



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب
دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی برق قدرت

پایان نامه جهت اخذ دانش نامه در مهندسی برق قدرت

عنوان پایان نامه :

خازن گذاری در شبکه های توزیع برای کاهش تلفات و بهبود ضریب توان

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر طالبی

دانشجو:

مهدی بختیاری

شماره دانشجویی:

۸۰۱۲۸۴۰۰۸۱

تابستان ۱۳۸۳

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول :
۷	مفاهیم اساسی
	فصل دوم :
۲۱	منابع مصرف کننده توان راکتیو سلفی در شبکه
	فصل سوم :
۳۴	اثرات خازن های موازی در سیستمهای قدرت
	فصل چهارم :
۶۴	توابع هدف
	فصل پنجم :
۸۰	بررسی چند مقاله از IEEE
۱۰۴	ضمائم

به پدر و مادرم

که ادامه بی قراری های من اند .

تشکر :

در اینجا لازم می دانم که از زحمات بی دریغ و بی پیرایه استاد ارجمندم جناب دکتر طالبی که با دلسوزی و حوصله فراوان در طول انجام پایان نامه یاریم کردند ، تشکر نمایم و همچنین از دوست گرامیم آقای مهدی حیدری که همیشه در مشکلات و سختیها یاری گر و راه گشا بوده اند تشکر نمایم .

پیشگفتار:

خازن های اصلاح ضریب توان برای مهندسی برق اسم آشنایی است و اهمیت این عناصر در سیستمهای توزیع بر هیچ کس پوشیده نیست . این عناصر در سیستمهای توزیع نقش کلیدی دارند. در سیستمهای توزیع به خاطر ولتاژ پایین تر جریان O عبوری از خطوط بالا است و این امر باعث می شود که XI^2 بالا باشد، که به همراه توان مصرفی حقیقی ، اندازه ی توان ظاهری را بالاتر برده ، لازم می دارد که از تجهیزاتی با قدرت بالاتر استفاده کنیم ، I توان راکتیو القایی که بیشتر از خاصیت سلفی عناصر می باشد به وفور در سیستمهایی توزیع و قدرت یافت می شود که از عوامل تولید کننده ی آنی می توان به موتورهای القایی مورد استفاده در صنعت ، تراش ها ، خطوط انتقال ومیره اشاره کرد . برای کم کردن اثر توان القایی در نتیجه اندازه می توان ظاهری ، از وسایل گوناگون مانند موتورهای سنکرون و خازن های اصلاح ضریب توان می توان استفاده نمود، که مورد اول بیشتر در صنایع بمنظور کم کردن هزینه توان راکتیو استفاده می شد ، که به خاطر هزینه تعمیر و نگهداری بالا ، در حال حاضر بیشتر از خازن های سوئیچینگ استفاده می شود . اما مورد دوم که بحث اصلی ما در این پایان نامه می باشد به خاطر هزینه تعمیر و نگهداری کم و عمر بالا بیشتر در سیستم های توزیع استفاده می شود. که می تواند به صورت واحد ، گروهی ، ثابت و یا قابل سوئیچ به کار گرفته شود. از دیگر پارامترهای مهم مربوط به این خازن می توان به مقدار بهینه این خازن ها و مکانی که بیشترین جبران سازی را ایجاد می کند اشاره کرد ، که در حد توان در این پایان نامه بررسی شده است .

فصل اول

مفاهیم اساسی^۱

۱-۱ ساختار مکانیکی و الکتریکی خازن^۲

هرگاه اختلاف پتانسیلی بین دو صفحه ی هادی که در فاصله ی کمی از هم قرار گرفته اند، اعمال شود انرژی الکترواستاتیکی در سیستم موجود ذخیره می گردد که صفحات فلزی بعنوان الکتروود و فضای بین آنها دی الکتریک^۳ نامیده می شود. اندازه ی توانایی عایق یا دی الکتریک در ذخیره سازی انرژی الکتروستاتیکی ثابت دی الکتریک یا پرمابیلیته نامیده می شود. ثابت دی الکتریک تمام عایق ها معمولاً نسبت به هوا سنجیده می شود که ضریبی از دی الکتریک هوا می باشد. ثابت دی الکتریک هوا برابر 8.85×10^{-12} است که آنرا با علامت ϵ_0 می شناسیم و واحد آن نیز فاراد برمتر است (F/m) و ثابت نسبی دی الکتریک تمام عایقها که ضریبی از ثابت هوا هستند را با ϵ_r نمایش می دهیم که این مقدار برای هوا یک است. در جدول ۱-۱ اندازه ای ϵ_r برای بعضی عایقها آورده شده است.

ماده		ϵ_r
Air	هوا	1
Ceramic	سرامیک	3000
Glass	شیشه	7
Castor oil	روغن معدنی	2.12
Mica	میکا	5.16
Polystyrene	پلی استر	2.9

جدول (۱-۱) ثابت دی الکتریک نسبی برخی مواد

1- Basic Concept
2- Mechanical and Electrical of capacitor
3- Dielectric

۱-۲) ظرفیت خازن و انرژی ذخیره شده در خازن

میزان باری که یک خازن می تواند در خود ذخیره کند توسط فاکتوری به نام C نمایش داده می شود. این فاکتور برابر با ظرفیتی است بین صفحات یک خازن که ولتاژ یک ولت روی آن قرار گرفته و باریک کولمب را ذخیره کرده است.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1-1)$$

واحد این فاکتور فاراد (F) می باشد با توجه به اینکه فاراد واحد بسیار بزرگی است لذا از اجزاء آن مانند میکروفاراد، نانوفاراد و پیکوفاراد استفاده می گردد. در یک خازن ظرفیت از رابطه ای زیر بدست می آید.

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{d} (F) \quad (1-2) \quad \epsilon_o \epsilon_r [F/m], d[m], A[m^2]$$

در سری و موازی کردن خازنها ظرفیت معادل هرکدام از روابط زیر بدست می آید.

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n}} \quad (1-3)$$

$$C_{eq} = c_1 + c_2 + \dots + c_n \quad (1-4)$$

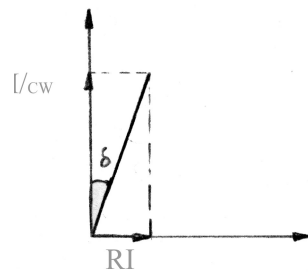
و انرژی ذخیره شده در میان صفحات خازن از رابطه ای زیر بدست می آید.

$$J = \frac{1}{2} c v^2 \quad (1-5)$$

همانطوری که از روابط بالا می توان فهمید با موازی کردن خازن ها ظرفیت معادل افزایش پیدا می کند و به ازای یک ولتاژ مشخص مقدار انرژی ذخیره شده در خازن افزایش پیدا می کند و نیز براساس معادله ای ۱-۱ برای افزایش Q در یک ولتاژ مشخص باید مقدار C افزایش یابد.

۳-۱ تفاوت دی الکتریک^۱

اگر عایق دی الکتریک خازن خلاء باشد هیچگونه تلفاتی در خازن وجود ندارد. تحت این شرایط همواره مولفه ی جریان ۹۰ درجه جلوتر از ولتاژ است اما با هر عایق دیگر تلفات بوجود می آید. در خازن های واقعی، اختلاف فاز جریان و ولتاژ به اندازه ی زاویه کوچک δ ، کم تر از ۹۰ درجه بوده، خازن دارای مقداری تلفات حرارتی نیز می شود. در نتیجه می توان مدار معادل یک خازن واقعی را به صورت یک خازن ایده ال موازی با مقاومت در نظر گرفت.



شکل (۱-۱)

البته این مدل سازی را می توان با المان های سری شامل یک خازن ایده آل و یک مقاومت نیز مدل سازی نمود. برای مدار معادل سری ضریب تلفات عایقی از رابطه ی زیر محاسبه می شود.

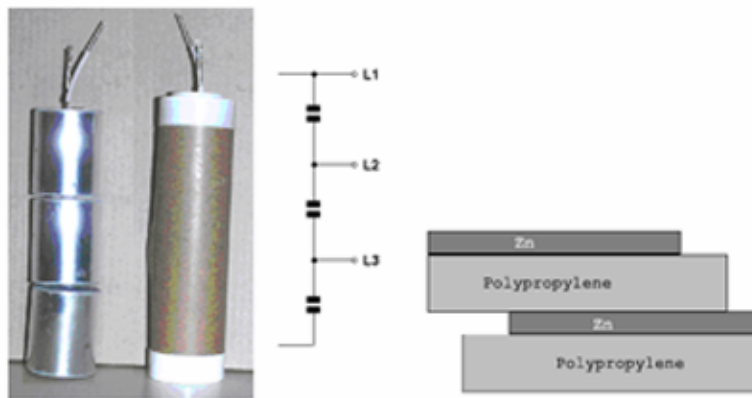
$$\tan \delta = \frac{V_R}{V_C} = \frac{RI}{I / \omega c} = RC\omega$$

در عمل برای اندازه گیری ضریب تلفات عایقی $\tan \delta$ از مدار معادل سری و از پل شرینگ استفاده می شود. با افزایش ضریب تلفات عایقی که به واسطه ی افزایش مقدار R مدل شده صورت می گیرد، تلفات خازن افزایش پیدا می کند و این امر در بانکهای خازنی بزرگ باید در نظر گرفته شود.

۱-۴ خازن قدرت^۱

در نگاه اول به نظر می رسد که خازن وسیله ی ساده ای است در حالی که در عمل خازن قدرت وسیله ای پیچیده و کاملاً فنی است که در آن از مواد دی الکتریک بسیار نازک که با فرآیندی کاملاً تخصصی ساخته می شود، استفاده شده است. به صورتی که فیلمهای فلزی مطابق شکل ۱-۲ روی هم قرار گرفته و تا رسیدن به ظرفیت مطلوب بدور محور پیچیده می شود.

مطابق شکل سه کویل خازن^۲ روی هم قرار گرفته و توسط چند رشته سیم به صورت مثلث بهم متصل می شود.



Mechanical Structure of Power Condenser
S.N:8012840081

شکل (۱-۲)

پس از قرار گرفتن کاغذ کرافت^۳ دور این کویلها، کل مجموعه در داخل بدنه ی استوانه ای شکل آلومینیومی قرار گرفته و فضای خالی با گرانول پر می گردد و نهایتاً سه سرسیم خروجی بر روی ترمینالها لحیم می شود. مجموعه ی حاصل شده یک عنصر خازنی نامیده می شود. از این عناصر خازنی در مراکز صنعتی برای اصلاح ضریب توان^۴ استفاده می شود. برای استفاده

1- Power capacitor
2- Coil
3- Kraft
4- Power Factor

خازن در سیستمهای قدرت^۵ و توزیع^۶، عناصر خازنی برای رسیدن به سطح ولتاژ مطلوبی که بتوان در سیستم قدرت و توزیع استفاده کرد، سری می شوند و برای رسیدن به ظرفیت های بالاتر خازن ها را موازی می کنند.

مجموعه ای از خازن های قدرت را در داخل ظرفی فولادی که برای رسیدن به ولتاژ و ظرفیت موردنظر سری و موازی شده اند، قرار می دهند این مجموعه واحد خازنی نامیده می شود، شکل ۱-۳. در حال حاضر از نظر فنی امکان ساخت واحدهای خازنی برای شبکه ی ۲۰kV بطوری که یک واحد خازن بتواند ولتاژ مربوطه را تحمل کند، است. فقط برای بدست آوردن راکتیو لازم در هر فاز بایستی موازی شوند. پس از قطع برق خازنها به دو روش تخلیه داخلی و خارجی تخلیه می شوند که بستگی به تکنولوژی ساخت آنها دارد و طبق استاندارد حداقل زمان لازم برای وصل مجدد ۵ دقیقه می باشد.

5- Power system
6- Distribution system



شکل (۱-۳) واحد خازنی

دلایل مهندسی ناشی از تلفات الکتریکی ، خازن در مقادیر کوچک ساخته می شود در حال حاضر واحدهای خازنی تا ۹۰۰kvar ساخته می شوند که این واحدهای خازنی را برای بدست آوردن کیلووات بالاتر می توان به صورت گروهی به کار برد.

خازن ها دارای تلفات انرژی هستند محدودیت عمده برای ساخت واحدهای خازنی بزرگ همین تلفات است زیرا با بزرگ شدن مقدار واحد خازنی سطح خارجی آن متناسب با مقدار خازن افزایش نمی یابد و در نتیجه انتقال گرما به بیرون کاهش می یابد. تلفات در خازنها برحسب $W/kvar$ سنجیده می شود و در ارزیابی خازن نقش مهمی دارد تلفات نمونه برای خازن ها از

$0.05w/kvar - 0.2 W/kvar$ متغیر است

تلفات که بستگی به نوع عایق بکاررفته در ساختمان آن دارد با گذشت زمان و با تغییرات شیمیایی و فیزیکی عایق افزایش پیدا می کند استاندارد وزارت نیرو در ایران توصیه می کند برای تلفات کمتر از خازنهای بادی الکتریک فیلم پلاستیکی یا OPP¹ و انبشاته با یکی از روغنهای MIPB استفاده گردد.

خازن های موازی در ولتاژهای 33kv, 20kv, 11kv در ایران استفاده می شود و در سه اندازه 200kvar, 150kvar, 100kvar می باشند که براساس استاندارد VDE0560, IEC-70A, IEC-70 و BS-1650 و شرایط آب و هوایی انتخاب گردیده اند.

۵-۱ توان

توان جذب شده توسط هر عنصر الکتریکی در هر لحظه برحسب وات، برابر است با حاصلضرب افت ولتاژ لحظه ای در دو سر بار برحسب ولت و جریان لحظه ای وارده به بار برحسب آمپر، این مقادیر لحظه ای هستند پس حاصلضرب جریان و ولتاژ در هر لحظه می تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد.

اگر ولتاژ و جریان عنصر موردنظر برابر باشد با:

$$v(t) = V_{\max} \sin \omega t$$

$$i(t) = I_{\max} \cos(\omega t - \theta)$$

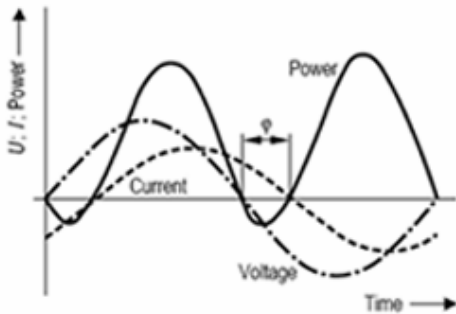
در این صورت توان لحظه ای برابر است با:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V_{\max} I_{\max} \cos \omega t \sin(\omega t - \theta) \quad (1-7)$$

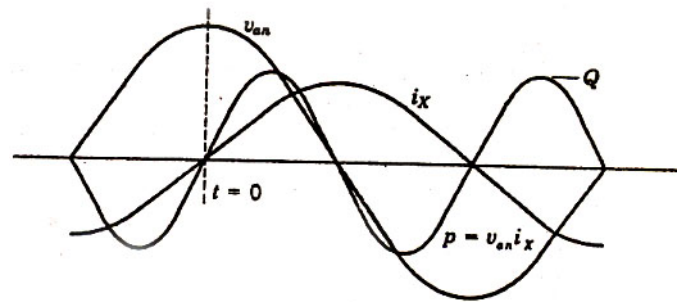
زاویه θ در این معادلات برای جریان پس افقی از ولتاژ مثبت و برای جریان پیش افقی از ولتاژ منفی است مقدار مثبت P بیان کننده ی آهنگی است که در آن انرژی توسط قسمتی از سیستم که ولتاژ و جریان آن مشخص شده، جذب می شود همانطور که از شکل ۴-۱ پیداست

1- Oriented polypropylene Filme

چنانچه $i(t)$ و $v(t)$ علامتی خلاف همدیگر داشته باشند $p(t)$ منفی خواهد بود و توان لحظه ای هنگامی مثبت است که $v(t)$, $i(t)$ هر دو مثبت یا هر دو منفی هستند.



شکل (۱,۴) منحنی توان لحظه ای



شکل (۱-۵) ولتاژ و جریان ۹۰ درجه اختلاف دارند

و چنانچه $v(t)$, $i(t)$ هم فاز باشند که این در مواردی که بار اهمی است اتفاق می افتد در اینصورت توان لحظه ای همواره مثبت است و چنانچه جریان و ولتاژ به اندازه ی ۹۰ درجه باهم اختلاف داشته باشند- شکل ۱-۵- همانطوری که در یک عنصر ایده آل سلفی یا خازنی اتفاق می افتد، در این صورت توان لحظه ای دارای نیم سیکل های مثبت و منفی برابر بوده و مقدار میانگین آن همیشه صفر است.

با استفاده از تساوی مثلثاتی زیر معادله ی ۱-۷ به صورت زیر خلاصه می شود:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

$$P(t) = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \cos(1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \sin \theta \sin 2\omega t \quad (1-8)$$

بررسی معادله ی فوق نشان می دهد که جمله ای شامل $\cos \theta$ همواره مثبت است و دارای مقدار

میانگین $P = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} \cos \theta$ است یا اگر از مقادیر موثر rms استفاده کنیم.

$$P = |V| |I| \cos \theta = |I|^2 R \quad (1-9)$$

P کمیتی است که کلمه توان به آن اطلاق می شود. P به توان حقیقی^۱ یا توان موثر^۲ نیز مشهور است. واحد اساسی توان لحظه ای $p(t)$ و توان حقیقی P وات است ولی معمولاً از مقادیر کیلووات و مگاوات برای P استفاده می شود. کسینوس زاویه θ بین ولتاژ و جریان، ضریب توان نامیده می شود. ضریب توان مدار القایی را پس افتی و ضریب توان مدار خازنی را پیش افتی گویند. ضریب توان پس افتی یا پیش افتی نشان می دهد که جریان نسبت به ولتاژ به چه میزان پس فاز یا پیش فاز دارد.

جمله ی دوم معادله ۸-۱ جمله ای شامل $\sin\theta$ به صورت متناوب مثبت و منفی است که دارای مقدار میانگین صفر است به این قسمت در توان لحظه ای $P(t)$ توان لحظه ای واکنشی گفته می شود و بیانگر عبور انرژی به تناوب به سمت بار و از بار به بیرون است. مقدار حداکثر این توان را که با Q مشخص می شود، توان واکنشی می گویند در تشریح عملکرد سیستمهای الکتریکی اعم از سیستمهای قدرت و سیستمهای توزیع نقش مهمی را ایفا می کند.

مقدار این توان برابر است با:

$$Q = \frac{1}{2} V_{\max} I_{\max} \sin \theta = |V| |I| \sin \theta = |I|^2 X \quad (1-10)$$

جذر مجذور مربعات P, Q برابر است با:

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = |V| |I| \quad (1-11)$$

هرچند P, Q دارای واحدهای یکسانی هستند، ولی متداول است که واحد Q را با وار (var) نمایش دهند.

1- Real Power
2- Active Power

معادلات ۹-۱ و ۱۰-۱ روش دیگری را برای محاسبه ی ضریب توان در اختیار می گذارد زیرا

مشاهده می شود. $Q/P = \tan \theta$ بنابراین ضریب توان برابر است با:

$$\cos \theta = \cos(\tan^{-1} \frac{Q}{P})$$

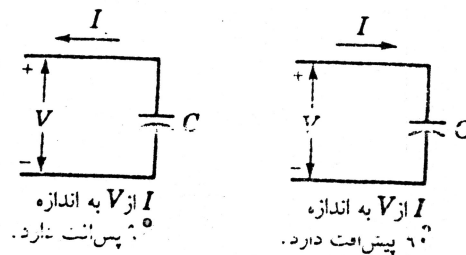
یا از معادلات ۹-۱ و ۱۱-۱

$$\cos \theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

چنانچه معادله ی ۷-۱ تعریف کننده ی توان لحظه ای $p(t)$ ، توان در مداری با خاصیت خازنی غالب باشد در اینصورت θ منفی شده و $\sin \theta$ و Q را منفی می کند و اگر مدار القایی و ظرفیتی با هم موازی باشند، در اینصورت توان لحظه ای واکنشی مدار RL با توان لحظه ای واکنشی مدار RC، 180° درجه اختلاف فاز خواهد داشت و می توان Q خازنی و Q سلفی را به صورت عددی جمع کرد و Q حاصل را محاسبه کرد Q جذبی توسط مدار RL مثبت و Q جذبی توسط مدار خازنی منفی است.

مهندسين سيستم قدرت معمولاً خازن را توليدکننده ی توان واکنشی مثبت در نظر می گیرند تا جذب کننده ی توان واکنشی منفی. این به نظر صحیح است برای اینکه از تحلیل مدارهای الکتریکی بیاد داریم ک اگر توان مصرفی عنصری مثبت باشد $+P=VI$ می توان گفت که این عنصر از منبع توان جذب می کند مانند عنصر مقاومت حال اگر توان مصرفی عنصری منفی باشد، یعنی داشته باشیم $-P=VI$ می توان گفت این عنصر توان منفی جذب می کند یا به اصطلاح معمول تر، توان مثبت وارد شبکه می کند. همانند عنصر منبع ولتاژ که توان مصرفی اش منفی است. به همین دلیل خازن که Q های منفی جذب می کند هنگامی که موازی با بار القایی قرار می گیرد مقدار Q ی موردنیاز بارالقایی را تأمین می کند و مقدار Q ی را که سیستم باید تأمین کند، کاهش می دهد و

این شبیه آن است که خازن را به عنوان وسیله ای در نظر بگیریم که جریان پس افی تحویل می دهد. تا اینکه بعنوان وسیله ای که جریان پیش افی می گیرد. مانند شکل ۶-۱.



شکل (۶-۱)

برای مثال خازن قابل تنظیم که موازی با بار القایی باشد را می توان طوری تنظیم کرد که جریان پیش افی خازن دقیقاً برابر با اندازه ی مولفه ای از جریان بار القایی شود که ۹۰ درجه از ولتاژ عقب تر است به همین دلیل مهندسین قدرت راحت تر است که خازن را به عنوان تأمین کننده ی توان واکنشی به بار القایی در نظر بگیرند.

۶-۱ مثلث توان

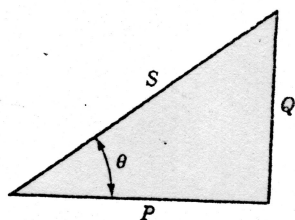
چنانچه عبارات فازوری ولتاژ و جریان معلوم باشند، دراین صورت محاسبه ی توان حقیقی و واکنشی براحتی به فرم مختلف انجام گیرد اگر داشته باشیم $I = |I| \angle \beta, V = |V| \angle \alpha$ در این صورت خواهیم داشت.

$$S = VI^* = |V| |I| \cos(\alpha - \beta) + j |V| |I| \sin(\alpha - \beta) = P + jQ \quad (۱۲-۱)$$

این کمیت توان مختلط نامیده می شود که در آن $\alpha - \beta = \theta$ می باشد.

معادله ی ۱۲-۱ روشی ترسیمی برای بدست آوردن P, Q و زاویه ی فاز کل برای چندین بار موازی را پیشنهاد می کند که می توان یک مثلث برای بار القایی همانند شکل (۷-۱) کشید. البته

در بعضی از مراجع ولتاژ به عنوان مبنا در محور در افقی در نظر گرفته شده که باعث گردیده این مثلث رو به پائین باشد. هرچند مفهوم هردویکی است و در این میان مسئله ی مهم اختلاف علامت توان اکتیو و راکتیو می باشد. قطر این مثلث ها توان ظاهری نامیده می شود که نقش مهمی را در سیستم های قدرت و توزیع ایفا می کند.



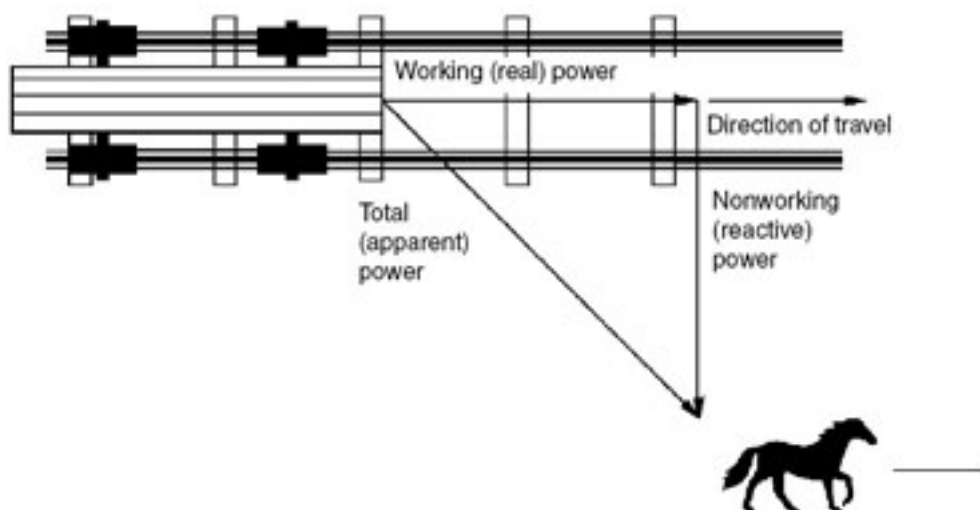
شکل (۱-۷)

۱-۷) مفهوم فیزیکی توان اکتیو و راکتیو

مفهوم فیزیکی توان اکتیو P به راحتی قابل درک است کل انرژی جذب شده توسط بار در مدت زمان T در یک سیکل ، معادل PT وات ثانیه (Ws) می باشد. در مدت زمان n سیکل، انرژی جذب شده $P(nT)$ وات ثانیه است که تمام آن توسط جزء مقاومتی بار جذب می شود. دستگاه اندازه گیر کیلووات ساعت برای محاسبه انرژی جذب شده توسط بار در مدت زمان $(t_2 - t_1)$ به وسیله انتگرال گیری توان اکتیو روی بازه ی زمانی $(t_2 - t_1)$ طراحی می گردد.

درک مفهوم فیزیکی توان راکتیو Q ساده نیست. Q ماکزیمم مقدار توان لحظه ای جذب شده توسط قسمت راکتیو بار است. توان راکتیو لحظه ای که توسط دومین جمله ای $P(t)$ در معادله ی ۱-۸ آورده شده متناوباً مثبت و منفی می شود و این نشانگر جاری شدن انرژی از و به سوی المان راکتیو به صورت تناوبی است. بسته به اینکه علامت $\theta = (\alpha - \beta)$ مثبت باشد یا منفی. به روش دیگر توان راکتیو آن جز از توان است که انرژی مصرف می کند ولی کار انجام

نمی دهد همانند شکل ۸-۱ که به صورت خیلی ساده مفهوم توان ها در آن بیان شده است، دیده می شود که کار اصلی را در سیستم قدرت توان اکتیو انجام می دهد و توان راکتیو فقط اندازه ی توان ظاهری را افزایش می دهد پس در سیستمهای قدرت به دنبال کاهش این توان هستیم.



شکل (۸-۱) مفهوم فیزیکی توان ها

فصل دوم

منابع مصرف کننده ی توان راکتیو سلفی در شبکه

اغلب دستگاهها و مصرف کنندگان الکتریکی برای انجام کار مفید نیازمند مقداری توان راکتیو سلفی برای مهیا کردن شرایط لازم برای انجام کار هستند از مهمترین منابع مصرف کننده ی توان راکتیو سلفی می توان به موتورها، ترانسفورماتورها، خطوط هوایی و کابلها، مشترکین (صنایع، خانگی)، دستگاههای مورد استفاده در صنایع از جمله، کوره های القایی، کوره های قوس الکتریکی، سیستم های جوشکاری AC, DC, مصرف کنندگان با تجهیزاتی که دارای مشخصه ی غیرخطی هستند، مبدل های AC/DC, DC/AC, AC/AC و چاپرها و بسیاری دیگر از مصرف کننده ها. برای نمونه تعدادی از این مصرف کننده های توان راکتیو سلفی را به طور اختصار بررسی می کنیم.

۱-۲ موتورها

موتورهای الکتریکی A.C برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی، نیازمند تولید شار مغناطیسی در فاصله ی هوایی موتور هستند. ایجاد شار در فاصله ی هوایی نیازمند کشیدن جریان از شبکه است. این جریان توسط کلافهای سیم پیچی شده ی موتور که درصد کمی از امیدانس آن اهمی و بقیه ی آن سلفی است تأمین می شود. این جریان پس افتی، موتور را یک مصرف کننده ی توان راکتیو سلفی می سازد که با افزایش بار مکانیکی جریان موتور افزایش یافته و راکتیو مصرفی نیز افزایش می یابد. معمولاً موتورها را بزرگتر از بار موردلزم انتخاب می کنند بنابراین هیچگاه به بار نامی خود نمی رسند و این باعث می شود که با P.F¹ پائین تر

1- Power Factor

در مصارف استفاده شود و P.F کمتر یعنی $\cos\theta$ کمتر و $\sin\theta$ ای بیشتر و در نتیجه طبق معادله ی (1-10) Q_s سلفی مصرفی بالاتر.

۲-۲ ترانسفورماتورها

جریان بی باری^۲ یا همان جریان مغناطیس کنندگی هر ترانسفورماتوری دارای دو مولفه می باشد یکی از مولفه ها هم فاز با ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور است و به همین دلیل با R_C مدل سازی می شود و نمایانگر تلفات هسته می باشد، مولفه ی دیگر که عمود بر ولتاژ اعمالی است و ۹۰ درجه عقبتر از آن با X_m مدل می شود و معمولاً مؤلفه ی اهمی جریان مغناطیس کنندگی کمتر از ۱۰ درصد مولفه ی سلفی است و می توان کل جریان مغناطیس کنندگی را سلفی در نظر گرفت. و با این فرض که به واقعیت نزدیک است می توان راکتیو مصرفی را در ترانسفورماتورهای هوایی و زمینی 20 kv و ولتاژهای بالاتر را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$Mvar = \frac{\quad}{100} \times Mvar \text{ (ترانسفورماتور)}$$

جریان بی باری برای ترانس های هوایی 2.5 درصد و برای ترانس های زمینی $1/7$ درصد می باشد طبق یک آمار در کل تهران توان راکتیو بی باری بالغ بر 230 Mvar می باشد که به صورت ثابت از شبکه دریافت می شود.

امپدانس- درصد هر ترانسفورماتور که در بار نامی مشخص می شود، سازندگان ترانسفورماتور بر روی پلاک آن درج می کنند و در سیستمهای قدرت و توزیع از قسمت اهمی این امپدانس صرف نظر می شود. و در دیاگرامهای تک خطی نیز فقط به صورت یک سلف، سری با عناصر دیگر شبکه شبیه سازی می شود با استفاده از امپدانس- درصد داده شده می توان امپدانس سری ترانسفورماتور را بدست آورد.

V : ولتاژ بین فازها به کیلوولت

S : ظرفیت ترانس (توان ظاهری) به مگاوات آمپر

X : اندوکتانس سری توانی برحسب اهم

$$X = \%Z \frac{V^2}{S}$$

با توجه به تعداد زیاد ترانسفورماتورها در شبکه و جریان های بالای کشیده از آنها، توان راکتیو مصرفی این مجموعه حجم بالایی را شامل می شود طبق یک آمار توان راکتیو کل ترانسفورماتورها در هنگام بارداری در کل تهران حدود ۸۲۱ Mvar است.

۳-۲ توان مصرفی در خطوط هوایی

همانطور که می دانیم خط انتقال در شبکه به صورت های مختلف مدل می شود که بستگی به طول این خطوط دارد. به هر صورت که مدل بندی شود دارای امپدانس سری که شامل سلف و مقاومت است می باشد که مقادیر این دو بستگی به طول و نوع سیم متغیر است. قسمت سلفی این امپدانس باعث مصرف توان راکتیو سلفی می شود که با توجه به متغیر بودن X و تغییرات ولتاژ نمی توان به دقت عاملهای دیگر بدست آورد، ولی اگر مقدار فیدرها و نوع سیم و توان عبوری از خطوط را به طور متوسط محاسبه کنیم می توان متوسط این توان را از رابطه ی زیر محاسبه کرد.

$$\text{Mvar} = \frac{S^2}{V^2} \times \text{طول فیدر} \times X(\Omega/\text{km}) \times \text{تعداد فیدرها}$$

S : متوسط بار هر فیدر

بطور کلی طبق یک آمار برای خطوط برق تهران بار راکتیو مصرفی ۳۳۰ Mvar است که جمع کل توان ترانسهای راکتیو بی باری و بارداری ترانسفورماتورها و خطوط ۱۳۸۰ Mvar می

باشد و با توجه به اینکه از این مقدار حدود ۶۲۴ H Mvar توسط خاصیت خازنی خطوط جبران می شود مقدار توان راکتیو ۷۵۶ Mvar از شبکه دریافت می شود که باید جبران شود.

۲-۴ توان راکتیو مشترکین (صنایع، خانگی)

مشترکین دیماندی (مشترکین که دارای کنتور مصرف توان راکتیو هستند مانند صنایع) دارای مصرف توان راکتیو بالایی از مشترکین عادی هستند. همانطور که گفته شد موتورهای الکتریکی توان راکتیو سلفی مصرف می کنند، این نوع مشترکین با توجه به نوع استفاده شان از انرژی الکتریکی که بیشتر برای محرکهای الکتریکی کوره ها و غیره می باشد متحمل هزینه های توان راکتیو نیز می باشند به همین منظور برای کم کردن این هزینه با استفاده از خازن گذاری مقداری از هزینه های پرداختی را کاهش می دهند. از طرف وزارت نیرو اگر P.F کمتر از ۸۵ درصد باشد بهای برق (شامل بهای دیماند، بهای انرژی و حداقل بهای فوق برحسب مورد) با ضریبی که نمونه آن در جدول زیر آمده است افزایش می یابد.

P.F	ضریب زیان	P.F	ضریب زیان
0.85	0.00	0.6	0.42
0.84	0.01	0.55	0.55
0.83	0.06	0.5	0.7
0.75	0.13	0.45	0.89
0.70	0.21	0.40	1.13
0.65	0.31		

همچنین در جدول زیر نمونه از صنایع مختلف با ضریب توان های آنها آورده شده است که باید در هنگام بهره برداری تصحیح گردد.

P.F	نوع صنعت	P.F	نوع صنعت
0.6-0.85	کارخانه ی فولاد	0.65-0.75	صنایع نساجی
0.65-0.80	معادن زغال سنگ	0.75-0.85	صنایع شیمیایی
0.7-0.8	سردخانه ها	0.4-0.65	فروشگاههای ماشین
0.6-0.75	آجرسازی	0.35-0.4	جوشکاری
0.5-0.7	کارخانه ذوب فلزات	0.7-0.9	کوره های الکتریکی
0.6-0.75	کارخانه ی مواد پلاستیک	0.15-0.16	کوره های القایی بدون هسته
0.5-0.7	معادن سنگ	0.78-0.8	کارگاههای سیمان
		0.55-0.7	چاپخانه ها
		0.3-0.75	موتورهای تریستوری
		0.35-0.6	کارگاههای پارچه بافی

و مقدار توان راکتیو مصرفی مشترکین غیردیماندی از جمله مصارف خانگی را چون دارای کنتور توان راکتیو نمی باشند نمی توان به صورت دقیق اندازه گرفت در زیر ضریب توان را برای بعضی از وسایل مورد استفاده در مصارف خانگی آورده شده است.

P.F	مصرف کننده	P.F	مصرف کننده
0.63-0.67	دمنده ی یک شوفاژ	0.5-0.61	یخچال
0.6-0.73	سوخت رسان دیگ	0.58-0.61	فریزر
0.57-0.72	فن زیر شیروانی	0.6	ماشین لباس شویی

0.65	پمپ سیرکولاسیون آبگرم	0.6	ماشین ظرفشویی
0.65	پمپ دفع لجن	0.6	واقع زباله ی خانگی
0.65-0.69	پمپ چاه نیمه عمیق	0.56-0.65	مشکل گازوئیل یا نفت

۵-۲ لزوم افزایش ضریب توان

در این قسمت می خواهیم به دلایل بالابردن ضریب توان در شبکه و صنایع بپردازیم. در بخش توان دیدیم که توان ظاهری از رابطه های زیر بدست می آید:

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

وقتی در دستگاههای الکتریکی از توانی که بر روی پلاک مشخصات درج شده است صحبت می شود منظور توان ظاهری می باشد . وسایل الکتریکی به دلیل مسائل عایقی در سطح ولتاژی که سازنده بر روی پلاک درجه کرده به کار میروند، درحالیکه جریان در یک محدوده ی مشخص تغییر می کند و بستگی به مقدار بار دارد. برای نمونه در یک ترانسفورماتور ولتاژ کار، مقدار ثابتی است ولی جریان بسته به مقدار بار تغییر می کند و تغییر جریان باعث می شود که توان ظاهری تغییر کند، به منظور تأثیر ضریب توان و جریان در مقدار توان ظاهری یک نمونه را بررسی می کنیم.

برای مثال یک موتور الکتریکی که در ۴۰۰۷ کار می کند دارای $P.F = 0.75$ و توان $P = 10 \text{ kW}$ می باشد، همانطور که می دانیم توان یک موتور سه فاز از رابطه ی $P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$ بدست می آید از این رابطه می توان جریان را محاسبه کرد که مقدار آن 22.5 A خواهد بود.

حال به هر دلیلی بتوانیم ضریب قدرت را به $P.F = 0.9$ برسانیم آنگاه جریان کشیده شده ی

موتور $I = 16A$ خواهد شد و این باعث کم شدن توان ظاهری می شود و یا افزایش $P.F = \cos\theta$

باعث کاهش $\sin\theta$ و در نتیجه کمتر شدن Q مصرفی شده و S را کاهش می دهد.

توان ظاهری یک شبکه مشخص کننده ی میزان بار پذیری آن شبکه است. ژنراتورها،

ترانسفورماتورها، کلیدهای قدرت، فیوزها و مقاطع سیم ها و کابلها می بایستی برای توان

ظاهری شبکه انتخاب شوند. بالارفتن جریان باعث می شود که تلفات حرارتی بیشتر شود.

فیوزها و کلیدهای قدرت بایستی بتوانند این افزایش جریان را تحمل کنند و در صورت زیادبودن

آن به اجبار بایستی دستگاههای با ظرفیت بالاتر انتخاب نمود که هزینه های تولید و مصرف را

افزایش می دهد.

مسئله ی دیگر این است که در صورت کاهش $P.F$ که به نوبه ی خود باعث افزایش جریان و

توان ظاهری می شود بایستی تمام تجهیزات از نقطه ی تولید تا فیدر انتهایی (نقطه ی مصرف)

مانند ژنراتورها، ترانس های افزایشده، خطوط قدرت، ترانس های کاهشده، کلیدهای قدرت و غیره

برای S افزایش یافته طراحی شوند و این به معنی افزایش هزینه ی تولید می باشد.

طبق جدول زیر اثر کاهش $P.F$ در یک توان حقیقی ثابت، بر روی توان ظاهری را می توان به

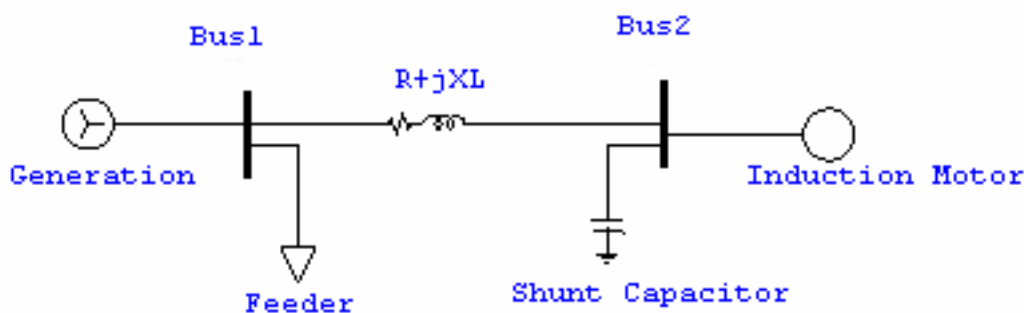
سادگی مشاهده کرد.

P(kw)	P.F	Q(kvar)	S (kva)
100	1.00	0	100
100	0.90	48.43	111.11
100	0.80	75	125
100	0.70	102	142.86
100	0.60	133.33	166.67

طبق جدول، ضریب توان ۰/۸۰ باعث افزایش ۲۵ درصد توان ظاهری می شود و در این ضریب توان ۷۵ kvar خازن برای حذف ۷۵ کیلوواری مولفه ی پس افتری لازم است.

۶-۲ اصلاح ضریب توان^۱

در بخش قبل دیدیم که پایین بودن ضریب توان باعث افزایش توان ظاهری و در نتیجه کاهش ظرفیت پذیری شبکه می شود. همانطوری که از بخش توان بیاد داریم توان واکنشی و توان اکتیو در مقابل همدیگر عمل می کنند یعنی از لحاظ برداری ۱۸۰ درجه باهم تفاوت دارند و به راحتی می توان به صورت اسکالر از همدیگر کم کرد و فهمیدیم خازن که جریان پیش فاز از شبکه می کشد را می توان به عنصری که جریان پس فاز به شبکه تزریق می کند در نظر گرفت. برای نمونه طبق شکل (۱-۲) اگر شبکه ای داشته باشیم که یک موتور القایی - سمبلی از بارهای راکتیو- را با توان اکتیو ۱۰۰ kw و توان راکتیو ۱۰۰ kvar را تغذیه کند در اینصورت داریم:



Power Factor Correction With Shunt Condenser

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 142 \quad KVA$$

1- Power Factor Correction

$$P.F = \cos \theta = \frac{100}{142} = 0.70 \quad \text{or} \quad 70\%$$

حال اگر بخواهیم این ضریب توان را به ۰/۹۵ برسانیم در این صورت طبق مثلث توانها خواهیم داشت:

$$\tan(\cos^{-1} 0.95) = \frac{Q'}{100}$$

Q' مقدار توان واکنشی است که بعد از اضافه شدن خازن باقی می ماند.

$$Q' = 33 \quad k \text{ var}$$

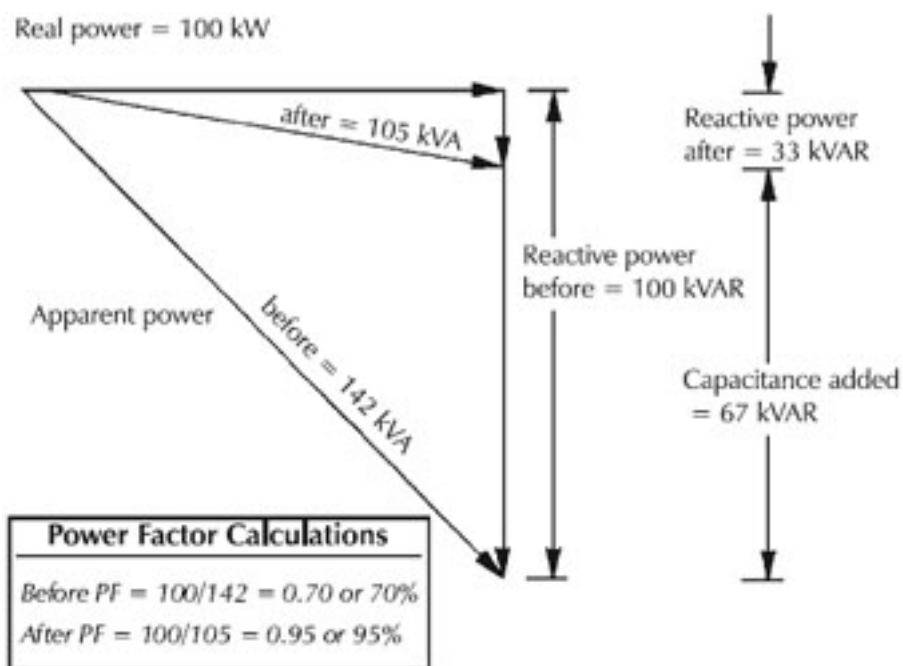
البته مقدار Q' از روش های مختلفی همانطور که در مثلث توان نیز مشخص است - شکل (۲-۲)

- می توان محاسبه کرد. برای نمونه می توان ابتدا مقدار S را برای P.F=۰/۹۵ محاسبه کرد.

$\cos \theta \frac{P}{S}$ و سپس مقدار Q' را از رابطه ی $Q' = \sqrt{S^2 - P^2}$ بدست آورده شده در هر صورت Q'

مقدار توان واکنشی است که سیستم بعد از اضافه شدن خازن احتیاج دارد و برای بدست آوردن

Q_c اضافه شده بایستی این مقدار را از مقدار Q کل قبل از اضافه شدن خازن کم کنیم.



$Q = Q - Q'$ این مراحل از روی مثلث توان به سادگی قابل فهم است.

همانطوری که از روی مثلث توان هم دیده می شود، مقدار S بعد از اضافه کردن خازن ۲۶ درصد کاهش یافته است در عمل برای اصلاح ضریب توان از جداول موجود استفاده می شود که این جداول نیز از روی مثلث توان بدست آمده است. اگر زاویه ضریب توان بار φ_1 باشد، اگر بخواهیم این زاویه به φ_2 برسد مقدار توان راکتیو لازم، همانطوری که از مثلث توان مشخص است از این روابط بدست می آید.

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q}{P} \quad , \quad \tan \varphi_2 = \frac{Q'}{P}$$

$$Q_c = Q - Q' = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2 = k$$

مقدار k را می توان از جدول آورده شده در استاندارد ANSI/IEEE Std 141.1988 با داشتن φ_1, φ_2 بدست آورد و یا به روش مشابه اگر بخواهیم از ضریب توان $\cos \varphi_1$ به ضریب توان $\cos \varphi_2$ برسیم می توان با استفاده از جدول زیر ضریب k را بدست آورد. برای مثال اگر توان اکتیو مصرف کننده ای 40 kW با ضریب توان $\cos \varphi_1 = 0.8$ باشد، می خواهیم به طریقی اصلاح شود که به ضریب توان $\cos \varphi_2 = 0.96$ برسد در اینصورت طبق جدول خواهیم داشت.

$$Q_c = 40(\text{kW}) \times 0.46 = 36.8 \quad \text{k var} \quad (0.46 \text{ عدد برخورد دو ضریب توان است})$$

Q_c مقدار توان راکتیو خازنی است که لازم است اضافه شود تا به ضریب توان 0.96 برسد. نمونه ی کاملتری از این جدول در ضمیمه آورده شده است.

Existing power factor ($\cos \varphi_1$)	Desired power factor $\cos \varphi_2$									
	1.0	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
0.40	2.29	2.09	2.00	1.93	1.86	1.81	1.67	1.54	1.41	1.27
0.45	1.99	1.79	1.70	1.63	1.56	1.51	1.37	1.24	1.11	0.97
0.50	1.73	1.53	1.44	1.37	1.30	1.25	1.11	0.98	0.85	0.71
0.55	1.52	1.32	1.23	1.16	1.09	1.04	0.90	0.77	0.64	0.50
0.60	1.33	1.13	1.04	0.97	0.90	0.85	0.71	0.58	0.45	0.31
0.65	1.17	0.97	0.88	0.81	0.74	0.69	0.55	0.42	0.29	0.15
0.70	1.02	0.82	0.73	0.66	0.59	0.54	0.40	0.27	0.14	-
0.75	0.88	0.68	0.59	0.52	0.45	0.40	0.26	0.13	-	-
0.80	0.75	0.55	0.46	0.39	0.32	0.27	0.13	-	-	-
0.85	0.62	0.42	0.33	0.26	0.19	0.14	-	-	-	-
0.90	0.48	0.28	0.19	0.12	0.05	-	-	-	-	-

۷-۲ ضریب توان اقتصادی^۱

۰/۹۵ P.F ضریب توان اقتصادی نامیده می شود و آن ضریب توانی است که در آن، منابع اقتصادی ناشی از افزودن خازنهای موازی، درست با هزینه های خازنها برابر باشد هرچند این ضریب توان رفته، رفته به سمت یک افزایش یافته است. در این بین لزوم استفاده از خازن اصلاح ضریب توان را بررسی اقتصادی تعیین می کند. برای این کار بایستی شناخت کافی از بارهای ایستگاه موردنظر و فیدرهای مختلف بدست آورد.

مقادیر PF, KVA, KW در بارهای کم و متوسط و کامل، نوع بارها و تغییرات روزانه، ماهانه، فصلی و حتی $kW \text{ kvar}$ بخصوص برای فصلهای تابستان و زمستان لازم است و بارهایی که در آینده قرار است اضافه شوند باید مشخص شود. باید توجه داشت که برای یک مقدار معین بهبود در نزدیکی ضریب توان یک $kvar$ بیشتری لازم است یعنی منحنی اصلاح ضریب توان در نزدیکی یک به اشباع می رسد.

1- Economic Power Factor

P.F	Kvar	افزایش Kvar
0.75	0	0
0.80	15	15
0.85	28	13
0.90	42	14
0.95	60	18
1.00	100	40

همانطوری که از جدول مشخص است برای بالابردن ۵ درصد ضریب توان از ۰/۹۵ به ۱/۰۰ به ۴۰ kvar نیاز است درحالیکه برای افزایش همین مقدار ضریب توان از ۰/۸۵ به ۰/۹۰ به ۱۴ kvar نیاز است بنابراین رساندن ضریب توان به مقدار یک اقتصادی نیست و مقدار بهینه ای وجود دارد.

فصل سوم

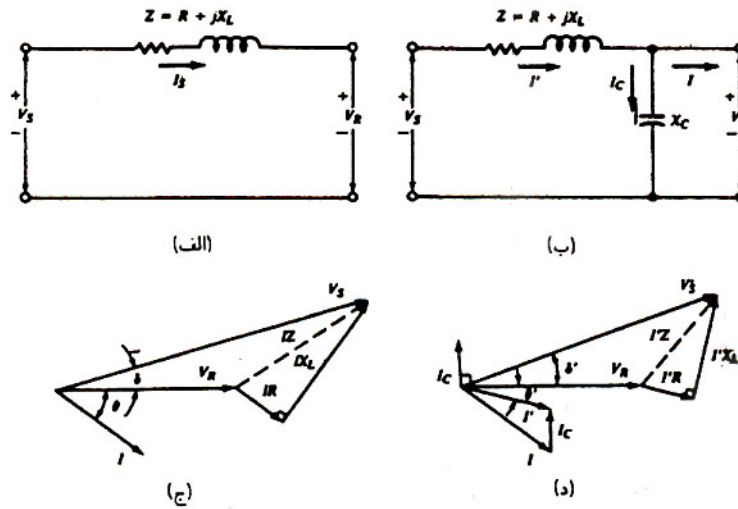
۱-۳ اثرات خازن های موازی در سیستم های قدرت:

خازن های موازی که به صورت واحدهای یگانه یا گروهی از واحدها مورد استفاده قرار می گیرند وظیفه ی تأمین کیلووار پیش فاز در نقطه ی اتصال آن به سیستم را بعهده دارند یک خازن موازی همان اثر موتور و مولد سنکرون فوق تحریک را دارد و به صورت فراوان در سیستم های توزیع بکار می رود این نوع خازنها با تأمین جریان و توان واکنشی مولفه ی ناهمفاز جریان موردنیاز بار القایی را جبران می کنند.

از طرف دیگر این خازنها با کشیدن جریان پیش افی قسمتی و یا همه مولفه ی پس افی جریان بار القایی را در نقطه ی نصب خنثی می کنند و با این کار مشخصه ی آن را اصلاح می کنند. در حالت کلی نصب خازن موازی در نزدیکی بار به صورت های زیر اثر گذار است.

- ۱- مولفه ی پس فاز مدار را کاهش می دهد.
- ۲- سطح ولتاژ را در نقطه ی اتصال بار به مدار افزایش می دهد.
- ۳- چنانچه واحد خازنی به طور مناسب کلید زنی شود تنظیم ولتاژ را بهبود می بخشد.
- ۴- به دلیل کاهش جریان، تلفات قدرت RI^2 کاهش می یابد.
- ۵- به دلیل کاهش جریان تلفات I^2X کاهش می یابد.
- ۶- ضریب قدرت مولدهای منبع را افزایش می دهد.
- ۷- بارگذاری KVA برروی مولدهای منبع و مدارها را به منظور جلوگیری از بروز شرایط اضافه بار، با امکان افزایش رشد بار کاهش می یابد.
- ۸- بارگذاری (کیلووات) اضافی برروی مولدها افزایش می یابد.
- ۹- میزان نیاز مصرف کیلوولت آمپر در جایی که توان خریداری می شود را کاهش می دهد.

۱۰- سرمایه گذاری تجهیزات سیستم کاهش می یابد.



شکل (۲-۱) نمودار فاز برداری ولتاژ برای یک مدار فیدر با ضریب توان پس افقی: الف و ج بدون خازن ب و د با خازن موازی

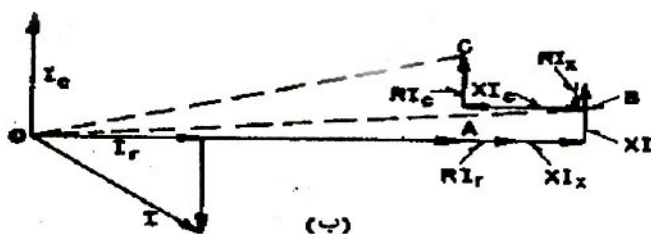
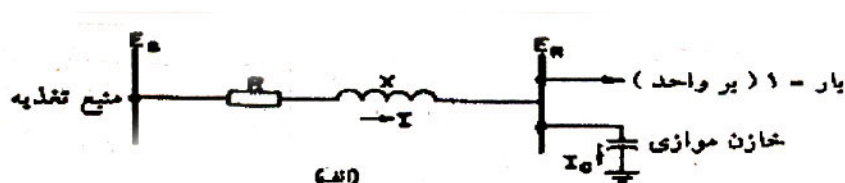
با بکارگیری خازن موازی برای فیدر، مطابقش کل ۱-۳ می توان جریان را کم کرد و ضریب توان مدار را افزایش داد، همانطوری که از شکل پیداست مولفه ی جریان های سلفی و خازنی در مقابل همدیگر عمل می کنند و این باعث کاهش مولفه ی جریان برآیند می شود و در نتیجه افت ولتاژ بین ابتدای خط و بار نیز کاهش می یابد.

ولی خازن های موازی اثری بر جریان یا ضریب توان مدار بعد از نقطه ی نصب خود ندارد. در شکل ۱-۳ نمودار تک خطی یا خط و نمودار فاز برداری ولتاژ آن را پیش از افزودن خازن موازی و پس از افزودن خازن نشان می دهد.

افت ولتاژ در فیدرها یا خطوط کوتاه را می توان به طور تقریبی با رابطه ی زیر بیان نمود.

$$VD = RI_r + XI_r$$

همان گونه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده R مقاومت اهمی، X مقاومت القایی، I_r مولفه ی حقیقی (اهمی) جریان و I_x مولفه ی غیر حقیقی (القایی) جریان می باشد. اگر یک خازن به طور موازی در انتهای خط دوسر بار قرار گیرد افت ولتاژ به طور ناگهانی کاهش یافته یا ولتاژ صعود می کند افت ولتاژ جدید تقریباً برابر است :



OA = ولتاژ در محل بار - E_r

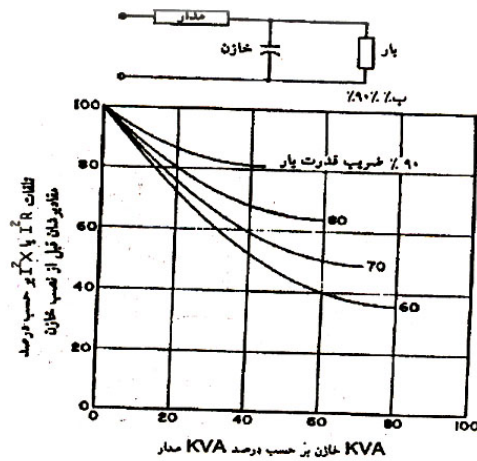
OB = ولتاژ در ابتدای خط بدون خازن - E_s

OC = ولتاژ در ابتدای خط با خازن - E_s

$$VD = RI_r + XI_r = XI_r$$

I_c جریان کشیده شده بوسیله ی خازن است.

پس اگر I_c به اندازه ی کافی بزرگ باشد هر دو افت RI_r ، XI_r را می توان خنثی نمود. این عبارت همچنین نشان می دهد که اگر افت ولتاژ را در بار کامل با خازن های دائمی جبران شود در بارهای سبک I_x ، I_r کوچکتر می شوند و خط وارد حالت فوق جبران می شود در بازارهای سبک افزایش ولتاژ ممکن است بسیار بزرگتر از میزان طبیعی بوده و موجب بروز شرایط ناخواسته و نامحدود گردد. یک راه حل استفاده از کلیدزنی دستی و خودکار برای اضافه کردن یا برداشتن گروهی از خازن ها به طور دلخواه است.



مورد دیگر همانطوری که قبل از این اشاره شد هزینه ی بالای اصلاح ضریب قدرت در نزدیکی یک است همانطوری که در شکل ۲-۳ دیده می شود خازن های اعمال شده به یک بار معین، تلفات I^2X , I^2R مدار منبع قدرت را کاهش می دهند. برای یک بار با ضریب توان ۷۰٪ و ۴۰ کیلووار خازن به ازای هر ۱۰۰ کیلوولت آمپر یا ظرفیت مدار، تلفات I^2R , I^2X ۵۹ درصد مقدار اولیه شان است درحالیکه این مقدار در ضریب توان نزدیک واحد کمتر می باشد که نتیجه می گیریم اصلاح ضریب قدرت در نزدیکی واحد اقتصادی نیست.

شکل (۲-۳) کاهش تلفات در مدار از منبع تولید تا محل خازن

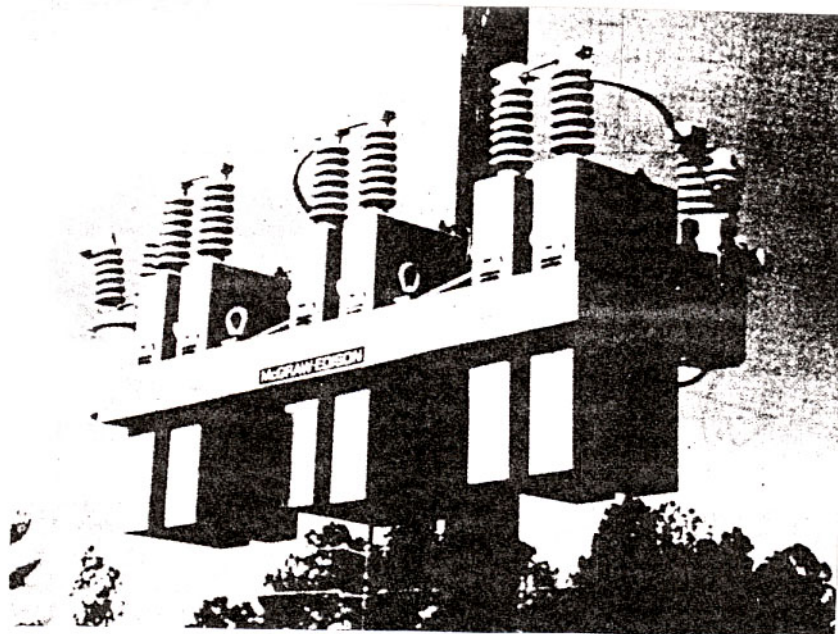
یک فرمول تقریبی که اغلب هنگام استفاه از خازن ها برای تغذیه کننده یا خط شعاعی مفید است عبارت است از:

$$\text{درصد افزایش ولتاژ} = \frac{(k \text{ var})(d)(X)}{(10kv)^2}$$

درجایی که کیلووار برابر کیلووار در یک مجموعه خازنی سه فاز، d فاصله برحسب مایل از شینه تا محل نصب مجموعه خازن، X مقاومت القایی تغذیه کننده برحسب اهم در یک مایل و kv ولتاژ خط به خط سیستم برحسب کیلوولت است. معادله ی بالا درصد افزایش ولتاژ در نتیجه ی استفاده از خازن، از شینه تا خازن را ارائه می دهد که می بایست با افت ولتاژ ناشی از بار جمع گردد تا میزان افت یا افزایش ولتاژ خالص بدست آید این معادله از آن جا که تأثیر خازن را به تنهایی نشان می دهد مفید است.

۲-۳ نصب خازن

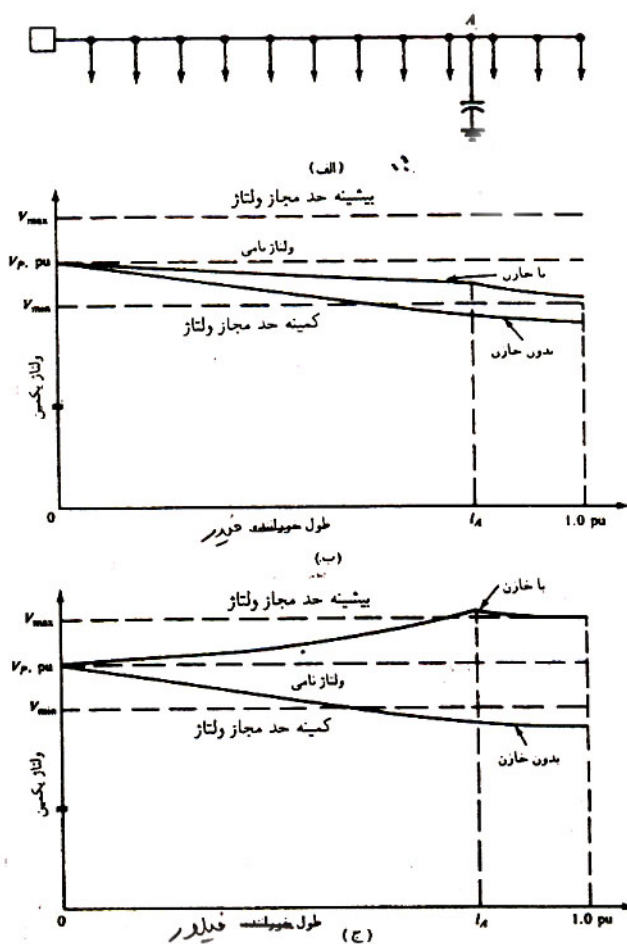
پبه طور کلی، خازنهای فیدرها به صورت گروهی با فیوزگذاری جمعی در بالای دکل نصب می شوند - شکل ۴-۳- شرکت های برق رسانی، معمولاً بیش از چهارگروه خازنی (هم اندازه) روی یک فیدر نصب نمی کنند. چرا که کاربرد فیوزها، اندازه ی گروهی را که می توان به کاربرد را محدود می کند.



شکل (۴-۲) یک نمونه کاربرد خازن بر جایگاه بالای دکل کلید دار

شکل ۵-۳ اثر خازنهای ثابت را بر منحنی ولتاژ فیدری با توزیع بار یکنواخت، در بار کامل و بار کم نشان می دهد. اگر فقط خازنهای ثابت نصب شوند. همانند شکل ۵-۳ شاهد ضریب توان پیش افتی زیاد و افزایش ولتاژ در فیدر خواهیم بود. بنابراین برخی از خازنها را مانند شکل به صورت گروه خازنهای کلیددار نصب می کنند تا بتوان آنها را در شرایط کم باری یا بی باری که

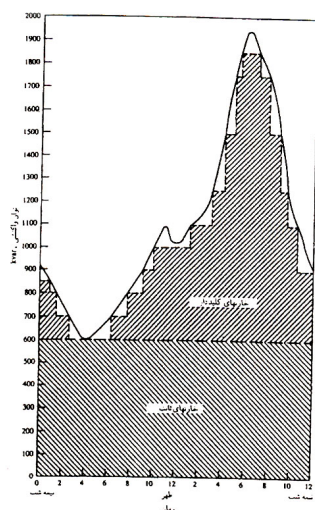
به واسطه ی خاصیت شارژی (خازنی) خط و نصب خازن ولتاژ انتهای فیدر افزایش می یابد کنترل کرد. بنابراین خازن های ثابت برای بی باری انتخاب شده و همیشه در مدار هستند و خازنهای کلیددار را می توان همزمان با افزایش توان واکنشی از بی باری تا بار کامل به صورت یک بلوک یا در چند مرحله کلیدزنی کرده و وارد مدار کرد در عمل تعداد مراحل کلیدزنی بعلت هزینه ی زیاد کلیدهای قدرت توجیه اقتصادی ندارد و می توان از سکسیونر استفاده کرد تا امکان کنترل روزانه، هفتگی و فصلی بیشتر شود.



شکل (۲-۵) آثار خازن ثابت در منحنی ولتاژ (الف) فیدر با توزیع بار یکنواخت (ب) دربار کامل (ج) بی باری

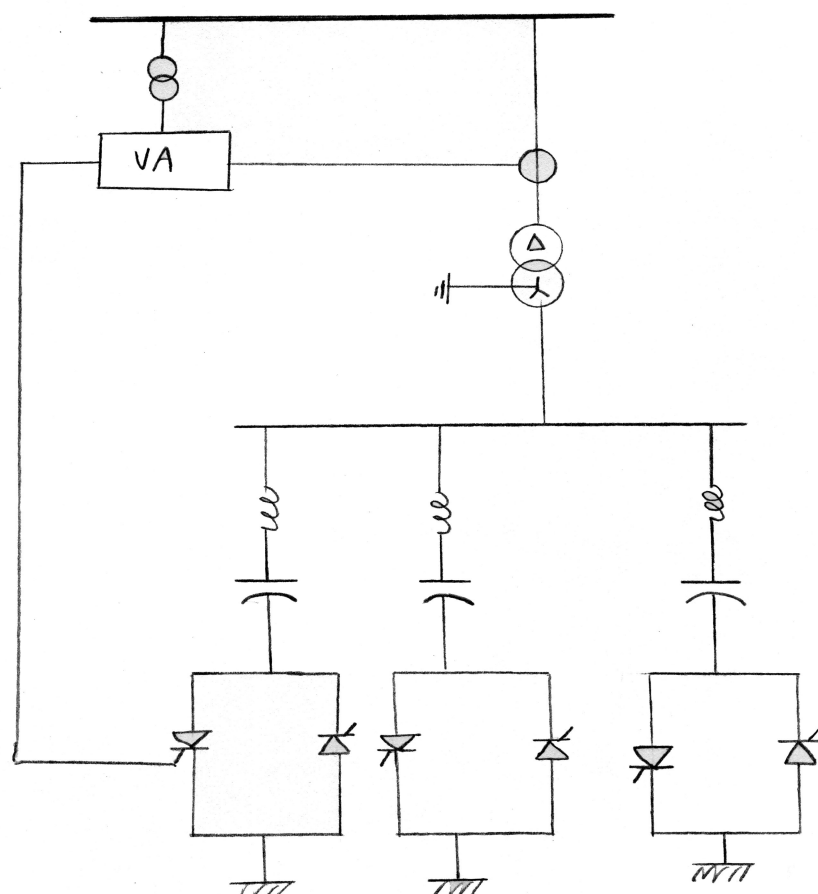
اشکال عمده ی خازن های ثابت مورد استفاده در فیدرها این است که با قطع برق حداقل تا زمان تخلیه خازن، باس ها برق دار هستند و این موضوع از لحاظ ایمنی مشکل ساز است. طبق استاندارد حداقل زمان لازم برای تخلیه ی خازن ۵ دقیقه می باشد که مکانیزم تخلیه ی خازن های قدرت معمولاً به صورت داخلی است.

برای گزینش کردن نوع خازن برای نصب که شامل خازن های ثابت و متغیر می باشد، بررسی جامع سیستم ضرورت دارد. بارهای واکنشی پس افتی سیستم را می توان با برنامه های پخش بار بدست آورد و نتایج آن را می توان با یک منحنی همانند شکل ۶-۳ نمایش داد. که این منحنی به منحنی زمانی توان واکنشی معروف است. با نگاه کردن به منحنی زمانی می توان اندازه ی خازنهای ثابت و متغیر را بدست آورد. برای نمونه طبق شکل اندازه ی خازنهای ثابت لازم ۶۰۰ kvar است. بقیه کیلووار تقاضای بار را ژنراتور یا خازنهای کلیددار به عهده می گیرند همانطوری که گفته شد تأمین توان راکتیو از ژنراتور توجیه اقتصادی ندارد و ممکن است پایداری سیستم را دچار مشکل کند بنابراین از خازن ها استفاده می شود.



شکل(۶-۲) اندازه بندی خازن های ثابت و کلید دار برای تأمین تقاضای روزانه توان واکنشی

کنترل مجموعه ی خازن ها مسئله ی مهمی است . ممکن است بصورت ثابت باشند یا اینکه در بعضی از ساعت های شبانه روز وارد شبکه شوند نمونه ای از مدار شماتیک این نوع کنترل که در شبکه های توزیع و انتقال کاربرد دارد در زیر آورده شده است.



شکل (۷-۳) یک نمونه کنترل SVC

این مدار به SVC معروف است و بخصوص برای کاهش نوسانات شدید که توسط کوره ها تولید می شود مفید است. L برای جلوگیری از رزونانس با شبکه و همچنین کم کردن افزایش جریان تریستور می باشد. تریستورها برای عبور جریان دوطرفه و توسط هوا و یا مایع خنک

می شوند همانطوری که طبق مدار دیده می شود توسط سیستم کنترل و نمونه برداری از باس اصلی مقدار خازن موردنیاز برای جبران سازی وارد شبکه می شود این نوع جبران کننده، از جبران کننده های فعال می باشد و از مشخصات آن سرعت واکنش خیلی سریع و تنظیم توان راکتیو پیوسته می شباشد چنانچه در شبکه، سرعت تغییرات توان آهسته باشد در این حالت کاربرد SVC سبب به خازن های شنت مقرون به صرفه نیست.

۳-۳ جنبه های اقتصادی خازن موازی

زمانی که از خازن در سیستم های قدرت استفاده می شود بایستی کوشش نمود تا مزایای اقتصادی نصب خازن تعیین شود. مقدار بهینه کیلووار خازن، همیشه مقداری است که در آن بهره ی اقتصادی حاصل از اضافه کردن آخرین کیلووار، دقیقاً با هزینه کیلووار برابر باشد. به طور معمول تعیین هزینه کل نصب یک کیلووار خازن آسان می باشد. مسئله مهم، تعیین ارزش اقتصادی دقیق خازن می باشد. یک تجزیه و تحلیل اقتصادی عمومی بر روی مبانی یک سیستم گسترده مسئله ی بسیار پیچیده ای است البته ظهور رایانه ها این را تا حدودی ممکن ساخته است.

در مقابل این امکان وجود دارد که کلیه مزایای اقتصادی ممکن خازن را فهرست کرد تا استفاده کننده بنابر وضعیت خاص خود این عوامل را بررسی کند.

۳-۴ ظرفیت آزاد شده

درصد بالایی از خازن های مورد استفاده به این دلیل نصب شده اند که مزایای اقتصادی آن ها چندین برابر قیمت خازن ها است به طور مثال اگر احداث یک خط فوق توزیع ۱۰۰۰۰۰۰ دلاری را بتوان با اضافه کردن خازن به ارزش ۵۰۰۰ دلار به مدت یک سال به تعویق انداخت این یک

کاربرد آشکار است. در سیستم قدرت مکان های بسیاری برای صرفه جویی از این نوع وجود دارد.

به طور کلی اگر مطالعات نشان دهد که حداکثر بار پیش بینی شده در سال آتی برای تغذیه کننده، مبدل (بار یا پست) و یا خط فوق توزیع تحت بارگذاری کمی بیشتر از حداکثر بار دلخواه قرار می گیرد، در این حالت نصب خازن در سیستم را باید بررسی کرد. گاهی اوقات اضافه بار ممکن است به صورت حرارتی یا محدودیت ولتاژ باشد و خازن هر یک از حالت ها را بهبود می بخشد. حالاتی نیز وجود دارد که در آن نصب خازن به جهت کاهش تلفات کیلووات سیستم، نصب یک واحد مولد را به تعویق می اندازد.

وضعیت هایی که در بالا مورد بحث قرار گرفت در ارتباط تنگاتنگ با مزیت اقتصادی ظرفیت آزاد شده توسط خازن می باشد.

۳-۵ تلفات

یکی از مهمترین مزایای اقتصادی خازن ها کاهش تلفات است. همان گونه که به طور معمول بیان می شود خازن ها هر دو تلفات I^2R ، I^2X سیستم قدرت را کاهش می دهند. V.J.Farmer نشان داده است که کاهش تلفات فقط تابعی از جریان غیرحقیقی است و نیازی به استفاده از مولفه ی حقیقی جریان در محاسبات نیست. کاهش در تلفات I^2R در یک مدار به واسطه ی اضافه کردن خازن برابر است با:

$$LR_R = 2I_c I_x R - I_c^2 R$$

و کاهش در تلفات I^2X برابر است با:

$$LR_x = 2I_c I_x X - I_c^2 X$$

I_c عبارت است از جریان خازن، I_x جریان غیرحقیقی در مدار قبل از این که خازن اضافه شود R مقاومت اهمی مدار و X مقاومت القایی مدار می باشد.

۳-۶ مزایای ولتاژ

خازن ها دارای دو مزیت از نظر ولتاژ هستند. خازن های مرحله ای (کلیدزنی) می توانند به

سیستم اضافه گردیده و یا جایگزین:

۱- تنظیم کننده ی ولتاژ تغذیه کننده

۲- تنظیم کننده های ولتاژ شینه پست

۳- مبدل های مجهز به مکانیسم تغییرولتاژ زیر بار، شوند و خازن های ثابت می توانند متوسط

سطوح ولتاژ یک سیستم را افزایش دهند. با افزایش متوسط سطوح ولتاژ، توسط خازن های

ثابت، هزینه های تنظیم ولتاژ کاهش می یابد یک خازن ثابت، تنظیم کننده ی ولتاژ نیست و نمی

توان آن را به طور مستقیم با تنظیم کننده ها مقایسه نمود افزایش متوسط سطوح ولتاژ یک

خازن ثابت می تواند درآمد حاصل از بارها را افزایش دهد. این مطلب به ویژه در مورد تغذیه

کننده های مناطق مسکونی صدق می کند.

۳-۷ مجموعه های خازنی پست

خازن های موازی اغلب در مجموعه های بزرگ یا گروههای مجموعه ای با ظرفیت کل ۶۰۰۰۰ تا

۱۰۰۰۰۰ کیلووار نصب می شوند مجموعه های منفرد بر روی یک وسیله ی کلیدزنی انفرادی

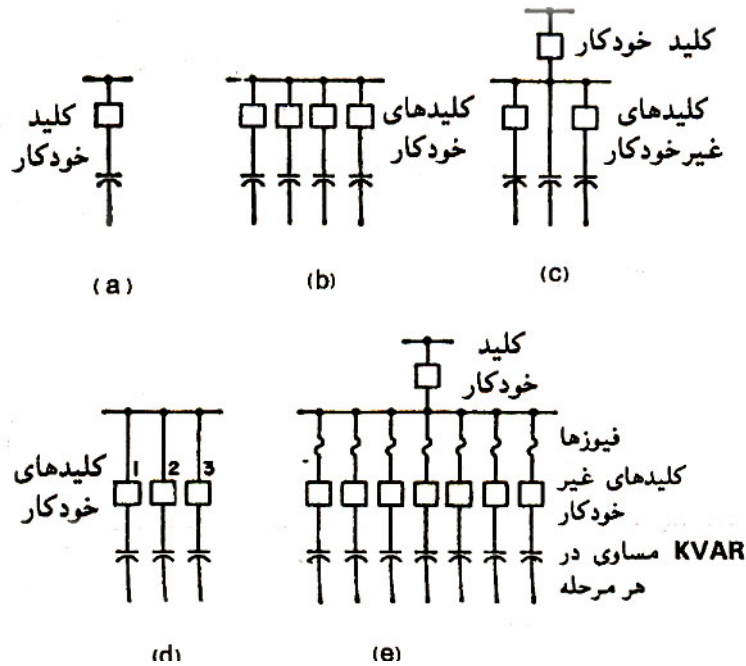
ممکن است بین ۲۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ کیلووار باشد. به منظور دریافت حداکثر مزایای اقتصادی از

خازنها، می بایست تا حد امکان نزدیک به بار آنها را نصب نمود. عموماً به این معنی که

تأسیسات خازنی بایستی بر روی تغذیه کننده بار نصب شود، زمانی که خازن ها در پست نصب

می شوند به طور معمول وضعیت خاصی حاکم است که ممکن است با یک یا چند عامل زیر در ارتباط باشد:

- ۱- یک بار بزرگ مستقیماً از پست تغذیه می شود.
 - ۲- به واسطه ی ولتاژ بیش از حد بارهای سبک، نصب خازن های ثابت بیشتر بر روی تغذیه کننده امکان پذیر نباشد.
 - ۳- قراردادن خازن های مرحله ای بیشتر بر روی تغذیه کننده ها در مجموعه های کوچک غیرممکن و یا غیراقتصادی باشد.
 - ۴- ملاحظات سیستم در یک ناحیه نیاز به خازن بیشتری نسبت به تغذیه کننده هایی که به طور اقتصادی مورد استفاده قرار می دهند، داشته باشند.
 - ۵- ملاحظات سیستمی در یک ناحیه معین تحت کنترل دیسپاچر نیاز به مجموعه بزرگی از خازن داشته باشد.
- عوامل بالا نشان می دهند که چرا بیشتر خازن های پست به صورت مجموعه های مرحله ای هستند، مجموعه های خازنی بسیار بزرگ به ندرت در فقط یک مرحله کلیدزنی می شوند. تغییر ولتاژ در نتیجه اضافه یا حذف خازن ها ممکن است بیش از اندازه باشد.
- شکل ۸-۳ جانمایی یک نمونه را برای مجموعه های خازنی بزرگ نشان می دهد.



شکل (۳-۸) آرایش هاسی مدار کلید خازن های مجموعه ای بزرگ

شکل ۳-۸ یک کلید خودکار (کلید قدرت) را برای یک مجموعه جدا نشان داده و شکل b چهار کلید خودکار را برای چهار مجموعه نشان می دهد این کلیدها بایستی قادر به قطع مقادیر اتصال کوتاه کل سیستم باشند. شکل c یک کلید خودکار با ظرفیت قطع کامل و دو کلید غیر خودکار (سکسیونر) با ظرفیت قطع کاهش یافته را برای یک مجموع سه پله ای نشان می دهد شکل d سه کلید خودکار را در یک آرایش کلیدی برای کلیدزنی موثر ۷ مرحله ای نشان می دهد به عنوان مثال با کلیدهای ۱ و ۳ در حالت بسته $\frac{5}{7}$ مجموعه خازنی در مدار قرار می گیرد با بازکردن کلید ۱ و بستن قطع کننده ی ۲، $\frac{6}{7}$ از کل ظرفیت در مدار قرار می گیرد و همچنین مراحل دیگری نیز امکان پذیر است شکل e آرایشی از کلیدهای قطع کننده را نشان می دهد که در آن از یک کلید قطع کننده خودکار با ظرفیت قطع کامل و چندین کلید قطع کننده غیر خودکار با ظرفیت قطع

کاهش یافته به منظور دستیابی به گام های متعدد کلیدزنی استفاده شده است. کلیدهای قطع کننده ی غیرخودکار (سکسیونر) هرگز جریان عیب را قطع نخواهند کرد. این کلیدها بایستی قادر به تحمل جریان های لحظه ای موجود، اتصالی های فرکانس معمولی و جریان های گذرای کلیدزنی فرکانس بالا مابین مجموعه های خازنی باشند.

عیب جریان لحظه ای (فرکانس معمولی و بالا) روی کلید قطع کننده ما را ملزم می سازد که از کلیدهای قطع کننده با ظرفیت قطع کامل استفاده نماییم بنابراین استفاده از کلیدهای غیرخودکار صرفه جویی اقتصادی را به دنبال ندارد. ممکن است از راکتورها همان طور که برای کاهش ولتاژ بی باری استفاده میشود برای کاهش جریان لحظه ای و جریان اتصالی کلیدهای قطع کننده مجموعه خازنی استفاده شود.

زمانی که مجموعه های بزرگ خازن در پست ها نصب می شوند. نگه داری آتی کلید قطع کننده اغلب می تواند با آینده نگری در جاییابی فیزیکی مجموعه های خازنی کاهش یابد. این موضوع مخصوصاً در جایی که خازن های مجموعه ای موازی وصل می شوند صدق می کند.

افزایش های کوچک در مقاومت غیرحقیقی مابین مجموعه ها ممکن است تعمیرات آتی کلید قطع کننده را بوسیله ی کاهش دامنه و فرکانس جریان های هجومی کلیدزنی کاهش دهد. سیم های رابط بین مجموعه های خازن می بایستی طولانی و حتی الامکان با فاصله از یکدیگر در نظر گرفته شوند.

در صورت استفاده از کابل، کابل تک رشته ای نسبت به کابل سه رشته ای برتری دارد. زمانی که از یک شینه ی جداگانه برای خازن مورد استفاده قرار می گیرد، مقطع شینه بایستی از مقدار موردنیاز جهت عبور جریان بزرگ تر باشد، فواصل هادی شینه می بایستی به اندازه کافی

بزرگ باشد در حال حاضر برای دستیابی به مقاومت اهمی و القایی فرکانس بالا از لوله های آهنی جهت شینه های خازن استفاده می شود.

مجموعه های خازنی پست ممکن است هریک از انواع انباشته ای، تجهیزات سازه‌ی، بیرونی یا مجموعه های با محفظه فلزی محصور شده باشد عموماً در مجموعه های خازنی پست، از فیوزهای جدا بر روی خازن ها استفاده می شود. تعداد واحدهای موازی در یک گروه یا جریان عیب موجود ممکن است چنان باشد که فیوزهای گروه نتوانند خازنی را در مقابل حالت سوراخ شدن در هنگام بروز عیب داخلی حفاظت کند.

مجموعه های خازنی بزرگ مستقر در پست عموماً کلیدزنی می شوند، مجموعه های خازن اغلب به وسیله ی ابزار کنترل از دور نظارت می گردند اگر مجموعه به طور خودکار کنترل شود، اغلب کنترل ولتاژ یا زمان مورد استفاده قرار می گیرد.

واسطه های دیگر مانند Vars، آمپر، ضریب قدرت حرارت یا ترکیباتی از اینها را نیز می توان مورد استفاده قرار داد.

۳-۸ استفاده از خازن در فشار قوی

خازن را تقریباً تحت هر ولتاژ می توان به کار برد، با موازی کردن می توان به کیلووار موردنظر با متوالی کردن خازن ها می توان به ولتاژ موردنظر دست یافت. بنابه دلایل اقتصادی خازن ها بایستی در محدوده ی ولتاژ مجاز مورد بهره برداری قرار گیرند. از آن جا که کیلووار خروجی با مجذور ولتاژ تغییر می کند، استفاده از خازن در زیر ولتاژ مجاز آن فایده چندانی نخواهد داشت به عنوان مثال یک خازن ۷۲۰۰ ولتی به قدرت ۵۰ کیلووار می توان در یک سیستم ۴۱۶۰ ولتی در یک مجموعه با اتصال ستاره مورداستفاده قرار گیرد. ولتاژ دوسر خازن ۲۴۰۰ ولت

خواهد بود و کیلووار خروجی برابر خواهد بود با: $k \text{ var} = 5.55 \cdot (2400)^2 / (7200)^2 = 5.55$

دیده می شود که استفاده از خازن ۵۰ کیلوواری در اینجا فایده چندانی در بر نداشته و از نظر اقتصادی به صرفه نیست اگرچه خازن های ۲۴۰۰ ولتی نیز می توانستند در یک سیستم ۱۲۴۷۰ ولت با استفاده ۱۰۰٪ از ظرفیت مورد استفاده قرار گیرند. برای این منظور می بایست در یک مجموعه با اتصال ستاره قرار گرفته و در هر فاز ۳ عدد خازن ۲۴۰۰ ولتی باهم سری شوند. همچنین لازم است خازن ها از یکدیگر و از زمین عایق شوند.

۹-۳ کاربرد خازن های موازی در تغذیه کننده های فشار متوسط

امروزه درصد بالایی از خازن های موازی بر روی تغذیه کننده های فشار متوسط نصب هستند، زیرا حداکثر بهره زمانی حاصل می شود که خازن ها تا حد امکان به بار نزدیک باشند. بیشترین کاربرد خازن در تغذیه کننده های فشار متوسط، در بازوهای منصوب بر روی پایه ها می باشد. این نوع نصب در محدوده ی ۴۵ تا ۱۲۰۰ کیلووار بر روی هرپایه قرار دارد به طور معمول اقتصادی ترین اندازه و موقعیت مکانی خازن ها بر روی یک فیدر خاص، در ابتدا با در نظر گرفتن کاهش تلفات تعیین می گردد. برای یک مدار شعاعی ساده با بارهای متصل در انتهای مدار، محاسبات کاهش تلفات کاملاً ساده است. Higel, Samson یک قاعده ی عمومی را تعمیم داده اند که تا حدی کاربرد دارد. ایشان اظهار می دارند که یک تقریب خوب در جهت اندازه و موقعیت مکانی بهینه، برای یک تغذیه کننده با توزیع بار یکنواخت، خازنی به اندازه ی $\frac{2}{3}$ کل باری که در نقطه ای به فاصله ی $\frac{2}{3}$ کل فاصله از منبع تا انتهای تغذیه کننده بر روی تغذیه کننده نصب شده، می باشد.

این قاعده مناسب بوده و به ویژه برای تغذیه کننده ها، در جایی که ضریب بار غیرحقیقی بالاست، به عبارتی بالای $\frac{0}{8}$ مفید می باشد. نتیجه حاصل از بررسی ها نشان می دهد برای خازن های ثابت نصب شده بر روی تغذیه کننده های با توزیع بار یکنواخت، حداکثر کاهش تلفات

با مجموعه خازنی، مساوی $\frac{2}{3}$ متوسط کیلووار بار مستقر در نقطه ای به فاصله $\frac{2}{3}$ طول تغذیه کننده از منبع تغذیه رخ می دهد.

و برای خازن های مرحله ای همزمان با توجه به تنظیم ولتاژ بایستی در $\frac{2}{3}$ انتهای طول تغذیه کنده از منبع تولید قرار گیرد.

۱۰-۳ استفاده از خازن های موازی در شبکه های فشار ضعیف

خازن های موازی که در محل بار قرار می گیرند. حداکثر برتری را برای شبکه ی برق فراهم می آورند. در مقایسه با خازن های نزدیک به منبع تولید، خازن های نصب شده در محل بار، حداکثر کاهش در تلفات I^2R , I^2X را فراهم می آورند. ظرفیت سیستم را در اکثر مبدل ها و مدارها آزاد کرده و موجب حداکثر افزایش ولتاژ برای یک میزان کیلووار داده شده می شوند. اگرچه از نظر اقتصادی، نصب خازن درست در محل بار، همیشه بهترین راه حل نیست. زیرا خازن های با ولتاژ بالاتر (۲۴ تا ۸ کیلوولت) به ازای هر کیلووار ارزان تر از خازن های فشار ضعیف (۲۴۰ تا ۶۰۰ ولت) می باشد. همچنین ممکن است همانند مناطق مسکونی، بار تحت ولتاژ مصرف با پله های کوچک توزیع شده باشد. به همین لحاظ لازم است خازن های کوچکتر و گران تری مورد استفاده قرار گیرند. این عوامل در توزیع فشار ضعیف موجب افزایش هزینه به ازاء هر کیلووار خازن می گردد. به همین دلیل بیشتر خازن های سیستم توزیع، خازن های فشار متوسط نصب شده بر روی تغذیه کننده ها هستند در جایی که خازن ها بایستی در مدار قرار گیرند، جنبه های اقتصادی، توسعه بیشتر خازن های فشار متوسط را مطلوب می سازد.

خازن های فشار ضعیف اغلب کلیدزنی نمی شوند. زیرا عموماً اقتصادی تر آن است که خازن های فشار متوسط کلیدزنی شده و خازن های فشار ضعیف به طور ثابت در مدار مورد استفاده قرار گیرند. اگر قرار است سیستم در برابر عیوب خازن های فشار ضعیف حفاظت شود می

بایست خازن ها را به همراه فیوز نصب نمود. عیب با خازن های بدون فیوز ممکن است موجب قطعی در سیستم گردد.

خازن های فشارضعیف اغلب در شبکه های فشار ضعیف زمینی مورد استفاده قرار می گیرند. هزینه بالای شبکه، کاربرد خازن ها را در بعضی موارد قابل توجه می سازد. طرح های خازنی وجود دارند که مخصوصاً برای استفاه از خازن در شبکه های فشارضعیف طراحی شده اند.

واحدهای خازنی منفرد در اندازه های $1/3$ کیلووار و ۲۱۶ ولت می باشند و قفسه های ۴۰ و ۸۰ کیلوواری موجود هستند و این قفسه ها برای مجموعه های بزرگتر باهم ترکیب می شوند.

خازن های قدرت به طور طبیعی برای دمای محیط ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد و بسته به آرایش فضای موجود و تهویه طراحی می شوند محفظه ی خازن فشار ضعیف طوری طراحی می شود که در مقابل خوردگی کاملاً مقاوم بوده و حتی اگر گاهی اوقات در آب آلوده به مواد اسیدی یا آب دریا غوطه ور شود، به طور رضایت بخشی به کار خود ادامه دهد. در بیشتر موارد توجه جنبه های اقتصادی بودن خازن های فشارضعیف کاملاً ساده است. بعضی از استفاده کنندگان تصحیح آن را تا بیش از ۹۰٪ اقتصادی می دانند.

۱۱-۳ فیوزگذاری خازن

بیشتر مجموعه های خازنی تغذیه کننده فشار متوسط و بعضی از مجموعه های کوچک تر پست با فیوزهای گروهی حفاظت می شوند. برای مجموعه های کوچکتر آشکارسازی واحدهای معیوب به اندازه ی واحدهای بزرگ مشکل نیست و زمانی که فیوزهای گروهی حفاظت کافی را در مقابل ترکیدن محفظه فراهم می آورند، اغلب مورد استفاده قرار می گیرند. زمانی که یک

خازن عیب داخلی پیدا می کند، واکنش قوس ایجاد شده و مدار تشکیل دهنده ی خازن موجب تولید گاز و فشار در داخل محفظه خازن می گردد. فیوز جدا یا گروهی، قبل از این که فشار داخل محفظه به حد خطرناکی برسد، می بایست قطع نماید. سازنده خازن به طور معمول فیوزهای جدا را پیشنهاد می کند. در صورت استعمال نیازی به رعایت هماهنگی از سوی کاربر نخواهد بود. اگرچه به طور معمول کاربران فیوزها را به صورت گروهی به کار می برند در این حالت دانستن منحنی های ترکیدن محفظه ی خازن موردنیاز است.

۱۲-۳ نوع اتصال به شبکه

یک مجموعه خازن سه فاز برای تغذیه کننده توزیع ممکن است به صورت مثلث، ستاره با صفر زمین نشده یا با صفر زمین شده اتصال یابد. انتخاب بهترین اتصال ممکن است به نوع سیستم (زمین شده یا زمین نشده) ملاحظات فیوزگذاری، موقعیت مکانی مجموعه خازنی در سیستم، و تداخل رادیویی بستگی داشته باشد.

مجموعه های مثلث یا ستاره زمین نشده زمانی که یک یا دو تا از هادی های طرف منبع مجموعه باز می شوند، همیشه امکان معکوس شدن نقطه ی صفر یا شرایط تشدید را فراهم می آورند. بیشتر شرکتها از اتصال مجموعه های خازنی با اتصال مثلث یا ستاره زمین نشده در طرف بار و وسایل تک قطبی مانند فیوزها، یا دستگاه های وصل مجدد و جداکننده ها پرهیز می کنند. مجموعه های خازنی با اتصال ستاره زمین شده به طور معمول فقط در سیستم چهارسیمه مورد استفاده قرار می گیرد.

خازن ها مسیرهای با مقاومت ظاهری کوچکی برای جریان های هارمونیک بوده و ممکن است اجازه دهند این جریان ها در تغذیه کننده ها جاری شوند که در این صورت با خطوط تلفنی تداخل به وجود می آید. در اکثر شبکه های برق به طور معمول هارمونیک دوم باعث تداخل

رادیویی می شود از آن جا که خازن های با اتصال ستاره زمین شده تنها نوع اتصالی هستند که اجازه می دهند هارمونیک های سوم جریان یابند، بدین جهت در اکثر سیستمهای قدرت به ندرت تداخل رادیویی بوجود می آید. هنگامی که تداخل روی دهد جابجایی مجموعه خازنی اغلب باعث می شود که مشکل رفع گردد. در غیراینصورت می بایست اتصال زمین مجموعه را قطع و یا به مجموعه نوعی صافی اضافه نمود.

می توان به صورت خلاصه تجارب معمول در مورد مجموعه های خازنی را به صورت زیر بیان نمود.

۱- برای سیستمهای مثلث یا زمین نشده. به طور معمول مجموعه های با اتصال مثلث مورد استفاده قرار می گیرد.

۲- برای سیستم های زمین شده و سیستم های چهار سیمه، در بیشتر جاها مجموعه های با اتصال ستاره زمین شده مورد استفاده قرار می گیرد

مجموعه های خازنی در پست ها به طور معمول با اتصال ستاره در سیستم های مثلث همیشه با اتصال ستاره زمین نشده هستند و در سیستم های چهارسیمه می توانند هم بصورت زمین شده و هم به صورت زمین نشده باشند.

۳-۱۳ حفاظت از مجموع ههای خازن موازی

برای حفاظت از مجموعه های خازن موازی بزرگ باید چندین عامل را به حساب آورد.

۱- حفاظت در مقابل موج های ضربه

۲- حفاظت از سیستم قدرت، در شینه خازن یا عیوب سیم های رابط

۳- حفاظت در واحد های خازن جدا در مقابل صدمات ناشی از عیوب شدید واحدهای مجاور

۴- حفاظت واحدهای باقی مانده در مقابل اضافه ولتاژ زمانی که یک یا چند واحد در یک

گروه موازی از مدار خارج می شوند.

حفاظت در مقابل امواج ضربه ای:

مجموعه های خازنی بایستی در مقابل صاعقه و اضافه ولتاژهای دیگر محافظت شوند. عایق مابین عناصر داخلی و محفظه ی خازن ممکن است در اثر ولتاژهای ضربه ای صدمه ببیند. در مجموعه های مثلث و ستاره زمین نشده، پیشنهاد می شود به منظور حفاظت خازن در مقابل تخلیه جوی برق گیر نصب شود. در مجموعه های ستاره زمین شده در یک سیستم کاملاً زمین شده یک مجموعه خازن بزرگ در مقابل ولتاژهای ضربه ای در محدوده ی وسیعی به طور خودکفا محافظت می شود. در یک سیستم ستاره زمین شده، نیاز کمتری به نصب برق گیر می باشد پیشنهاد می شود در مجموعه های بزرگ برق گیرها در طرف منبع کلید قطع کننده ی مجموعه نصب گردد.

حفاظت اضافه جریان:

عیبهای شینه های خازن یا اتصالات مربوطه می بایست به منظور حفاظت بقیه سیستم در مقابل تخریب، برطرف گردد. رله گذاری عادی اضافه جریان به این منظور مورد استفاده قرار میگیرد. مبدل های جریان نصب شده در مجموعه خازنی، می بایست در ثانویه خود دارای حفاظت موج ضربه ای به منظور جلوگیری از آسیب دیدن رله مبدل جریان در طول مدت شرایط جریان گذرا باشند. در طول عملیات کلیدزنی یا در آستانه ی پیدایش عیب، مجموعه خازنی دارای جریان گذرای فرکانس بالایی است که از آن می گذرد، این جریان های گذرا بخصوص زمانی که مجموعه خازنی موازی کلیدزنی می شوند، ممکن است بالا باشند. جریان های گذرا ممکن است

در ثانویه مبدل های جریان، ولتاژهای بالا القا کنند. این موضوع ایجاب می کند که در ثانویه مبدل های جریان حفاظت موج ضربه ای مورد استفاده قرار گیرد.

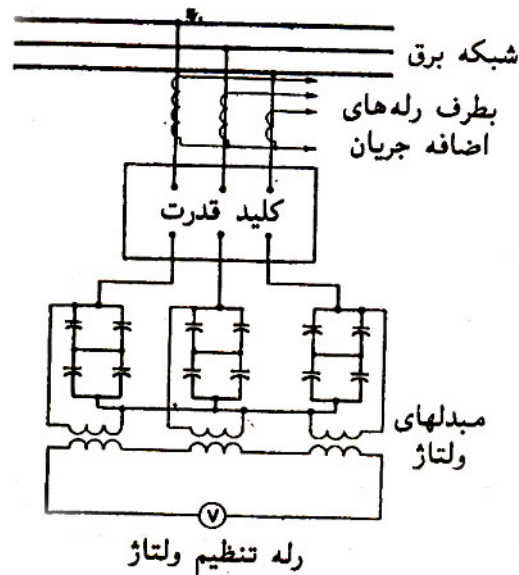
حفاظت واحدهای جدا:

زمانی که در یک واحد خازنی عیب داخلی ظاهر می شود، امکان ترکیدن شدید محفظه وجود دارد، مگر آن که واحد معیوب سریعاً از مدار خارج شود. در تأسیسات خازنی بزرگ تر پیشنهاد می شود از فیوزهای جدا برای حفاظت واحد های خازنی استفاده شود.

این فیوزها واحد معیوب را قبل از انفجار محفظه از مدار خارج نموده و نیز اجازه می دهند واحدهای سالم در مدار باقی مانده و مورد بهره برداری قرار گیرند. بدون استفاده از فیوزهای جدا تعیین واحدهای خازنی معیوب ممکن است بسیار مشکل باشد.

حفاظت اضافه ولتاژ:

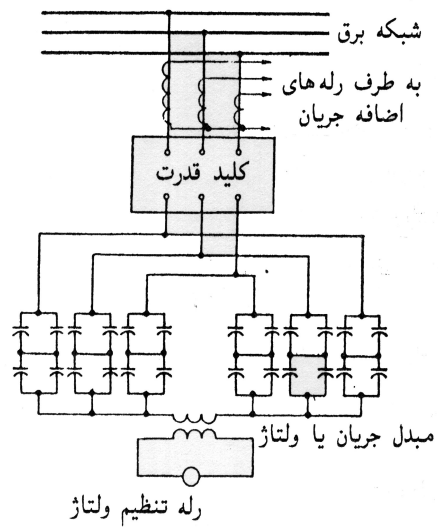
به استثنای دوره های زمانی بسیار کوتاه ولتاژ دوسر خازن ها نباید از ۱۱۰٪ ولتاژ مجاز تجاوز کند. اگر خازن ها در معرض اضافه ولتاژ قرار گیرند گسترش عیب به سرعت افزایش پیدا می کند. برای حفاظت در مقابل ولتاژ در یک گروه موازی، چندین روش وجود دارد شکل های ۱۱ و ۱۰ و ۹-۳ سه نوع طرح رله گذاری را که می تواند مورد استفاده قرار گیرد نشان می دهد. شکل ۹-۳ بهترین طرح نظری است، به ویژه اگر مبدل های ولتاژ همان گونه که نشان داده شده به جای اینکه دو سر کل فازها قرار گیرنده، دوسر هرگروه، موازی متصل شوند. مجموعه های خازنی شکل ها نشان دهنده ی دو خازن در هر گروه موازی و



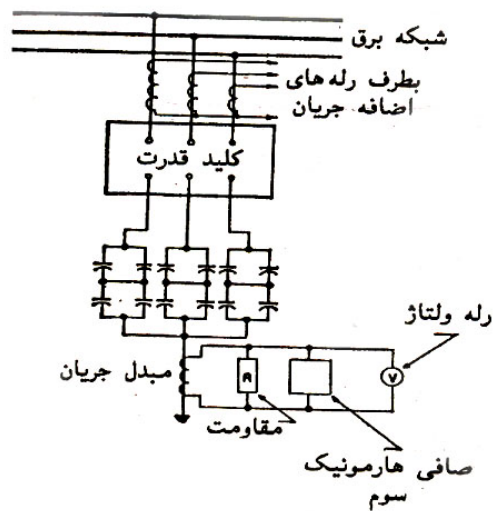
شکل (۳-۹) طرح حفاظت برای مجموعه برای خازنی جدا با اتصال ستاره زمین شد.

دو گروه در هر سری می باشند. ضمناً نشان دهنده ی این مورد هستند که هر تعداد خازن در گروه و هر تعداد گروه در سری می تواند وجود داشته باشد.

طرح های رله گذاری بسیاری وجود دارد که می توانند برای حفاظت گروه های خازن موازی در برابر اضافه ولتاژ مورد استفاده قرار گیرند. چنین به نظر می رسد که سه طرح ارائه شده در این جا زمانی که تمام عوامل در نظر گرفته می شوند. شایستگی قابل ملاحظه ای داشته و طرح های مطلوب تری هستند.



شکل (۳-۱۰) طرح حفاظت برای مجموعه مضاعف خازنی با اتصال ستاره زمین نشده



شکل (۳-۱۱) طرح حفاظت برای مجموعه خازنی با اتصال ستاره زمین شده ی جدا

همان طور که در بالا ذکر گردید، طرح نشان داده شده در شکل ۹-۳ بهترین طرح می باشد. مقاومت های تخلیه تعبیه شده در هر واحد خازنی جدا، مجموعه را در حدود ۵ دقیقه تخلیه می نمایند. برای مجموعه های با کنترل خودکار، چنین زمانی در بسیاری از موارد طولانی است، زیرا ممکن است مجموعه در حالی که هنوز عملکرد قبلی پراست، کلید زده شود. چنین اتفاقی ممکن است موجب ایجاد جریان های بالاتر از جریان گذرای عادی شود.

طرح نشان داده شده در شکل ۱۰-۳ بنام طرح Wye (ستاره) دوتایی شناخته می شود و شایستگی قابل ملاحظه ای دارد. این طرح حفاظت از مجموعه را همانند طرح شکل ۷-۲ و حتی ارزاتر از آن ارائه می دهد. برای مجموعه های کوچکتر ممکن است تقسیم مجموعه ها به دو گروه ستاره گران تمام شود و یا این که غیرممکن باشد. کلیه فیوزهای ارزان قیمت نوع انفجاری مورد استفاده دارای محدودیت حداکثر تعداد در واحدهای موازی می باشند.

به دلیل محدودیت های فیوز، اغلب تبدیل مجموعه های خازنی بزرگ به ستاره ای دوبل مطلوب است. از آن جا که مجموعه های ستاره ای دوبل بهتر از ستاره ی جدا حفاظت می شوند و نیز به طور معمول گرانتر از مجموعه های بزرگ نیستند طرح حفاظت دوبل پیشنهاد می شود.

طرح شکل ۱۱-۳ حفاظت حساسی را برای مجموعه های ستاره زمین شده بدست می دهد. استفاده از یک رله ولتاژ به همراه صافی هارمونی سوم امکان تنظیم رله را برای مقادیر نسبتاً کوچک فراهم می آورد. برای مجموعه های کوچک که نمی توانند به ستاره دوبل تبدیل شوند، این روش طرح حفاظتی ارزان قیمتی است.

هیچ طرحی در زمینه حفاظت در برابر اضافه ولتاژ، حفاظت مثبت علیه اضافه ولتاژ را در کلیه موارد فراهم نمی آورد. نظریه اساسی کلیه طرح ها براساس تشخیص عدم توازن ولتاژ یا جریان می باشد. مقداری عدم توازن ذاتی در مجموعه های خازنی وجود دارد و رله گذاری بایستی

بالتر از حداکثر عدم توازن ذاتی تنظیم گردد. عدم توازن ذاتی اساساً ناشی از جریان های هارمونیک و ولتاژها، تغییر ظرفیت خازنی خازن ها می باشد که در حدود ۱۵٪ + می باشد.

۱۴-۳ تأثیرات هارمونیکی خازن های موازی

خازن ها تحت هیچ شرایطی ولتاژهای هارمونی تولید نمی کنند. اگرچه از آنجا که مقاومت ظاهری خازن با فرکانس نسبت عکس دارد، یک خازن موازی مقاومت ظاهری کوچکی را در فرکانس بالاتر نسبت به مقاومت ظاهری عادی در فرکانس عادی ارائه می دهد. بنابراین ممکن است خازن با فراهم آوردن مسیر کم مقاومت، موجب جاری شدن جریا های هارمونیکی در مدار گردد.

ولتاژهای هارمونیکی در صورت حضور، بیشتر توسط مبدل های فوق تحریک، یکسوکننده ها و یا مولدها تولید می شوند. جریان های هارمونیکی که در قسمتی از سیستم جاری می شوند، ممکن است موجب اختلال رادیویی در شبکه تلفنی شود. جریان های هارمونیکی بیش از حد نیز ممکن است موجب اضافه بار شدن خازن گردد، زیرا جریان مؤثر عبوری از یک خازن را افزایش می دهد.

در سیستم های قدرت امروزی تداخل رادیویی مربوط به مناطقی است که در آن جا خطوط تلفن بدون روکش در مسیری با طول زیاد به طور موازی با خطوط انتقال قدرت عبور می نمایند. ولتاژهای هارمونیکی توسط جریان های هارمونیکی جاری در سیستم قدرت و از طریق کوپلینگ القائی مابین خطوط انتقال و خطوط تلفن به وجود می آید. به همین خاطر مؤلفه های متقارن هارمونیکی ها از اهمیت برخوردار هستند. اگر خطوط انتقال و تلفن در یک طول کامل جابجایی فاز به طور موازی باهم عبور نمایند، هارمونیکی های مولفه های مثبت و منفی در موارد بسیاری

چندان از اهمیت برخوردار نیستند. زیرا مولفه های مثبت و منفی در سه فاز خط انتقال با صفر جمع می شوند.

ولتاژ خالص القایی ناشی از این مولفه ها بستگی به اختلاف فاصله مابین هادی های جدای سه فاز و خط تلفن دارد. اثر نهایی به طور معمول بسیار کوچک است. هارمونیک های مولفه ی صفر به طور معمول بیشترین مشکل را بوجود می آورند. آنها در تمام هادی های سه فاز، همفاز بوده و ولتاژهای القاء شده آن ها در خط تلفن به طور جبری جمع می شود.

هارمونیک های مولفه ی مثبت همگی از درجه ی $(6n+1)$ است که n هر عدد صحیحی می تواند باشد مولفه ی منفی از درجه ی $(6n-1)$ و مولفه ی صفر $(6n-3)$ می باشند. هارمونیک های هفتم، سیزدهم، نوزدهم، بیست و پنجم، مولفه ی منفی هستند. هارمونیک های سوم، نهم، پانزدهم، و بیست یک و هفتم هارمونیک های مولفه ی صفر هستند.

در یک سیستم سه فاز متقارن هارمونیک زوج وجود ندارد. برای تولید هارمونیک های زوج، یک وسیله یکسوکننده جریان می بایست موجود باشد بنابراین این هارمونیک ها به طور معمول به بارهای درگیر با یکسوکننده ها، مانند فعالیت های آبرکاری، بارهای کششی مثل تراموای جریان مستقیم یا جوشکاری می باشند.

هارمونیک های مولفه ی صفر فقط در صورتی که خازن ها به شکل ستاره اتصال یافته و صفر آن نیز زمین شده باشد، جریان می یابند. این یک دلیل برای استفاده از خازن های با اتصال ستاره ی زمین نشده و مثلث می باشد.

قرار داشتن خط انتقال نیرو در فرکانس هارمونیک، باعث ایجاد جریان های هارمونیک بزرگ از طریق مجموعه ی خازنی می باشد، تغییر موضع خازن ها ممکن است مشکل را برطرف کند یا کاهش دهد.

مجموعه های خازنی که دارای امپدانس ظاهری کمتری هستند و موجب جاری شدن جریان هارمونیک می شوند گاهی اوقات سودمند است در بعضی مواقع از یک مجموعه خازنی در کنار بارهای درگیر یکسوکننده ها استفاده می کنند تا جریان هارمونیکی در تجهیزات دیگر جاری نشود در حقیقت این نوع مجموعه ی خازنی صافی است ولی چون برای فرکانس خاصی طراحی نمی شود صافی نیروی خشن نامیده می شود.

۱۵-۳ توجیه اقتصادی برای نصب خازنهای موازی

وقتی که خازن های موازی در سیستم قدرت استفاده می شود لازم است منافع اقتصادی در نصب خازن با هزینه های مربوط به خازن مقایسه گردد فواید کامل از به کار بردن خازن وقتی حاصل می شود که فواید حاصل باهم و همزمان در نظر گرفته شوند. این فواید باید با هزینه خازن ها و وسایل دیگر بکاررفته (سیستم کنترل خازن ها و مکانیسم وارد و خارج کردن آنها در شبکه) مقایسه گردد.

موضوع نصب خازن های موازی در خطوط توزیع انرژی (در پست های تغذیه شده از پست اصلی) بوسیله ی تعداد زیادی از محققان مطالعه شده است Lee, Grainger یک روش بنام برابری مسافتها برای محاسبه ی اندازه و محل قرار گرفتن تعداد مشخصی از خازن های موازی در طول خطوط توزیعی شعاعی به دست آورند. آنها بعدها روش خود را با در نظر گرفتن افزایش ولتاژ در اثر نصب خازن موازی در طول خط تکمیل نمودند. برای افزایش سود حاصل از نصب خازن ها، آنها در مطالعه ی بعدی روش خود را با در نظر گرفتن خازن های قابل قطع و وصل تعمیم دادند. هرچند روشهای مختلف برای محاسبه ی جایابی و اندازه ی بهینه خازن های مورد استفاده در طول فیدر با روشهای مختلفی بررسی شده است ولی این روشها هر یک دارای حداقل یکی از نواقص زیر هستند:

- وقتی که خازن در یک پست فرعی در طول خط توزیع نصب می شود، سود حاصل از ظرفیت آزادشده در پست اصلی اکثراً بیشتر از سود حاصل از کم شدن تلفات انرژی از خطوط است. تقریباً در تمام مطالعات این موضوع در نظر گرفته نشده است
- در اکثر تحقیقات یادشده مقدار خازن ها ثابت فرض شده است و محاسبه ی تعداد بهینه ی خازن ها انجام نشده است.
- در تعدادی از مقالات یادشده خطوط توزیع با انشعابات در نظر گرفته نشده است.
- از آنجایی که در تحقیقات یادشده، تعداد زیادی معادلات به کار می روند که باید حل شوند، با افزایش اندازه شبکه تعداد معادلات زیاد و مسأله خیلی پیچیده می شود.
- افزایش ولتاژ در ساعات بار کم در اکثر بررسی های انجام شده در نظرگرفته نشده است.

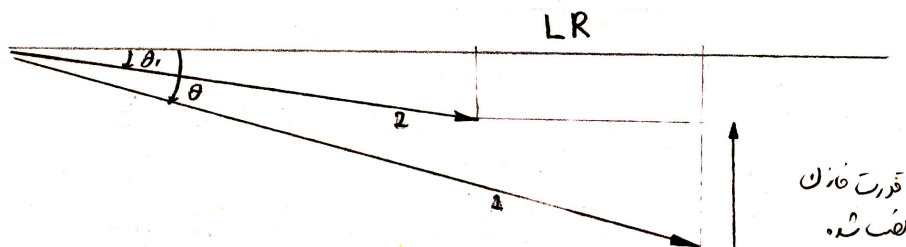
برای محاسبه ی مقدار و محل بهینه خازن های موازی در شبکه توزیع لازم است مزایای حاصل از نصب خازن با هزینه های مربوط به خازن مقایسه شوند قبل از این که روشی برای محاسبات فوق پیشنهاد کنیم مزایای نصب خازن در شبکه را بررسی خواهیم کرد.

فصل چہارم

۴-۱ آزاد سازی ظرفیت

در اثر نصب خازن در یک پست توان راکتیو انتقالی از پست توزیع به محل بار کاهش می یابد و مقداری از ظرفیت فیدرها آزاد می شود آزادسازی ظرفیت فقط مربوط به فیدرنیست و شامل کلیه ی المانهای سیستم بین خازن و منبع، شامل پست توزیع، فیدرهای توزیع، پستهای انتقال، خطوط انتقال، ترانسفورماتورهای توزیع و انتقال تا ژنراتور می شود. آزادشدن ظرفیت در سیستم قدرت باعث تأخیر در نصب و توسعه ی سیستم می گردد و سود قابل توجهی نیز به همراه خواهد داشت. برای مثال اگر صرف هزینه ی معادل ۱/۶٪ برای خازن در یک شبکه ی نمونه باعث به تأخیر افتادن توسعه ی شبکه برای یک سال شود، می توان به اهمیت نصب خازن در شبکه پی برد. بطور مثال در شکل ۴-۱ ظرفیت آزادشده در محل ژنراتور در اثر نصب خازن در محل بار که جریان I_c به پست بار تزریق می نماید از رابطه ای (۴-۱) مطابق شکل ۴-۱ بدست می آید.

$$\text{ظرفیت آزاد شده در محل ژنراتور} = S' \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{EgI_c}{S'} \right)^2 + \left(\frac{LR}{S'} \right)^2 - 2 \left(\frac{EgI_c \sin \theta + LR \cos \theta}{S'} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}$$



که در آن:

$$S' = (RLF).S$$

$$LR = R[2I_L(RLF)I_c - I_c^2]$$

که Eg ولتاژ در محل ژنراتور، I_c جریان خازن، I_L جریان خط، RLF ضریب بار راکتیو و LR کاهش تلفات در اثر نصب خازن و S ظرفیت پست قبل از نصب خازن است.

۲-۴ کاهش تلفات

یکی از مهمترین مزایای نصب خازن در شبکه کاهش تلفات است. با نصب خازن در یک پست، جریان عبوری از فیدرها، پست، ترانسفورماتورها و کلیه ی المانهای قبل از محل نصب خازن تا ژنراتور کاهش می یابد اگر فیدر شکل قبل را در نظر بگیریم، کاهش تلفات توان بعد از نصب خازن در فیدر از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$LR=R(2I_c I_L(RLF)I_c - I_c^2)$$

که در آن I_L جریان بار، I_c جریان خازن و RLF ضریب بار راکتیو است. بعد از کاهش تلفات توان سه سود دیگر حاصل می شود که مربوط به کاهش تلفات بار حداکثر (تقاضا)، صرفه جویی در انرژی بخاطر کاهش انرژی تلفاتی و کاهش حداکثر بار راکتیو است.

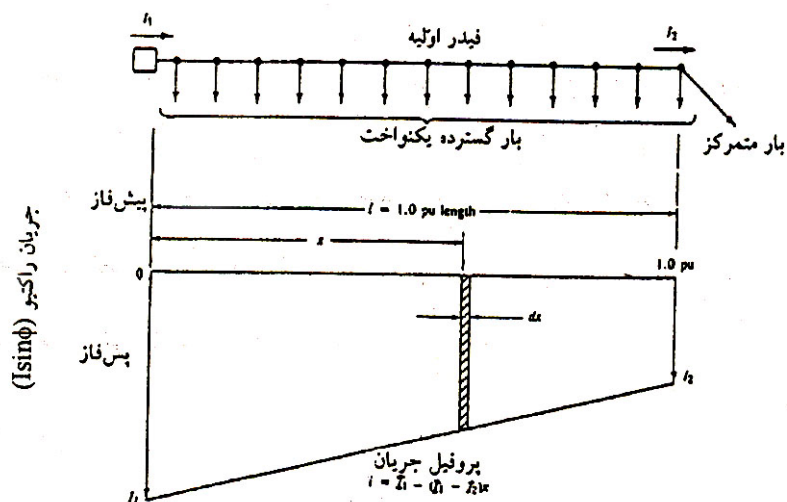
جایابی بهینه خازن های موازی در شبکه های توزیع

برای مشخص نمودن محل نصب خازن در پست های توزیع باید بطریقی عمل کنیم که منافع حاصل حداکثر شود. روشهای مختلفی برای جایابی بهینه خازن در شبکه ی توزیع ارائه شده است. در روشهای مختلف محل بهینه سازی با توجه به ساده سازیهای متفاوت و یکنواخت فرض نمودن بار فیدر، تعداد محدود محل نصب خازن، تقسیم بندی شبکه به زیرشبکه ها و ... انجام شده است. البته با توجه به گستردگی و تنوع شبکه های توزیع شاید نتوان روشی یافت که کلیه پارامترها رابه حساب آورد و کلیه مزایای حاصل از نصب خازن را در تابع هدف منظور کرد، بدین جهت هر روش دارای مزایا و معایبی است.

۳-۴ یک روش ریاضی برای جایابی بهینه خازن ها

روشهای مختلفی برای جایابی بهینه خازن در شبکه ارائه شده است. روشهای ارائه شده هرکدام مزایا و معایبی دارند. با توجه به گستردگی شبکه های توزیع انرژی، روشهای پیچیده ممکن است کاربرد عملی نداشته باشند. اگرچه استفاده از روشهای تقریبی نیز جوابهای نادرست و غیربهینه را خواهد داد. برای پیدا کردن محل و تعداد خازن در این روش از فرضهای ساده کننده (نظیر یکنواخت فرض نمودن توزیع بار روی فیدر، مشخص کردن تعداد محل های نصب خازن از قبل و ...) استفاده شده است. در این مطالعه مقدار بار ثابت فرض شده است و از تغییرات تلفات حقیقی در اثر افزایش ولتاژ بواسطه ی نصب خازن صرف نظر شده است. شکل ۲-۴ یک فیدر با بار یکنواخت در طول و یک بار مجتمع در انتهای آن را نشان می دهد. فرض کنید I^2R تلفات حاصل از جریان پس فاز I جریان عبوری از مقاومت R باشد می توان نشان داد که:

$$I^2 R = (I \cos \varphi)^2 R + (I \sin \varphi)^2 R \quad (۴-۱)$$



شکل (۴-۲) فیدر توزیع با بیار گسترده و متمرکز و پروفیل جریان راکتیو قبل از نصب خازن

پس از نصب خازن با جریان I_c جریان عبوری از خط I_1 تولید تلفات I^2R را می کند که از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$I_1^2 R = (I \cos \varphi)^2 R + (I \sin \varphi - I_c)^2 R$$

در نتیجه کاهش تلفات در اثر نصب خازن برابر است با:

$$DP_{LS} = I^2 R - I_1^2 R \quad (4-2)$$

با قراردادن از روابط بالا در رابطه ی فوق خواهیم داشت.

$$DP_{LS} = 2(I \sin \varphi)I_c R - I_c^2 R \quad (4-3)$$

فرض کنید طول فیدر واحد باشد. پروفیل جریان خط در هر نقطه روی فیدر، تابع فاصله ی آن نقطه از شروع فیدر است. بنابراین دیفرانسیل تلفات I^2R برای یک جزء دیفرانسیلی کوچک در فاصله ی X بصورت زیر نوشته می شود.

$$P_1(0, I_1), P_2(1, I_2)$$

دو نقطه ی ابتدایی و انتهای پروفیل جریان

$$i = I_1 - (I_1 - I_2)X$$

$$dp_{LS} = 3[I_1 - (I_1 - I_2)X]^2 R dx$$

در نتیجه کل تلفات I^2R در فیدر از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$P_{LS} = \int_{x=0}^1 dp_{LS} = 3 \int_{x=0}^1 [I_1 - (I_1 - I_2)X]^2 R dx = (I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)R \quad (4-4)$$

که در آن P_{LS} کل تلفات فیدر قبل ا اضافه کردن خازن، I_1 جریان راکتیو در ابتدای فیدر، I_2 جریان راکتیو در انتهای فیدر، R مقاومت فیدر و X فاصله از ابتدای فیدر برحسب پریونیت است.

۴-۴ کاهش تلفات توان در اثر نصب خازن

حالت اول (یک بانک خازنی: وارد کردن یک بانک خازنی روی فیدر شکل ۲-۴ باعث شکست در پروفیل توان راکتیو در طول فیدر می شود، بنابراین تلفات در اثر اضافه کردن یک بانک خازنی از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$P'_{Ls} = \int_{x=0}^{x_1} [I_1 - (I_1 - I_2)X - I_c]^2 R dx + 3 \int_{x=x_1}^1 [I_1 - (I_1 - I_2)X]^2 R dx$$

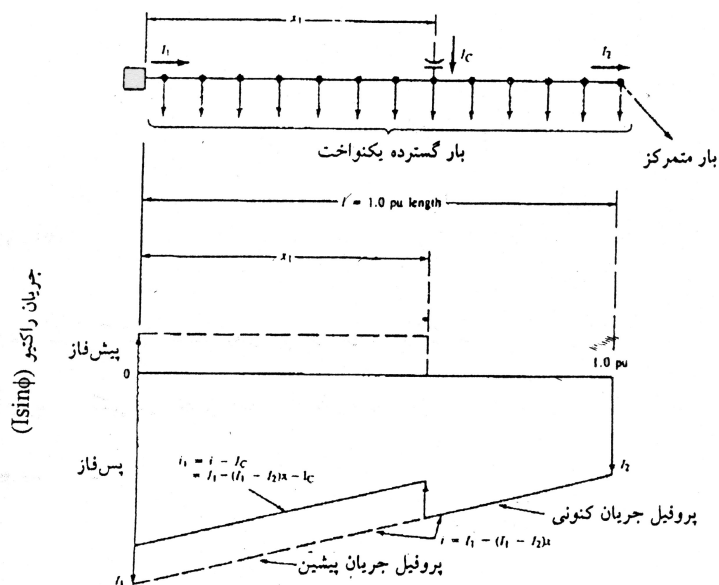
و پس از انتگرال گیری خواهیم داشت.

$$P'_{Ls} = (I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)R + 3x_1[(X_1 - 2)I_1 I_c - x_1 I_2 I_c + I_c^2]R$$

در نتیجه کاهش تلفات در اثر نصب یک بانک خازنی برحسب پریونیت برابر است با:

$$\Delta P_{Ls} = \frac{P_{Ls} - P'_{Ls}}{P_{Ls}}$$

با جایگزینی روابط بالا در رابطه ای آخر خواهیم داشت:



شکل (۳-۴) کاهش تلفات در اثر نصب یک بانک خازنی

$$\Delta P_{Ls} = \frac{-3X_1[(X_1 - 2)I_1I_c - X_1I_2I_c + I_c^2]R}{(I_c^2 + I_1I_2 + I_2^2)R}$$

با تقسیم رابطه ای فوق بر I_1 و مرتب کردن عبارت خواهیم داشت:

$$\Delta P_{Ls} = \frac{3X_1}{1 + \left(\frac{I_2}{I_1}\right) + \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2} \left[(2 - X_1)\left(\frac{I_c}{I_1}\right) + X_1\left(\frac{I_2}{I_1}\right)\left(\frac{I_c}{I_1}\right) - \left(\frac{I_c}{I_1}\right)^2 \right]$$

اگر C بصورت نسبت قدرت خازن نصب شده به کل توان راکتیو بار تعریف شود یعنی:

ظرفیت خازن نصب شده ÷ کل توان راکتیو بار = C

$$C = \frac{I_c}{I_1} \text{ خواهیم داشت}$$

و اگر λ نسبت جریان راکتیو در انتهای خط به توان راکتیو در ابتدای خط به صورت زیر تعریف شود.

$$\lambda = \frac{I_2}{I_1}$$

با جایگزینی مقادیر λ , C , در رابطه کاهش نسبی تلفات خواهیم داشت:

$$DP_{Ls} = \frac{3X_1}{1 + \lambda + \lambda^2} [(2 - X_1)C + X_1\lambda_c - C^2]$$

با فاکتورگیری از C خواهیم داشت.

$$\Delta P_{Ls} = \frac{3CX_1}{1 + \lambda + \lambda^2} [(2 - X_1) + X_1\lambda - C]$$

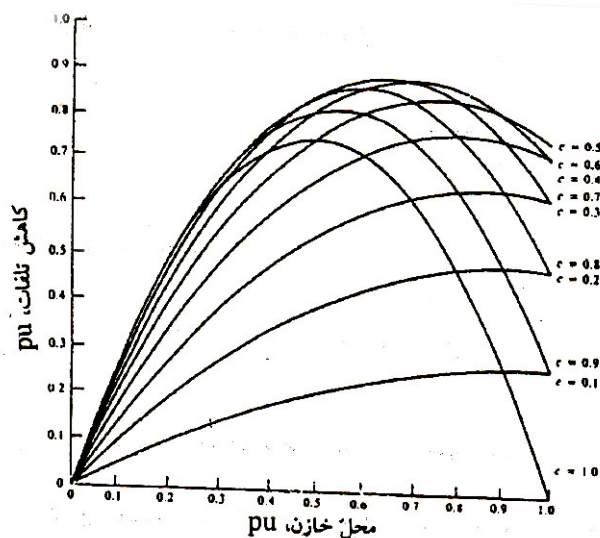
اگر α به صورت زیر تعریف شود خواهیم داشت.

$$\alpha = \frac{1}{1 + \lambda + \lambda^2}$$

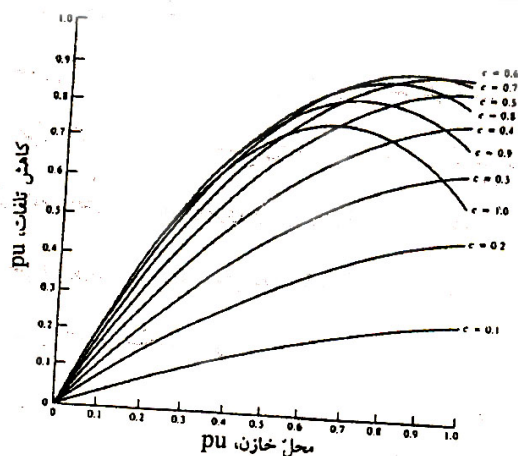
برای کاهش تلفات داریم

$$\Delta P_{Ls} = 3\alpha CX_1 [(2 - X_1) + \lambda X_1 + C]$$

شکلهای ۳-۴ تا ۶-۴ کاهش تلفات با تغییر محل یک بانک خازنی تکی بازای اندازه و نسبتهای مختلف جبران سازی در طول فیدر را نشان میدهد یعنی برای بارهای گسترده ی یکنواخت $\lambda=0$ و بارهای متمرکز $\lambda=1$ و ترکیب بارهای متمرکز و گسترده ($0<\lambda<1$) منحنی های کاهش تلفات رسم شده اند.

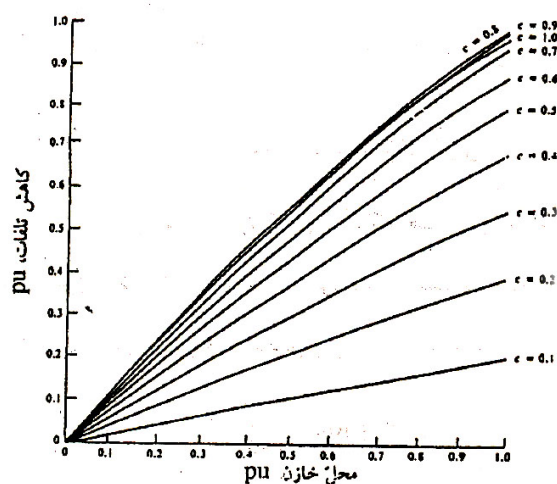


شکل ۱۳-۱۶ کاهش تلفات بصورت تابعی از محل بانک خازنی و نسبت جبران سازی خازنی برای قسمتی از یک خط با بار گسترده یکنواخت ($\lambda = 0$)



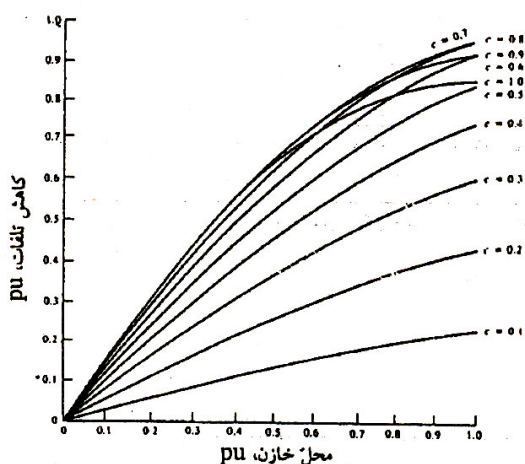
شکل ۱۳-۱۷ کاهش تلفات بصورت تابعی از محل و مقدار جبران سازی خازنی برای یک خط با ترکیبی از بار یکنواخت گسترده و بار متمرکز ($\lambda = \frac{1}{4}$)

به عنوان مثال فرض کنید که بار روی خط به طور گسترده ی یکنواخت توزیع شده باشد و نسبت جبران سازی $C=0.5$ از شکل ۳-۴ حداکثر کاهش تلفات به ازای نصب خازن در ۷۵٪ طول فیدر از منبع به دست می آید. مقدار کاهش تلفات ۸۵٪ پریونیت یا کمتر از ۸۵٪ خواهد بود. به عبارت دیگر فقط یک محل بازای هر بانک خازنی به منظور به دست آوردن بیشترین کاهش تلفات وجود دارد.



شکل ۱۳-۱۹ کاهش تلفات بصورت تابعی از محل و نسبت جبران سازی خازن برای خطی با

ترکیبی از بارهای متمرکز و گسترده یکنواخت ($\lambda = \frac{3}{4}$)



شکل ۱۳-۱۸ کاهش تلفات بصورت تابعی از محل و نسبت جبران سازی خازن برای یک خط با

ترکیبی از بارهای متمرکز و گسترده یکنواخت ($\lambda = \frac{1}{4}$)

پحالت دوم) بانک خازنی: فرض کنید که از دو بانک خازنی باندازه های مساوی برای نصب روی فیدر مطابق شکل ۷-۴ استفاده می شود. با استفاده از همان روش حالت اول تلفات با نصب دو خازن روی فیدر مطابق زیر محاسبه می شود:

$$P'_{LS} = 3 \int_{x=0}^{x_1} [I_1 - (I_1 - I_2)X - 2I_c]^2 R dx + 3 \int_{x=x_1}^{x_2} (I_1 - (I_1 - I_2)X - I_c)^2 R dx + 3 \int_{x=x_2}^1 [I_1 - (I_1 - I_2)X]^2 R dx$$

مانند حالت قبل مقدار کاهش تلفات از روابط زیر بدست می آید:

$$\Delta P_{LS} = 2\alpha C X_1 [(2 - x_1) + \lambda X_1 - 3C] + 3\alpha C X_2 [(2 - x_2) + \lambda X_2 - C]$$

و با مرتب سازی خواهیم نوشت:

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha C [X_1(2 - X_1) + \lambda X_1 - 3C] + X_2 [(2 - X_2) + \lambda X_2 - C]$$

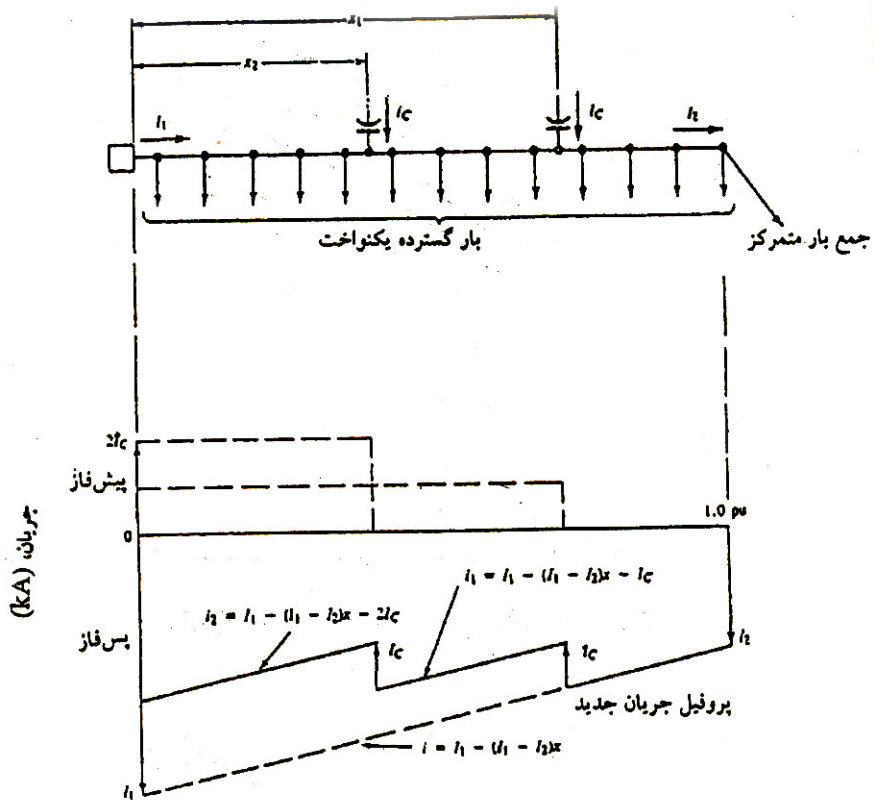
حالت سوم) سه بانک خازنی: فرض کنید سه بانک خازنی مساوی در طول فیدر نصب شود مقدار کاهش تلفات پریونیت در این حالت از رابطه ی زیر به دست می آید.

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha C \{X_1 [(2 - X_1) + \lambda X_1 + 5C] + X_2 [(2 - X_2) + \lambda X_2 - 3C] + X_3 [(2 - X_3) + \lambda X_3 - C]\}$$

حالت چهارم) n بانک خازنی: با توجه به حالت های قبل مقدار کاهش تلفات در اثر نصب n بانک خازنی مساوی روی فیدر از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha C \sum_{i=1}^n X_i [(2 - X_i) + \lambda X_i - (2i - 1)C]$$

که در آن X_i فاصله بانک خازن n ام و از منبع و n تعداد بانک های خازنی است.



شکل ۱۳-۲۰ کاهش تلفات با دو بانک خازنی

۴-۵ حل بهینه بانک خازنی

محل بهینه i امین بانک خازنی با گرفتن مشتق مرتبه ی اول از معادله ی بالا نسبت به X_i و مساوی صفر قراردادن آن بدست می آید:

$$X_i \quad opt = \frac{1}{1-\lambda} - \frac{(2i-1)C}{2(1-\lambda)}$$

که $X_i \quad opt$ محل بهینه ی i امین خازن در طول فیدر است. با جایگزینی رابطه ی فوق در رابطه کلی کاهش تلفات، مقدار کاهش تلفات بهینه بصورت زیر بدست می آید.

$$\Delta P_{Ls, opt} = 3\alpha C \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{1-\lambda} - \frac{(2i-1)C}{1-\lambda} + \frac{i^2 c^2}{1-\lambda} - \frac{c^2}{4(1-\lambda)} - \frac{ic^2}{1-\lambda} \right]$$

معادله ی فوق یک مجموعه ی جبری نامحدود است و بوسیله روابط زیر ساده می شود:

$$\sum_{i=1}^n (2i-1) = n^2$$

$$\sum_{i=1}^n (i) = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\sum_{i=1}^n (i^2) = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{1-\lambda} = \frac{n}{1-\lambda}$$

بنابراین رابطه ی کاهش تلفات بهینه بصورت زیر ساده می شود.

$$\Delta P_{Ls, opt} = 3\alpha C \left[\frac{n}{1-\lambda} - \frac{n^2 C}{1-\lambda} + \frac{n C^2 (n+1)(2n+1)}{6} - \frac{n C^2}{4(i-\lambda)} - \frac{n C^2 (n+1)}{2(1-\lambda)} \right]$$

یا:

$$\Delta P_{Ls, opt} = \frac{3\alpha C}{1-\lambda} \left[n - C n^2 + \frac{C^2 n (4n^2 - 1)}{12} \right]$$

نسبت جبران سازی خازن در هر محل با مشتق گیری از روابط بالا نسبت به C و مساوی صفر قرار دادن آن به دست می آید.

$$C = \frac{2}{2n+1}$$

معادله ی بالا به قانون $\frac{2}{2n+1}$ موسوم است. به عنوان مثال برای $n=1$ مقدار خازن $2/3$ کل توان

راکتیو بار است که در محل X_1 که از رابطه ی بالا بدست می آید قرار داده می شود:

$$x_1 = \frac{2}{3(1-\lambda)}$$

مقدار حداکثر کاهش تلفات از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\Delta P_{Ls, opt} = \frac{8\alpha}{9(1-\lambda)}$$

برای یک فیدر با بارگسترده یکنواخت، مقدار جریان راکتیو در انتهای فیدر برابر صفر است

($I_2=0$) در نتیجه:

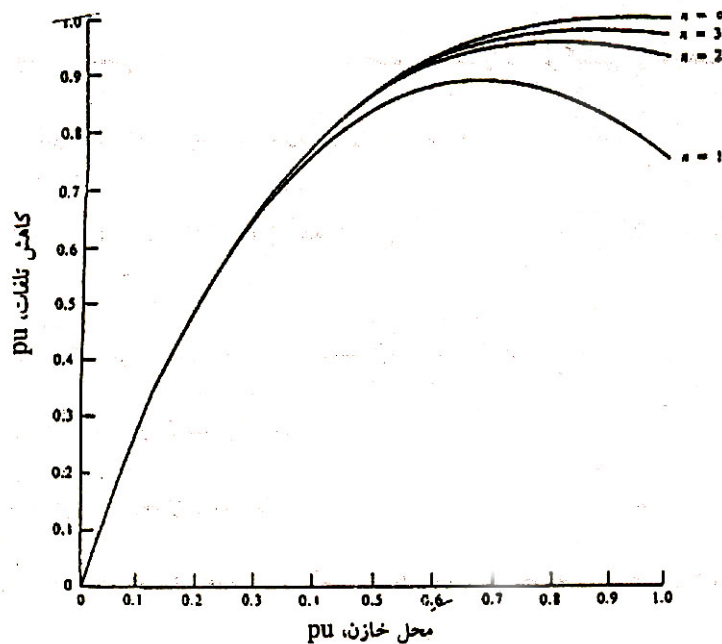
$$\lambda = 0, \alpha = 1 \quad \Delta p_{ls, opt} = \frac{8}{9} p.u$$

مقدار بهینه ی X_1 :

$$x_1 = \frac{2}{3} p.u$$

و مقدار بهینه ی C از رابطه زیر بدست می آید:

$$C = \frac{2}{3} p.u$$



شکل ۱۳-۲۲ مقایسه کاهش تلفات ناشی از ۱، ۲، ۳ و بی نهایت تعداد بانک خازنی ($\lambda = 0$)

در شکل زیر مقدار حداکثر کاهش تلفات برای بانکهای خازنی مختلف مقایسه شده اند. منحنی ها به ازاء سطوح مختلف جبران سازی برای بار با توزیع یکنواخت ($\lambda = 0$) رسم نشده اند منحنی های داده شده برای مقدار یک یا دو، سه و بی نهایت تعداد بانک خازنی رسم شده اند. بطور مثال برای یک بانک خازنی مشاهده می شود که ظرفیت بانک خازنی $2/3$ کل توان راکتیو بار است که در فاصله ی $2/3$ طول فیدر از منبع نصب می شود و کاهش تلفات 8.9 درصد خواهد بود.

۴-۵ کاهش تلفات انرژی در اثر نصب خازن

مقدار کاهش تلفات انرژی در یک خط سه فاز با ترکیبی از بارهای مجتمع و گسترده یکنواخت در اثر نصب خازن از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$\Delta EL = 3\alpha C \sum_{i=1}^n ni[(2 - x_i)F'_{LD} + x_i\lambda F'_{LD} - (2i - 1)C]T$$

که در آن F'_{LD} ضریب بار راکتیو، T مدت زمان کل که در آن خازنهای موازی نصب شده اند و ΔEL مقدار کاهش تلفات انرژی برحسب پریونیت است.

نحل بهینه ی خازن های ثابت برای کاهش حداکثر تلفات انرژی با مشتق گیری از روابط بالا نسبت به x_i و مساوی قرار دادن آن به دست می آید، در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{\partial(\Delta EL)}{\partial x_i} = 3C\alpha[2F'_{LD}(\lambda - 1)x_i + 2F'_{LD} - (2i - 1)C]$$

$$\frac{\partial^2(\Delta EL)}{\partial x_i} = -2F'_{LD}(1 - \lambda) < 0$$

اگر رابطه ی بالا را مساوی صفر قرار دهیم. محل بهینه ی خازن برای کاهش حداکثر تلفات انرژی بصورت زیر بدست می آید.

$$x_{iopt} = \frac{1}{1 - \lambda} - \frac{(2i - 1)C}{2(1 - \lambda)F'_{LD}}$$

به همین طریق مقدار ظرفیت بهینه خازن به صورت زیر بدست می آید.

$$C_T = \frac{2n}{2n + 1} F'_{LD}$$

از معادله ی بالا مشاهده می شود که اگر تعداد کل خازن ها به سمت بی نهایت میل کند مقدار بهینه ی کل خازنها برابر ضریب بار راکتیو خواهد شد، اگر فقط یک بانک خازنی به کار برده شود، مقدار بهینه ی ظرفیت خازن برای کاهش حداکثر انرژی تلفاتی برابر است با:

$$C_T = \frac{2}{3} F'_{LD}$$

معادله ی بالا رابطه معروف دو سوم برای خازن های ثابت را نشان می دهد. با ساده سازی روابط بالامقدار بهینه ی کاهش تلفات انرژی به دست می آید:

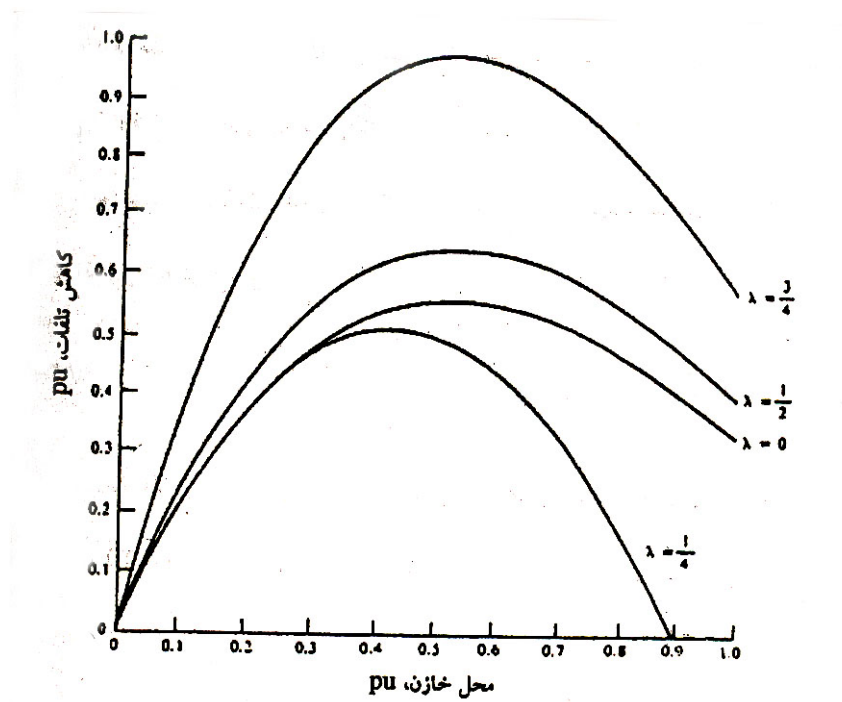
$$\Delta E_{Lopt} = \frac{3\alpha C}{1-\lambda} \left[nF'_{LD} - Cn^2 + \frac{Cn^2(4n^2-1)}{12F'_{LD}} \right] T$$

$$\frac{3\alpha nc}{1-\lambda} \left[F'_{LD} - cn + \frac{C^2 n^2(4n^2-1)}{12n^2 F'_{LD}} \right] T$$

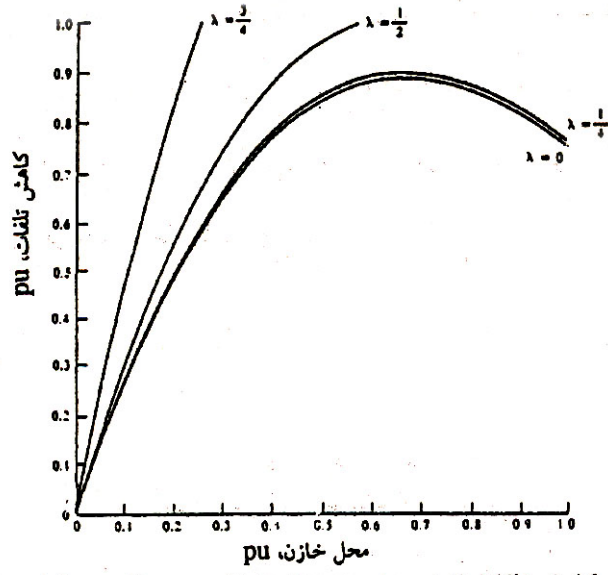
$$\frac{3\alpha C_T}{1-\lambda} \left[F'_{LD} - C_t + \frac{C_2 + (4n^2-1)}{12n^2 F'_{LD}} \right] T$$

که CT کل جبران سازی راکتیو Cn است.

برمبنای معادله بالا مقدار بهینه ی کاهش تلفات انرژی برای هر بانک خازنی در بهترین محل برای مقادیر مختلف ضریب بار اکتیو محاسبه و نتایج در شکل های زیر رسم شده اند.



شکل ۲۳-۲۴ کاهش تلفات انرژی برای هر بانک خازنی در محل بهینه ($F'_{LD} = 0.8$)



شکل ۱۳-۲۴ کاهش تلفات انرژی برای هر بانک خازنی در محل بهینه ($F'_{LD} = 1$)

فصل پنجم

در این فصل به بررسی دو مقاله از مقالات IEEE خواهیم پرداخت ، که روشی را برای یافتن مقدار و مکان بهینه خازن در یک شبکه توزیع شعاعی ارائه می دهد.

جاگذاری خازن در سیستمهای توزیع شعاعی برای کاهش تلفات

M.H.Haque¹

چکیده:

کاهش تلفات I^2R در سیستمهای توزیع برای بهبود بازده انرژی تحویلی ضروری است. تلفات I^2R برپایه ی مولفه های اکتیو و راکتیو جریان های شاخه به دو قسمت قابل تفکیک است. تلفات I^2R می تواند به دو قسمت بر پایه ی جریان راکتیو و اکتیو تقسیم شود. این مقاله روشی را برای می نیم کردن تلفات مربوط به مولفه ی راکتیو جریان های شاخه از طریق جاگذاری خازن موازی ارائه می دهد. این روش ابتدا توالی گره ها را برای جبران سازی توسط خازن تعیین می کند. سپس اندازه ی بهینه ی خازن در گره های جبران شده از طریق بهینه سازی معادله ی کاهش تلفات با توجه به جریان های خازن تعیین می شود. در مورد عملکرد روش پیشنهادی در دو سیستم توزیع که دارای ۱۵ و ۳۳ باس می باشند بررسی به عمل آمده و مشخص شد که کاهش تلفات معنی داری با جاگذاری بهینه ی خازن ها در سیستم قابل انجام است.

۱- مقدمه

یک سیستم توزیع مصرف کننده ها را به یک سیستم انتقال ولتاژ بالا متصل می کند. بخاطر ولتاژ کمتر و بنابراین جریان بالاتر، تلفات I^2R در یک سیستم توزیع در مقایسه با یک سیستم انتقال ولتاژ بالا به طور معنی داری زیادتر است.

1.The author is with the school of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Technological University, Singapore

فشار حاصل از بهبود بازده کل انرژی تحویلی تجهیزات قدرت را مجبور به کاهش تلفات، مخصوصاً در مرحله ی توزیع می کند تلفات I^2R در سیستمهای توزیع با پیکربندی دوباره ی شبکه [۴-۱] قابل کاهش است. این فرآیند مسیر جاری شدن انرژی را از منبع به بارها عوض می کند. همچنین تلفات توسط اضافه کردن خازن های شنت به بخش تغذیه ی تقاضای توان راکتیو کاهش می یابد [۸-۵] خازن های شنت نه تنها تلفات را کاهش می دهند، بلکه سبب بهبود منحنی ولتاژ و ضریب قدرت و پایداری سیستم می شود. عموماً یک سیستم توزیع تنها در یک نقطه تغذیه می شود و ساختمان شبکه اصولاً به صورت شعاعی است. برای چنین سیستمی همه ی تقاضاهای توان اکتیو و تلفات باید توسط منبع در باس اصلی تأمین گردد.

بنابراین اضافه کردن خازن های شنت می تواند توان راکتیو تولید کند، در این صورت تأمین همه ی توان راکتیو و تلفات توسط منبع لازم نیست. بنابراین شرایطی برای کاهش تلفات متناظر با قدرت راکتیو جاری در شاخه ها وجود دارد.

روش های مختلفی برای کاهش تلفات از طریق جاگذاری خازن ها در سیستم های توزیع در طول سالهای گذشته گزارش شده است. قدیمی ترین روش ها [۹ و ۱۰] از فرضیات غیرواقعی بار یکنواخت توزیع شده، فیدرهای بدون شاخه های جانبی، اندازه ی یکنواخت فیدر و غیره استفاده می کند. مرجع [۱۱] روندی را برای بهینه کردن صرفه جویی مالی خالص متناظر با کاهش تلفات و انرژی توسط جاگذاری خازن های ثابت و کلیدزنی توسعه داده است.

روش ابتکاری Heuristic [۱۲] همچنین توسط بعضی محققین برای پیدا کردن اندازه و محل بهینه ی خازن ها اعمال می شود.

مرجع [۱۳] از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله ی جاگذاری خازن استفاده کرده است. این مقاله روشی برای مینیم کردن تلفات متناظر با مولفه ی راکتیو جریان های شاخه ها با

جایگذاری خازن های بهینه در مکان مناسب پیشنهاد می کند. این روش ابتدا محل بهینه ی خازن ها را در یک روش ترتیبی پیدا می کند. به محض اینکه محل خازن ها تعیین گردید، اندازه ی بهینه ی خازن در هر محل انتخابی از طریق بهینه کردن معادله ی کاهش تلفات بدست می آید. روش ارائه شده بر روی دو سیستم توزیع مختلف امتحان و نتایج بسیار دلگرم کننده ای بدست آمد.

۲- زمینه

تلفات کل $(P_{Lt})I^2R$ در یک سیستم توزیع که دارای n شاخه است توسط رابطه ی زیر ارائه می شود.

$$P_{Lt} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (1)$$

که در آن I_i ، R_i به ترتیب بزرگی جریان و مقاومت شاخه ی i ام هستند. جریان شاخه از حل معادله ی پخش بار به دست می آید. الگوریتم پخش بار توضیح داده شده در [۱۴] برای این منظور به کاربرده می شود. جریان شاخه دو مولفه دارد:

اکتیو (I_a) و راکتیو (I_r) تلفات متناظر با مولفه های اکتیو و راکتیو جریان می تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$P_{La} = \sum_{i=1}^n I_{ai}^2 R_i \quad (2)$$

$$P_{Lr} = \sum_{i=1}^n I_{ri}^2 R_i \quad (3)$$

توجه کنید که برای شبکه ی شعاعی تغذیه شده از یکسو تلفات P_{La} متناظر با مولفه ی اکتیو جریان های شاخه قابل مینیمم شدن نیستند. زیرا همه توان اکتیو باید توسط منبع در باس اصلی

تأمین شود. در حالی که تلفات P_{LR} متناظر با مولفه ی راکتیو جریان های شاخه می تواند توسط قسمت تغذیه انرژی راکتیو در مصرف کننده مینیمم شود.

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی ابتدا ترتیب گره ها را برای جبران سازی مشخص می کند. این ترتیب با اعمال تکراری روش مینیمم سازی تلفات توسط خازن های دارای محل مشخص تعیین می شود. به محض مشخص شدن ترتیب گره ها برای جبران سازی، اندازه ی بهینه ی خازن متناظر در گره های جبران سازی شده بطور همزمان با می نیم کردن معادله ی کاهش تلفات با توجه به جریان های خازن قابل تعیین است. روند می نیمم سازی تلفات از طریق جایگذاری خازن های تکی و چندگانه در بخش های بعدی توضیح داده می شود.

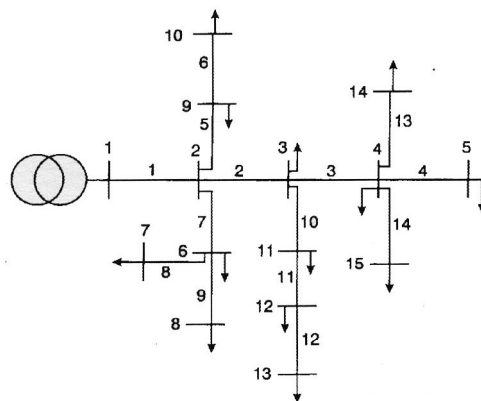


Fig.1 Single-line diagram of the 15-bus system

۳-۱ می نیم کردن تلفات با خازن تکی

یک شبکه ی شعاعی تغذیه شده از یک طرف دارای n شاخه را در نظر بگیرید. فرض کنید خازن C در باس m قرار داده شود و α مجموعه ی شاخه های متصل بین منبع و باس های خازن باشد. در شکل ۱ اگر خازن در باس ۱۲ قرار داده شود، ($m=12$) مجموعه α شامل شاخه های ۱ و ۲ و ۱۰ و ۱۱ می باشد. خازن جریان راکتیو I_c را می کشد و برای یک شبکه ی شعاعی تنها مولفه ی راکتیو جریان شاخه ی مجموعه α را تغییر می دهد. جریان شاخه های دیگر ($\notin \alpha$) از خازن تأثیر نمی پذیرد. بنابراین جریان راکتیو جدید I_{ri}^{new} برای شاخه ی i ام بصورت زیر است:

$$I_{ri}^{new} = I_{ri} + D_i I_c \quad (۴)$$

$$D_i = 1 \text{ اگر } i \in \alpha$$

در غیر اینصورت ؛ $=0$

که در آن I_{ri} جریان راکتیو شاخه ای i ام در سیستم اصلی از حل معادله ی پخش بار بدست می آید. تلفات P_{Lr}^{com} متناظر با مولفه ی راکتیو جریان های شاخه در سیستم جبران شده (وقتی که خازن متصل است) بصورت زیر نوشته می شود:

$$P_{Lr}^{com} = \sum_{i=1}^n (I_{ri} + D_i I_c)^2 R_i \quad (۵)$$

کاهش تلفات S اختلاف معادله ی ۳ و ۵ بوده و بصورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} S &= P_{Lr} - P_{Lr}^{com} \\ &= -\sum_{i=1}^n (2D_i I_{ri} I_c + D_i I_c^2) R_i \end{aligned} \quad (۶)$$

جریان خازن I_c که ماکسیمم کاهش تلفات را تأمین می کند از رابطه ی زیر بدست می آید،

$$\frac{\partial S}{\partial I_c} = -2 \sum_{i=1}^n (D_i I_{ri} + D_i I_c) R_i = 0 \quad (7)$$

بنابراین جریان خازن برای کاهش تلفات حداکثر عبارت است از:

$$I_c = - \frac{\sum_{i=1}^n D_i I_{ri} R_i}{\sum_{i=1}^n D_i R_i} = - \frac{\sum_{i \in \alpha} I_{ri} R_i}{\sum_{i \in \alpha} R_i} \quad (8)$$

اندازه ی خازن متناظر برابر است با:

$$Q_c = V_m I_c \quad (9)$$

که در آن V_m اندازه ی ولتاژ خازن در باس m می باشد. پروسه ی بالا برای همه ی باس ها، جهت بدست آوردن بالاترین کاهش تلفات ممکن برای یک خازن با محل مشخصی قابل تکرار است. هنگامیکه باس موردنظر مشخص و جبران شد، روش بالا برای تعیین باس های بعدی جبران شونده برای کاهش تلفات قابل استفاده است.

این کار فقط محل قرار داده شدن خازن ها را مهیا می سازد. اندازه ی خازن که از معادله ی (۹) بدست می آید یک مقدار بهینه ی محلی است و ممکن نیست وقتی بیش از یک خازن در سیستم جایگذاری می شود استفاده گردد. اندازه ی خازن های بهینه ی محل های چندگانه بطور همزمان تعیین می شود و روند یافتن اندازه ی بهینه در بخش ذیل توضیح داده می شود.

۲-۳ می نیم سازی با خازن های چندگانه

مفهوم می نیم سازی تلفات با خازن های تکی قابل تعمیم به خازن های چندگانه است. در نظر بگیرید که :

$$k = \text{تعداد باس های خازنی}$$

$$I_c = \text{بردار } k \text{ بعدی شامل جریان های خازن}$$

$\alpha_j =$ مجموعه ی شاخه ها از باس منبع تا باس خازن j ام ($j = 1, 2, \dots, k$)

$D =$ ماتریس $n \times k$

داریه های D بصورت زیر در نظر گرفته می شوند:

$$D_{ij} = 1 \quad \text{اگر} \quad i \in \alpha_j$$

$$= 0 \quad \text{در غیر این صورت}$$

در شکل ۱، اگر سه خازن ($k=3$) در باس های ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ قرار داده شوند، مجموعه ی شاخه α ها و ماتریس D^T بصورت زیر قابل نوشتن است.

$$\alpha_1 = [1, 5, 6] \quad \alpha_2 = [1, 2, 10, 11] \quad \alpha_3 = [1, 2, 3, 13]$$

$$D^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

هنگامیکه خازن ها در سیستم قرار داده می شوند، مولفه ی راکتیو جدید جریان های شاخه بصورت زیر می باشد.

$$[I_r^{new}] = [I_r] + [D][I_c] \quad (10)$$

تلفات P_{Lr}^{com} متناظر با جریان های راکتیو جدید در سیستم جبران سازی شده هست.

$$P_{Lr}^{com} = \sum_{i=1}^n \left(I_{ri} + \sum_{j=1}^n D_{ij} I_{cj} \right)^2 R_i \quad (11)$$

کاهش تلفات S با جایگذاری خازن ها، اختلاف بین معادلات ۳ و ۱۱ بوده و به صورت زیر نوشته می شود.

$$S = - \sum_{i=1}^n \left[2I_{ri} \sum_{j=1}^k D_{ij} I_{cj} + \left(\sum_{j=1}^k D_{ij} I_{cj} \right)^2 \right] R_i \quad (12)$$

جریان های خازن بهینه برای کاهش ماکزیمم تلفات از حل معادلات زیر بدست می آید

$$\frac{\partial S}{\partial I_{c1}} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial I_{c2}} = 0 \quad (13)$$

... ..
... ..

$$\frac{\partial S}{\partial I_{CK}} = 0$$

$$[A][I_c] = [B] \quad (14)$$

بعد از انجام یکسری عملیات ریاضی، معادله ی ۱۳ می تواند به صورت مجموعه ای از معادلات جبری خطی به شرح زیر بیان شود.

که در آن A یک ماتریس مربع $K \times K$ و B یک بردار k بعدی است. درایه های A ، B بصورت زیر می باشد.

$$A_{jj} = \sum_{i \in \alpha} R_i \quad (15)$$

$$A_{im} = \sum_{i \in (\alpha_j \cup \Omega_{\alpha m})} R_i \quad (16)$$

$$B_j = \sum_{i \in \alpha_j} I_{ri} R_i \quad (17)$$

تنها مقاومت های شاخه و جریان های راکتیو در سیستم اصلی برای پیدا کردن درایه های A ، B موردنیاز است. جریان های خازن برای حداکثر کاهش تلفات از معادله (۱۴) بدست می آید.

$$[I_c] = [A]^{-1} [B] \quad (18)$$

با بدست آمدن جریان های خازن، اندازه های بهینه ی خازن بصورت زیر نوشته می شود:

$$[Q_c] = [V_c][I_c]$$

که در آن V_c بردار بزرگی ولتاژ باس های خازن می باشد.

کاهش تلفات در سیستم جبران سازی شده توسط معادله ی (۱۲) که در آن برای مقدار I_c از معادله ی (۱۸) استفاده می شود قابل تخمین است.

۴- الگوریتم

گامهای محاسباتی دخیل در پیدا کردن اندازه و محل بهینه ی خازن برای می نیم کردن تلفات در سیستم توزیع شعاعی در زیر خلاصه می شود:

۱- برنامه ی پخش بار را اجرا کنید و جریان های شاخه ها را بدست آورید. باسی را

انتخاب کنید و کاهش تلفات حداکثر و اندازه ی خازن متناظر را به ترتیب از معادله ی ۶

و ۹ پیدا کنید. این مرحله را برای همه ی باس های سیستم بجز باس منبع تکرار کنید.

باسی را پیدا کنید که بیشترین کاهش تلفات را بدست می دهد، تعیین نمایید.

۲- باس را جبران سازی کنید تا حداکثر کاهش تلفات متناظر با خازن بدست آمده از معادله

ی ۹ حاصل شود.

۳- مراحل ۱ و ۲ را تکرار کنید، تا باس خازن بعدی و بنابراین ترتیب باس های جبران

سازی شونده بدست آید، تا وقتی که معلوم شود با جایگذاری خازن های بیشتر کاهش

تلفات عمده ای حاصل نمی شود.

۴- پس از تعیین ترتیب باس ها، اندازه های خازن بهینه و کاهش تلفات متناظر را به ترتیب

از معادله ی ۹ و ۱۲ تعیین نمایید. توجه کنید که بار سیستم متغیر با زمان است و منحنی

تداوم بار سیستم با یک سری تابع های خطی تکه ای در مدتی که بار ثابت فرض می

شود قابل تقریب است [۱۳ و ۱۶]. الگوریتم بالا اندازه های خازن بهینه و محل آنها را

برای سطح بار داده شده بدست می دهد. تعیین کاهش تلفات کل برای پرپود کل منحنی تداوم بار نیاز به اعمال الگوریتم فوق به هریک از ترازهای بار است. این کار ممکن است اندازه های مختلفی برای خازن پیشنهاد نماید و در بعضی حالات در مکان های مختلف. مسأله ای اختلاف اندازه و محل خازن می تواند با استفاده از ترکیب خازن های ثابت و کلیدزنی مرتفع گردد [۱۱]

۵- نتایج شبیه سازی

این روش پیشنهادی برای کاهش تلفات از طریق جایگذاری خازن بر روی دو سیستم توزیع شامل ۱۵ و ۳۳ باس آزمایش شده است. نتایج بدست آمده در این سیستم ها بطور خلاصه در بخش های بعدی توضیح داده می شود.

۱-۵ سیستم ۱۵ باس

دیگرام تک خطی ۱۱ kV سیستم ۱۵ باس در شکل ۱ نمایش داده می شود. داده های سیستم از مرجع [۱۵] گرفته شده است. این سیستم بار متمرکز برابر با $KVA (1251/2 + j 1226/4)$ و تلفات I^2R برابر $61/8 KW$ است. تلفات متناظر با مولفه های اکتیو و راکتیو جریان های شاخه بدست آمده از حل پخش بار به ترتیب $30/4 kw$ و $31/4 kw$ است.

ابتدا اندازه ی بهینه ی خازن تکی و کاهش تلفات متناظر با آن تعیین می شود. اشکال ۲ و ۳ به ترتیب اندازه و کاهش تلفات خازن را برای تمام باس ها در سیستم نمونه باستثنای باس منبع نشان می دهد در شکل ۳ می توان خاطرنشان شد که بیشترین کاهش تلفات $23/4 kw$ با قراردادن خازن $1013 Kvar$ در باس ۳ (شکل ۲) حاصل می شود. نتایج این سیستم در جدول ۱ خلاصه می شود.

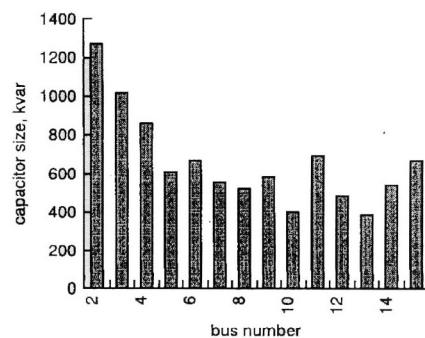


Fig.2 Optimal size of a singly located capacitor of the 15-bus system

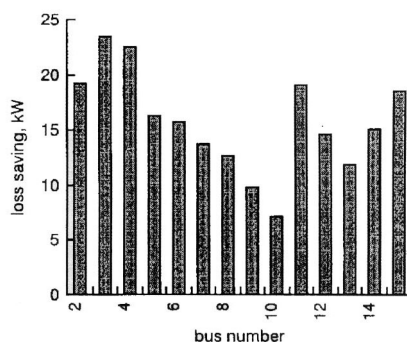


Fig.3 Estimated loss saving in the 15-bus system for a singly located capacitor

هنگامیکه روند بالا تکرار می شود، بعد از قرار دادن خازن 1013 Kvar در باس ۳، مشخص شد که خازن دوم 327 Kvar در باس ۶ کاهش تلفات بیشتر $2/7 \text{ kw}$ بدست می دهد. هنگامیکه باس ۶ هم جبران سازی می شود، مشخص گردید که خازن 150 Kvar باید از باس ۳ برداشته شود تا کاهش تلفات بیشتر $0/5 \text{ kw}$ حاصل گردد. این نشان می دهد که باس ۳ در ابتدا بیش جبران شده زیرا مسأله ی بهینه سازی برای تعیین اندازه ی یک خازن تکی حل شده است. با این وجود وقتیکه هر دو باس ۶ و ۳ جبران سازی شوند، روش توصیفی در بخش ۲-۳ استفاده شده است برای پیدا کردن اندازه های خازن بهینه و کاهش تلفات متناظر با آن این روش کاهش تلفات کلی

برابر با ۲۷/۷ kw توسط خازن ۱۱۹۳ Kvar (۸۰۵ Kvar در باس ۳ و ۳۸۸ Kvar در باس ۶) فراهم می آورد. هنگامیکه سیستم اصلی با استفاده از خازن های فوق الذکر جبران سازی می شود نتایج پخش بار نشان می دهد که تلفات سیستم ناشی از I_r از ۳۱/۴ kw به ۳/۷ kw کاهش پیدا می کند.

Table 1: Summary of results of 15-bus system

System description	System loss			Compensation and saving			
	P_{La} kW	P_{Lr} kW	P_{Lb} kW	*	Bus	Capacitor size, kVAr	Saving, kW
Original base system	30.4	31.4	61.8	1	3	1013	23.4
1013 kVAr is placed at bus 3	29.1	8.0	37.1	1	6	327	3.7
1013 kVAr is placed at bus 3 327 kVAr is placed at bus 6	28.9	4.3	33.2	1	3	-150	0.5
Original base system	30.4	31.4	61.8	2	3	805	27.7
805 kVAr is placed at bus 3 388 kVAr is placed at bus 6	28.9	3.7	32.6		6	388	

* Number of buses to be compensated

Table 2: Summary of results of 33-bus system

System description	System loss			Compensation and saving			
	P_{La} kW	P_{Lr} kW	P_{Lb} kW	*	Bus	Capacitor size, kVAr	Saving, kW
Original base system	293.9	75.4	369.3	1	29	1245	62.0
1245 kVAr is placed at bus 29	284.0	14.1	298.1	1	12	385	7.9
1245 kVAr is placed at bus 29 385 kVAr is placed at bus 12	282.9	6.3	289.3	1	23	495	3.1
Original base system	293.9	75.4	369.3	2	29	1079	69.5
1079 kVAr is placed at bus 29 396 kVAr is placed at bus 12	282.7	6.5	289.2		12	396	
Original base system	293.9	75.4	369.3	3	29	1035	72.8
1035 kVAr is placed at bus 29 370 kVAr is placed at bus 12 521 kVAr is placed at bus 23	282.1	3.0	285.1		12	370	
					23	521	

* Number of buses to be compensated

بنابراین یک کاهش ۲۷/۷ kw انجام شده بود که با تخمین روش پیشنهادی برابر بود. هم چنین خازن های موازی منحنی ولتاژ را بهبود می بخشند و در اثر ولتاژ بالاتر مولفه ی اکتیو جریان شاخه ی Ia نیز (و بنابراین P_{La}) برای مدل بار ثابت به آرامی کاهش پیدا می کند. P_{La} سیستم از

کاهش I_a حاصل می شود. $30/4 \text{ kW}$ به $28/9 \text{ kW}$ کاهش پیدا می کند. بنابراین یک کاهش فوق العاده $1/5 \text{ kW}$ نیز در اثر

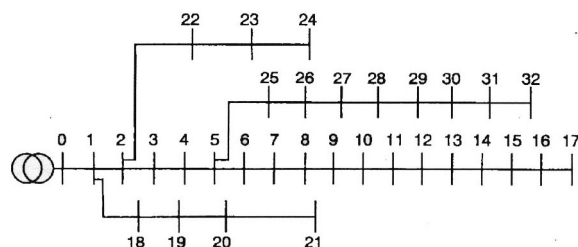


Fig.4 Single-line diagram of the 33-bus system

۲-۵ سیستم ۳۳ باس

دیاگرام تک خطی $12/66 \text{ kv}$ سیستم ۳۳ باسه در شکل ۴ نشان داده شده است. داده های سیستم از مرجع [۱] گرفته شده است. بار پایه ی سیستم $(4715 + j2300) \text{ Kvar}$ و تلفات کل $269/3 \text{ kW}$ است. تلفات سیستم ناشی از I_r برابر $75/4 \text{ kW}$ است. خلاصه ی نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی در مینیم سازی تلفات ناشی از I_r در جدول ۲ آمده است.

مشاهده می شود که در جدول ۲ زمانیکه باس ۲۹ اولین باس جبران سازی شده توسط خازن 1245 Kvar می باشد کاهشی برابر با $62/0 \text{ kW}$ حاصل خواهد شد. با این وجود نتایج پخش بار (در سیستم اصلی و سیستم جبران شده) نشان داد که تلفات ناشی از I_r از $75/4 \text{ kW}$ به $14/1 \text{ kW}$ کاهش یافته است. بنابراین کاهش واقعی ناشی از خازن در باس ۲۹ برابر $61/3 \text{ kW}$ است که خیلی نزدیک به مقادیر تخمینی $62/0 \text{ kW}$ روش پیشنهادی است.

در مرحله ی بعدی معلوم شد که خازن دوم 285 Kvar در باس ۱۲ کاهش تلفات بیشتر $7/9 \text{ kW}$ را فراهم می سازد. هم چنین، خازن سوم 495 Kvar در باس ۲۳ کاهش اضافی $3/1 \text{ kW}$ فراهم می آورد.

بنابراین ترتیب باس های جبران سازی شونده ۲۹ و ۱۲ و ۲۳ است. هنگامیکه فقط دو باس اول (۲۹ و ۱۲) جبران سازی می شوند. مشخص می شود که خازن 1475 Kvar کل (1079 Kvar در باس ۲۹ و 396 Kvar در باس ۱۲) سبب کاهش $69/5 \text{ Kw}$ تلفات می شود. یعنی تلفات ناشی از I_r بیشتر از ۹۰٪ کاهش پیدا می کند. وقتیکه هر سه باس (۲۹ و ۱۲ و ۲۳) در نظر گرفته می شوند، مشخص می شود که خازن 1926 Kvar کل (1035 Kvar در باس ۲۹، 370 Kvar در باس ۱۲ و 521 kvar در باس ۲۳) کاهش تلفاتی برابر $72/8 \text{ kw}$ بدست می دهد. یعنی خازن اضافی $451-6 \text{ kvar}$ یک کاهش فوق العاده $3/3 \text{ kw}$ فراهم می کند. بنابراین برای این سیستم، جبران سازی در دو باس ممکن است اقتصادی تر از سه باس باشد.

در عمل اندازه ی خازن باید به چند مقدار تقسیم شود. با توجه به این مسأله، زمانیکه باس های ۲۹ و ۱۲ به ترتیب با 1000 kvar (بجای 1079 kvar) و 400 kvar (بجای 396 kvar) جبران سازی شوند نتیجه ی پخش بار نشان می دهد که کاهش $68/3 \text{ kw}$ بجای $69/5 \text{ kw}$ حاصل می شود. قابل ذکر است که ظرفیت اضافی $11/2 \text{ kw}$ توسط خازن قابل آزاد شدن است بخاطر بهبود منحنی ولتاژ و بنابراین کاهش I_a .

بنابراین یک ظرفیت کل $79/5 \text{ kw}$ با قراردادن خازن 1400 kvar در باس های ۲۹ و ۱۲ قابل حصول است.

۶- نتیجه گیری

روش ساده ی می نیمم سازی تلفات متناظر با مؤلفه ی راکتیو جریان های شاخه توسط جایگذاری خازن در سیستم توزیع شعاعی در این مقاله پیشنهاد شده است. این روش ابتدا ترتیب باس های جبران شونده را از طریق پیدا کردن بالاترین کاهش تلفات با استفاده از خازن تکی تعیین می کند. سپس اندازه ی بهینه ی خازن های چندگانه با می نیمم سازی معادله ی

کاهش تلفات با توجه به جریانهای خازن تعیین می شود. این شامل حل مجموعه معادلات جبری خطی است.

اجرای عملی روش جایگذاری خازن احتیاج به آنالیز توجیه اقتصادی دارد که به نوبه ی خود بستگی به هزینه ی بانک خازن و انرژی آزادشده دارد.

روش ارائه شده بر روی دو سیستم توزیع که شامل ۱۵ و ۳۳ باس بودند آزمایش شد. در سیستم ۱۵ باسه مشخص شد که با جایگذاری خازن های بهینه در باس ۳ و ۶ تلفات متناظر با جریان شاخه ای راکتیو از $31/4 \text{ kw}$ به $3/7 \text{ kw}$ کاهش می یابد. در سیستم ۳۳ باسه مشخص شد که خازن 1400 kwar کل در دو مکان مختلف (باس ۲۹ و ۱۲) تلفات ناشی از جریان های شاخه ای راکتیو را بیش از ۹۰٪ کاهش می دهد. در این سیستم یک ظرفیت $5/7 \text{ kw}$ در بانک خازن 100 kwar قابل آزادسازی است.

برنامه ریزی توان راکتیو بهینه برای سیستم های توزیع با بارهای غیرخطی

چکیده :

هدف این مقاله بدست آوردن یک الگوریتم منظم برای تصمیم گیری در مورد مکان و اندازه ی بهینه ی خازن های موازی و فیلترها برای سیستم های توزیع با پیچش هارمونیک می باشد. در این مقاله مسأله ی جبران سازی توان راکتیو، ابتدائاً بصورت برنامه ی غیرخطی می نیمم سازی تلفات توان حقیقی، تلفات انرژی و هزینه ی خازن تحت محدودیت ولتاژ فرموله می شود. مسأله ی برنامه ریزی غیرخطی با استفاده از نرم افزار MINOS برای تعیین مکان ها و اندازه های بهینه خازن های موازی حل می شود. سپس پخش بار هارمونیک برای حل ضریب واپیچش هارمونیک ولتاژ کل (HDF) اعمال می شود و طراحی فیلتر برای حل همزمان harmonic distortion و جبران سازی توان راکتیو انجام می شود. برای نمایش اجرا و تأثیر روش پیشنهادی، یک فیدر توزیع نمونه برای شبیه سازی کامپیوتری انتخاب شده است.

مقدمه:

بهینه سازی برنامه ریزی خازن های موازی برای سیستم های توزیع بطور مؤثری با روش های کاهش تلفات سیستم و بهبود کیفیت سرویس برق برای یک زمان طولانی انجام شده است. آن شامل تعیین محلها و اندازه های خازن های نصب شونده در سیستم های توزیعی می باشد بطوریکه اهداف کاهش تلفات سیستم، تثبیت ولتاژ و آزادسازی ظرفیت سیستم قابل اجرا باشد. تا حالا، بیشتر جاگذاری های خازن های شنت بهینه، تنها فرکانس اصلی را در نظر می گرفته اند [۱-۲] با این وجود، با استفاده ی روز افزون از قطعات الکترونیک قدرت در صنعت، harmonic distortion ولتاژ به یک مسأله ی جدی از نقطه نظر تلفات توان تبدیل می شود و عملکرد نامناسب دستگاههای محافظ قابل تعریف است.

از آنجایی که خازن نصب شده ممکن است با اندکتناس سیستم تداخل نماید و رزنانس هارمونیک شدیدی ایجاد کرده و جریان هارمونیک را افزایش دهد. در نظر گرفتن harmonic distortion در طول برنامه ریزی توان راکتیو سیستم های توزیع ضروری است فیلتر های هارمونیک مناسب توان راکتیو را در فرکانس اصلی فراهم می کند و از وارد شدن جریان هارمونیک به داخل سیستم قدرت با ایجاد کمترین مسیر امپدانس در فرکانس مشخص جلوگیری می کند. در حال حاضر، بیشتر روش های طراحی فیلتر تنها، باس منفرد را برای جبران سازی در نظر می گیرند و همینطور یک منبع هارمونیک، در سیستم [۳]

با وجود این، برای سیستم قدرت عملی با منابع مختلف هارمونیک، تحلیل پخش بار هارمونیکی با در نظر گرفتن کل شبکه برای پیدا کردن رزنانس هارمونیک محتمل در سیستم انجام می شود.

جبران سازی توان راکتیو

۱- تابع هدف

برنامه ریزی خازن بهینه، می نیم کردن تلفات توان حقیقی و تلفات انرژی با در نظر گرفتن هزینه ی خازن می باشد. تابع هدف F با معادله ی (۱) بصورت زیر تعریف می شود:

$$F = K_p \sum_{n=1}^{n_{\max}} P_{\text{loss}}^n + K_e \sum_{n=1}^{n_{\max}} E_{\text{loss}}^n + K_c \sum_{i=1}^N Q_i \quad (1)$$

k_p : p.u : هزینه ی سالانه ی تلفات توان ($\$/kw yr$)

k_e : p.u : هزینه ی تلفات انرژی ($\$/kwh$)

k_c : p.u : هزینه ی سالانه خازن ها ($\$/kvar.ye$)

P_{loss} : تلفات توان حقیقی معرفی شده با شار جریان هارمونیک مرتبه n ام در طول یک پریود بار

E_{loss}^n : تلفات انرژی معرفی شده با شار جریان هارمونیک مرتبه n ام در طول پریود مورد مطالعه

ظرفیت کل خازن موازی در باس i : Q_i

N : تعداد کل باس

برای سیستم توزیع، تلفات توان مختلط بصورت تابعی از جریان تزریقی باس حل می شود.]

۴ [و تلفات توان مختلط برای هر مرتبه n ی هارمونیک توسط خازن های جبران ساز کاهش پیدا می کند.

$$[\bar{S}] = [\bar{I}^*]^T [\bar{Z}] [\bar{I}] \quad (۲)$$

$$[S^n] = [(I^n - I_c^n)^*]^T [z^n] [(I^n - I_c^n)] \quad (۳)$$

$$I_i^n = I_i \cos \theta_{li}^n + j I_i \sin \theta_{li}^n \quad (۴)$$

$$I_{ic}^n = \frac{V_i^n}{V_{Ri}^2} (-\sin \theta_{vi}^n + j \cos \theta_{vi}^n) Q_i \quad (۵)$$

$$Z_{ij}^n = R_{ij} + j X_{ij}^n \quad (۶)$$

$[Z]$: که در آن ماتریس امپدانس سیستم

θ_{li}^n : زاویه n مرتبه هارمونیک جریان تزریقی در باس i

θ_{vi}^n : زاویه n ولتاژ باس هارمونیک مرتبه n در باس i

V_{Ri} : ولتاژ مجاز خازن در باس i

سپس تلفات توان حقیقی از حل معادله (۷) بدست می آید:

$$\begin{aligned} P_{\text{loss}}^n &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_i^n I_j^n R_{ij} \cos(\theta_{li}^n - \theta_{lj}^n) \\ &- 2n \sum_{i=1}^N \frac{V_i^n}{V_{Ri}^2} \left(\sum_{j=1}^N R_{ij} I_j^n \sin(\theta_{lj}^n - \theta_{vi}^n) \right) Q_i \\ &+ h^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{V_i V_j}{V_{Ri}^2 V_{Rj}^2} R_{ij} \cos(\theta_{vi}^n - \theta_{vj}^n) Q_i Q_j \end{aligned} \quad (۷)$$

سپس تلفات انرژی بصورت مجموع تلفات توان حقیقی در طول کل پرپود زمانی با در نظر گرفتن منحنی بار روزانه عملی فیدر نمونه حل می شود:

$$E_{loss}^n = \int_0^T P_{loss}^n(t) dt \quad (8)$$

۲- محدودیت ها

در طول می نیمم سازی تابع هدف معادله ی (۱)، محدودیت های عملیاتی سیستم از قبیل harmonic distortion و تشدید ولتاژ (voltage violation) باید وارد محاسبات شود. در این مقاله، محدودیت ولتاژ تحلیل اصلی ولتاژ محسوب می شود. سپس ولتاژ harmonic distortion در صورت نیاز با فیلتر هارمونیک حل می شود.

تغییر ولتاژ باس در اثر تزریق جریان خازن های جبران کننده با حل معادله ی (۹) و [۵] بدست می آیند:

$$\Delta V_i = \sum_{k=1}^N Z_{ik} \Delta I_{ck} = \sum_{k=1}^N Z_{ik} \left(\frac{jQ_k}{V_k^c} \right) \quad (9)$$

سپس ولتاژ باس بصورت V_i^e اصلاح می شود.

$$\begin{aligned} V_i^c &= V_i^u + \Delta V_i \\ &= V_i^u + \sum_{k=1}^N \left(\frac{Z_{ik}}{V_k^c} \right) Q_k \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن V_{ci}^u ولتاژ باس قبل از جبران سازی موازی می باشد. بنابراین محدودیت ولتاژ بصورت تابعی از خازن های موازی بیان می شود و مسأله ی جایگذاری خازن کل بصورت معادله ی (۱۱) حل می شود.

$$\text{Min. : } F = K_p \sum_{n=1}^{\text{max}} P_{loss}^n + K_e \sum_{n=1}^{\text{max}} E_{loss}^n + K_c \sum_{i=1}^N Q_i$$

$$\text{s.t.} \quad V \min_i - V_i^u \leq \sum_{j=1}^N \left(\frac{Z_{ij}}{V_j^c} \right) Q_j \leq V \max_i - V_i^u \quad (11)$$

طراحی فیلتر

بعد از حل جبران سازی توان راکتیو موردنیاز و تعیین مکانهای متناظر که خازنها باید در آنجا نصب شوند، خازن موازی باید برای باس هایی که harmonic distortion غیرمجاز دارند با فیلترهای مناسب جایگزین شوند. در این مطالعه، توان راکتیو تولیدی توسط فیلتر باید همان باشد که توسط خازن موازی قبلی تأمین می شود.

برای فیلتر تکی درجه α م، ولتاژ اصلی عبوری خازن بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} V^1 &= \frac{X_c}{Z_{filter}} \times V_{bus} \\ &= \frac{t^2}{t^2 - 1} \times V_{bus} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن X_c ، Z_{filter} به ترتیب امپدانس خازن و فیلتر در فرکانس اصلی می باشند. میزان مجاز ولتاژ خازن فیلتر از معادله ی (۱۳) بدست می آید:

$$V_c = V_{bus} \times \frac{t^2}{t^2 - 1} + \sum_{n=2}^{n_{max}} V^n \quad (13)$$

بسته به وجود اندکتانس سری، توان راکتیو خالص تولیدشده با فیلتر هارمونیک مرتبه α م از معادله ی (۱۴) بدست می آید:

$$\begin{aligned} Q_{filter} &= \frac{V_{bus}^2}{Z_{filter}} \\ &= Q_{cap} \times \left(\frac{V_{bus}}{V_c} \right)^2 \times \frac{t^2}{t^2 - 1} \end{aligned} \quad (14)$$

شبیه سازی کامپیوتری

فلوچارت جبران سازی توان راکتیو برای سیستم توزیع با آلودگی قدرت هارمونیک در شکل (۱) نشان داده شده است. برنامه ی پخش بار هارمونیکی بر پایه روش تزریق جریان ایجاد شده است. [۶]

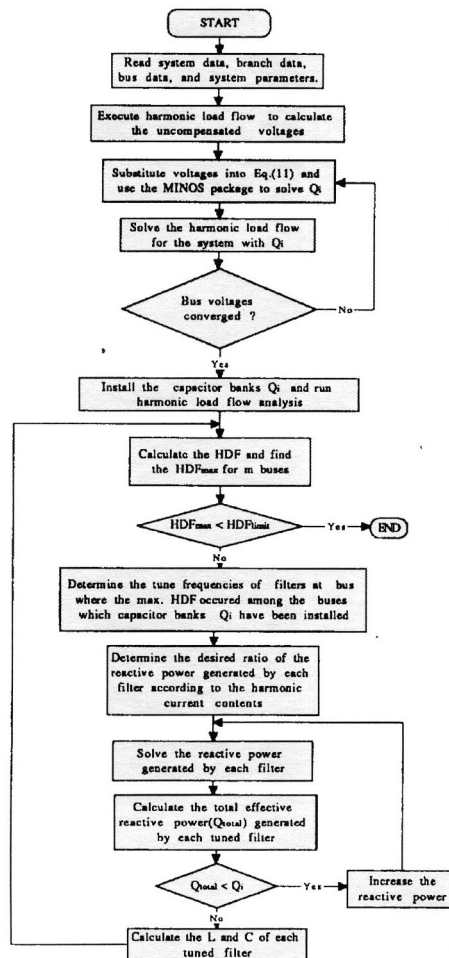


Fig. 1 The flowchart of reactive power compensation

در این مقاله یک فیدر توزیع نمونه ای $11/4 \text{ kV}$ مطابق آنچه در شکل ۲ نشان داده شده برای شبیه سازی کامپیوتری انتخاب گردیده است. اطلاعات باس و اطلاعات شاخه، در ضمیمه آمده

است. محدودیت های ولتاژ عبارتند از: $V_{\min} = 0.95 \text{ p.u.}$ و $V_{\max} = 1.05 \text{ p.u.}$ حد harmonic

distortion برابر است با $\text{HDF}_{\max} = 3\%$

پارامترهای تابع هدف عبارتند از:

مقادیر جریان هارمونیک در هر باس $I_{1/n}$ فرض می شود، که در آن I_1 جریان بار اصلی و n

مرتبه ی هارمونیک است. جدول ۱ شبیه سازی کامپیوتری برای فیدر آزمایش در ۹ صبح که

اوج بار سیستم اتفاق می افتد نشان می دهد. معلوم می شود که harmonic distortion خیلی

جدی و منحنی ولتاژ ضعیف برای سیستم بدون جبران ساز توان راکتیو نتیجه می شوند.

Table 1 Computer simulation of the sample feeder
Case I: system without compensation
Case II: system with capacitor compensation
Case III: system with capacitor and filter compensation

BUS	Case I		Case II		Case III	
	Voltage	HDF(%)	Voltage	HDF(%)	Voltage	HDF(%)
1	1.000	0.00	1.000	0.00	1.000	0.00
2	0.986	1.12	0.996	1.04	0.997	0.33
3	0.961	3.37	0.991	3.11	0.991	0.39
4	0.944	4.76	0.991	4.37	0.991	0.78
5	0.957	3.80	0.988	3.50	0.988	1.30
6	0.921	6.75	0.989	6.19	0.991	0.74
7	0.955	4.11	0.987	3.78	0.987	1.57
8	0.915	7.11	0.984	6.54	0.986	0.85
9	0.916	7.27	0.992	6.68	0.993	0.85
10	0.947	5.08	0.980	4.67	0.981	2.41
11	0.912	7.24	0.980	6.66	0.983	0.93
12	0.913	7.63	0.994	7.01	0.996	1.14
13	0.944	5.35	0.978	4.90	0.979	2.64
14	0.910	7.31	0.977	6.73	0.981	0.98
15	0.911	7.94	0.993	7.30	0.994	1.01
16	0.910	7.85	0.992	7.22	0.993	1.03

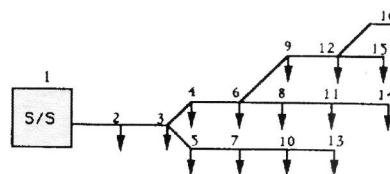


Fig. 2 One line diagram of the sample feeder

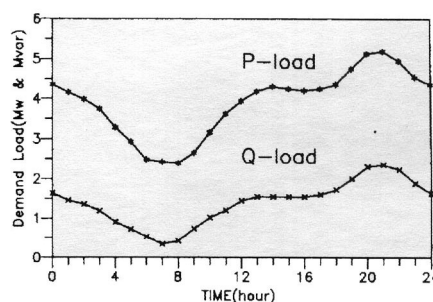


Fig. 3 Daily load curve of the sample feeder

به منظور بهبود منحنی ولتاژ ابتدا جایگذاری خازن بهینه انجام می شود. برای این مطالعه مکان خازن موازی بهینه در باس ۴ و ۶ و ۷ و ۱۲ و ۱۳ و اندازه های متناظر خازن ها ۳۰۰ و ۳۰۰ و ۱۵۰ و ۱۵۰ و ۱۵۰ kvar بدست آمدند.

هرچند ولتاژ سیستم بهبود می یابد، اما ضریب harmonic distortion هنوز بزرگتر از حد مجاز است. بعلاوه تلفات سیستم و هزینه های متناظر فیدر آزمایش بطور معنی داری با جبران سازی قدرت راکتیو مطابق آنچه در جدول ۲ نشان داده می شود کاهش می یابند. معلوم می شود که تلفات سیستم و هزینه های کل فیدر نمونه با اعمال روش پیشنهادی حداقل می شود. صرفه جویی بالغ بر $\$6885/\text{year}$ با کاربرد روش جبران سازی توان راکتیو حاصل می شود. برای حل harmonic distortion دو فیلتر تک کوکی sigle- tuned در باس ۱۲ مطابق جدول ۳ با فرکانس های tuning در مرتبه هارمونیک $4/8$ و $6/7$ نصب می شوند تا قابلیت افزایش هارمونیک توسط فیلترها را از بین ببرد. توان راکتیو مؤثر کل تولیدشده با هر دو فیلتر در فرکانس اصلی برابر با ۱۵۰ kvar است، و این به معنی آن است که همان میزان جبران سازی قدرت راکتیو بدست می آید. از جدول ۱ (حالت III) جبران سازی بدست می آید. معلوم می شود که harmonic distortion به حد مجاز آن کاهش پیدا می کند.

Table 2 System loss and cost of the sample feeder

	Case I	Case II
Peak loss(Kw)	203.0	179.3
Energy loss(Mw.yr)	904.7	840.7
Power loss cost(\$/yr)	34110	30121
Energy loss cost(\$/yr)	47033	42036
Capacitor cost(\$/yr)	0	2100
Total cost(\$/yr)	81143	74257

Table 3 The single-tuned filters to be installed at bus 12

filter	Q(kvar)	L(mH)	Q _{gen} (kvar)
4.8th	127	0.140	94
6.7th	74	0.187	56

نتیجه گیری ها:

این مقاله یک روند منظم توسعه داده است برای تعیین جبران سازی توان راکتیو توسط خازن های موازی و فیلترها برای سیستم های توزیع با بارهای غیرخطی. نرم افزار MINOS برای حل برنامه ریزی غیرخطی جهت پیدا کردن محل و اندازه های بهینه جبران سازی توان راکتیو بکار برده می شود. پخش بار هارمونیک برای محاسبه ی harmonic distortion سیستم و تلفات توان بکار برده می شود. فیلترهای هارمونیک مناسب برای پیدا کردن فرکانس کوک (tuning frequency) ولتاژ و جریان مجاز اندوکتانس و خازن برای باس های دارای harmonic distortion غیرمجاز بکار برده می شود. برطبق شبیه سازی کامپیوتری فیدر نمونه، نتیجه می شود که جبران سازی قدرت راکتیو باید با فیلترهای هارمونیک برای حذف harmonic distortion هم چنین برای تأمین جبران سازی توان راکتیو ترکیب نشود.

Bus data and branch of the test system
(all line segments are ACSR 1/0)

BUS	Peak Load(kw)	Nonlinear Load (%)	FBUS	TBUS	Length (mile)
1	0	0.00	1	2	1.0
2	250	0.0	2	3	2.0
3	220	55.7	3	4	2.0
4	300	48.9	3	5	1.0
5	280	92.1	4	6	3.0
6	410	4.7	5	7	1.0
7	350	51.9	6	8	3.0
8	250	38.2	6	9	1.0
9	390	90.1	7	10	4.0
10	300	80.5	8	11	2.0
11	290	37.2	9	12	1.0
12	630	8.1	10	13	2.0
13	500	63.5	11	14	3.0
14	250	20.1	12	15	2.0
15	370	85.7	12	16	3.0
16	400	42.7			

ضدائهم

Capacitor placement in radial distribution systems for loss reduction

M.H.Haque

Abstract: Reduction of I^2R loss in distribution systems is very essential to improve the overall efficiency of power delivery. The I^2R loss can be separated into two parts based on the active and reactive components of branch currents. The paper presents a method of minimising the loss associated with the reactive component of branch currents by placing shunt capacitors. This method first determines a sequence of nodes to be compensated by capacitors. The size of the optimal capacitor at the compensated nodes is then determined by optimising the loss saving equation with respect to the capacitor currents. The performance of the proposed method was investigated on two distribution systems consisting of 15 and 33 buses and it was found that a significant loss saving can be achieved by placing optimal capacitors in the system.

1 Introduction

A distribution system connects consumers to the high-voltage transmission system. Because of lower voltage, and hence higher current, the I^2R loss in a distribution system is significantly high compared to that in a high-voltage transmission system. The pressure of improving the overall efficiency of power delivery has forced the power utilities to reduce the loss, especially at the distribution level.

The I^2R loss in a distribution system can be reduced by reconfiguring the network [1-4]. The reconfiguration process changes the path of power flow from the source to the loads. The loss can also be reduced by adding shunt capacitors to supply part of the reactive power demands [5-8]. Shunt capacitors not only reduce the loss but also improve the voltage profile, power factor and stability of the system.

In general, a distribution system is fed at only one point and the structure of the network is mainly radial. For such a system all active power demands and losses must be supplied by the source at the root bus. However, addition of shunt capacitors can generate the reactive power and therefore it is not necessary to supply all reactive power demands and losses by the source. Thus, there is a provision to minimise the loss associated with the reactive power flow through the branches.

Several methods of loss reduction by placing capacitors in distribution systems have been reported over the years. Earlier methods [9, 10] used unrealistic assumptions of uniformly distributed load, feeders with no lateral, uniform feeder size, etc. Reference [11] developed a procedure for optimising the net monetary saving associated with the reduction of loss/energy by placing fixed and switched capacitors. Heuristic technique [12] is also applied by some researchers to find the optimal size and location of capaci-

tors. Reference [13] used the genetic algorithm to solve the capacitor placement problem.

This paper proposes a method of minimising the loss associated with the reactive component of branch currents by placing optimal capacitors at proper locations. The method first finds the location of the capacitor in a sequential manner. Once the capacitor locations are identified, the optimal capacitor size at each selected location is determined through optimising the loss saving equation. The proposed method was tested on two different distribution systems and very encouraging results were found.

2 Background

The total I^2R loss (P_{Lt}) in a distribution system having n number of branches is given by

$$P_{Lt} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (1)$$

Here I_i and R_i are the current magnitude and resistance, respectively, of the i th branch. The branch current can be obtained from the load flow solution. The load flow algorithm described in [14] is used for this purpose. The branch current has two components; active (I_a) and reactive (I_r). The loss associated with the active and reactive components of branch currents can be written as

$$P_{La} = \sum_{i=1}^n I_{ai}^2 R_i \quad (2)$$

$$P_{Lr} = \sum_{i=1}^n I_{ri}^2 R_i \quad (3)$$

Note that for a given configuration of a single-source radial network, the loss P_{La} associated with the active component of branch currents cannot be minimised because all active power must be supplied by the source at the root bus. However, the loss P_{Lr} associated with the reactive component of branch currents can be minimised by supplying part of the reactive power demands locally.

© IEE, 1999

IEE Proceedings online no. 19990495

DOI: 10.1049/ip-gtd:19990495

Paper first received 5th January and in revised form 23rd April 1999

The author is with the School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Nanyang Avenue, Singapore

3 Proposed method

The proposed method first identifies a sequence of nodes to be compensated. The sequence is determined by repetitive applications of loss minimisation technique by a singly located capacitor. Once the sequence of nodes to be compensated are identified, the corresponding optimal capacitor size at the compensated nodes can be determined simultaneously by minimising the loss saving equation with respect to the capacitor currents. The procedures of loss minimisation by placing a single and multiple capacitors are described in the following sections.

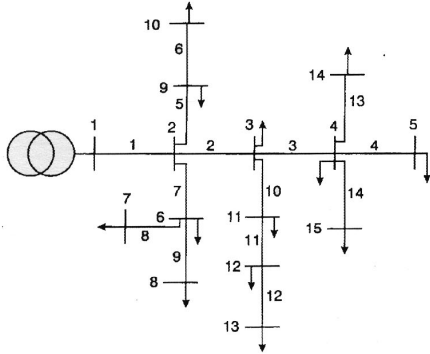


Fig. 1 Single-line diagram of the 15-bus system

3.1 Loss minimisation by a singly located capacitor

Consider a single source radial distribution system with n branches. Let a capacitor C be placed at bus m and α be a set of branches connected between the source and capacitor buses. In Fig. 1, if the capacitor is placed at bus 12 ($m = 12$), the set α consists of branches 1, 2, 10 and 11. The capacitor draws a reactive current I_c , and for a radial network it changes only the reactive component of current of branch set α . The current of other branches ($\notin \alpha$) is unaffected by the capacitor. Thus the new reactive current I_{ri}^{new} of the i th branch is given by

$$I_{ri}^{new} = I_{ri} + D_i I_c \quad (4)$$

where

$$D_i = 1; \text{ if branch } i \in \alpha \\ = 0; \text{ otherwise}$$

Here I_{ri} is the reactive current of the i th branch in the original system obtained from the load flow solution. The loss P_{Lr}^{com} associated with the reactive component of branch currents in the compensated system (when the capacitor is connected) can be written as

$$P_{Lr}^{com} = \sum_{i=1}^n (I_{ri} + D_i I_c)^2 R_i \quad (5)$$

The loss saving S is the difference between eqns. 3 and 5 and is given by

$$S = P_{Lr} - P_{Lr}^{com} \\ = - \sum_{i=1}^n (2D_i I_{ri} I_c + D_i I_c^2) R_i \quad (6)$$

The capacitor current I_c that provides the maximum loss saving can be obtained from

$$\frac{\partial S}{\partial I_c} = -2 \sum_{i=1}^n (D_i I_{ri} + D_i I_c) R_i = 0 \quad (7)$$

Thus the capacitor current for the maximum loss saving is

$$I_c = - \frac{\sum_{i=1}^n D_i I_{ri} R_i}{\sum_{i=1}^n D_i R_i} = - \frac{\sum_{i \in \alpha} I_{ri} R_i}{\sum_{i \in \alpha} R_i} \quad (8)$$

The corresponding capacitor size is

$$Q_c = V_m I_c \quad (9)$$

Here V_m is the voltage magnitude of the capacitor bus m . The above process can be repeated for all buses to get the highest possible loss saving for a singly located capacitor. When the candidate bus is identified and compensated, the above technique can also be used to identify the next and subsequent buses to be compensated for loss reduction. This will provide only the locations where the capacitors are to be placed. The capacitor size obtained from eqn. 9 is a local optimal value and may not be used when more than one capacitor is placed in the system. The size of optimal capacitors for multiple locations is to be determined simultaneously, and the procedure of finding the optimal sizes is described in the following section.

3.2 Loss minimisation by multiple capacitors

The concept of loss minimisation by a singly located capacitor can be extended for multiple capacitors. Let us consider the following:

k = number of capacitor buses

I_c = k -dimensional vector consisting of capacitor currents

α_j = set of branches from the source bus to the j th capacitor bus ($j = 1, 2, \dots, k$)

D = a matrix of dimension $n \times k$

The elements of D are considered as

$$D_{ij} = 1; \text{ if branch } i \in \alpha_j \\ = 0; \text{ otherwise}$$

In Fig. 1, if three capacitors ($k = 3$) are placed at buses 10, 12 and 14, the branch set α s and the matrix D^T can be written as

$$\alpha_1 = [1, 5, 6]; \quad \alpha_2 = [1, 2, 10, 11]; \quad \alpha_3 = [1, 2, 3, 13]$$

$$D^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

When the capacitors are placed in the system, the new reactive component of branch currents is given by

$$[I_r^{new}] = [I_r] + [D][I_c] \quad (10)$$

The loss P_{Lr}^{com} associated with the new reactive currents in the compensated system is

$$P_{Lr}^{com} = \sum_{i=1}^n \left(I_{ri} + \sum_{j=1}^k D_{ij} I_{cj} \right)^2 R_i \quad (11)$$

The loss saving S obtained by placing the capacitors is the difference between eqns. 3 and 11 and is given by

$$S = - \sum_{i=1}^n \left[2I_{ri} \sum_{j=1}^k D_{ij} I_{cj} + \left(\sum_{j=1}^k D_{ij} I_{cj} \right)^2 \right] R_i \quad (12)$$

The optimal capacitor currents for the maximum loss saving can be obtained by solving the following equations:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial I_{c1}} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial I_{c2}} &= 0 \\ &\dots \\ &\dots \\ \frac{\partial S}{\partial I_{ck}} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

After some mathematical manipulations, eqn. 13 can be expressed by a set of linear algebraic equations as follows:

$$[A][I_c] = [B] \quad (14)$$

Where A is a $k \times k$ square matrix and B is a k -dimensional vector. The elements of A and B are given by

$$A_{jj} = \sum_{i \in \alpha_j} R_i \quad (15)$$

$$A_{jm} = \sum_{i \in (\alpha_j \cap \alpha_m)} R_i \quad (16)$$

$$B_j = \sum_{i \in \alpha_j} I_{ri} R_i \quad (17)$$

Only the branch resistances and reactive currents in the original system are required to find the elements of A and B . The capacitor currents for the highest loss saving can be obtained from eqn. 14

$$[I_c] = [A]^{-1}[B] \quad (18)$$

Once the capacitor currents are known, the optimal capacitor sizes can be written as

$$[Q_c] = [V_c][I_c] \quad (19)$$

Here V_c is the voltage magnitude vector of capacitor buses. The saving in the compensated system can be estimated from eqn. 12 using the value of I_c given by eqn. 18.

4 Algorithm

The computational steps involved in finding the optimal capacitor size and location to minimise the loss in a radial distribution system are summarised in following:

1. Run the load flow program and obtain the branch currents. Select a bus and find the maximum loss saving and the corresponding capacitor size from eqns. 6 and 9, respectively. Repeat this step for all buses in the system, except the source bus. Identify the bus that provides the highest loss saving.
2. Compensate the bus to get the highest loss saving with the corresponding capacitor found from eqn. 9.
3. Repeat steps 1 and 2 to get the next capacitor bus and hence the sequence of buses to be compensated until it is found that no significant loss saving can be achieved by further capacitor placement.
4. Once the sequence of buses is known, determine the optimal capacitor sizes and the corresponding loss saving from eqns. 9 and 12, respectively.

Note that the system load is time-variant and load duration curve of the system can be approximated by a piecewise linear function during which the load level is assumed to be constant [6, 13]. The above algorithm provides the optimal capacitor sizes and locations for a given load level. Determination of overall loss saving for the entire period of the load duration curve requires the application of the above

algorithm to each load level. This may suggest different capacitor sizes and, in some cases, at different locations. The problems of different capacitor size and location can be solved by using a combination of fixed and switched capacitors [11].

5 Simulation results

The proposed method of loss reduction by capacitor placement was tested on two distribution systems consisting of 15 and 33 buses. The results obtained in these systems are briefly described in the following Sections.

5.1 15-bus system

The single-line diagram of the 11kV, 15-bus system is shown in Fig. 1. The data of the system are obtained from [15]. This system has a total load of $(1226.4 + j1251.2)$ kVA and I^2R loss of 61.8kW. The loss associated with the active and reactive components of branch currents found from the load flow solution is 30.4kW and 31.4kW, respectively. First the optimal size of a singly located capacitor and the corresponding loss saving are determined. Figs. 2 and 3 show the capacitor size and loss saving, respectively, for all buses in the base system except the source bus. It can be noticed in Fig. 3 that the highest loss saving of 23.4kW can be realised by placing a capacitor of 1013kVAR (Fig. 2) at bus 3. The results of this system are summarised in Table 1.

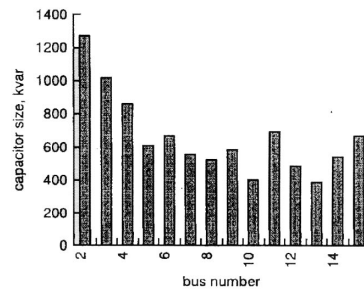


Fig.2 Optimal size of a singly located capacitor of the 15-bus system

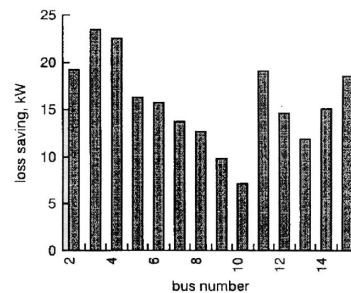


Fig.3 Estimated loss saving in the 15-bus system for a singly located capacitor

When the above procedure is repeated, after placing 1013kVAR of capacitor at bus 3, it was found that a second capacitor of 327kVAR at bus 6 would provide a further loss saving of 3.7kW. When bus 6 is also compensated, it was found that 150kVAR of capacitor must be removed from bus 3 to get a further loss saving of 0.5kW. This indicates that bus 3 was initially overcompensated because the optimisation problem was solved to find the size of a singly

Table 1: Summary of results of 15-bus system

System description	System loss			Compensation and saving			
	P_{La} , kW	P_{Lr} , kW	P_{Lb} , kW	*	Bus	Capacitor size, kVAr	Saving, kW
Original base system	30.4	31.4	61.8	1	3	1013	23.4
1013 kVAr is placed at bus 3	29.1	8.0	37.1	1	6	327	3.7
1013 kVAr is placed at bus 3 327 kVAr is placed at bus 6	28.9	4.3	33.2	1	3	-150	0.5
Original base system	30.4	31.4	61.8	2	3	805	27.7
805 kVAr is placed at bus 3 388 kVAr is placed at bus 6	28.9	3.7	32.6		6	388	

* Number of buses to be compensated

Table 2: Summary of results of 33-bus system

System description	System loss			Compensation and saving			
	P_{La} , kW	P_{Lr} , kW	P_{Lb} , kW	*	Bus	Capacitor size, kVAr	Saving, kW
Original base system	293.9	75.4	369.3	1	29	1245	62.0
1245 kVAr is placed at bus 29	284.0	14.1	298.1	1	12	385	7.9
1245 kVAr is placed at bus 29 385 kVAr is placed at bus 12	282.9	6.3	289.3	1	23	495	3.1
Original base system	293.9	75.4	369.3	2	29	1079	69.5
1079 kVAr is placed at bus 29 396 kVAr is placed at bus 12	282.7	6.5	289.2		12	396	
Original base system	293.9	75.4	369.3	3	29	1035	72.8
1035 kVAr is placed at bus 29 370 kVAr is placed at bus 12 521 kVAr is placed at bus 23	282.1	3.0	285.1		12	370	
					23	521	

* Number of buses to be compensated

located capacitor. However, when both buses 6 and 3 are compensated, the technique described in Section 3.2 is to be used to find the optimal capacitor sizes and the corresponding loss saving. This technique provides a total loss saving of 27.7kW by 1193kVAr of capacitors (805kVAr at bus 3 and 388kVAr at bus 6). When the original base system is compensated with the above capacitors, the load flow results indicated that the system loss due to I_r is reduced from 31.4kW to 3.7kW. Thus a saving of 27.7kW has been achieved, which is exactly the same as estimated by the proposed method. The shunt capacitors also improve the voltage profile, and due to the higher voltage the active component of branch current I_a (and hence P_{La}), for the constant power load model, is also reduced slightly. The load flow results of the compensated system indicated that P_{La} of the system is reduced from 30.4kW to 28.9kW. Thus an extra saving of 1.5kW can also be achieved due to the reduction of I_a .

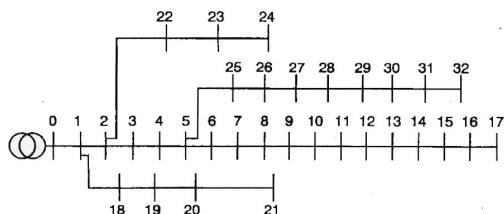


Fig. 4 Single-line diagram of the 33-bus system

5.2 33-bus system

The single-line diagram of the 12.66kV, 33-bus system is shown in Fig. 4. The data of the system are obtained from [1]. The base load of the system is $(4715 + j2300)$ kVA and the total loss is 369.3kW. The loss of the system due to I_r is 75.4kW. A summary of results obtained by the proposed method in minimising the loss due to I_r is given in Table 2.

It can be observed in Table 2 that when bus 29 is first compensated by 1245kVAr of capacitor, a saving of 62.0kW can be achieved. However, the load flow results (in the original and compensated systems) indicated that the loss due to I_r is reduced from 75.4kW to 14.1kW. Thus the actual saving due to the capacitor at bus 29 is 61.3kW, which is very close to the estimated value of 62.0kW found by the proposed method. In the next step it was found that a second capacitor of 385kVAr at bus 12 would provide a further loss saving of 7.9kW. Similarly, a third capacitor of 495kVAr at bus 23 would provide an additional saving of 3.1kW. Thus the sequence of buses to be compensated is 29, 12 and 23. When only the first two buses (29 and 12) are compensated, it was found that a total 1475kVAr of capacitor (1079kVAr at bus 29 and 396kVAr at bus 12) would save 69.5kW of loss. That is the loss due to I_r is reduced by more than 90%. When all three buses (29, 12 and 23) are considered, it was found that a total 1926kVAr of capacitors (1035kVAr at bus 29, 370kVAr at bus 12 and 521kVAr at bus 23) provide a loss saving of 72.8kW. That is an additional 451kVAr of capacitor provides an extra

saving of only 3.3kW. Thus for this system, compensation at two buses may be more cost-effective than the three buses.

In practice the capacitor size should be discrete in value. With this in mind, when buses 29 and 12 are compensated by 1000kVAr (instead of 1079kVAr) and 400kVAr (instead of 396kVAr), respectively, the load flow results indicate that a saving of 68.3kW instead of 69.5kW can be achieved. It is worth mentioning that an additional saving of 11.2kW can also be realised by the capacitor because of the improvement of voltage profile and hence the reduction of I_q . Thus an overall saving of 79.5kW has been achieved by placing 1400kVAr of capacitors at buses 29 and 12.

6 Conclusions

A simple method of minimising the loss associated with the reactive component of branch currents by placing capacitors in a radial distribution system has been proposed in this paper. The method first finds a sequence of buses to be compensated through finding the highest loss saving by a singly located capacitor. The optimal size of multiple capacitors is then determined by minimising the loss saving equation with respect to the capacitor currents. This involves the solution of a set of linear algebraic equations. Practical implementation of the capacitor placement technique requires further cost-benefit analysis which in turn depends on the costs of capacitor bank and energy saving.

The proposed method was tested on two distribution systems consisting of 15 and 33 buses. In the 15-bus system it was found that by placing the optimal capacitors at buses 3 and 6 the loss associated with the reactive branch currents can be reduced from 31.4kW to 3.7kW. In the 33-bus system it was found that a total 1400 kvar capacitors at two different locations (buses 29 and 12) reduced the loss due to reactive branch currents by more than 90%. In this system a saving of 5.7kW per 100kVAr of capacitor bank can be realised.

7 References

- 1 BARAN, M.E., and WU, F.F.: 'Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing', *IEEE Trans.*, 1989, **PD-4**, (2), pp. 1401-1407
- 2 CHIANG, H.D., and JEAN-JUMEAU, R.: 'Optimal network reconfigurations in distribution systems - Part 2: Solution algorithms and numerical results', *IEEE Trans.*, 1990, **PD-5**, (3), pp. 1568-1574
- 3 GOSWAMI, S.K., and BASU, S.K.: 'A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimisation', *IEEE Trans.*, 1992, **PD-7**, (3), pp. 1484-1491
- 4 SARFI, R.J., SALAMA, M.M.A., and CHIKHANI, A.Y.: 'A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for loss reduction', *Electr. Power Syst. Res.*, 1994, **31**, pp. 61-70
- 5 BARAN, M.E., and WU, F.F.: 'Optimal capacitor placement on radial distribution systems', *IEEE Trans.*, 1989, **PD-4**, (1), pp. 725-732
- 6 CHIANG, H.D., WANG, J.C., COCKINGS, O., and SHIN, H.D.: 'Optimal capacitor placements in distribution systems: Part 1 and 2', *IEEE Trans.*, 1990, **PD-5**, (2), pp. 634-649
- 7 ABDEL-SALAM, T.S., CHIKHANI, A.Y., and HACKAM, R.: 'A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition', *IEEE Trans.*, 1994, **PD-9**, (2), pp. 819-827
- 8 BORTIGNON, G.A., and EL-HAWARY, M.E.: 'A review of capacitor placement techniques for loss reduction in primary feeders on distribution systems'. Proceedings of the Canadian conference on *Electrical and computer engineering*, 1995, Vol. 2, pp. 684-687
- 9 COOK, R.F.: 'Analysis of capacitor application as affected by load cycle', *AIEE Trans.*, 1959, **78**, pp. 950-956
- 10 SCHMILL, J.V.: 'Optimal size and location of shunt capacitors on distribution feeders', *IEEE Trans.*, 1965, **PAS-84**, (9), pp. 825-832
- 11 LEE, S.H., and GRAINGER, J.J.: 'Optimal placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders', *IEEE Trans.*, 1981, **PAS-100**, (1), pp. 345-352
- 12 CHIS, M., SALAMA, M.M.A., and JAYARAM, S.: 'Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies', *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 1997, **144**, (3), pp. 225-230
- 13 SUNDHARARAJAN, S., and PAHWA, A.: 'Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using genetic algorithm', *IEEE Trans.*, 1994, **PWRS-9**, (3), pp. 1499-1507
- 14 HAQUE, M.H.: 'Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration', *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 1996, **143**, (1), pp. 33-38
- 15 DAS, D., KOTHARI, D.P., and KALAM, A.: 'Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution systems', *Electr. Power Energy Syst.*, 1995, **17**, (5), pp. 335-346

OPTIMAL REACTIVE POWER PLANNING FOR DISTRIBUTION SYSTEMS WITH NONLINEAR LOADS

C. T. Hsu Y. H. Yan*
Department of Electrical Engineering
National Sun Yat-Sen University
Kaohsiung, Taiwan, China

C. S. Chen S. L. Her
* Department of Electrical Engineering
National Yunlin Polytechnic Institute
Huei, Yunlin, Taiwan, China

ABSTRACT

The objective of this paper is to derive a systematic algorithm to decide the optimal location and size of shunt capacitors and filters for distribution systems with harmonic distortion. In this paper, the problem of reactive power compensation is first formulated as a nonlinear programming of minimization of real power loss, energy loss and capacitor cost under voltage constraint. The nonlinear programming problem is solved by the MINOS package to determine the optimal locations and sizes of shunt capacitors. The harmonic load flow is then applied to solve the total voltage harmonic distortion factor(HDF) and the filter design is executed to solve the harmonic distortion and reactive power compensation simultaneously. To demonstrate the performance and effectiveness of the proposed methodology, a sample distribution feeder has been selected for computer simulation.

INTRODUCTION

Optimization of shunt capacitor planning for distribution systems has been implemented effectively by utilities to reduce system loss and improve the electricity service quality for a long time. It consists of determining the locations and sizes of capacitors to be installed in distribution systems so that the objectives of power loss reduction, voltage regulation and system capacity release can be achieved. Up to now, most of the optimal shunt capacitor placement considers fundamental frequency only[1-2]. However, with more and more power electronic devices used in the industry, voltage harmonic distortion becomes a serious problem from the view point of power loss and the malfunction of protective devices could be introduced.

Because the capacitor installed may interact with system inductance to introduce severe harmonic resonance and amplify the harmonic current, it is necessary to consider the harmonic distortion during the reactive power planning of distribution systems. The proper harmonic filters

will provide the reactive power at fundamental frequency and prevent harmonic current from flowing into the power system by providing a low impedance path at the specified tuning frequency. At present, most of the filter design only consider a single bus to be compensated and assume one harmonic source in the system[3]. However, for a practical power system with multiple harmonic sources, the harmonic load flow analysis by considering whole network has to be performed to find the possible harmonic resonance in the system.

REACTIVE POWER COMPENSATION

1. Objective function

The optimal capacitor planning is to minimize the real power loss and the energy loss by considering the capacitor cost. The objective function, F , is defined as Eq.(1).

$$F = K_p \sum_{n=1}^{n_{\max}} P_{\text{loss}}^n + K_e \sum_{n=1}^{n_{\max}} E_{\text{loss}}^n + K_c \sum_{i=1}^N Q_i \quad (1)$$

K_p : p.u. annual cost of power loss(\$/kw.yr)

K_e : p.u. cost of energy loss(\$/kwh)

K_c : p.u. annual cost of capacitors (\$/kvar.yr)

P_{loss}^n : real power loss introduced by the n th order harmonic current flow during peak load period

E_{loss}^n : energy loss introduced by the n th order harmonic current flow during study period

Q_i : total capacity of shunt capacitors at bus i

N : total bus number

For the distribution system, the complex power loss is solved as a function of the bus injection current[4] and the complex power loss for each harmonic order is reduced by the compensation capacitors.

$$[S] = \begin{bmatrix} - \\ I \end{bmatrix}^* T [Z] I \quad (2)$$

$$[S^n] = [(I^n - I_c^n)]^T [Z^n] [(I^n - I_c^n)] \quad (3)$$

$$I_i^n = I_i \cos \theta_{i1}^n + j I_i \sin \theta_{i1}^n \quad (4)$$

$$I_{ic}^n = \frac{V_i^n}{V_{Ri}} (-\sin \theta_{Vi}^n + j \cos \theta_{Vi}^n) Q_i \quad (5)$$

$$Z_{ij}^n = R_{ij} + j X_{ij}^n \quad (6)$$

where

$[Z]$: system impedance matrix

θ_{i1}^n : the angle of the nth order harmonic injection current at bus i

θ_{Vi}^n : the angle of the nth order harmonic bus voltage at bus i

V_{Ri} : rated voltage of the capacitor at bus i

The real power loss is then solved by Eq.(7).

$$P_{loss}^n = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N I_i^n I_j^n R_{ij} \cos(\theta_{i1}^n - \theta_{j1}^n) - 2n \sum_{i=1}^N \frac{V_i^n}{V_{Ri}} (\sum_{j=1}^N R_{ij} I_j^n \sin(\theta_{ij}^n - \theta_{Vi}^n)) Q_i + n^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{V_i V_j}{V_{Ri} V_{Rj}} R_{ij} \cos(\theta_{Vi}^n - \theta_{Vj}^n) Q_i Q_j \quad (7)$$

The energy loss is then solved as the summation of the real power loss during whole time period by considering the typical daily load curve of the sample feeder.

$$E_{loss}^n = \int_0^T P_{loss}^n(t) dt \quad (8)$$

2. Constraints

During the minimization of the objective function Eq.(1), system operation constraints such as harmonic distortion and voltage violation have to be take into account. In this paper, the voltage constraint is considered fundamental voltage analysis, then the voltage harmonic distortion is solved by harmonic filter, if required.

The bus voltage change due to the injection current of the compensation capacitors is solved as Eq.(9)[5].

$$\Delta V_i = \sum_{k=1}^N Z_{ik} \Delta I_{ck} = \sum_{k=1}^N Z_{ik} \left(\frac{j Q_k}{V_c} \right) \quad (9)$$

The bus voltage is then modified as V_i^c .

$$V_i^c = V_i^u + \Delta V_i = V_i^u + \sum_{k=1}^N \left(\frac{Z_{ik}}{V_c} \right) Q_k \quad (10)$$

where V_i^u is the bus voltage before shunt compensation. Therefore, the voltage constraint is then expressed as the function of shunt capacitors and the overall capacitor placement problem is solved as Eq.(11).

$$\text{Min.: } F = K_p \sum_{n=1}^{n_{\max}} P_{loss}^n + K_e \sum_{n=1}^{n_{\max}} E_{loss}^n + K_c \sum_{i=1}^N Q_i \quad (11)$$

s.t. $V_{\min_i} - V_i^u \leq \sum_{j=1}^N \left(\frac{Z_{ij}}{V_c} \right) Q_j \leq V_{\max_i} - V_i^u$

FILTER DESIGN

After solving the reactive power compensation required and the corresponding locations where the capacitors should be installed, the shunt capacitor should be replaced by the proper filter for those buses with the harmonic distortion violation. In this case, the reactive power generated by the filter should be the same as provided by the previous shunt capacitor.

For the t-th order single-tuned filter, the fundamental voltage across the capacitor is calculated as

$$V^1 = \frac{X_c}{Z_{filter}} \times V_{bus} = \frac{t^2}{t^2 - 1} \times V_{bus} \quad (12)$$

where X_c and Z_{filter} are the impedance of the capacitor and the filter at fundamental frequency respectively. The voltage rating of the filter capacitor is solved as Eq.(13).

$$V_c = V_{bus} \times \frac{t^2}{t^2 - 1} + \sum_{n=2}^{n_{\max}} V^n \quad (13)$$

Due to the existence of the series inductor, the net reactive power generated by the t-th order harmonic filter is solved as Eq.(14).

$$Q_{filter} = \frac{V_{bus}^2}{Z_{filter}} = Q_{cap} \times \left(\frac{V_{bus}}{V_c} \right)^2 \times \frac{t^2}{t^2 - 1} \quad (14)$$

COMPUTER SIMULATION

The flowchart of reactive power compensation for the distribution system with

harmonic power pollution is shown as Fig. 1. The harmonic load flow program is based on the current injection method[6].

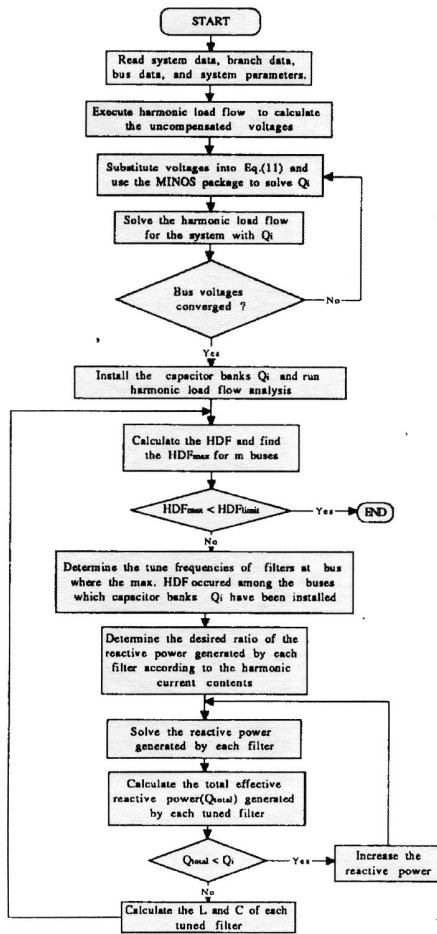


Fig. 1 The flowchart of reactive power compensation

In this paper, a 11.4kV sample distribution feeder as shown by Fig.2 is selected for computer simulation. The bus data and branch data are listed in Appendix. The voltage constraints are $V_{min}=0.95p.u.$, $V_{max}=1.05p.u.$ and the harmonic distortion limit is $HDF_{max}=3\%$. The parameters in the objective function are $K_p=\$168/kw.yr.$, $K_e=\$0.05/kwh$ and $K_c=\$4/kvar.yr.$ The sample feeder serves the commercial area with the daily load curve as shown in Fig. 3.

The harmonic current contents at each bus are assumed to be I/n , where I is the fundamental load current and n is the harmonic order. Table 1 shows the computer simulation for the test feeder at 9AM when the system peak load occurs. It is found that very serious harmonic distortion and

poor voltage profile are resulted for the system without reactive power compensation.

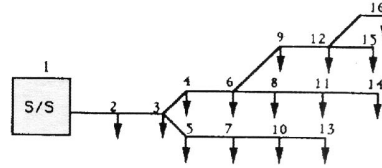


Fig. 2 One line diagram of the sample feeder

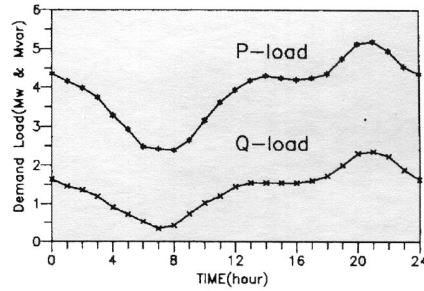


Fig. 3 Daily load curve of the sample feeder

Table 1 Computer simulation of the sample feeder
Case I: system without compensation
Case II: system with capacitor compensation
Case III: system with capacitor and filter compensation

BUS	Case I		Case II		Case III	
	Voltage	HDF(%)	Voltage	HDF(%)	Voltage	HDF(%)
1	1.000	0.00	1.000	0.00	1.000	0.00
2	0.986	1.12	0.996	1.04	0.997	0.33
3	0.961	3.37	0.991	3.11	0.991	0.39
4	0.944	4.76	0.991	4.37	0.991	0.78
5	0.957	3.80	0.988	3.50	0.988	1.30
6	0.921	6.75	0.989	6.19	0.991	0.74
7	0.955	4.11	0.987	3.78	0.987	1.57
8	0.915	7.11	0.984	6.54	0.986	0.85
9	0.916	7.27	0.992	6.68	0.993	0.85
10	0.947	5.08	0.980	4.67	0.981	2.41
11	0.912	7.24	0.980	6.66	0.983	0.93
12	0.913	7.63	0.994	7.01	0.996	1.14
13	0.944	5.35	0.978	4.90	0.979	2.64
14	0.910	7.31	0.977	6.73	0.981	0.98
15	0.911	7.94	0.993	7.30	0.994	1.01
16	0.910	7.85	0.992	7.22	0.993	1.03

In order to improve the voltage profile, the optimal capacitor placement is first executed. For this study, the optimal shunt capacitor location are solved at Bus 4, 6, 7, 12, 13 and the corresponding capacitor sizes are 300, 300, 150, 150, 150kvar. Although the system voltage has been improved, the harmonic distortion factor is still larger than the limit. Furthermore, the system loss and the corresponding cost of the test feeder is reduced significantly with the proper reactive power compensation as shown by Table

2. It is found that the system loss and the overall cost of the sample feeder are the smallest by applying the proposed methodology. There is \$6885/year cost saving has been achieved by the proposed reactive power compensation.

To solve the harmonic distortion, two single tuned filters are installed at bus 12 as Table 3 with tuning frequencies at 4.8 and 6.7 harmonic order to prevent the filters from becoming capacitive to amplify the harmonic current. The total effective reactive power generated by both filters are 150kvar at fundamental frequency, which means that same amount of reactive power compensation is obtained. From Table 1(Case III), it is found that the harmonic distortion has been reduced to within the harmonic distortion limit.

Table 2 System loss and cost of the sample feeder

	Case I	Case II
Peak loss(Kw)	203.0	179.3
Energy loss(Mw.yr)	904.7	840.7
Power loss cost(\$/yr)	34110	30121
Energy loss cost(\$/yr)	47033	42036
Capacitor cost(\$/yr)	0	2100
Total cost(\$/yr)	81143	74257

Table 3 The single-tuned filters to be installed at bus 12

filter	Q(kvar)	L(mH)	Q _{gen} (kvar)
4.8th	127	0.140	94
6.7th	74	0.187	56

CONCLUSIONS

this paper has developed a systematic procedure to determine the optimal reactive power compensation by shunt capacitors and filters for distribution systems with nonlinear loads. The MINOS package is applied to solve the nonlinear programming to find the optimal location and size of the reactive power compensation. The harmonic load flow is used to calculate the system harmonic distortion and power loss. The proper harmonic filters are designed to find the tuning frequency, voltage and current ratings of the inductor and capacitor for those buses with harmonic distortion violation. According to the computer simulation of the sample feeder, it is concluded that the reactive power compensation must be incorporated with harmonic filters to eliminate the harmonic distortion as well as to provide the reactive power compensation.

APPENDIX

Bus data and branch of the test system
(all line segments are ACSR 1/0)

BUS	Peak Load(kw)	Nonlinear Load (%)	FBUS	TBUS	Length (mile)
1	0	0.00	1	2	1.0
2	250	0.0	2	3	2.0
3	220	55.7	3	4	2.0
4	300	48.9	3	5	1.0
5	280	92.1	4	6	3.0
6	410	4.7	5	7	1.0
7	350	51.9	6	8	3.0
8	250	38.2	6	9	1.0
9	390	90.1	7	10	4.0
10	300	80.5	8	11	2.0
11	290	37.2	9	12	1.0
12	630	8.1	10	13	2.0
13	500	63.5	11	14	3.0
14	250	20.1	12	15	2.0
15	370	85.7	12	16	3.0
16	400	42.7			

REFERENCES

1. A. Venkataramens, J. Carr and R. S. Ramshaw, "Optimal Reactive Power Allocation", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. PWR-2, No. 1, 1987, pp. 138-144.
2. H. Duran, "Optimum Number, Location, and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders: A Dynamic Programming Approach", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, 1968, pp. 1769-1774.
3. D. A. Gonzalez and J. C. McCall, "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 3, 1987, pp. 504-511.
4. William D. Stevenson Jr., Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill Book Company, 1982.
5. A. M. Pretelt, "Automatic Allocation of Network Capacitors", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 1, 1971, pp. 54-61.
6. C. S. Chen, J. S. Wu, Y. H. Yan and C. S. Moo, "Harmonic Analysis of distribution System", Electric Power System Research, Vol-17, 1989, pp. 171-177.

جدول ۱.۸ تصحیح ضریب تون:

ضریب واکنشی	ضریب تصحیح تون در خواستی ۰.۱٪																				
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0.800	0.584	0.610	0.636	0.662	0.688	0.714	0.741	0.767	0.794	0.822	0.850	0.878	0.905	0.939	0.971	1.005	1.043	1.083	1.311	1.192	1.334
0.791	0.549	0.575	0.601	0.627	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.870	0.904	0.936	0.970	1.008	1.048	1.096	1.157	1.299
0.785	0.515	0.541	0.567	0.593	0.619	0.645	0.672	0.698	0.725	0.753	0.781	0.809	0.836	0.870	0.902	0.936	0.974	1.014	1.062	1.123	1.265
0.776	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.721	0.749	0.777	0.804	0.838	0.870	0.904	0.942	0.982	1.030	1.091	1.233
0.768	0.450	0.476	0.502	0.528	0.554	0.580	0.607	0.633	0.660	0.688	0.716	0.744	0.771	0.805	0.837	0.871	0.909	0.949	0.997	1.058	1.200
0.759	0.419	0.445	0.471	0.479	0.523	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.740	0.774	0.806	0.840	0.878	0.918	0.966	1.027	1.169
0.751	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.626	0.654	0.682	0.709	0.743	0.775	0.809	0.847	0.887	0.935	0.996	1.138
0.744	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.679	0.713	0.745	0.779	0.817	0.857	0.905	0.966	1.108
0.733	0.329	0.355	0.381	0.407	0.433	0.459	0.486	0.512	0.539	0.567	0.595	0.623	0.650	0.684	0.716	0.750	0.788	0.828	0.876	0.937	1.079
0.725	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.620	0.654	0.686	0.720	0.758	0.798	0.840	0.907	1.049
0.714	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.591	0.625	0.657	0.691	0.729	0.769	0.811	0.878	1.020
0.704	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.563	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.783	0.850	0.992
0.694	0.213	0.239	0.265	0.291	0.317	0.343	0.370	0.396	0.423	0.451	0.479	0.507	0.534	0.568	0.600	0.634	0.672	0.712	0.754	0.821	0.963
0.682	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.507	0.541	0.573	0.607	0.645	0.685	0.727	0.794	0.936
0.673	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.480	0.514	0.546	0.580	0.618	0.658	0.700	0.767	0.909
0.661	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.453	0.487	0.519	0.553	0.591	0.631	0.673	0.740	0.882
0.650	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.426	0.460	0.492	0.526	0.564	0.604	0.652	0.713	0.855
0.637	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.400	0.434	0.466	0.500	0.538	0.578	0.620	0.687	0.829
0.626	0.053	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.210	0.236	0.263	0.291	0.319	0.347	0.374	0.408	0.440	0.474	0.512	0.552	0.594	0.661	0.803
0.613	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.347	0.381	0.413	0.447	0.485	0.525	0.567	0.634	0.776

1-Electric Power Distribution System Engineering

By: Turan Gonen

2- Power System Analysis

By: Grainger . JohnJ. Stevenson Wiliam

3- Power System Analysis and Design

By: Glover, J. Doncan

۴- راهنمای خازن گذاری در شبکه های توزیع مرکز تحقیقات نیرو (متن)

۵- استاندارد خازنهای مورد استفاده در شبکه های توزیع مرکز تحقیقات نیرو

۶- راهنمای اصلاح ضریب توان شرکت FRAKO

۷- پایانه های کارشده با دکتر حقی فام در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

۸- سیستم های توزیع جلد ۲ شرکت وستینگهاس

۹- مقالات IEEE

۱۰- سایت های علمی در مورد خازن گذاری