کاربرد عملی خازن گذاری بهینه در شبکه های فشار متوسط و تعمیم آن در شبکه های فشار ضعیف

محمد رجبی غلامرضا صفارپور احمدعلی بهمن پور

مهندسین مشاورقدس نیرو برق منطقه‌ای تهران

چکیده :

افزایش روزافزون مصرف برق وافزایش تجهیزات تولیدکننده توان راکتیوباعث بالا رفتن باراراکتیو در شبکه‌های توزیع میگردد. برای تأمین این توان بایدقدرت ترانسفورماتور، خطوط توزیع، کلیدهاوتجهیزات‌حفاظتی‌افزایش یابندکه این عمل باعث افزایش هزینه در شبکه‌های توزیع می‌شود.

خازنهای قدرت ،اقتصادی ترین منبع تأمین توان راکتیومورد‌نیازسیستم هستند.خازنها باعث کاهش انتقال توان راکتیووجریان خطوط ودرنتیجه باعث کاهش تلفات وباردرخطوط و ترانسفورماتورهای توزیع می‌گردند. روشهای معمول درخازن‌گذاری ،فقط به‌شبکه‌فشار متوسط بعنوان مکان خازن‌گذاری نگاه می‌کنند. دراین مقاله ،خازن گذاری به شبکه فشار ضعیف نیزتعمیم داده شده است .به دلیل واریانس زیادمصارف بارهادرشبکه فشارضعیف ،روش ریاضی تقریبی خاصی برای محاسبات پیشنهادوبراساس روش ذکرشده وباتوجه به تجربیات‌عملی نصب خازن ومشکلات همراه آن ،برنامه کامپیوتری به زبان C++ تدوین شده است ،که در انتهای مقاله یک مثال حل شده باآن نشانگر روندخواهدبود.

شرح مقاله

چون بخش اعظم تلفات سیستم های قدرت درشبکه های توزیع صورت می گیرد ، کاهش تلفات دراین شبکه هاازاهمیت خاصی برخورداراست ،یکی ازروشهای مناسب در کاهش تلفات شبکه ،نصب خازن درپستهای توزیع است .

ازآنجایی که نصب خازن باتجهیزات جانبی وحفاظتی آن نیازمندسرمایه گذاری وصرف هزینه است،انتخاب نادرست مقدار،ومحل نامناسب نصبآن باعث افزایش غیرضروری هزینه در شبکه توزیع می شود.برای جلوگیری ازاین هزینه هالازم است ،انتخاب مقدارخازن ومحل مناسب نصب آن بامطالعه ودقت کافی صورت گیرد.

معمولا"درروشهای بهینه سازی که محاسبات نصب خازن راانجام می دهند،مشکلاتی مانند نبودن فضای کافی برای نصب خازن یاکمبوداکیپهای سرویس ونگهداری رادرمحاسبات منظور نمی‌کنند.درروش موردبحث مقاله روندی تشریح می شودکه باکمک آن می توان روشهای خازن گذاری رامطابق بامحدودیتهای عملی شبکه اصلاح کرد.تعمیم روشهای خازن گذاری به شبکه فشارضعیف باعث آزادشدن ظرفیت خطوط فشارضعیف می شودکه احتمال اضافه باربیشتری نسبت به شبکه های فشارمتوسط دارد. باتوجه به این موضوع که درایران قیمت تمام شده خازنهای فشارضعیف نسبت به خازنهای فشارمتوسط (به دلیل ارزبری کمتری) کمتراست توجیه اقتصادی قوی تری برای خازن گذاری درفشارضعیف وجود دارد. بنابراین ازنظراقتصادی بهتراست که ابتدادرفشارضعیف خازن گذاری انجام شودوسپس اقدام به خازنگذاری درفشارمتوسط کرد.این عمل علاوه برصرفه اقتصادی ،باعث آزادشدن بار ترانس‌های توزیع ،کاهش تلفات درخطوط 400 ولت‌وکاهش افت درانشعابات می‌شود.

خازن گذاری درشبکه فشارمتوسط

درخازنگذاری شبکه فشارمتوسطازروش‌گردایان برداری‌استفاده شده‌است چون در روش مرجع [1]

مشکلات ومحدودیتهای علمی نصب خازن درنظرگرفته نشده بود،برای تعمیم کاربردی کردن

آن ، بایدخازن گذاری باسه محدودیت زیرانجام شود:

الف - خازن گذاری روی تمامی پستهای فشارمتوسط درفیدرفشارمتوسط (باآزادی کامل روش مرجع [1]).

ب- خازن گذاری بامحدودیت نصب دربعضی پستها(به دلیل نبودن فضای کافی).

ج - خازن گذاری باتعدادازپیش تعیین شده (باتعیین حداکثرپستهای قابل خازن گذاری به دلیل محدودیت اکیپهای سرویس ونگهداری).

الف - خازن گذاری باآزادی کامل

دراین حالت فرض براین است که می توان درتمام پستهاخازن نصب کرد.این حالت معمولا" در شبکه‌هایی پیش می آید ،که پست زمینی دارندوفضای تمام پستهای زمینی اجازه نصب خازن رامی دهد.البته دربعضی مواردمی توان خازن رادرکنارپستهای هوایی (درصورت لزوم بالای پایه)نیزنصب کرد. درچنین مواردی برنامه خازنگذاری آزاداست، وفقط تابع هزینه است که مشخص می‌کند نصب خازن ،درکجای شبکه باعث کم کردن هزینه می‌شود.تابع هزینه شامل هزینه تلفات ،هزینه نصب خازن و هزینه آزادشدن ظرفیت است .درروش مرجع [1]هزینه افت ولتاژ نیزدرتابع هزینه آمده است .این هزینه مقداررریالی واقعی نداردوفقط نمای ریالیازکیفیت‌برق تحویلی‌است.کاربردآن بدون توجه به ملاحظات اقتصادی توجیه فنی ندارد وفقط درمواردی باعث سرعت‌گرفتن همگرایی عملیات می شود.ازآنجایی که ضریب وزنی آن بسته به موردممکن‌است‌باعث همگرایی سریعترياواگرایی شودازکاربردآن اجتناب شده است.

ب - خازن گذاری بامحدودیت نصب دربعضی پستها

عملا"دربسیاری ازشبکه ها،کارخازن گذاری درتمام پستهاعملی نیست .این مواردشامل حالتهای زیراست:

۱ - پستهای زمینی فشرده بدون جای کافی

۲ - پستهای زمینی که جای نصب تجهیزات خازن راندارند.

۳- پستهای هوایی که نصب خازن درآنهابه هردلیلی ،ممکن نباشد.

درچنین حالتهایی بایدبتوان دربرنامه این محدودیت راواردکرداین کارباتنظیم نمودن یک‌شاخص دراطلاعات‌مربوط به‌پست‌انجام می‌شود.برنامه‌این محدودیت رابابی‌نهایت گرفتن تابع هزینه گره غیرقابل خازن‌گذاری انجام میدهد.این روش کار،نوعی بسط تابع حساسیت باضرب کردن متغیر Mi_i درتابع حساسیت است .این متغیربه صورت زیرتعریف می‌شود:

$M_i=O$ گره i قابل خازن گذاری نیست .

$M_i=1$ گره i قابل خازن گذاری است .

ج - خازن گذاری باتعدادازپیش تعیین شده

دربعضی مواردتعدادکم پرسنل وامکانات تعمیرونگهداری ،اجازه نصب تعدادزیادخازن راحتی اگرازنظراقتصادی مقرون به صرفه باشد،نمی دهد.دراین حالت باید حداکثرتعداد پستهای قابل خازن گذاری رابرای فیدردربرنامه منظورکرد.به عنوان مثال ممکن است یک فیدر شامل ۲۷ پست باشد،ازاین ۲۷ پست فقط ۱۱ پست قابل خازن گذاری باشندوبخواهیم ۵ پست از ۱۱ پست راخازن گذاری کنیم .سوال این است‌که درکدام ۵ پست (یاکمتر)از۱۱ پست باید خازن نصب شودومقدارآنهاچقدرباشد؟

برای حل این مسئله بعدازبررسیهای به عمل آمده سه راه پیشنهادشدکه درزیرشرح داده می‌شود (**n** تعدادپستهای قابل خازن گذاری و **m** تعدادمجازخازن است):

۱ - حل تمام حالتهای ممکن واستخراج بهترین حالت .

دراین روش مسئله به تعداد ترکیب " **m** از **n** " بارحل می‌شود.

۲ - **m+2** حالت بابیشترین حساسیت پیداکرده وپستهای قابل خازن گذاری فقط به همین تعداددرنظرگرفته می شودوسپس استخراج بهترین حالت ازترکیب " **m** از **m2** " انجام می‌شود.

۳ - یافتن **m** حالت‌بابیشترین حساسیت وحل مسئله فقط برای همین **m** حالت .

درروش اول می‌توانیم مطمئن باشیم که حتما"به بهترین جواب می رسیم ولی ممکن است تعدادحالتهابسیارزیادباشد.چون برنامه‌های خازن‌گذاری دراینجابه صورت **off-line** کار می‌کنند زیادشدن زمان درحدقابل قبول مشکل عمده‌ای نیست. متاسفانه دربعضی مواردحل چنین روشی ممکن است بسیارطولانی باشد(چندساعت).بنابراین بایدحتمایکی ازروشهای ۲ یا۳ انتخاب شود.برای مقایسه این روشهاباهم برای چندشبکه مختلف .اجرای آزمایشی ترتیب داده

شد.همانطورکه ازقبل پیش بینی شده بوداجراهای آزمایشی نشان دادکه بدون استثناء درتمام مواردکمترین هزینه در m گره بابیشترین حساسیت واقع شده است .

طبق عملیات ذکرشده برنامه درحالت ۳ ابتداگره بابیشترین حساسیت رامی یابدوسپس کار خازن‌گذاری رادرآنهاانجام میدهد.

اطلاعات ورودی برای محاسبات خازن گذاری فشارمتوسط

۱- اطلاعات شبکه (اتصالات شبکه ،فاصله بین پستها،امپدانس وراکتانس خطوط)

۲- توان اکتیو وراکتیوپستهادرفصلهای پربار،کم بارومتوسط .

۳- بهای انرژی مصرفی (کیلووات ساعت /ریال)وتخمین رشدسالیانه .

۴- بهای دیماند(کیلووات/ریال).

۵- بهای بانک خازنی (کیلووار/ریال).

۶- بهای تجهیزات خازنهابرحسب ریال .

۷- عمرمفیدشبکه برحسب سال .

۸- نرخ بهره پولی برحسب درصدو.....

نحوه انجام کار خازن‌گذاری

خازن‌گذاری باتوجه به بارهای اکتیو وراکتیوپستهادرسه فصل پربار،کم‌بار ومتوسط بطور همزمان انجام می‌شود.

۱- فصل پربار: پیک بار درفصل پرباری (بسته به مناطق مختلف).

۲- فصل متوسط : حداقل بار درفصل پرباری (بسته به مناطق مختلف).

۳- فصل کم بار: حداقل باردرفصل کم‌باری (بسته به مناطق مختلف).

برنامه‌باتوجه به فصل پربارشروع به خازن‌گذاری می‌کند (به‌صورت پله‌های خازن‌گذاری)،

وبعداز پخش بار، اضافه ولتاژ غیرمجاز درسه فصل آزمایش می‌شوداگر درفصل پربار ومتوسط اضافه ولتاژ داشتیم برنامه به رفع اضافه ولتاژ می‌پردازد (برداشتن آخرین پله خازن‌گذاری) وسپس به برنامه خاتمه می‌دهد. ولی اگر دراین دوفصل (پرباروم‌توسط) اضافه ولتاژ غیرمجاز وجود نداشت برنامه‌درفصل کم بارآزمایش اضافه ولتاژ غیرمجاز راانجام می‌دهد اگردراین حالت اضافه ولتاژ وجود نداشت برنامه به خازن‌گذاری ادامه می‌دهد و مراحل دوباره‌تکرار می‌شود. ولی اگر اضافه ولتاژ غیرمجاز وجود داشت برنامه درصدد رفع آن ویافتن یک بانک خازنی سوئیچ شونده فصلی برمی‌آید که این بانک خازنی دریکی ازفصول (کم‌بار) از مدارخارج می‌شود وبقیه خازنهای منصوبه بصورت ثابت خواهندبود.

نحوه‌انتخاب خازن سوئیچ شونده

ابتدا تعداد پستهای خازن‌گذاری شده ومقدار خازن هرپست محاسبه می‌شود وبراساس شماره پست مقادیر خازن مرتب (sort) می‌شوند (به‌ترتیب صعودی). باتوجه به اطلاعات مرتب شده مقدار خازن اولین پست به‌طور کامل برداشته می‌شودو مقدار بار راکتیوپست برابر بامقدار باررراکتیو قبل ازخازن‌گذاری درنظر گرفته‌می‌شود. سپس بعداز انجام پخش باراضافه ولتاژ غیرمجاز آزمایش می‌شود. اگراضافه ولتاژ رفع شد همین پست رابه عنوان بانک خازنی سوئیچ شونده علامت‌گذاری می‌شودو عملیات تکرار می‌شود. ولی اگراضافه ولتاژ غیرمجاز رفع نشد خازن محاسبه شده دوباره روی همان پست قرارداده می‌شودو برای پست بعدی عملیات تکرار می‌شود. نحوه خازن‌گذاری درفلوچارت شکل (۱) وانتخاب خازن سوئیچ شونده درفلوچارت شکل (۲) آمده است.

خازن‌گذاری درشبکه فشار ضعیف

درشبکه فشار ضعیف باتوجه به محدودیت اطلاعات وتغییرات شدید آن درشبانه‌روز وفصول مختلف، بهینه‌سازی به شکل زیرانجام می‌شود. باانجام یک رشته محاسبات که شرح آن درزیر خواهد آمد، بهترین حالت برای خازن‌گذاری فشار ضعیف به‌صورت زیرمحاسبه شده است:

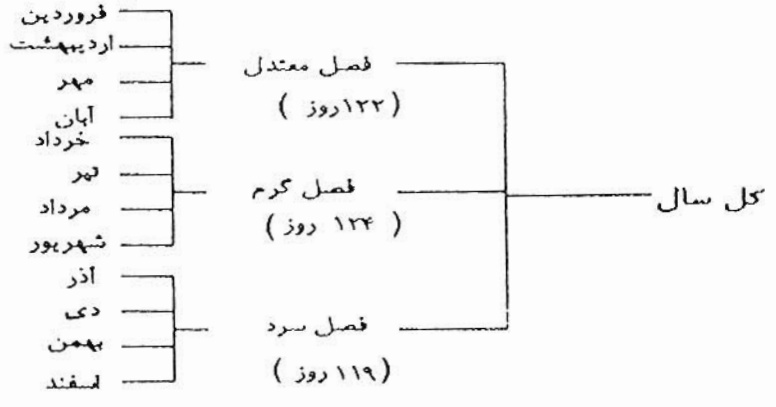
مقدار خازن نصبی رابرابر نصف بار راکتیو کل فیدردرزمان پیک بار گرفته ومکان نصب آن

جایی درنظرگرفته می‌شود که بار راکتیو فیدر درآن مکان یک سوم کل بار ابتدای فیدرباشد. یعنی دوسوم بار راکتیو کل فیدر، بین محل پست ومحل نصب خازن باشد.

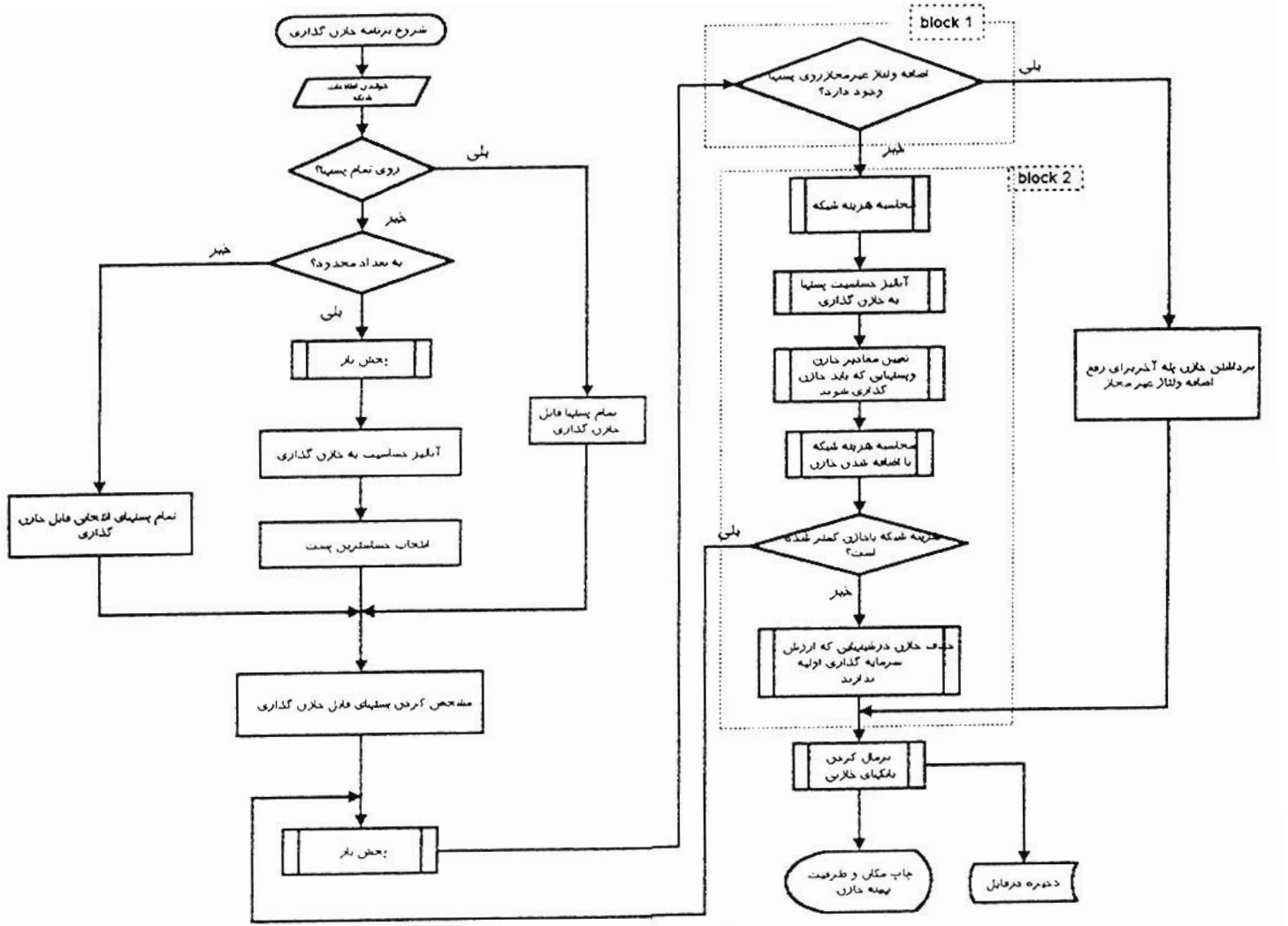
محاسبات توجیهی خازن‌گذاری فشارضعیف

برای اثبات این که چراباید مقدارخازن، نصف بار راکتیو پیک انتخاب شود، ازمنحنی بار سالانه فرضی استفاده شده است که سعی شده‌است اطلاعات آن حتی‌المقدور نزدیک به واقعیت باشد.

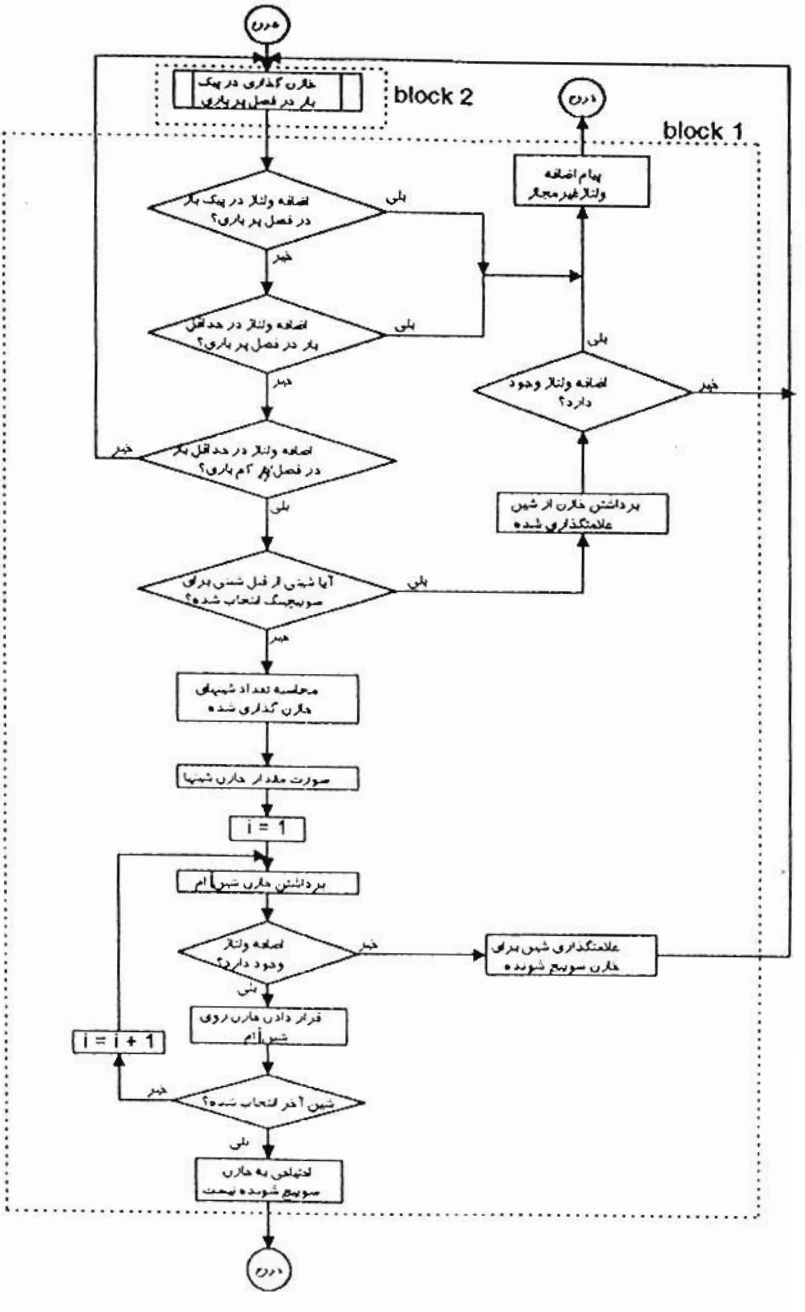
کل سال به سه فصل معتدل - گرم - سرد تقسیم شده‌است شکل (۳) ومصرف بار در فصلهای مختلف در جدول (۱) آمده است. باتوجه به جدول (۱) مصرف سه فصل ، بارسالانه مطابق جدول (۲) تنظیم وسپس منحنی بار سالانه شکل (۴) طبق جدول (۳) ترسیم می‌شود.



شکل (۳) تقسیم بندی بار مصرفی سالانه



شکل (۱) فلوچارت نحوه خازن‌گذاری



شکل (۲) نحوه انتخاب خازن سوئیچ شونده

جدول (۱) مصارف بار در فصول مختلف

فصل معتدل : ۱۲۲ روز

S (p.u)	COS Φ	مدت مصرف کل درسال (ساعت)	نوع مصرف	مدت مصرف در ۲۴ ساعت	ساعات مصرف در شبانه روز
۰/۱	۰/۵	۹۷۶	کم بار	۸	۲۳ تا ۷
۰/۲	۰/۵	۱۲۲۰	متوسط	۱۰	۷ تا ۱۷
۰/۶	۰/۶	۲۴۴	متوسط	۲	۱۷ تا ۱۹
۰/۷	۰/۸	۴۸۸	پیک بار	۴	۱۹ تا ۲۳

فصل گرم : ۱۲۴ روز

S (p.u)	COS Φ	مدت مصرف کل درسال (ساعت)	نوع مصرف	مدت مصرف در ۲۴ ساعت	ساعات مصرف در شبانه روز
۰/۲	۰/۵	۷۴۴	کم بار	۶	۲۴ تا ۶
۰/۶	۰/۶	۱۷۴۶	متوسط	۱۴	۶ تا ۲۰
۱	۰/۸	۴۹۶	پیک	۴	۲۰ تا ۲۴

فصل سرد : ۱۱۹ روز

S (p.u)	COS Φ	مدت مصرف کل درسال (ساعت)	نوع مصرف	مدت مصرف در ۲۴ ساعت	ساعات مصرف در شبانه روز
۰/۲	۰/۵	۹۵۲	کم بار	۸	۲۳ تا ۷
۰/۴	۰/۶	۱۱۹۰	متوسط	۱۰	۷ تا ۱۷
۰/۶	۰/۶	۲۳۸	متوسط	۲	۱۷ تا ۱۹
۰/۸	۰/۹	۴۷۶	پیک	۴	۱۹ تا ۲۳

جدول (۲) بار سالانه

COSΦ	S (p.u)	ساعات مصرف در سال (ساعت)
۰/۵	۰/۱	۹۷۶
۰/۵	۰/۲	۲۹۱۶
۰/۸	۰/۷	۴۸۸
۰/۶	۰/۶	۲۴۱۸
۰/۸	۱	۴۹۶
۰/۶	۰/۴	۱۱۹۰
۰/۹	۰/۸	۴۷۶

جدول (۳) جمع بندی مصارف سه فصل

COSΦ	S (p.u)	مدت مصرف در سال (ساعت)
۰/۵	۰/۱	۳۸۹۲
۰/۷	۰/۶	۲۷۰۶
۰/۶	۰/۴	۱۱۹۰
۰/۸	۱	۹۷۲

باتوجه‌به‌منحنی شکل (۴)تلفات‌انرژی سالانه‌رامی‌توان‌بااستفاده‌ازرابطه(۱) محاسبه کرد.

$$\Delta w_T = k \Sigma S^2 . T = k\left(0.1^2 \times 3892 + 0.4^2 \times 1190 + 0.6^2 \times 2706 + 1^2 \times 972 \right) = 2175.48\,k$$ رابطه (۱)

که در آن : K = ضریب S = توان ظاهری بر حسب پریونیت T = مدت به ساعت

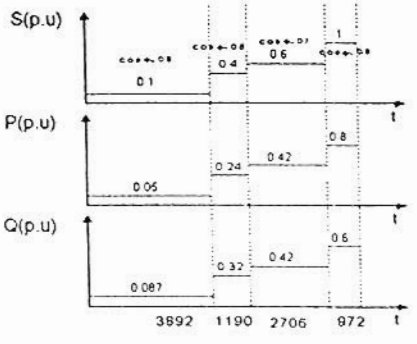
مقدار خازن نصبی رادرسه حالت زیربررسی می‌کنیم:

۱- برابر یانصف مقدار بار راکتیو پیک بار.

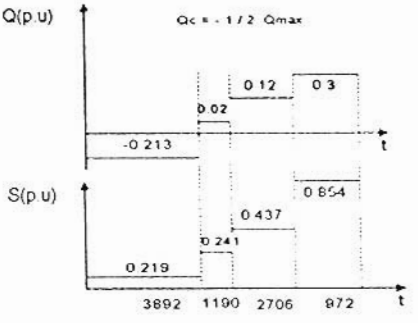
۲- برابر باسه چهارم بار راکتیو پیک بار.

۳- برابر بایک دوم بار راکتیو پیک بار.

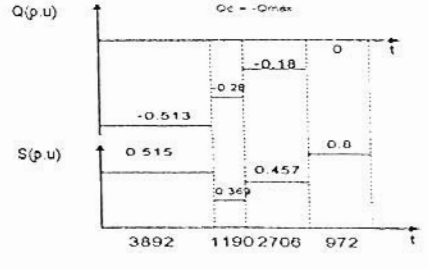
مقدار درصد کاهش تلفات با کمک رابطه‌های ۲ تا۴ محاسبه می‌شود. درشکلهای (۵)،(۶)و(۷) توان ظاهری وبار راکتیو شبکه مورد مطالعه بعدازنصب فرضی خازن نشان داده‌شده‌است.



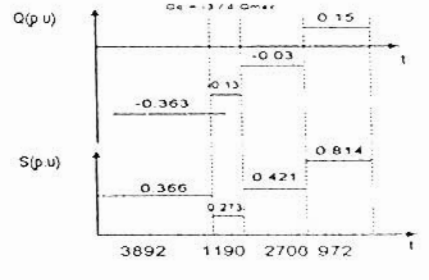
شکل (۴) منحنی بار سالانه



شکل (۵) انتخاب خازن به اندازه 1/2 Qmax



شکل (۷) انتخاب خازن به اندازه Qmax



شکل (۶) انتخاب خازن به اندازه 3/4 Qmax

$$\Delta w = k\sum S^2.T = k\left(0.366^2\times 3892 + 0.273^2\times 1190 + 0.421^2\times 2706 + 0.814^2\times 972\right)$$
$$= 1733.8k \quad \text{تلفات انرژی}$$

رابطه (۲)

$$\text{در صد کاهش تلفات} = \frac{\Delta w_T - \Delta w}{\Delta w_T} = \frac{2175.5k - 1733.8k}{2175.5k} = 20\%$$

$$\Delta w = k\sum S^2.T = k\left(0.219^2\times 3892 + 0.241^2\times 1190 + 0.437^2\times 2706 + 0.854^2\times 972\right)$$
$$= 1481.5k \quad \text{تلفات انرژی}$$

رابطه (۳)

$$\text{در صد کاهش تلفات} = \frac{\Delta w_T - \Delta w}{\Delta w_T} = \frac{2175.5k - 1481.5k}{2175.5k} = 32\%$$

$$\Delta w = k\sum S^2.T = k\left(0.515^2\times 3892 + 0.369^2\times 1190 + 0.457^2\times 2706 + 0.8^2\times 972\right)$$
$$= 2381.5k \quad \text{تلفات انرژی}$$

رابطه (۴)

$$\text{در صد کاهش تلفات} = \frac{\Delta w_T - \Delta w}{\Delta w_T} = \frac{2175.5k - 2381.5k}{2175.5k} = -9.5\%$$

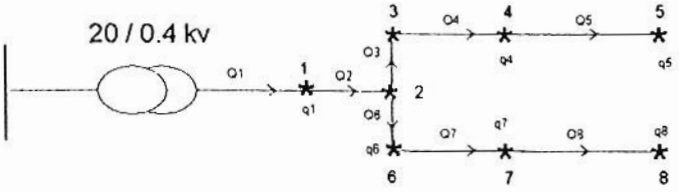
بابررسی روابط مشخص می‌شود که وقتی مقدار خازن رابه اندازه سه چهارم بار راکتیو پیک می‌گیریم کاهش تلفات ۲۰٪ ، وقتی به اندازه یک دوم بار راکتیو پیک می‌گیریم کاهش تلفات ۳۲٪ است ولی زمانی که خازن رابرابر بار راکتیو پیک می‌گیریم نه تنها کاهش تلفات نداریم بلکه افزایش تلفات نیز به وجود می‌آید.

نتیجه محاسبات فشار ضعیف

بامقایسه منحنی ومحاسبات به‌دست آمده برای کاهش تلفات دیده می‌شود که بهترین حالت برای تعیین مقدار خازن ،حالت "ج" است. یعنی مقدار خازن باید برابر بانصف بار راکتیو پیک درنظرگرفته شود.

تعیین مکان نصب خازن درفشار ضعیف

فیدر زیر رادرنظر بگیرید.



برای تعیین محل نصب مناسب خازن محاسبات زیررا انجام می‌دهیم:

الف) محاسبه مصرف بار راکتیو هرگروه (q۱,q۲,q۳,....).

ب) محاسبه مجموع بار راکتیو ورود به هرگروه (Q۱,Q۲,....).

ج) مجموع کل بارهای راکتیو عبوری ازابتدای فیدر Q۱ .

$Q_5=q_5$

$Q_4=q_4+Q_5$

$Q_3=q_3+Q_4=q_3+q_4+q_5$

$Q_1=q_1+Q_2$

مقدارخازن انتخابی‌برابراست‌با $Q_c=-1/2Q_1$ برای پیداکردن مکان نصب خازن مجموع بار راکتیو ورود به هرگروه (Q۱,Q۲,....) رابا یک سوم بار کل راکتیو عبوری ازابتدای فیدر (Q۱ ۱/۳) مقایسه می‌کنیم هرکدام که به این مقدار نزدیکتر باشد همان تیر (گره) رابه عنوان مکان نصب خازن انتخاب می‌کنیم [۲].

نتیجه‌گیری

انجام محاسبات خازن‌گذاری و کاربرد عملی آن درشبکه‌های توزیع، درنظر گرفتن نکات فنی و محدودیت‌های شرکت‌های توزیع ازاهمیت زیادی برخورداراست. علاوه برآن کاربرد خازن در شبکه‌های فشار ضعیف باعث کمتر شدن تلفات وبالارفتن بهره‌وری درشرکت‌های توزیع می‌شود. کاربرد روشهای ذکرکشده درمقاله ،امکان بکارگیری عملی محاسبات بهینه‌سازی ونصب خازن رابه‌صورتی صحیح فراهم می‌کند.

مراجع:

[۱] غلامرضا صفارپور وهمکاران ، "تعیین مکان وظرفیت بهینه خازن درشبکه‌های توزیع بااستفاده از روش گرادیان برداری " ، چهارمین کنفرانس سراسری شبکه‌های توزیع نیرو، بندرعباس فروردین ۱۳۷۳ .

[۲] TURAN GONEN <"ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM ENGINIEERING".