تعیین بهینه ظرفیت و محل نصب خازن در سیستمهای توزیع

(جهت بهینه‌سازی تلفات توان)

حمید معصومی - علی معمار دو قلعه
شرکت برق منطقه‌ای آذربایجان

چکیده :

فلوی توان راکتیو درسیستمهای توزیع باعث تلفات توان شده و مهندسین سعی میکنند با نصب بانکهای خازنی این تلفات را به حداقل ممکن تقلیل دهند. برای هر رشد بار و افزایش معرف ، مطالعهٔ پروفیل ولتاژ، تعیین محل نصب و ظرفیت خازن و تعیین مقدار کاهش تلفات به لحاظ صرفه‌جوئی در هزینه‌ها ضروری به نظر میرسد. در این مقاله یک روش ریاضی همراه با معادلات عمومی به منظور استفاده از خازنهای موازی جهت کاهش تلفات پیک بار و تلفات انرژی در خطوط توزیع ، با بارهای یکنواخت و در شرائطی که درانتهای خط رشد بار وجود دارد مطرح شده است.

شرح مقاله :

امروزه جهت کنترل ولتاژ فیدرهای توزیع در محدوده حداقل و حداکثر مقدار مجاز در شرائط تغذیهٔ بارهای مختلف ، بطور وسیعی از خازنهای موازی استفاده میشود. دراین محدوده (حد بالائی و حد پائینی ولتاژ) محل و ظرفیت بهینه خازن بر اساس حداکثر کاهش در تلفات انرژی بویژه در شرائط پیک بار شبکه تعیین میشود. عملاً در سیستمهای قدرت همزمان با افزایش بار شبکه، مؤلفه راکتیو بار

نیز تغییر می یابد و این تغییرات در انتهائی‌ترین نقاط فیدرها بعلت تقاضای بیشتر مصرف ، سریعتر ازدیگر نقاط میباشد. این موضوع یعنی رشد سریع بار در انتهای فیدر و نیز تاثیر خازنهای موجود در آن از جمله مشکلاتی است که معمولا" طراح سیستم توزیع در محاسبه و پیش‌بینی پروفیل جدید ولتاژ خط با آن روبروست. برای هر میزان رشد بار و افزایش مصرف ، مطالعهٔ پروفیل ولتاژ، تعیین مقدار کاهش تلفات و تعیین محل بهینه نصب خازن به لحاظ صرفه‌جوئی در هزینه‌ها ضرورت دارد.

<u>۱- محاسبات ریاضی جهت تعیین بهینه محل نصب خازن :</u>

شکل (۱) یک فیدر توزیع (۲۰ کیلوولت) که شامل ترکیبی از بارهای متمرکز و یکنواخت میباشد را نشان میدهد. برای سادگی فرض میشود جریان بار و یا جریان خط و در نتیجه تلفات ($I^2.R$) دارای دو مؤلفه اکتیو و راکتیو باشد. چون مؤلفه اکتیو جریان متاثر از وجود خازن شنت نمیباشد لذا از آن صرفنظر میشود. با عبور جریان پس‌فاز از مقاومت R خواهیم داشت :

$$I^2.R = (I.Cos\phi)^2.R + (I.Sin\phi)^2.R \qquad (۱)$$

پس از اضافه نمودن خازن شنت با جریان Ic ، جریان منتجه برابر I_1 و تلفات جدید برابر $I_1^2.R$ خواهد شد و درنتیجه :

$$I_1^2.R = (I.Cos\phi)^2.R + (I.Sin\phi - Ic)^2.R \qquad (۲)$$

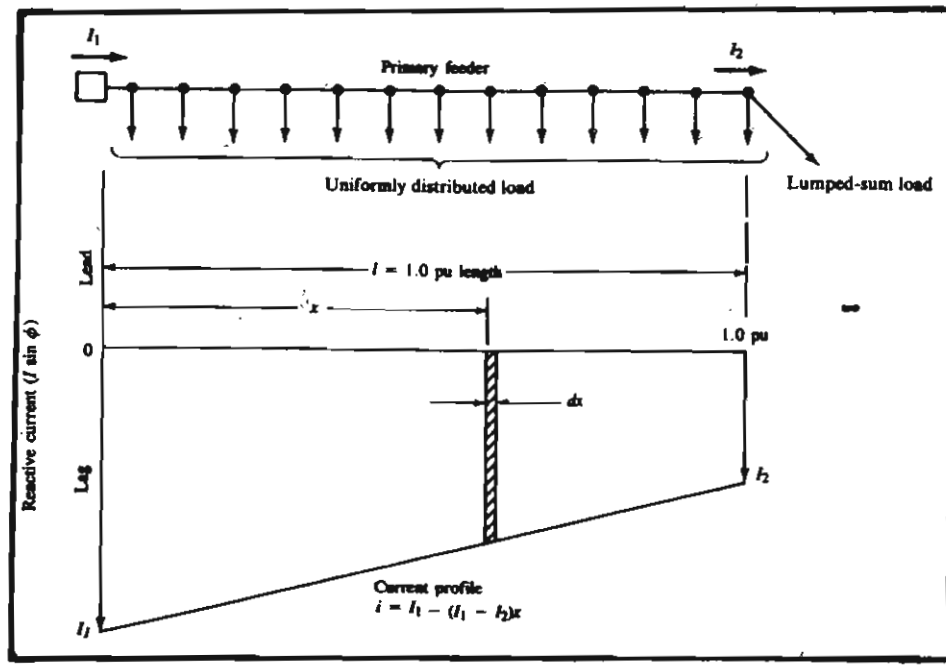
لذا مقدار کاهش تلفات در نتیجه اضافه شدن خازن به قرار زیراست :

$$\Delta PLs = I^2.R - I_1^2.R \qquad (۳)$$

با جایگزینی معادلات (۱) و (۲) در معادله (۳) خواهیم داشت :

$$\Delta PLs = 2(I.Sin\phi).Ic.R - Ic^2.R \qquad (۴)$$

بدین ترتیب درصورت وجود خازن جهت کاهش تلفات ($I^2.R$) باید تنها مؤلفه راکتیو جریان خط یعنی $I.Sin\phi$ در نظر گرفته شود.



شکل ۱

مطابق شکل(۱)اگر طول خط برابر یک پریونیت باشد پروفیل جریان خط در هر نقطه ازفیدر بر حسب تابعی از فاصله آن نقطه از نقطه شروع خط میباشد. بنابراین دیفرانسیل تلفات $(I^2.R)$ یک جزء کوچک dx درفاصله x ازشروع خط بصورت زیر بیان میشود :

$$dPLs = 3[I_1-(I_1-I_2).x]^2.R.dx \qquad (۵)$$

کل تلفات خط $(I^2.R)$ بصورت زیر بیان میشود :

$$PLs = \int_{x=0}^{1.0} dPLs = 3\int_{x=0}^{1.0} [I_1-(I_1-I_2).x]^2.R.dx$$

$$= (I_1^2+I_1.I_2+I_2^2).R \qquad (۶)$$

PLS : کل تلفات $(I^2.R)$ خط قبل ازنصب خازن

I_1 : جریان راکتیوابتدای خط

I_2 : جریان راکتیو انتهای خط

X : طول برحسب پریونیت ازابتدای خط

۱-۱- کاهش تلفات بعد ازنصب خازن :

حالت اول - یک بانک خازنی :

با اضافه نمودن یک بانک خازنی در خط ، در پیوستگی پروفیل بار راکتیو شکستگی ایجاد شده و جریان راکتیو تغییر و بدنبال آن تلفات کاهش مییابد (شکل ۲). لذا معادله تلفات پس از اضافه نمودن بانک خازنی بقرار زیراست :

$$P_1LS = 3\int_{x=0}^{x_1} [I_1-(I_1-I_2).x-Ic]^2.R.dx + 3\int_{x=x_1}^{1.0} [I_1-(I_1-I_2).x]^2.R.dx \qquad (۷)$$

ویا

$$P_1Ls = (I_1^2+I_1 \cdot I_2+I_2^2) \cdot R + 3x_1 \cdot [(x_1-2) \cdot I_1 \cdot Ic-x_1 \cdot I_2 \cdot Ic+Ic^2] \cdot R \qquad (۸)$$

بدین ترتیب کاهش تلفات قدرت برحسب پریونیت پس ازاضافه نمودن بانک خازنی به فرم زیر میباشد :

$$PLs = \frac{PLs-P_1Ls}{PLs} \qquad (۹)$$

باجایگزینی معادلات (۶) و (۸) درمعادله (۹) خواهیم داشت :

$$PLs = \frac{-3x_1.[(x_1-2).I_1.Ic-x_1.I_2.Ic+Ic^2].R}{(I_1^2+I_1.I_2+I_2^2).R} \qquad (۱۰)$$

با مرتب نمودن معادله (۱۰) و مشتق گرفتن از I_1^2 داریم :

$$\Delta PLs = \frac{3x_1}{1+(I_2/I_1)+(I_2/I_1)^2} \times \dots \qquad (11)$$

$$\dots[(2-x_1)(Ic/I_1) + x_1.(I_2/I_1)(Ic/I_1)-(Ic/I_1)^2]$$

اگر C بعنوان نسبت کیلوولت آمپر بانک خازن (CKVA) نسبت به کل بار راکتیو باشد داریم :

$$C = \frac{\text{CKVA خازن نصب شده}}{\text{کل بار راکتیو}} \qquad (12)$$

$$C = \frac{Ic}{I_1} \qquad (13)$$

و اگر q نسبت جریان راکتیو در انتهای خط به جریان راکتیو درابتدای خط باشد :

$$q = \frac{\text{جریان راکتیو انتهای خط}}{\text{جریان راکتیو ابتدای خط}} \qquad (14)$$

$$q = \frac{I_2}{I_1} \qquad (15)$$

با جایگزینی معادلات (۱۵) و (۱۳) درمعادله (۱۱) کاهش تلفات بر حسب پریونیت بقرار زیر است :

$$\Delta PLs = \frac{3x_1}{1+q+q^2}[(2-x_1).c + x_1.q.c - c^2] \qquad (16)$$

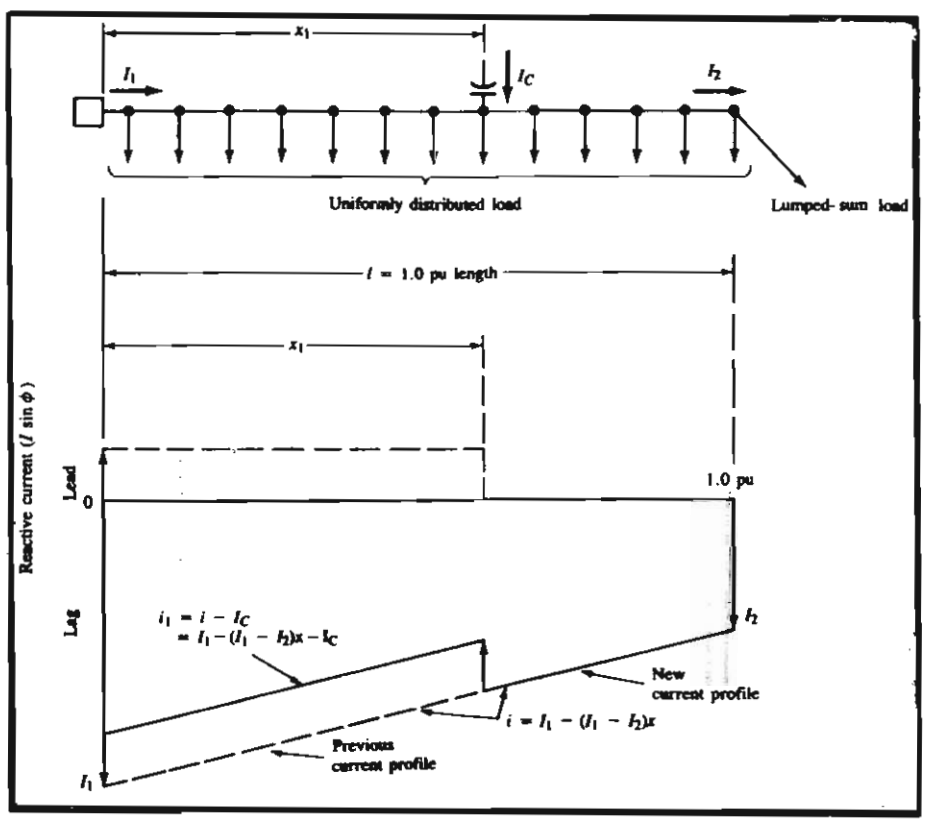
$$\Delta PLs = \frac{3c.x_1}{1+q+q^2}[(2-x_1)+x_1.q-c] \qquad (۱۷)$$

x_1 فاصله محل قرار گرفتن بانک خازنی از ابتدای خط میباشد (بین صفر و یک پریونیت). اگر α برابر $(1 + q + q^2)$ باشد:

$$\alpha = \frac{1}{1+q+q^2} \qquad (۱۸)$$

پس معادله (۱۷) به فرم زیر قابل بیان است :

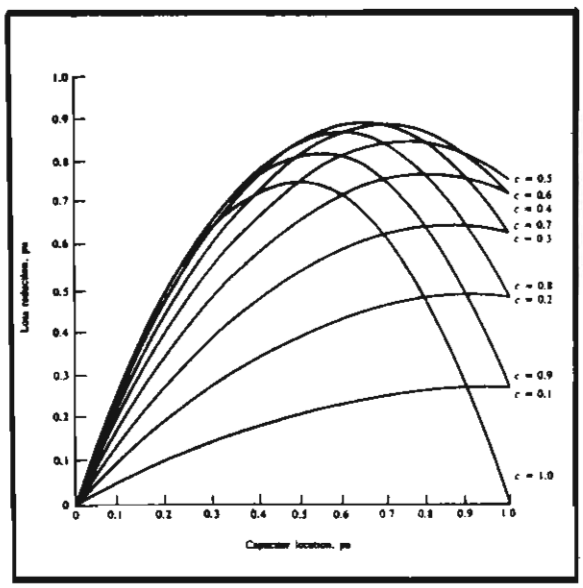
$$\Delta PLs = 3\alpha.c.x_1[(2-x_1)+q.x_1-c] \qquad (۱۹)$$



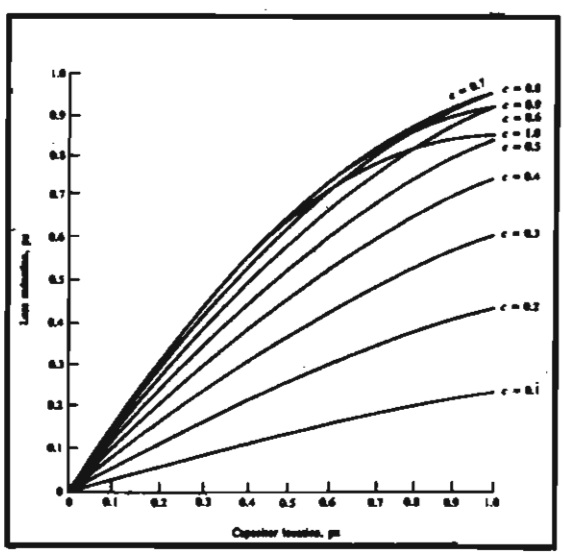
شکل ۲

چنانکه در اشکال (۳) تا (۵) دیده میشود مقدار کاهش تلفات بستگی به محل نصب بانک خازنی و ظرفیت آن در بارهای مختلف دارد. مثلا" برای بارهای توزیع شده

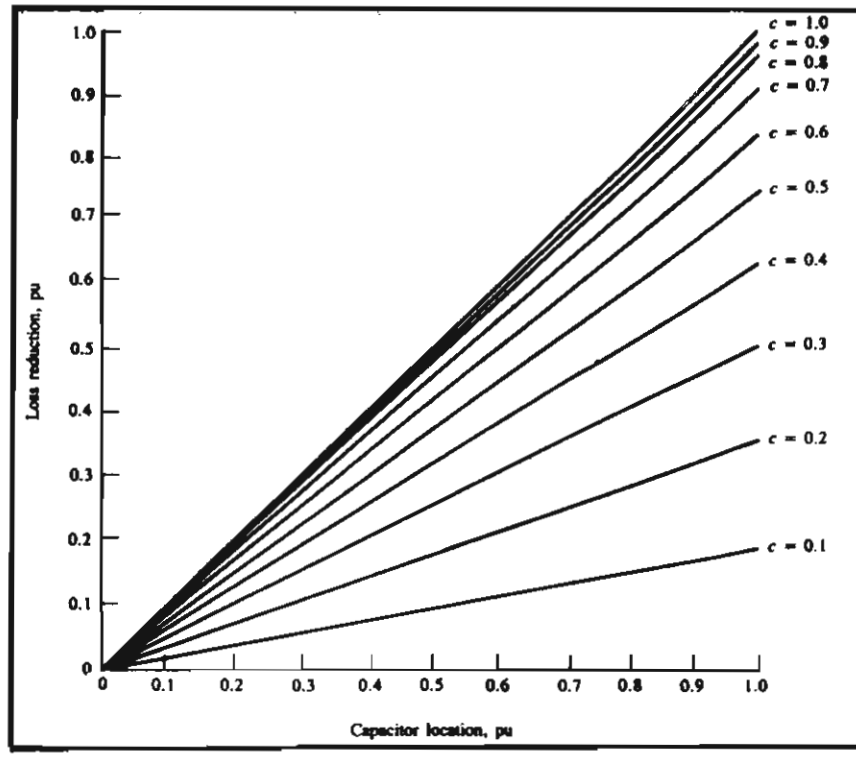
یکنواخت (Uniformaly distributed loads) q = 0 ، بارهای متمرکز (Lumped - Sum) q = 1 و بینا ترکیبی از بارهای متمرکز و یکنواخت توزیع شده 1 > q > 0 میباشد.



شکل ۳ -(q=۰)



شکل ۴ - (q=½)

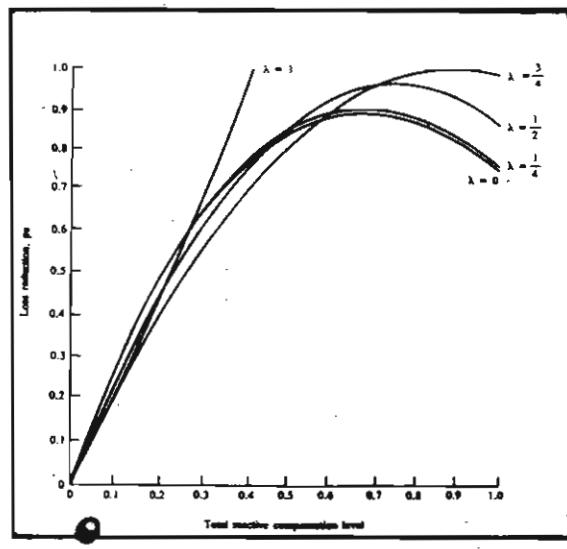


شکل ۵ - (q=1)

جهت استفاده ازاین نمودارها باید فاکتورهای زیر معلوم باشند :

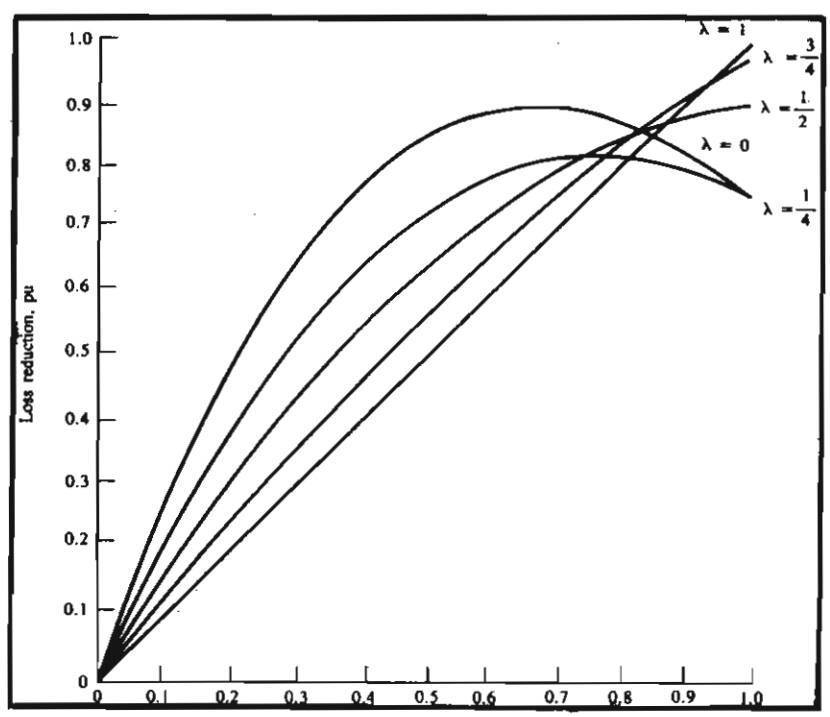
۱- جریان راکتیو قبل از نصب خازن
۲- ظرفیت جبران کننده خازنی
۳- محل بانک خازنی

بعنوان مثال فرض کنید بار خط توزیع یکنواخت بوده و مقدار C مورد نیاز ۰/۵ باشد. چنانچه از شکل(۳)مشاهده میشود حداکثر کاهش تلفات موقعی است که بانک خازنی در ۰/۷۵ کل طول خط نسبت به ابتدای خط باشد. کل کاهش تلفات ۰/۸۵ پریونیت یا ۰/۸۵ میباشد. اگر بانک خازنی در هر نقطه دیگر خط نصب شود کاهش تلفات کمتراز ۰/۸۵ خواهد بود. بعبارت دیگر برای نصب خازن در هر ظرفیتی تنها یک محل وجود دارد که حداکثر کاهش تلفات رابه‌همراه داشته باشد. شکل(۶)کاهش تلفات را برای حالتی که یک بانک خازنی در نقطهٔ بهینه نصب شده و خط شامل بارهای مختلفی باشد را نشان میدهد :



شکل ۶

شکل(۷)کاهش تلفات ناشی ازاپتیمم‌ظرفیت بانک خازنی را در روی خط ، در شرائط ترکیبی از بارهای مختلف نشان میدهد.



شکل ۷

حالت دوم - دو بانک خازنی :

فرض کنید مطابق شکل (۸) دو بانک خازنی مشابه در روی فیدر نصب شده باشد ، دراین حالت معادله جدید بصورت زیر میباشد :

$$PLs = 3\int_{x=0}^{x_1} [I_1-(I_1-I_2).x-2Ic]^2.R.dx + 3\int_{x=x_1}^{x_2} [I_1-(I_1.I_2).x-Ic]^2.R.dx + 3\int_{x=x_2}^{1.0} [I_1-(I_1-I_2).x]^2.R.dx \qquad (۲۰)$$

باجایگزینی معادلات (۲۰) و (۶) در معادله (۹) ، معادله جدید کاهش تلفات برحسب پریونیت بصورت زیر حاصل میشود.

$$\Delta PLs = 3\alpha.x_1.[(2-x_1) + q.x_1-3c] + 3\alpha.c.x_2[(2-x_2) + q.x_2 - c] \qquad (۲۱)$$

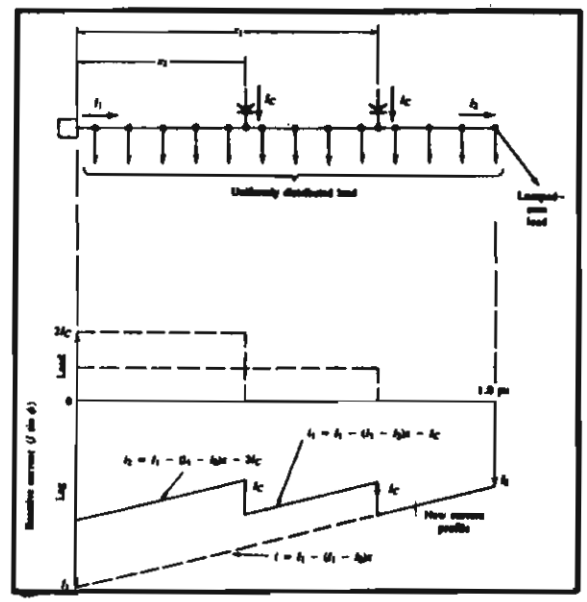
و یا :

$$\Delta PLs = 3\alpha.c.[x_1.[(2-x_1) + q.x_1-3c] + x_2.[(3-x_2) + q.x_2-c]] \qquad (۲۲)$$

حالت سوم - سه بانک خازنی :

فرض کنید سه بانک خازنی مشابه در روی فیدر نصب شده باشند. معادله کاهش تلفات دراین حالت به فرم زیر میباشد:

$$\Delta PLs = 3\alpha.c.[x_1.[(2-x_1) + q.x_1-5c)] + x_2.[(2-x_2) + q.x_2-3c] + x_3.[(2-x_3) + q.x_3- c]] \qquad (۲۳)$$



شکل ۸

حالت چهارم - n بانک خازنی :

معادله عمومی کاهش تلفات برحسب پریونیت برای n فیدر بانک خازنی به فرم زیرمیباشد :

$$\Delta PLs = 3\alpha.c \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i.[(2-x_i)+q.x_i-(2i-1).c] \qquad (۲۴)$$

که :

C : نسبت جبران کننده خازنی در هر محل

X_i : فاصله iامین بانک خازنی ازابتدای خط برحسب پریونیت

n : تعداد بانکهای خازنی

۲-۱- محل بهینه یک بانک خازنی :

محل بهینه برای iامین بانک خازنی با گرفتن مشتق جزئی مرتبه اول از معادله (۲۴) برحسب X_i و مساوی صفر قرار دادن آن بدست می‌آید :

$$Xi_{opt} = \frac{1}{1-q} - \frac{(2i-1).c}{2(1-q)} \qquad (۲۵)$$

که :

Xi_{opt} : محل اپتیمم iامین بانک خازنی برحسب طول (پریونیت)

باجایگزینی معادله (۲۵) درمعادله (۲۴) اپتیمم کاهش تلفات بصورت زیراست :

$$\Delta PLS_{opt} = 3\alpha \cdot c \cdot \Sigma_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{1-q} - \frac{(2i-1).c}{1-q} + \frac{i^2 \cdot c^2}{1-q} - \frac{c^2}{4(1-q)} - \frac{i.c^2}{1-q}\right] \qquad (۲۶)$$

$$\Sigma_{i=1}^{n} i = \frac{n.(n+1)}{2} \qquad (۲۷)$$

$$\Sigma_{i=1}^{n} i^2 = \frac{n.(n+1).(2n+1)}{6} \qquad (۲۸)$$

$$\Sigma_{i=1}^{n} \frac{1}{1-q} = \frac{n}{1-q} \qquad (۲۹)$$

$$\Delta PLS_{opt} = 3\alpha \cdot c\left[\frac{n}{1-q} - \frac{n^2.c}{1-q} + \frac{n^2.c.(n+1)(2n+1)}{6} - \frac{n.c^2}{4(i-q)} - \frac{n^2.c.(n+1)}{2(1-q)}\right] \qquad (۳۰)$$

$$\Delta PLS_{opt} = \frac{3\alpha.c}{1-q}\left[n - c \cdot n^2 + \frac{c^2.n.(4n^2-1)}{12}\right] \qquad (۳۱)$$

نسبت جبران کننده خازنی در هر محل با مشتق گرفتن از معادله (۱۳) بر حسب C و قراردادن آن برابر صفر بدست می‌آید:

$$C = \frac{2}{2n+1} \qquad (۳۲)$$

بعنوان مثال برای n=1 نسبت ظرفیت خازن برابر ۳ / ۲ کل بار راکتیو میباشد که درنقطه ای با مقدار q زیر نصب شده باشد.

$$q = \frac{2}{3(1-q)} \qquad (۳۳)$$

که حداکثر کاهش تلفات برابراست با :

$$\Delta PLSopt = \frac{8\alpha}{9(1-q)} \qquad (۳۴)$$

برای یک خط توزیع با بار توزیع شده یکنواخت ، جریان راکتیو درانتهای خط برابر صفر ($I_2=0$) میباشد ($\alpha=1$ و $q=0$). بنابراین کاهش تلفات در حالت اپتیمم برابر است با :

$$\Delta PLSopt = \frac{8}{9} PU \qquad (۳۵)$$

اپتیمم مقدار x_1 برابر است با :

$$x_1 = \frac{2}{3} PU \qquad (۳۶)$$

و اپتیمم مقدار C برابر است با :

$$C = \frac{2}{3} PU \qquad (۳۷)$$

<u>نتیجه:</u>

جهت کنترل ولتاژ فیدرهای توزیع در محدوده حداقل و حداکثر مقدار مجاز در

شرائط تغذیه بارهای مختلف استفاده از خازنهای موازی ضروری است و صرفه‌جوئی در هزینه‌ها ، مطالعه پروفیل ولتاژ ، تعیین محل نصب و ظرفیت خازن و تعیین مقدار کاهش تلفات را ایجاب مینماید. با استفاده از یک روش ریاضی جهت محاسبه محل و مقدار بهینه خازن در خطوط توزیع در شرائطی که در انتهای خط رشد بار وجود دارد میتوان به حداکثر کاهش در تلفات انرژی دست یافت.

منابع :