نسبت بیشینه به کمینه مقادیر ظرفیت اندازه‌گیری شده بین ترمینال‌های خط نباید بیشتر از ١,٠٨ باشد.

همچنین تفاوت ظرفیت خازن فشار متوسط با ظرفیت نامی آن باید در محدوده زیر باشد [٥]:

- ٥- تا ١٠+ برای واحدهای خازنی
- ٠ تا ١٠+ برای بانک‌های خازنی

در واحدها و بانک‌های ٣ فاز فشار متوسط، نسبت بیشینه به کمینه مقادیر ظرفیت اندازه‌گیری شده بین ترمینال‌های خط نباید بیشتر از ١,٠٥ باشد.

- **محاسبه ظرفیت خازن سه فاز**

اگر ظرفیت‌های اندازه‌گیری شده بین ترمینال‌های دو خط یک خازن سه فاز با اتصال مثلث یا ستاره به صورت Ca، Cb، Cc در نظر گرفته شوند، توان راکتیو خروجی می‌تواند با تقریب قابل قبولی توسط رابطه زیر محاسبه شود [٤ و ٥]:

$$Q = \frac{2}{3}(C_a + C_b + C_c)\omega {U_N}^2 \times 10^{-12} \qquad (٣٤)$$

در رابطه بالا، C_a، C_b، C_c، ظرفیت خازن، U_N، ولتاژ بر حسب ولت و Q، توان راکتیو بر حسب مگاوار است.

- **توان راکتیو خازن در شرایط بهره‌برداری**

توان راکتیو خروجی خازن می‌تواند با استفاده از رابطه زیر محاسبه شوند [۹]:

$$Q_{OP} = \frac{(2\pi f c)V_A^2}{1000} \qquad (۳۵)$$

در رابطه بالا، Q_{OP}، توان راکتیو بهره‌برداری خازن بر حسب کیلووار، V_A، ولتاژ بهره‌برداری بر حسب ولت، f، فرکانس تغذیه بر حسب هرتز و C، ظرفیت خازن بر حسب فاراد است.

توان راکتیو خروجی بر اساس ولتاژ بهره‌برداری واقعی متغیر خواهد بود که ممکن است نسبت به مقدار نامی متفاوت باشد. توان راکتیو بهره‌برداری می‌تواند بر اساس رابطه زیر محاسبه شود:

$$Q_{OP} = Q_R(\frac{V_A}{V_R})^2 \qquad (۳۶)$$

در رابطه بالا، Q_{OP}، توان راکتیو بهره‌برداری خازن بر حسب کیلووار، Q_R، توان راکتیو نامی خازن، V_A، ولتاژ بهره‌برداری و V_R، ولتاژ نامی است.

مقدار ظرفیت نامی خازن‌ها بر اثر پدیده خودترمیمی[۲۵] و تبخیر شدن پوشش هادی فیلم‌های پروپیلنی ناشی از وقوع اضافه ولتاژهای گذرا و جریان‌های هجومی در طی بهره‌برداری، کاهش می‌یابد [۱]. این کاهش نباید از مقادیر مجاز مذکور تجاوز نماید.

- **نصب خازن در شرایط ویژه:**

در شرایط ویژه شامل موارد زیر توصیه می‌شود با سازنده خازن مشورت شود [۵]:

- رطوبت بالای محیط
- محیط‌های دارای خوردگی
- محیط‌های دارای آلودگی
- ارتفاع غیرمجاز
- مناطق زلزله‌خیز

[25] Self-Healing

۱۲-۲- الزامات تعمیر و نگهداری

- **کلیات**

در این بخش ملاحظات کلی برای تعمیرات و بازرسی بانک‌های خازنی موازی ارائه شده است. همه بانک‌های خازنی باید در طول دوره بهره‌برداری (در هنگام نصب اولیه و همچنین به صورت دوره‌ای) مورد بازدید قرار گیرند. ازآنجایی‌که بانک‌های خازنی در محفظه‌ای بسته قرار دارند، تنها یک بازدید چشمی نمی‌تواند شرایط همه واحدهای خازنی داخل بانک خازنی را مشخص کند.

- **ایمنی و حفاظت پرسنل**

آموزش و تمرینات ایمنی مناسب باید در طول نصب، بازدید و تعمیرات خازن‌ها در نظر گرفته شود. علاوه بر این، روش‌هایی وجود دارند که مختص خازن‌ها بوده و باید برای حفاظت پرسنل و تجهیزات به کار گرفته شوند (این روش‌ها بر اساس مرجع National Electrical Safety Code (NESC) (ANSIC2) هستند)؛ بنابراین، رعایت الزامات زیر ضروری است:

- **زمین کردن و رعایت فاصله مجاز:** بعد از تخلیه بانک خازنی، حداقل پس از ۵ دقیقه می‌توان به آن نزدیک شد. این زمان به دلیل فراهم ساختن زمان کافی به منظور اتلاف انرژی ذخیره‌شده در خازن از طریق مقاومت‌های دشارژ داخلی است. این مقاومت‌ها باید ولتاژ واحد خازنی را به کمتر از ۵۰ ولت در مدت زمان حداکثر ۵ دقیقه کاهش دهند. حتی بعد از تخلیه بانک خازنی (به منظور اطمینان از عدم وجود انرژی ذخیره‌شده) توصیه می‌شود قبل از تماس پرسنل، واحدهای خازنی زمین شوند (در برخی از شرایط، خرابی مقاومت داخلی می‌تواند مقداری انرژی ذخیره‌شده روی هر واحد خازنی باقی بگذارد).
- **واحدهای خازنی متورم شده:** تورم قابل‌توجه واحدهای خازنی نشان‌دهنده فشار داخلی زیاد ناشی از حرارت بیش از حد یا وجود گاز به دلیل شرایط احتمالی جرقه است. این واحدهای خازنی باید با دقت بررسی شوند و در صورت لزوم با کارخانه سازنده در مورد نحوه بررسی این نوع از واحدهای خازنی مشورت شود.
- **واحدهای خازنی دارای نشتی**: در زمان بررسی خازن‌های دارای نشتی مایع، از تماس مایع با پوست و نواحی حساس بدن مثل چشم جلوگیری شود.
- **مایع قابل احتراق**: برخی از واحدهای خازنی دارای مایع قابل احتراق هستند و مکان آن‌ها باید بر اساس ملاحظات مربوط به امکان آتش‌سوزی و مهار آن در هنگام رخداد خرابی خازن، انتخاب شود. در مرجع National Electrical Code (NEC) (NFPA Std 70) این محدودیت‌های مکانی بیان شده‌اند.

- **برق‌دار کردن مجدد**: وقتی‌که یک خازن پس از تعمیرات، مورد بهره‌برداری مجدد قرار می‌گیرد، باید دقت شود که تمامی اتصال کوتاه‌ها و اتصالات زمین مربوط به تعمیرات حذف شوند. برق‌دار کردن مجدد بانک‌های خازنی، با رعایت فاصله زمانی حداقل ۵ دقیقه (به‌منظور وجود زمان کافی برای تخلیه انرژی ذخیره‌شده) مجاز است. برای حالتی که نیاز به برق‌دار کردن مجدد سریع باشد، باید اجازه داد تا ولتاژ به کمتر از ۱۰ درصد مقدار نامی کاهش یابد. این حالت موجب افزایش جریان هجومی حداکثر تا ۱۰ درصد خواهد شد و معمولاً قابل قبول است. بسته به ولتاژ نامی خازن، این کار معمولاً به ۲ تا ۳ دقیقه زمان نیاز دارد.

- **بازدید، اندازه‌گیری و برق‌دار کردن اولیه خازن**

بازدید اولیه باید شامل موارد زیر باشد:

- اتصالات مکانیکی تجهیزات بانک خازنی برای رعایت فاصله مجاز الکتریکی مناسب و استقامت مکانیکی بررسی شود.
- پیشنهاد می‌شود پیش از نصب خازن جدید، ظرفیت آن به‌منظور ارزیابی کیفیت و مقایسه‌های آینده، اندازه‌گیری شود.
- اتصالات الکتریکی به صورت صحیح و استاندارد باشد. باید پیچ و مهره‌های ترمینال واحد خازنی به درستی محکم شده باشد و اتصالات فیوزها به‌منظور اطمینان از اتصال مطمئن بررسی شود.
- تمام عایق‌ها، فیوزها و بوشینگ‌ها باید برای جلوگیری از بروز تخلیه سطحی، تمیز شوند.
- عایق‌ها و بوشینگ‌ها به‌منظور عدم وجود ترک یا شکست بازدید شود.
- بوشینگ‌ها و محفظه‌های آسیب دیده برای شناسایی عوامل نشتی بازدید شود.
- تمام تجهیزات کلیدزنی و اتصالات زمین قبل از برق‌دار کردن خازن بازدید شود.
- ۸ تا ۲٤ ساعت پس از برق‌دار کردن خازن، زمان مناسبی برای بازرسی فیوز، محفظه و تعادل فاز خازن است.

- **بازدید، اندازه‌گیری و تعمیرات دوره‌ای**

بانک‌های خازنی در طی دوره بهره‌برداری باید مورد بازدید، اندازه‌گیری‌های الکتریکی و تعمیرات دوره‌ای قرار بگیرند. تعداد و زمان بازدیدها باید بر اساس شرایط و نیازهای محلی (شامل شرایط زیست‌محیطی، مدت زمانی که بانک خازنی در حال بهره‌برداری است و تعداد قطع و وصل‌های بانک خازنی) تعیین شود.

بازدیدهای چشمی باید شامل موارد زیر باشد:

- عدم وجود فیوز خازنی تخریب‌شده، نشتی‌های محفظه خازنی، تغییر رنگ محفظه‌ها و محفظه-های متورم و تخریب‌شده
- عدم وجود مایع دی‌الکتریک بر روی سطح زمین در محدوده نصب خازن
- عدم وجود آلودگی در سطوح عایقی و ترک در بوشینگ‌ها
- عدم وجود علائم ناشی از گرم شدن بیش از حد اتصالات الکتریکی
- بررسی کردن کلیدها و تجهیزات حفاظتی

اندازه‌گیری و بازدیدهای فیزیکی باید شامل موارد زیر باشد:

- بازدید اتصالات قطع‌شده، فرسودگی الکترودها، وضعیت ظاهری بانک خازنی
- بازدید فیوزها به‌منظور تشخیص حرارت بیش از حد یا دیگر خسارت‌ها
- بازدید تنظیمات و عملکرد مناسب تجهیزات کنترلی و حفاظتی، سوئیچ‌ها و ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان
- رنگ‌آمیزی تجهیزاتی که در معرض آب‌وهوا قرار می‌گیرند به‌منظور جلوگیری از خوردگی
- اندازه‌گیری واحدهای خازنی و مقایسه با اعداد قبلی اندازه‌گیری شده

- **آزمون میدانی**

آزمون‌های میدانی بر روی خازن‌ها ممکن است شامل آزمون‌های جریان، ظرفیت خازنی و مقاومت عایقی است. واحدهای خازنی ممکن است در طول آزمون‌های ولتاژ بالا دچار تخریب شوند؛ بنابراین حفاظ مناسبی باید جهت جلوگیری از آسیب به پرسنل و تجهیزات مجاور به دلیل رخداد خطاهای مربوط به واحدهای خازنی در طول آزمون باید فراهم شود. آزمون معمولاً باید در دمای اتاق به‌منظور اجتناب از خسارت به دی‌الکتریک خازن انجام شود. اتصال کوتاه کردن ترمینال‌های واحد خازنی مورد آزمایش به‌منظور تخلیه خازن، کمتر از ۵ دقیقه بعد از قطع ولتاژ آزمون، موجب آسیب دیدن خازن می‌شود. قبل از انجام هر آزمون، باید دستورالعمل کارخانه با دقت، مطالعه و بررسی شود.

آزمون‌های میدانی ممکن است جهت مشخص کردن شرایط بهره‌برداری یک واحد خازنی انجام شود. چنین آزمون‌هایی تنها در زمان بروز مشکلات یا بعد از وارد آمدن خسارت‌های ممکن، لازم و ضروری است. چندین تجهیز الکتریکی برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی، ضریب قدرت، امپدانس، مقاومت و تحمل ولتاژ در بازار موجود هستند. بعضی از این تجهیزات برای تشخیص واحدهای خازنی باز یا اتصال کوتاه شده مناسب هستند و بعضی از آن‌ها می‌توانند تخلیه جزئی واحدهای خازنی را شناسایی می‌کنند.

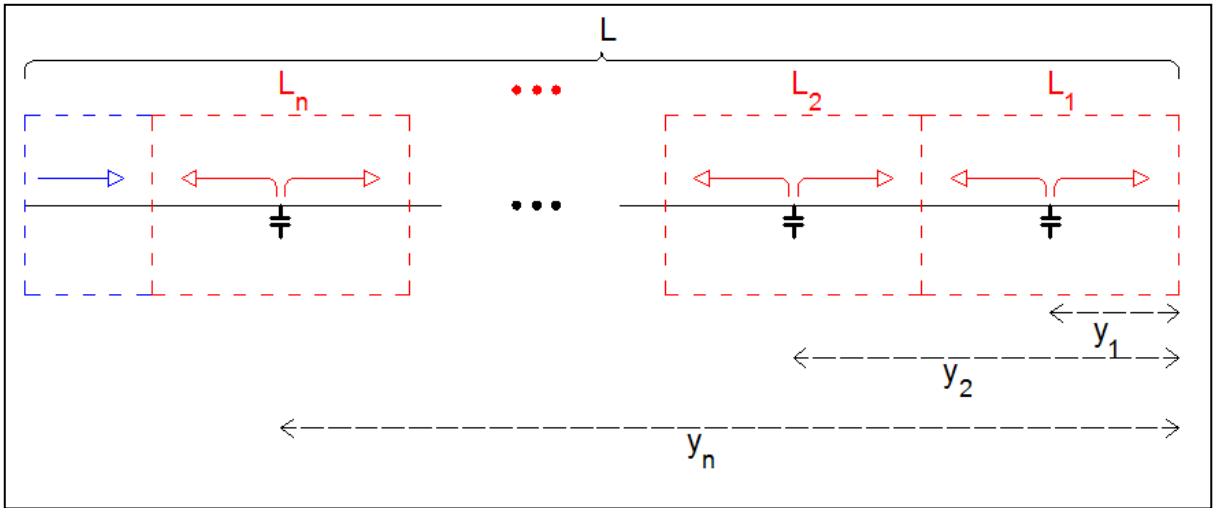
توانایی سرویس‌دهی یک واحد خازنی می‌تواند توسط یک یا چند مورد از آزمون‌های زیر مشخص شود:

- اندازه‌گیری ظرفیت خازنی
- مقاومت عایقی ترمینال به ترمینال
- مقاومت عایقی ترمینال و محفظه
- آزمون نشتی

۱۳- پیوست ها

پیوست ۱- اثبات روش زون بندی

در صورت نصب n خازن در شبکه با فرض یکنواختی بار، سطح مقطع یکسان در طول مسیر و عدم وجود آنتن، سهم جبران‌سازی توان راکتیو هر خازن و شبکه بالاسری به صورت شکل ۱ خواهد بود.



شکل پ ۱-۱- سهم جبران‌سازی توان راکتیو هر خازن و شبکه بالاسری

جدول پ۱-۱- پارامترهای سیستم مورد مطالعه

n	تعداد خازن های نصب شده
q_{c_n}	ظرفیت خازن های نصب شده
Q_{c_n}	مجموع ظرفیت خازن های نصب شده
Q_{min}	مجموع توان راکتیو شبکه در کم باری
Q_{ave}	مجموع توان راکتیو جذب شده از شبکه بالاسری
L_i	طول بخش i ام خط
L	طول خط
r	مقاومت واحد طول خط
k	سهم جبران‌سازی توان راکتیو
y_i	فاصله محل نصب خازن i ام از انتهای شبکه
i_p, i_q	چگالی بار توزیع شده اکتیو و راکتیو شبکه (A/m)
I_p, I_q	بار اکتیو و راکتیو شبکه

با فرض برابر بودن توان راکتیو تولیدی خازن‌های استفاده شده در خط، خواهیم داشت:

$$L_1 = L_2 = \cdots = L_n = L_c \quad (پ-۱)$$

$$L = L_0 + nL_c = (1-k)L + kL \quad (پ-۲)$$

$$Q_{C_n} = min\left(Q_{min} \ , \ \frac{2n}{2n+1}Q_{ave}\right) \quad (پ-۳)$$

(پ-٤)

$$q_c = \frac{Q_{C_n}}{n}$$
$$k = \frac{Q_{C_n}}{Q_{ave}} \quad (پ-۵)$$

$$P_{Loss_0} = \int_0^{L_0} 3r\left(i_p^2(x-L)^2 + i_q^2(x-L_0)^2\right)dx \quad (پ-٦)$$

$$P_{Loss_i} = \int_{L_0+(i-1)L_c}^{L_0+iL_c} 3ri_p^2(x-L)^2dx + 2\int_{L_0+(\frac{2i-1}{2})L_c}^{L_0+iL_c} 3ri_q^2(x-(L_0+iL_c))^2dx \quad (پ-۷)$$

$$P_{Loss} = \sum_{i=0}^{n} P_{Loss_i} = ri_p^2L^3 + ri_q^2L_0^3 + 2nri_q^2\left(\frac{L_c}{2}\right)^3 \quad (پ-۸)$$

$$= ri_p^2L^3 + ri_q^2((1-k)L)^3 + 2nri_q^2\left(\frac{k}{2n}L\right)^3$$
$$= ri_p^2L^3 + ri_q^2L^3\left((1-k)^3 + \frac{(k)^3}{4n^2}\right)$$
$$= rI_p^2L + rI_q^2L\left((1-k)^3 + \frac{(k)^3}{4n^2}\right)$$

همچنین فاصله محل نصب خازن‌ها از ابتدای شبکه برابر خواهد بود با:

$$y_i = \frac{2i-1}{2n}\frac{Q_{C_n}}{Q_{ave}}L = \frac{2i-1}{2n}kL \quad (پ-۹)$$

در نتیجه تعیین مقدار بهینه سهم جبران‌سازی توان راکتیو به منظور رسیدن به حداقل تلفات ممکن، از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\frac{dP_{Loss}}{dk} = 0 \rightarrow \left(3(1-k^*)^2 - \frac{3(k^*)^2}{4n^2}\right) = 0 \rightarrow 1-k^* = \frac{k^*}{2n} \rightarrow \quad (پ-۱۰)$$

$$(2n+1)k^* = 2n \ \rightarrow k^* = \frac{2n}{2n+1} \quad (پ-۱۱)$$

$$L_i{}^* = \begin{cases} \left(\frac{1}{2n+1}\right)L & i = 0 \\ \left(\frac{2}{2n+1}\right)L & 1 \le i \le n \end{cases} \quad (پ-۱۲)$$

$$P_{Loss}{}^* = rI_p^2L + \frac{rI_q^2L}{(2n+1)^2} \quad (پ-۱۳)$$

$$Q_{in_n}{}^* = (1-k^*)Q_{ave} = \left(\frac{1}{2n+1}\right)Q_{ave} \quad (پ-۱٤)$$

$$Q_{c_n} = k^*Q_{ave} = \left(\frac{2n}{2n+1}\right)Q_{ave} \quad (پ-۱۵)$$

$$q_{c_n} = \frac{Q_{c_n}}{n} = \frac{2}{2n+1}Q_{ave} \quad (پ-۱٦)$$

پیوست ۲- صحت سنجی و آنالیز حساسیت روش زون بندی

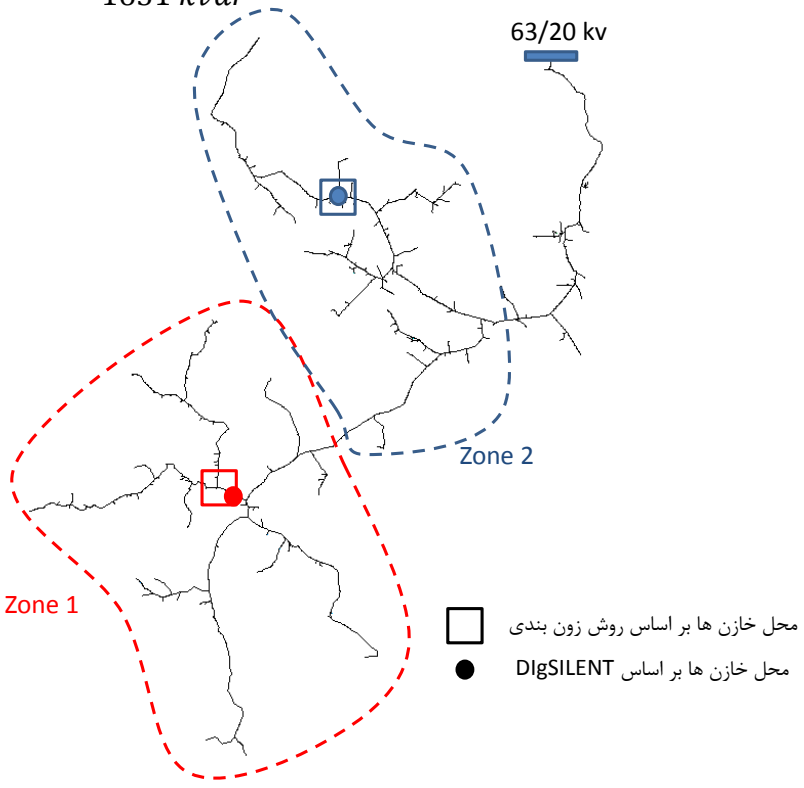
به منظور بررسی دقت نتایج روش زون‌بندی، بر روی فیدر حسن آباد شهرستان سنندج، محاسبات خازنگذاری با استفاده از روش زون‌بندی با محاسبات خازنگذاری توسط نرم افزار DIgSILENT مقایسه گردید. بار اکتیو، بار راکتیو و ظرفیت ترانسفورماتورهای کل فیدر ۳۵۳۰ کیلووات، ۱۶۳۱ کیلووار و ۲۳۰۱۵ کیلوولت آمپر است.

$$q_c = \frac{2}{5} * 1631\ kvar = 652\ kvar$$

با توجه به مقدار توان راکتیو، دو خازن ۶۰۰ کیلوواری پیشنهاد می شود.

محدوده هر زون متناسب با خازن ۶۰۰ کیلوواری، حدوداً ۸۴۶۶ کیلوولت آمپر ترانسقورماتور را پوشش می دهد.

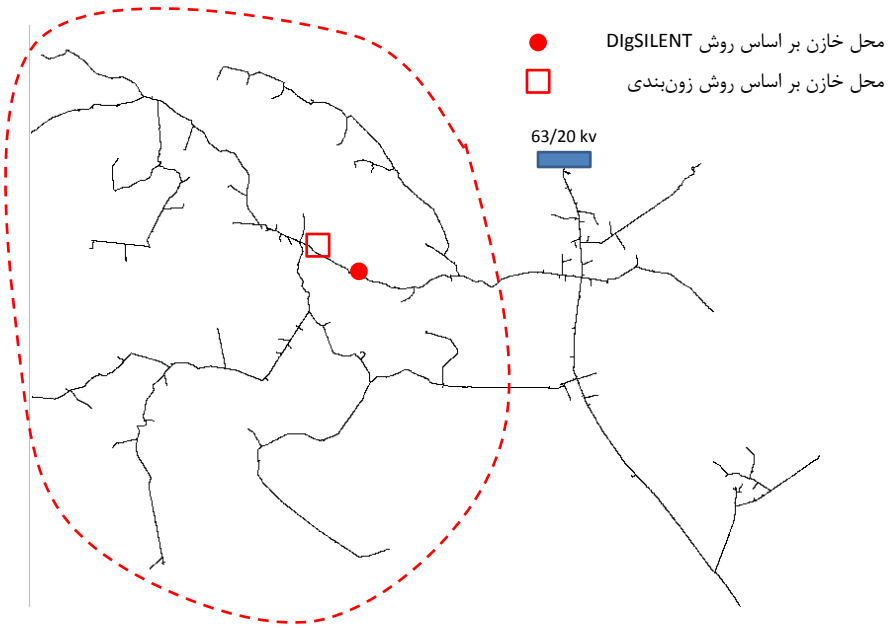
$$S_{zone} = 600\ kvar * \frac{23015\ kva}{1631\ kvar} = 8466\ kva$$



شکل پ ۱ - ۱- صحت سنجی روش زون بندی در فیدر حسن آباد توزیع کردستان

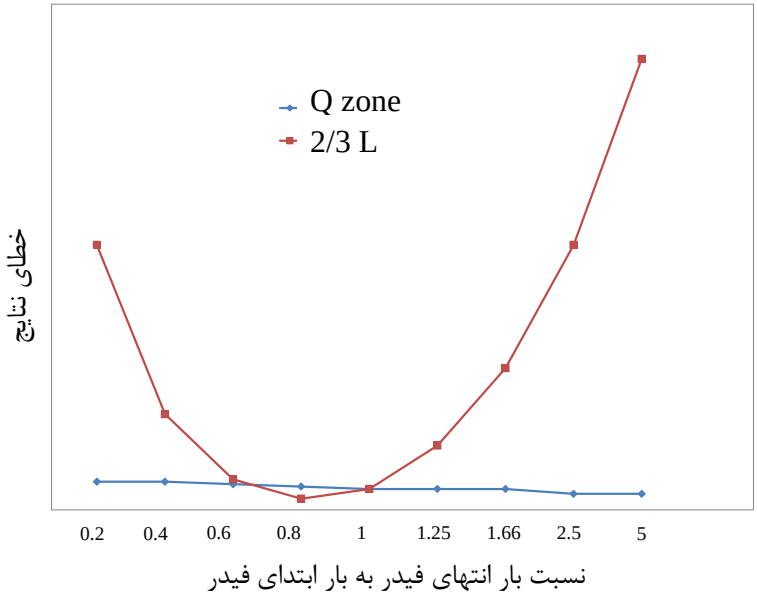
در فیدر مذکور، تلفات قبل از خازنگذاری ۲۱۰ کیلووات بوده که با نصب خازن در محل های پیشنهادی توسط DIgSILENT به مقدار ۱۷۳/۳ کیلووات و با نصب خازن در محل های پیشنهادی روش زون بندی به مقدار ۱۷۵/۴۴ کیلووات می رسد. همچنین با بررسی فیدر کم بار و طولانی (عربخانه از توزیع

خراسان جنوبی)، تلفات قبل از خازنگذاری ۸۹/۶۱ کیلووات بوده که با نصب خازن در محل های پیشنهادی توسط DIgSILENT به مقدار ۸۷/۶۶ کیلووات و با نصب خازن در محل های پیشنهادی روش زون بندی به مقدار ۸۷/۶۳ کیلووات می رسد.



شکل پ ۱ - ۲ صحت سنجی روش زون بندی در فیدر حسن آباد توزیع کردستان

روش ارائه شده در برخی مقالات که محل خازن را بر اساس $\frac{2}{3}$ طول خط، تعیین می شد در شرایط بار توزیع شده یکنواخت، نتایج نسبتاً دقیقی را در پی خواهند داشت. اما دور شدن شرایط شبکه از توزیع یکنواخت بار، دقت این روش به شدت کاهش می یافت. در روش تقریبی ارائه شده در این دستورالعمل، زون بندی بر اساس توان راکتیو بارها انجام شده و در حتی در شرایطی که توزیع بار یکنواخت نباشد نیز نتایج نسبتاً دقیقی را ارائه خواهند داد. شکل خطای روش $\frac{2}{3}$ طول خط و روش زون بندی با نتایج نرم افزار DIgSILENT ، در حالاتی که چگالی بار در ابتدای فیدر یا در ابتدای فیدر بیشتر است مقایسه شده است.



شکل پ ۱ – ۳- خطای روش های زون بندی و ۲/۳ طول در مقایسه با نتایج DIgSILENT

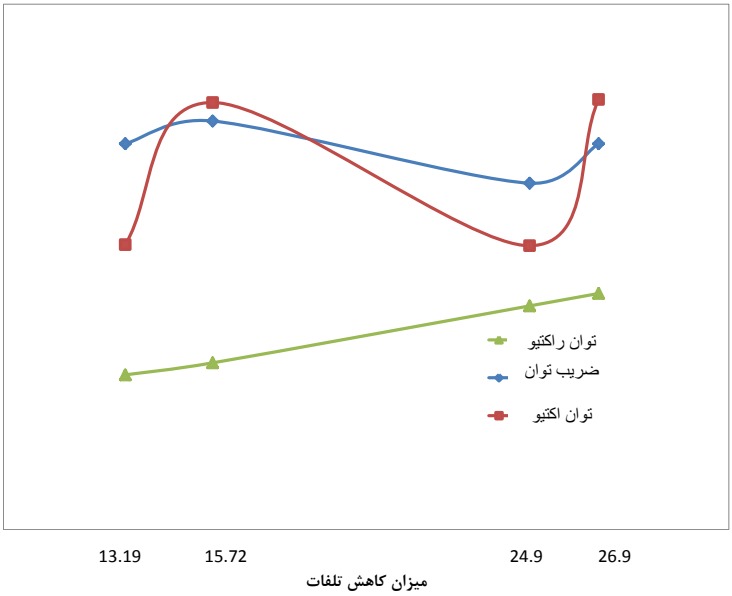
مطابق شکل فوق در شبکه های با توزیع بار یکنواخت روش زون بندی بر اساس بار راکتیو دارای دقت مناسب است.

همچنین با تغییر بارهای اکتیو و راکتیو در فیدرهای با طول یکسان نشان داده شده است که معیار ضریب توان یا معیار توان اکتیو نمی تواند معیار مناسبی برای اولویت بندی فیدرها به منظور کاهش تلفات باشد.

جدول پ ۱-۱ مقایسه کاهش تلفات با تغییرات توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان

طول خط (کیلومتر)	تعداد بار	بار اکتیو (کیلووات)	بار راکتیو (کیلوار)	ضریب توان	توان اکتیو (کیلووات)	توان راکتیو (کیلوار)	تلفات بعد از خازنگذاری (کیلووات)	تلفات قبل از خازنگذاری (کیلووات)	کاهش تلفات (کیلووات)
60	30	60	30	0.89	1865	976	65.57	52.38	13.19
60	30	90	30	0.95	2835	1058	136.29	120.57	15.72
60	30	60	45	0.80	1858	1447	83.73	58.83	24.9
60	30	90	45	0.89	2855	1532	156	129.1	26.9

مطابق شکل زیر فیدرهایی که دارای توان راکتیو بیشتر هستند با نصب خازن مشابه و طول فیدر یکسان، کاهش تلفات بیشتری خواهند داشت.



شکل پ ۱ – ٤ مقایسه کاهش تلفات با تغییرات توان اکتیو، راکتیو و ضریب توان

همچنین با تغییر همزمان طول شبکه و توان راکتیو بارها، نشان داده شده است که معیار ممان توان راکتیو معیار مناسب در خازنگذاری با هدف کاهش تلفات است.

جدول پ ۱-۲ مقایسه کاهش تلفات با تغییرات توان راکتیو و طول فیدر

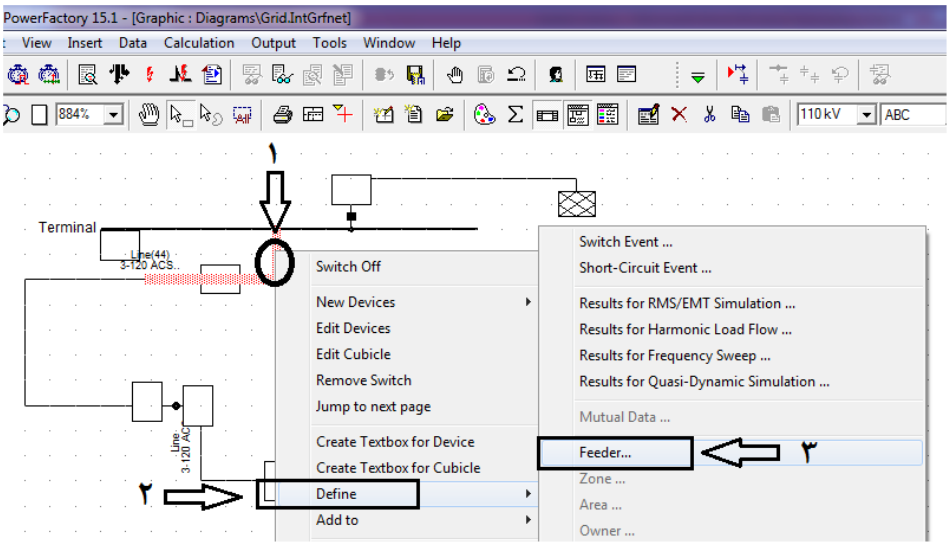
تعداد و توان بارها	طول خط		
	L=30 km	L=60 km	L= 120 km
30*(90kw +j30 kvar)	P=2763 kw Q=973 kvar P0=63 kw dP=7 kw	P=2835 kw Q=1058 kvar P0=136 kw dP=16 kw	P=3018 kw Q=1272 kvar P0=328 kw dP=43 kw
30*(90kw +j60 kvar)	P=2783 kw Q=1897 kvar P0=83 kw dP=18 kw	P=2883 kw Q=2014 kvar P0=183 kw dP=40 kw	P=3200 kw Q=2385 kvar P0=500 kw dP=114 kw

پیوست ۳- راهنمای مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع بر اساس نرم‌افزار DigSILENT

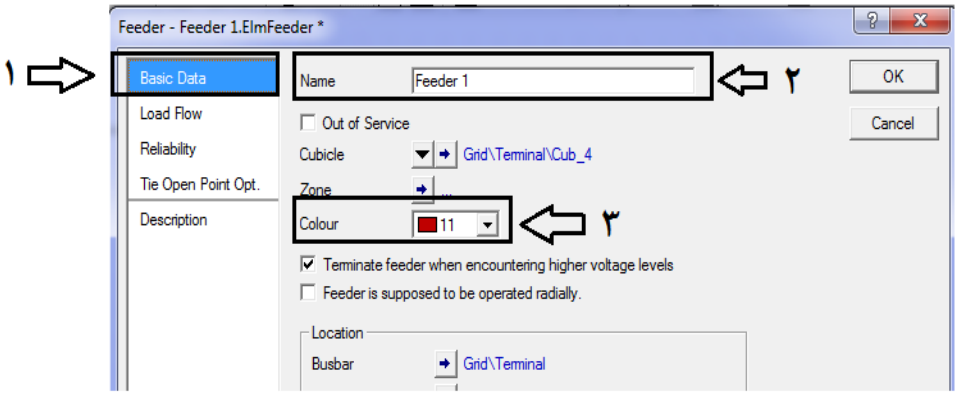
- **روش انجام مطالعات مکان یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع**

قبل از شروع انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه، باید فیدر و یا فیدرهایی را که می‌خواهید بر روی آن‌ها مطالعات انجام گیرد، برای نرم‌افزار تعریف نمایید. برای تعریف فیدر همان‌گونه که در شکل

(۱–پ ۳) نشان داده شده باید در پنجره گرافیکی و از دیاگرام تک‌خطی، به ابتدای شبکه رفته و قبل از جعبه نتایج (Result Box) کلیک راست کرده و سپس از گزینه Define بر روی گزینه Feeder رفته و کلیک راست کنید تا پنجره مربوط به تنظیمات فیدر باز شود (شکل پ ۳–۲). لازم به ذکر است که جهت تعریف فیدر باید از ابتدای شبکه و قبل از جعبه نتایج (Result Box) بر روی هادی یا کابل شبکه (Line) کلیک راست گردد و درصورتی‌که بعد از جعبه نتایج بر روی لاین کلیک راست نمایید، گزینه Feeder غیر فعال خواهد بود (در شکل (۳–پ ۳) مسیر صحیح و اشتباه تعریف فیدر نمایش داده شده است). در مرحله بعد، برای انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه بایستی از نوار ابزار اصلی گزینه optimal capacitor placement انتخاب‌شده (شکل پ ۳–٤) و بعد از کلیک بر روی کلید optimal capacitor placement calculate پنجره مربوط به تنظیمات مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بازشده که در ادامه توضیحات مربوط به تنظیمات این قسمت به‌صورت کامل تشریح خواهد شد.

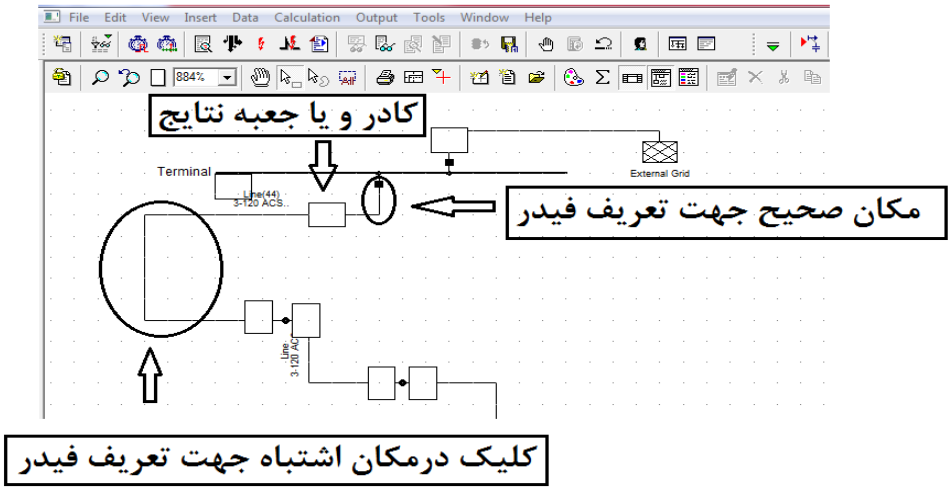


شکل پ ۳–۱: روش تعریف فیدر در شبکه‌های توزیع

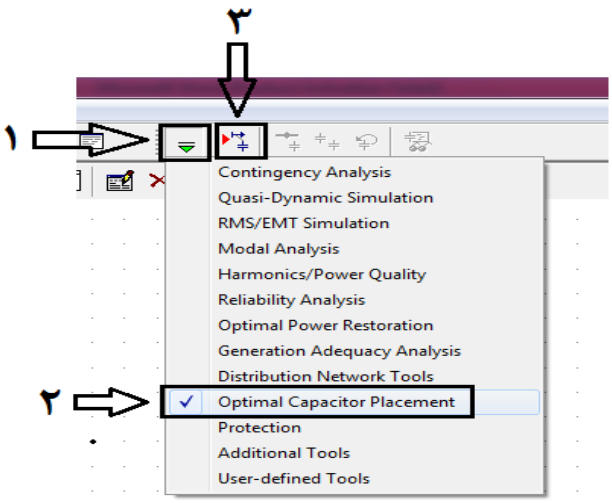


شکل پ ۳–۲: انجام تنظیمات مربوط به پنجره تعریف فیدر در شبکه‌های توزیع

- انتخاب گزینه Basic Data
- انتخاب نام فیدر
- انتخاب رنگ فیدر
-



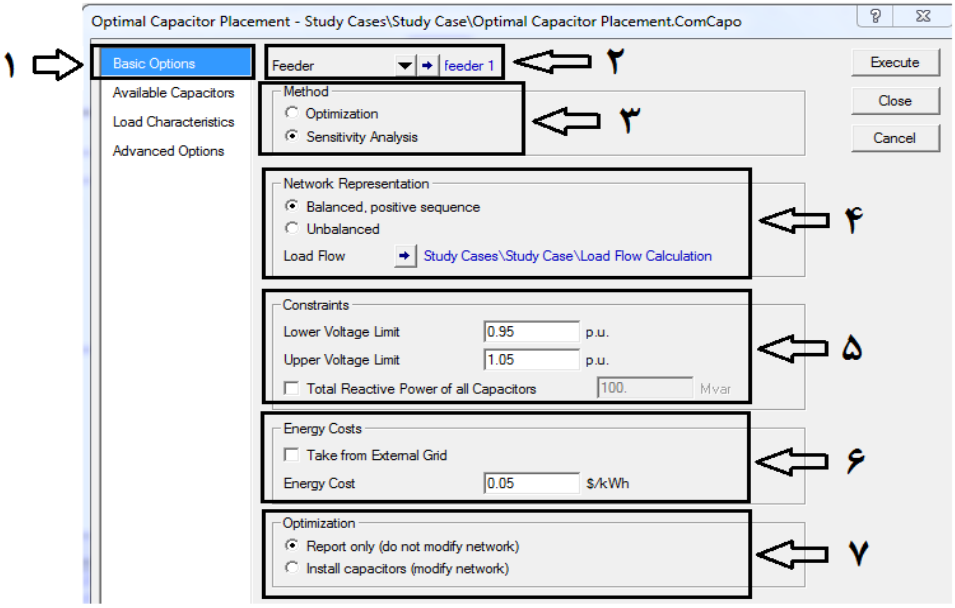
شکل پ ۳-۳: مسیر صحیح و اشتباه تعریف فیدر



شکل پ ۳-٤: مسیر شروع به کار انجام مطالعات خازن‌گذاری

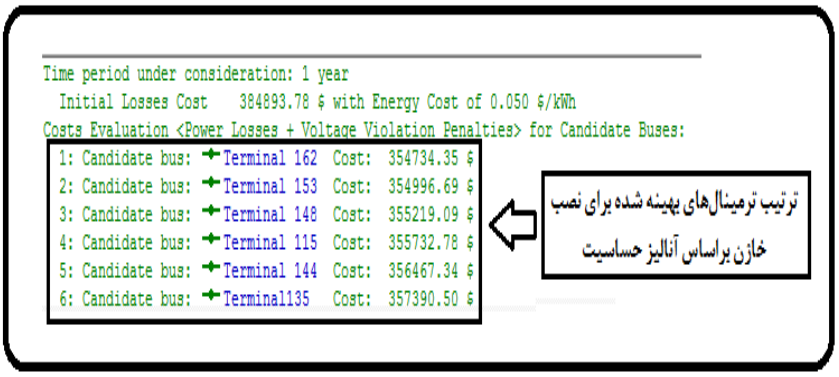
- **تنظیم تب Basic Data برای انجام مطالعات مکان یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع:**

بعد از انجام مراحل مذکور، پنجره تنظیمات مربوط به مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بازشده که تنظیم تب Basic Option (شکل پ ۳-۵) در زیر توضیح داده شده است.



شکل پ ۳-۵: تنظیم تب Basic Data برای انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع

- انتخاب گزینه Basic Option
- انتخاب فیدری که می‌خواهید خازن‌گذاری بر روی انجام گیرد.
- در قسمت Method دو گزینه Optimization و Sensitivity Analysis وجود دارد و درصورتی‌که گزینه Optimization انتخاب گردد محاسبات مربوط به بهینه‌سازی مکان‌یابی خازن انجام خواهد شد که در بخش‌های آتی توضیحات بیشتری در این رابطه ارائه می‌گردد، اما با انتخاب گزینه Sensitivity Analysis، ترمینال‌ها و یا پایه‌هایی را که نصب خازن بر روی آن‌ها بیشترین تأثیر رادارند به ترتیب مشخص خواهد شد (شکل پ ۳-۶).

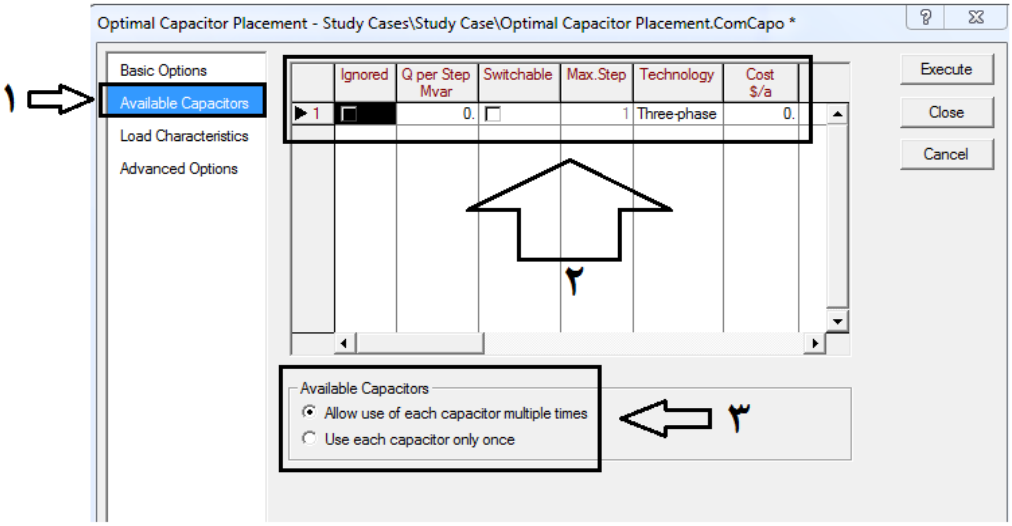


شکل پ ۳-۶: نمونه‌ای از خروجی نرم‌افزار Digsilent برای مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس آنالیز حساسیت

- در قسمت Network Representation دو گزینه Balanced,positive sequence و Unbalanced وجود دارد که قبل از شروع به خازن‌گذاری باید با توجه به ماهیت شبکه نسبت به انجام پخش‌بار Balanced,positive sequence و یا Unbalanced اقدام نمود و سپس قسمت Network Representation را بر اساس آن تنظیم نمود.
- یکی از اهداف مهم خازن‌گذاری افزایش ولتاژ شبکه در نقاطی از شبکه بوده که دارای ضعف ولتاژ می‌باشند بنابراین در قسمت Constraints باید گزینه Lower Voltage Limit را به صورتی تعیین کنید که ضعف ولتاژ شبکه رفع گردد مثلاً درصورتی‌که در این قسمت عدد ۰/۹۵ پریونیت را وارد نمایید، نرم‌افزار به اندازه‌ای خازن در شبکه قرار می‌دهد که ولتاژ از ۰/۹۵ پریونیت کمتر نشود. از طرف دیگر با نصب خازن در شبکه، ولتاژ شبکه افزایش خواهد یافت، بنابراین باید در قسمت Upper Voltage Limit باید بیشترین مقدار افزایش ولتاژ مجاز لحاظ گردد. به‌عنوان مثال درصورتی‌که در این قسمت عدد ۱/۰۵ پریونیت وارد گردد، نرم‌افزار به اندازه‌ای خازن در شبکه قرار می‌دهد که ولتاژ از ۱/۰۵ پریونیت بیشتر نشود.
- در قسمت Energy Cost باید قیمت هر کیلو وات‌ساعت انرژی بر حسب دلار بر کیلووات‌ساعت وارد نرم‌افزار شود. یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها در بحث مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن این است که قیمت هر کیلو وات‌ساعت انرژی به‌صورت صحیح وارد شود و این قیمت باید از دید مشترکینی باشد که می‌خواهید خازن‌گذاری را برای آن‌ها انجام دهید. به‌عنوان مثال قیمت هر کیلو ساعت انرژی برای مشترکین کشاورزی با مشترکین صنعتی متفاوت خواهد بود و مهم این است که قیمت مربوط به هر کیلو وات‌ساعت انرژی به‌صورت دقیق وارد شود. درصورتی‌که هدف خازن‌گذاری بر روی فیدرهای فشار متوسط و یا ضعیف توزیع باشد، در این قسمت باید هزینه تمام‌شده هر کیلو وات‌ساعت انرژی برای شرکت‌های توزیع لحاظ گردد.
- در قسمت Optimization درصورتی‌که هدف فقط گزارش‌گیری از مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن باشد باید گزینه Report Only(do not modify network) انتخاب شود و درصورتی‌که هدف نصب خازن در شبکه باشد باید گزینه Install Capacitors(modify network) انتخاب گردد.

- **تنظیم تب Capacitors Available برای انجام مطالعات مکان یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع:**

در مرحله بعد باید تب Available Capacitors تنظیم شود. در این قسمت باید خازن‌هایی را که در دسترس بوده و امکان نصب آن‌ها در شبکه وجود دارد به همراه هزینه سالانه آن وارد نرم‌افزار نمود. توضیحات مربوط به این قسمت در ادامه به‌تفصیل ذکرشده است (شکل پ ۳-۷).



شکل پ ۳-۷: تنظیم تب Available Capacitors برای انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع

- انتخاب گزینه Available Capacitors
- در قسمت دوم خازن‌هایی را امکان نصب آن‌ها در شبکه وجود دارد تعریف کنید.

۱) درصورتی‌که گزینه Ignored فعال شود خازن موردنظر در مطالعات مربوط به مکان‌یابی بهینه خازن در نظر گرفته نمی‌شود.

۲) در قسمت Q per Step Mvar مقدار ظرفیت خازن‌هایی که قابل دسترس بوده و امکان نصب آن در شبکه وجود دارد را برحسب مگاوار وارد نرم‌افزار کنید.

۳) درصورتی‌که خازن‌های موردنظر سوئیچ شونده باشند باید گزینه Switchable فعال شود.

٤) اگر خازن‌های موردنظر سوئیچ شونده باشند باید در قسمت Max.Step بیشترین پله مربوط به خازن وارد شود.

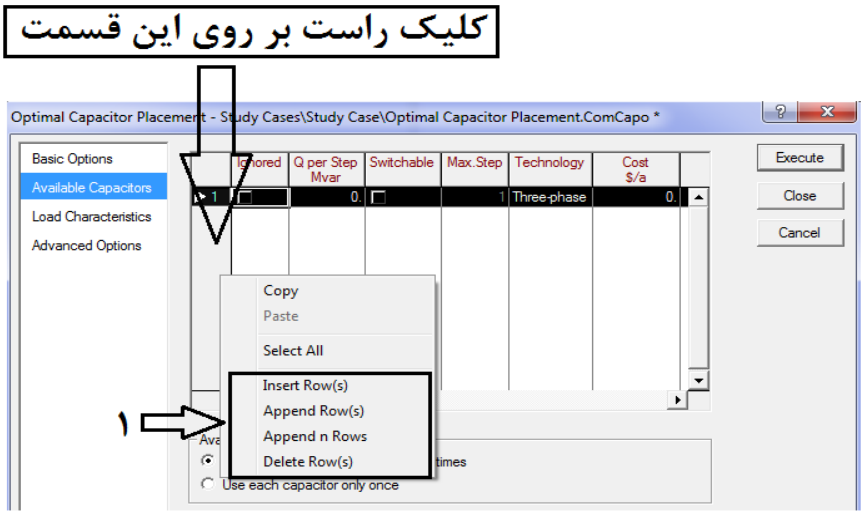
۵) در قسمت Tenology سه فاز و یا تک فاز بودن خازن مشخص می‌گردد.

٦) در قسمت Cost هزینه‌های مربوط به خازن برحسب دلار بر سال وارد نرم‌افزار می‌شود.

- در قسمت Available Capacitors درصورتی‌که بخواهید از هر خازن که در نرم‌افزار تعریف‌شده، در قسمت‌های مختلف شبکه چندین بار استفاده شود، باید تیک گزینه اول فعال شود، این بدان معنی است که محدودیتی در تعداد خازن‌های قابل نصب در شبکه وجود ندارد،

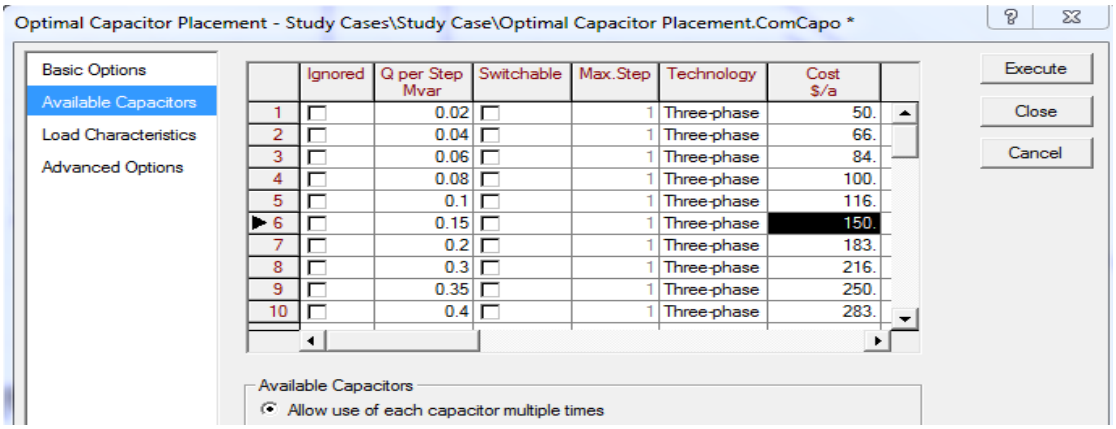
اما درصورتی‌که از هر خازن فقط یک سری در دسترس باشد و محدودیت در تعداد خازن قابل نصب در شبکه باشد و بخواهید از هر خازن فقط یک بار در شبکه نصب شود، باید تیک گزینه دوم یعنی Use each capacitor only once فعال گردد.

نکته: برای تعریف کردن خازن‌های قابل دسترس باید بر روی ناحیه مشخص شده در شکل (۸–پ ۳) کلیک راست کرده و سپس با توجه به تعداد خازن‌های موجود و قابل در دسترس باید ردیف اضافه کرد. در شکل (۹–پ ۳) نمونه‌ای از تعریف خازن‌های مختلف نمایش داده شده است.



شکل پ ۳–۸: نحوه اضافه و یا حذف کردن خازن‌های قابل نصب

- اضافه و یا حذف کردن خازن‌های که امکان نصب آن‌ها در شبکه وجود دارد.
-

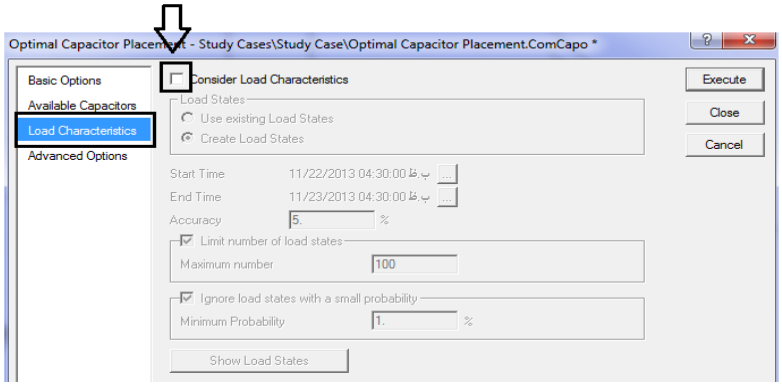


شکل پ ۳–۹: نمونه از تعریف خازن‌های مختلف در نرم‌افزار

- **تنظیم تب Load Characteristics برای انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع**

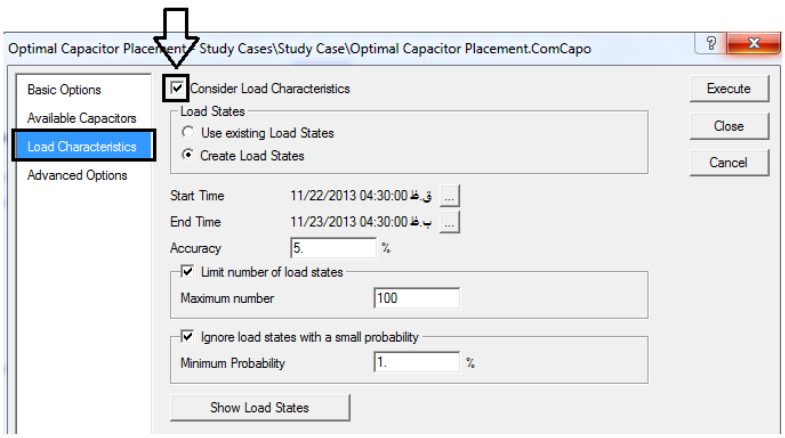
در تب Load Characteristics مشخصه‌های بار قابل تعریف خواهد بود. درصورتی‌که مطالعات بر اساس بار پیک باشد نیازی به تنظیم این تب نبوده و همان‌طور که شکل (پ ۳-۱۰) نمایش داده شده تیک مربوط به گزینه Consider Load Characteristics برداشته می‌شود و تمامی گزینه‌ها غیرفعال خواهد شد، در این صورت وارد کردن مقدار بار پیک، در قسمت Load Flow مربوط به تنظیمات بار کافی است. درصورتی‌که تیک مربوط به گزینه Consider Load Characteristics فعال شود (شکل پ ۳-۱۱)، تابع مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس منحنی بار نسبت به تعیین خازن‌های بهینه عمل می‌نماید. در این حالت دو گزینه "Use existing Load States" و "Create Load States"در دسترس کاربر خواهد بود. در صورت انتخاب گزینه Use existing Load States تابع مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس منحنی بارهایی که برای بارها تعریف‌شده نسبت به تعیین خازن‌های بهینه عمل می‌نماید و در صورت انتخاب گزینه Create Load States می‌توان در این پنجره یک منحنی بار بر اساس تعیین زمان و تاریخ برای بار تعریف نمود.

در صورتی که مطالعات براساس بار پیک باشد این تیک برداشته خواهد شد



شکل پ ۳-۱۰: روش انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس بار پیک

در صورتی که مطالعات براساس منحنی بار باشد تیک این قسمت فعال خواهدشد

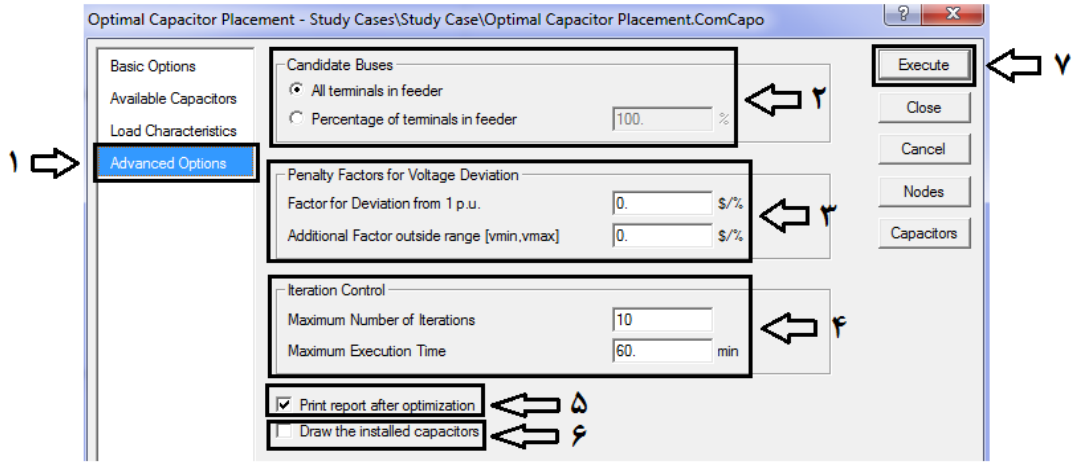


شکل پ ۳-۱۱: روش انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس منحنی بار

نکته: با توجه به اینکه در شرکت‌های توزیع برق در اکثر موارد فقط اطلاعات مربوط به بار پیک پست‌های توزیع و مشترکین مختلف وجود دارد، بنابراین مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس بار پیک انجام می‌گیرد. از طرف دیگر به‌طور معمول خازن‌هایی که در شبکه فشار متوسط هوایی نصب می‌شوند از نوع خازن‌های ثابت است، بنابراین نکته‌ایی بسیار مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد این است که به اندازه‌ای خازن در شبکه نصب شود که در هنگام کم‌باری، شبکه با افزایش ولتاژ مواجه نشود. به عبارت دیگر هنگامی که مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن بر اساس بار پیک باشد، نرم‌افزار بار را به‌صورت یک بار ثابت در نظر می‌گیرد، درصورتی‌که در زمان کم‌باری، مقدار بار خیلی کمتر از زمان پیک خواهد بود، بنابراین خازن‌های پیشنهاد شده بر اساس بار پیک توسط نرم‌افزار، در زمان کم‌باری مشکل‌ساز خواهد بود. درنتیجه برای جلوگیری از افزایش ولتاژ در زمان کم‌باری، باید مطالعات مکان‌یابی خازن بر اساس بار پایه فیدر انجام گیرد.

- **تنظیم تب Advanced Options برای انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع**

آخرین تب مربوط به پنجره تنظیمات مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن، تبAdvanced Option بوده (شکل ۵-۱۲) که در ادامه توضیح داده شده است.



شکل پ ۳-۱۲: تنظیم تب Advanced Option برای انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع

- انتخاب تب Advanced Option
- در قسمت Candidate Buses درصورتی‌که گزینه All Terminal in feeder فعال شود نرم‌افزار تمامی ترمینال‌ها و پایه‌ها را در مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در نظر خواهد گرفت اما درصورتی‌که درصد مشخصی از ترمینال‌ها و یا پایه‌ها در بحث مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن مدنظر باشد باید گزینهPercentage of Terminal in feeder فعال شود.

- با توجه به اینکه یکی از وظایف شرکت‌های توزیع تحویل انرژی با ولتاژ و فرکانس استاندارد است، درصورتی‌که بعد از خازن‌گذاری ولتاژ از حد استاندارد انحراف داشته باشد، مشترکین برق می‌تواند با توجه به قرارداد قبلی از شرکت‌های توزیع برق هزینه‌ای به عنوان جریمه دریافت کنند (این جریمه برای عدول از مقادیر تعریف شده در استاندارد است). این ضریب جریمه به دو صورت در نرم‌افزار تعریف شده است، درصورتی‌که مقدار جریمه بر اساس انحراف از ولتاژ ۱ پریونیت مدنظر باشد باید در گزینه Factor for Deviation From 1 p.u. مقدار جریمه بر حسب دلار بر درصد انحراف وارد شود و درصورتی‌که مقدار جریمه بر اساس انحراف از ولتاژ ماکزیمم و مینیم تعیین شده در استاندارد مدنظر باشد باید در گزینه Additional Factor outside range [vmin. Vmax] مقدار جریمه بر حسب دلار بر درصد انحراف وارد شود، همچنین می‌توان هر دو گزینه را نیز وارد نرم‌افزار کرد که در این صورت جریمه مربوط به هر دو گزینه با هم جمع خواهد شد، البته این بحث به نحوه قرارداد مشترکین با شرکت‌های توزیع برق بستگی دارد. لازم به ذکر است که در حال حاضر با توجه به اینکه در ایران بحث پرداخت جریمه از طرف شرکت‌های توزیع برق به مشترکین به علت انحراف ولتاژ از مقادیر تعیین شده در استاندارد اجرا نمی‌شود، در بحث مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن این مقدار باید صفر در نظر گرفته شود.
- در قسمت Iteration Control حداکثر تعداد تکرار برای حل مسئله پخش بار در قسمت Maximum Number of Iterations وارد نرم‌افزار می‌شود و درصورتی‌که تعداد این تکرارها کم در نظر گرفته شود پیغامی که در شکل (۱۳–پ ۳) نمایش داده شده در پنجره خروجی ظاهر شده و این پیام به این معنی است که تعداد تکرار لازم برای حل مسئله کم بوده و بهینه‌سازی متوقف شده که در این صورت باید تعداد تکرارها افزایش یابد. حداکثر زمان اجرای برنامه در قسمت Maximum Execution Time وارد نرم‌افزار می‌شود و درصورتی‌که این زمان کم در نظر گرفته شود پیغامی که در شکل (۱٤–پ ۳) نمایش داده شده در پنجره خروجی ظاهر شده و این پیام به این معنی است که زمان لازم برای حل مسئله کم بوده و بهینه‌سازی متوقف شده که در این صورت این زمان نیز باید افزایش یابد.
-

```
DIgSI/wrng - The "Maximum Number of Iterations" (see "Advanced Options") is exceeded. The optimization has stopped.
```

شکل پ ۳–۱۳: نمایش پیغام هشدار مبنی بر پایین بودن تعداد تکرار لازم برای اجرای برنامه

```
DIgSI/wrng - The time elapsed exceeds the "Maximum Execution Time" (see "Advanced Options"). The optimization has stopped.
```

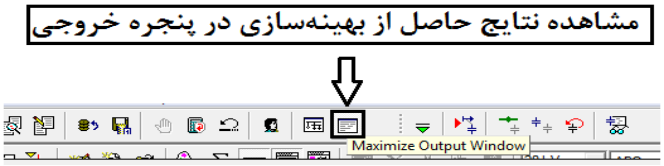
شکل پ ۳–۱٤: نمایش پیغام هشدار مبنی بر پایین بودن حداکثر زمان اجرای برنامه

- درصورتی‌که تیک قسمت Print report after optimization فعال شود بلافاصله بعد از اتمام شبیه‌سازی نتایج مربوطه در پنجره خروجی ظاهر خواهد شد که بخش‌های آتی توضیحات لازم در این رابطه ارائه خواهد شد.
- درصورتی‌که قسمت Draw the installed capacitors فعال گردد خازن‌هایی که توسط تابع مکان‌یابی بهینه خازن به‌عنوان خازن بهینه محاسبه شوند، به‌صورت اتوماتیک بر روی ترمینال شناسایی شده توسط تابع نصب خواهند شد.
- پس از اتمام تنظیمات لازم، با انتخاب گزینه Execute برنامه مربوط به مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن اجرا خواهد شد.

- **بررسی نتایج خروجی مطالعات مکان یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع:**

بعد از اتمام تنظیمات پنجره مربوط به مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع و اجرای این مطالعات نتایج حاصل از بهینه‌سازی در ادامه در ۷ گام توضیح داده شده است.

- **گام اول:** برای مشاهده نتایج خروجی حاصل از انجام مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن از نوار ابزار اصلی بر روی Maximize Output Window نمایید (شکل ۵-۱۵).



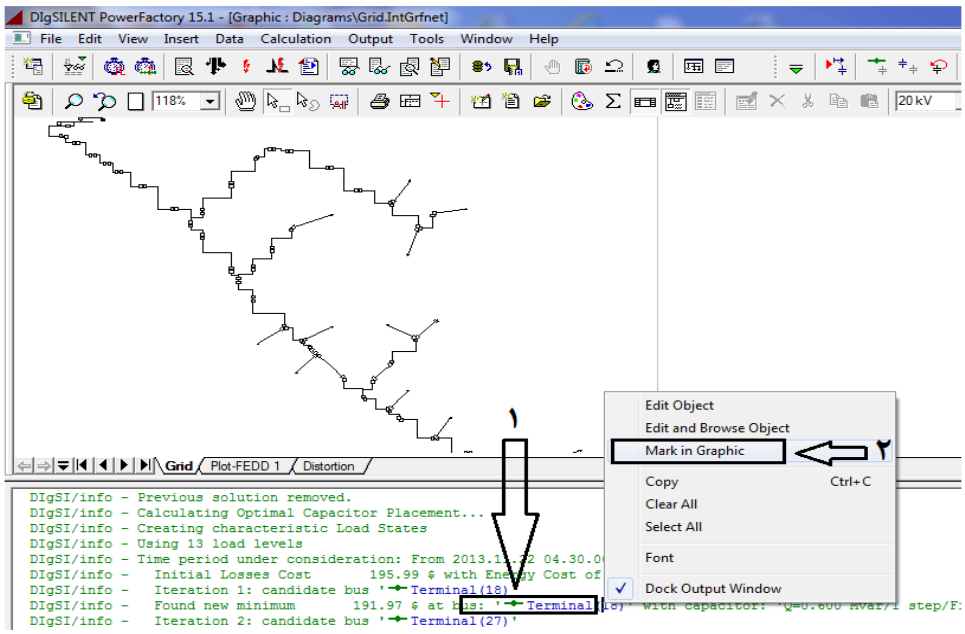
شکل ۵-۱۵: مشاهده نتایج حاصل از مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن

- **گام دوم:** بعد از انجام گام اول، نتایج حاصل از بهینه‌سازی در پنجره خروجی قابل مشاهده باشد همان‌طور که از شکل (۵-۱۶) مشاهده می‌شود دو سری خازن ۰/۶ مگاوار و ۰/۳ مگاوار به ترتیب در ترمینال‌های ۱۸ و ۲۷ پیشنهاد شده است.

```
DIgSI/info -   Iteration 1: candidate bus 'Terminal(18)'
DIgSI/info -   Found new minimum      191.97 $ at bus: 'Terminal(18)' with capacitor: 'Q=0.600 Mvar/1 step/Fixed/3 phases/$533.00'
DIgSI/info -   Iteration 2: candidate bus 'Terminal(27)'
DIgSI/info -   Found new minimum      191.92 $ at bus: 'Terminal(27)' with capacitor: 'Q=0.300 Mvar/1 step/Fixed/3 phases/$100.00'
```

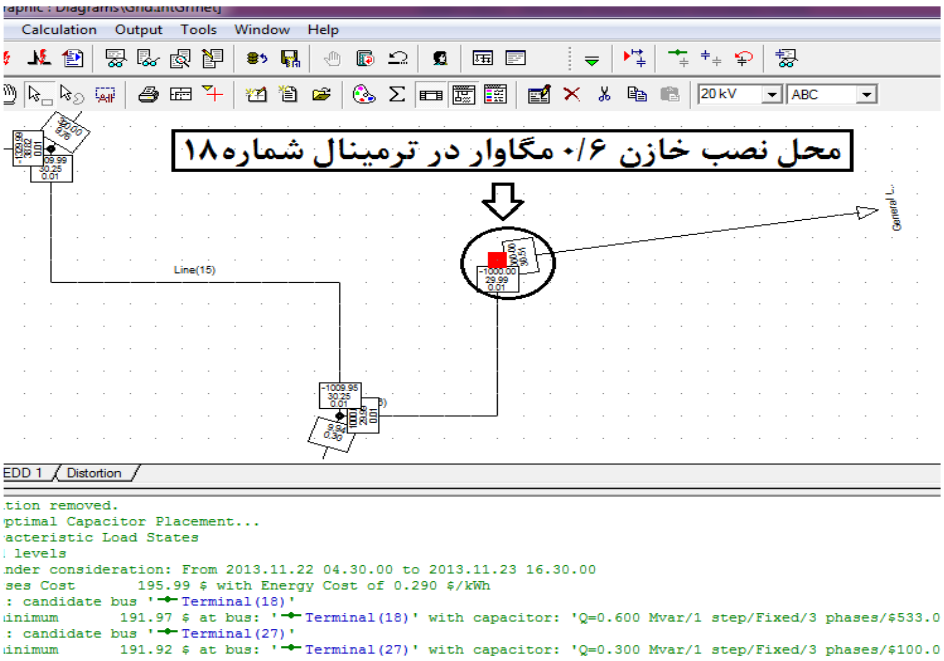
شکل ۵-۱۶: ظرفیت و مکان نصب خازن‌های با ظرفیت بهینه

- **گام سوم:** اکنون برای پیدا کردن محل نصب این خازن‌ها در شبکه بر روی نام ترمینال‌های مشخص شده در پنجره خروجی (قسمت آبی رنگ) کلیک راست کرده و گزینه Mark in Graphic را انتخاب کنید (شکل ۵-۱۷).



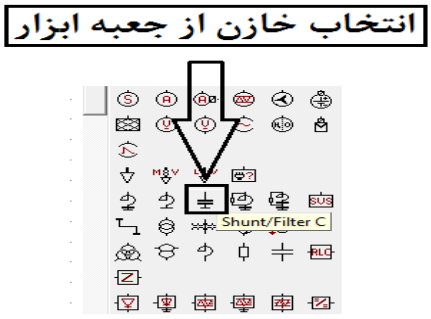
شکل ۵-۱۷: نحوه پیدا کردن محل نصب خازن در شبکه مورد مطالعه (فیدر شهرک صنعتی شهرستان سنندج)

- **گام چهارم:** بعد از انجام گام سوم محل نصب خازن بر روی بر روی دیاگرام تک‌خطی مشخص می‌گردد (شکل ۵-۱۸).



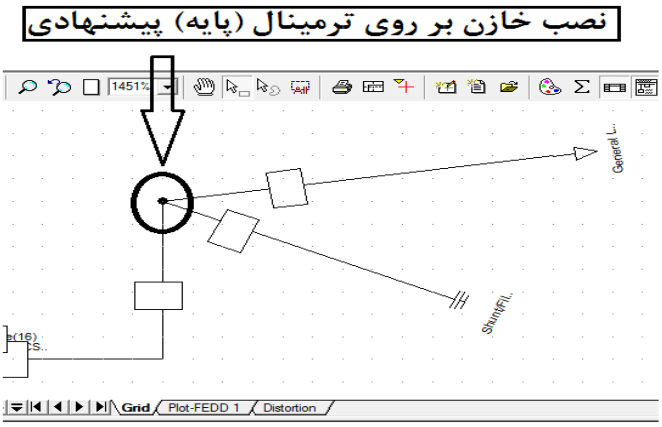
شکل ۵-۱۸: محل نصب خازن در شبکه مورد مطالعه (فیدر شهرک صنعتی شهرستان سنندج)

- **گام پنجم:** برای نصب خازن‌های بهینه از جعبه ابزار گرافیکی با کلیک بر روی گزینه Shunt/Filter C خازن موردنظر را انتخاب نمایید (شکل ۵-۱۹).



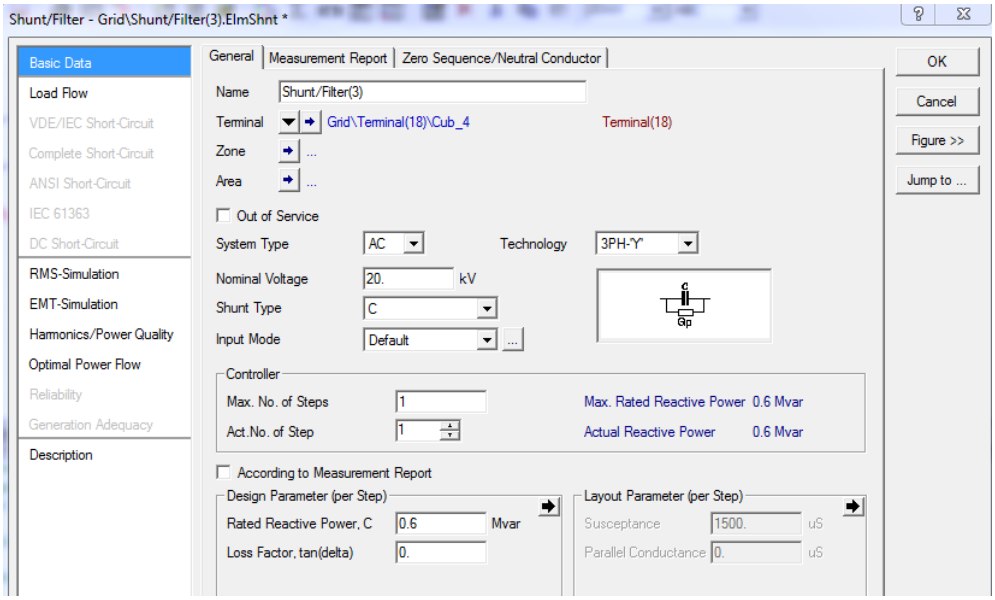
شکل ۵-۱۹: انتخاب خازن از جعبه ابزار

- **گام ششم:** بعد از انتخاب خازن از جعبه ابزار پنجره گرافیکی باید آن‌ها را در ترمینال‌های ۱۸ و ۲۷ که توسط تابع مکان‌یابی بهینه خازن پیشنهاد شده، نصب نمود (شکل ۵-۲۰).



شکل ۵-۲۰: نصب خازن بر روی ترمینال‌های (پایه‌های) پیشنهادی

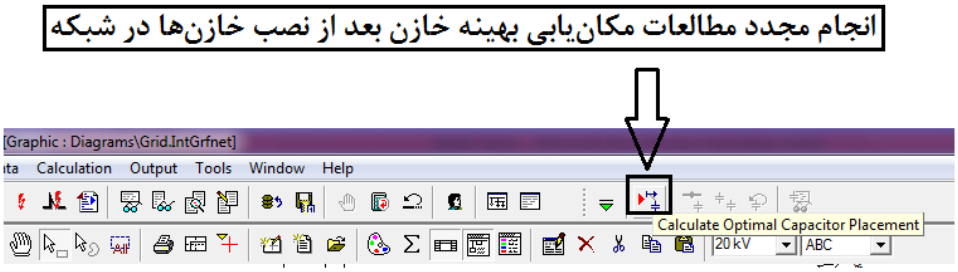
- **گام هفتم:** بعد از نصب خازن‌ها در ترمینال‌های موردنظر باید نسبت به انجام تنظیمات آن‌ها مطابق با خروجی تابع مکان‌یابی بهینه خازن اقدام نمود، برای این کار بر روی خازن‌ها در پنجره گرافیکی دو بار کلیک کرده تا پنجره تنظیمات مربوط به آن‌ها باز شود و سپس اطلاعات فنی موردنیاز را در تب Basic Data کامل کنید (شکل ۵-۲۱).



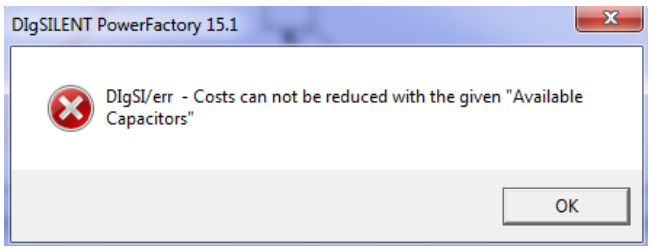
شکل ۵-۲۱: تکمیل اطلاعات فنی خازن‌ها در تب Basic Data

- **گام هشتم:** بعد از نصب خازن‌ها در شبکه باید مجدداً مطالعات مکان‌یابی خازن انجام گیرد. انجام این کار به این دلیل است که مطمئن شد بهینه‌ترین حالت ممکن محقق شده باشد. برای انجام این مورد مجدداً از نوار ابزار اصلی بر روی کلید optimal capacitor placement calculate کلیک کرده (شکل ۵-۲۲) تا دوباره مطالعات مربوط به مکان‌یابی بهینه خازن انجام

گیرد، درصورتی‌که بهینه‌ترین حالت ممکن برای خازن‌گذاری به دست آمده باشد، پیغامی با این مضمون ظاهر خواهد شد که هزینه‌ها با خازن‌های تعریف شده در نرم‌افزار بیشتر از این کاهش نمی‌یابد (شکل ۵-۲۳). درنهایت می‌توان در پنجره خروجی هزینه‌های قبل از خازن‌گذاری، بعد از خازن‌گذاری و میزان صرفه‌جویی حاصل از خازن‌گذاری در شبکه را مشاهده کرد (شکل ۵-۲٤).



شکل ۵-۲۲: انجام مجدد مطالعات مکان‌یابی خازن بعد از نصب خازن‌ها در شبکه



شکل ۵-۲۳: نمایش پیغام مربوط به پایان مطالعات مکان‌یابی بهینه خازن

Costs	
Before Optimization	
Power Losses	1287.86 $
Voltage Violations	0.00 $
Total	1287.86 $
After Optimization	
Power Losses	706.10 $
Voltage Violations	0.00 $
Costs of new capacitors	22970.00 $
Total	769.03 $
Saved Costs	
Power Losses	581.76 $
Voltage Violations	0.00 $
Total	518.83 $

شکل ۵-۲٤: صرفه‌جویی حاصل از خازن‌گذاری در شبکه

۱۴- فهرست منابع و مراجع

۱- **دستورالعمل محاسبه ظرفیت و محل نصب خازن ثابت در طول فیدر فشار ضعیف**

۲- دستورالعمل نصب تابلوهای بانک خازنی دارای رگلاتور در پست‌های توزیع برق

۳- استاندارد تجهیزات بانک‌های خازنی ۲۰ و ۳۳ کیلوولت

4- IEC 60831 – Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to including 1000 V

5- IEC 60871 – Shunt capacitors for a.c. systems having a rated above 1000 V

6- IEC 61921 Power capacitors – Low voltage power factor correction banks

7- IEC 61642 Industrial a.c. networks affected by harmonics - Application of filter and shunt capacitor

8- IEC 60549 High-voltage fuses for the external protection of shunt capacitors

9- IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors

10- IEEE Standard for Shunt Power Capacitors

11- IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks

12- IEC TR 61818 – Application guide for low voltage fuses

13- Electrical installation guide According to IEC international standards-2016

۱۴- دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های خازن‌های فشار متوسط ثابت

۱۵- دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمون‌های خازن‌های فشار ضعیف سه‌فاز

۱۵- اعضاء کارگروه تهیه کننده دستورالعمل

اعضای مشارکت کننده در تدوین دستورالعمل(به ترتیب حروف الفبا)	
آقای مهندس ماجد آزمون	شرکت توزیع برق کردستان
آقای دکتر صلاح بهرام آرا	دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
آقای مهندس میلاد بی‌آزار	شرکت توانیر
آقای دکتر صادق شجری	شرکت فراکوه
آقای مهندس پوریا شیخ احمدی	شرکت توزیع برق کردستان
آقای دکتر علیرضا شیخی	پژوهشگاه نیرو
آقای دکتر مسعود صادقی خمامی	شرکت توانیر
آقای دکتر مصطفی صدیقی زاده	دانشگاه شهید بهشتی
آقای مهندس نعمت اله صیادی زاهدکلایی	شرکت تدبیر انرژی سپهر
آقای مهندس محمد عظیمی	شرکت توزیع برق کردستان
آقای مهندس عبید علیمحمدی	شرکت توزیع برق کردستان
آقای دکتر مهیار قلی‌زاده	شرکت توانیر
آقای مهندس مسعود کرمی زاده	شرکت توزیع برق خراسان جنوبی
آقای مهندس محمدرضا گرامیان	شرکت توزیع برق خراسان جنوبی
آقای مهندس فواد گل آور محمدی	شرکت توزیع برق کردستان
آقای مهندس هیوا لهونیان	شرکت توزیع برق کردستان
آقای مهندس حسین مخدومی	شرکت توزیع برق کردستان
خانم مهندس نیکی مسلمی	پژوهشگاه نیرو
آقای دکتر کوروش موسوی تاکامی	شرکت توانیر
خانم مهندس پروین مولودی	شرکت توزیع برق کردستان
آقای دکتر سجاد نجفی روادانق	دانشگاه شهید مدنی آذربایجان