وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجتمع آموزش عالی گناباد

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجتمع آموزش عالی گناباد

«به نام خدا»

سیستم های توزیع انرژی الکتریکی

دکتر امین رنجبران

عضو هیات علمی مجتمع آموزش عالی گناباد

قسمت دوم

محاسبات سطح مقطع در خطوط فشار متوسط

در خطوط توزیع فشار متوسط محاسبات سطح مقطع بر اساس ملاحظات حداکثر جریان مجاز صورت می گیرد و در نهایت افت ولتاژ مجاز کنترل می شود.

در خطوط توزیع فشار ضعیف محاسبات سطح مقطع بر اساس با توجه به حداکثر افت ولتاژ محاسبه و در پایان حداکثر جریان مجاز کابل ها کنترل می شود.

دلیل آن هم این است که در خطوط فشار متوسط سطح مقطع خطوط بیشتر و افت ولتاژ کمتر است در صورتی که در توزیع فشار ضعیف عکس این موضوع صادق است.

عوامل موثر در انتخاب سطح مقطع

۱- اقتصادی: بطوری که قیمت مس کابل زیرزمینی یا هوایی متناسب با سطح مقطع آن باشد.

۲- فنی:
- ۱- حرارت مجاز
- ۲- افت ولتاژ مجاز

ابتدا سطح مقطع از لحاظ اقتصادی را بدست می‌آوریم:

C_1 = هزینه کل مس خط = هزینه کابل + هزینه استهلاک سرمایه‌گذاری شده + هزینه انرژی تلف شده در سال C_2

$C = C_1 + C_2$

I_k: جریان عبوری از قطعه kام در زمان بازدید

g: قیمت تلفات $/kwh

T_0: تعداد ساعات موثر سالیانه

A: سطح مقطع

α, β: ضرایب ثابت

L: طول

s: ضریب استهلاک

$$C_1 = g T_0 \sum_{k=1}^{n} 3 R_k I_k^2 = \frac{3 g T_0}{\sigma} \sum_{k=1}^{n} \frac{L_k}{A_k} I_k^2$$

(n: تعداد خطوط، 3: به خاطر ۳ فاز)

قیمت کابل‌های هوایی $= \alpha (A + \beta) L$

$$C_2 = s \sum_{k=1}^{n} \alpha (A_k + \beta) L_k$$

$$\frac{dC}{A_K} = 0 \Rightarrow$$

$$C = s\alpha \sum_{k=1}^{n} (A_k + \beta) L_k + \frac{3 g T_0}{\sigma} \sum_{k=1}^{n} \frac{L_k}{A_k} I_k^2$$ هزینه کل سالیانه

حل به ازای سطح مقطع‌های $A_1, \ldots, A_n$ را طوری انتخاب کنیم که C حداقل شود.

$$C = S\alpha \sum_{k=1}^{n} (A_k + \beta) L_k + \frac{3gT_0}{\sigma} \sum_{k=1}^{n} \frac{L_k}{A_k} I_k^2 \quad \text{هزینه کل سالیانه}$$

$$\frac{\partial C}{\partial A_k} = 0 \Rightarrow S\alpha L_k - gT_0 \times \frac{3L_k}{\sigma A_k^2} I_k^2 = 0 \Rightarrow \left(\frac{I_k}{A_k}\right)^2 = \frac{\sigma S\alpha}{3gT_0} \Rightarrow$$

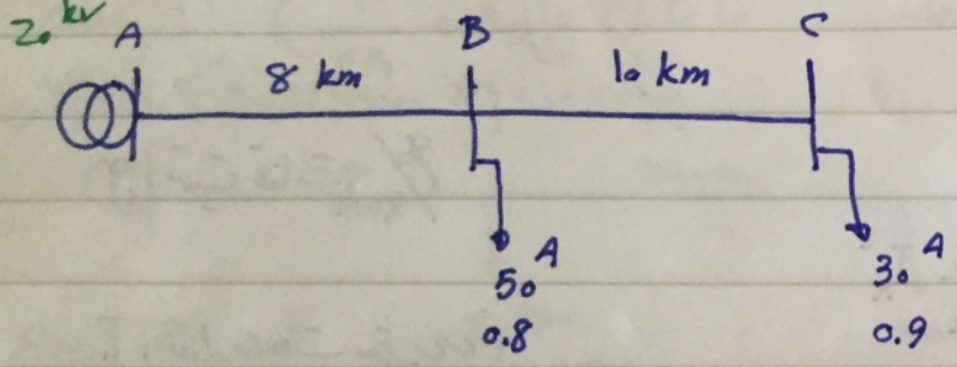
$$J = \frac{I_k}{A_k} = \sqrt{\frac{S\alpha\sigma}{3gT_0}} \quad \text{چگالی اقتصادی جریان:}$$

مثال ۱: قیمت هر کیلومتر کابل مسی شاخه‌ای از رابطه $140(A_{cu}+60)$ و قیمت هر کیلومتر کابل آلومینیومی مشابهی از رابطه $80(A_{al}+115)$ بدست آید، چگالی جریان اقتصادی را برای کابل مسی و آلومینیومی تعیین کنید؟ فرض می‌شود تعداد ساعات بهره‌برداری سالیانه $T_0 = 4000 \frac{h}{\text{سال}}$ قیمت واحد تولیدی $g = 0.08 \frac{\$}{kwh}$ ضریب استهلاک (۱۰٪)، $\sigma_{Cu} = 55 \frac{m}{\Omega.mm^2}$، $\sigma_{Al} = 35 \frac{m}{\Omega.mm^2}$ باشد.

$$J_{Cu} = \sqrt{\frac{\sigma_{Cu}\alpha S}{3gT_0}} = \sqrt{\frac{55 \times 140 \times 0.1}{3 \times 0.08 \times 4000}} = 0.89 \ A/mm^2$$

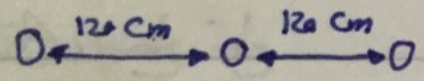
$$J_{Al} = \sqrt{\frac{\sigma_{Al}\alpha S}{3gT_0}} = \sqrt{\frac{35 \times 80 \times 0.1}{3 \times 0.08 \times 4000}} = 0.54 \ A/mm^2$$

مثال ۱۲: در شبکه زیر سطح مقطع اقتصادی برای خطوط AB و BC را تعیین کنید و سپس برای حداکثر افت ولتاژ مجاز و حداکثر جریان



مجاز شبکه را انتخاب کنید؟ هادی از نوع ~~آلومینیوم~~ ACSR

$$J = \sqrt{\frac{65\alpha}{3gT_0}} = \sqrt{\frac{35\times 1/1\times 8\times 10^4}{3\times 3800\times 80}} = 0.55 \ \frac{A}{mm^2}$$



حداکثر افت ولتاژ مجاز : 5٪

$I_{BC} = 30^A \Rightarrow J = \frac{I}{A} \Rightarrow A_{BC} = \frac{I_{BC}}{J} = \frac{30}{0.55}$

$T_0 = 3800$

$A_{BC} = 54.54 \ mm^2$

$g = 80$ ریال/kwh

از جدول نزدیکترین سطح مقطع استاندارد را انتخاب کنید.

$S = 10\%$

قیمت کابل هادی $= 8\times 10^4 (A+5)$ ریال $\quad A_{BC} \longrightarrow$ Mink

ولتاژ V_0

حقیقی ۲۳۰/۷۷

s.a.m

سیم آلومینیم ACSR
استفاده شده در فشار متوسط
۱- هادی
۲- هادیار
۳- سیم فلزی
۴- عایق
۵- بدنه

$$I_{AB} = 30 \angle \cos^{-1} 0.9 + 50 \angle -\cos^{-1} 0.8 = 78.65 \angle -32.7 \Rightarrow |I_{AB}| = 80\ A$$

$$A_{AB} = \frac{80}{0.55} = 145.45\ mm^2$$

از جدول ۱۵۰ کمی 157.16 ← استاندارد CSA-C49 طناب

از جدول، هادی پانزده نزدیک است ولی چون این نوع هادی استاندارد نیست از هادی لینکس استفاده می‌کنیم.

$$A_{AB} \longrightarrow Lynx$$

حال بایستی افت ولتاژ را بدست آوریم تا از 5٪ بیشتر نباشد و اگر بیشتر بود باید سطح مقطع را عوض کنیم.

$$\text{جدول} \Rightarrow \begin{cases} r_{AB} = 0.154\ \Omega/km \\ r_{BC} = 0.449\ \Omega/km \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_{AB} = 0.154 \times 1.03 \times 8 = 1.3\ \Omega \\ R_{BC} = 0.449 \times 1.03 \times 1 = 4.67\ \Omega \end{cases}$$

DC

0.4545

$$L_{AB} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{D_s}\ H/m \Rightarrow X_{AB} = L_{AB} \times \omega = 0.06283 \ln \frac{D_{eq}}{D_s}\ \Omega/km$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{1.2 \times 1.2 \times 2.4} = 1.51\ m$$

از جدول $D_{s_{AB}} = 0.7788 \times \frac{19.53}{2} = 7.605\ mm \Rightarrow X_{AB} = 0.06283 \ln \frac{1.51 \times 10^3}{7.605} = 0.33\ \Omega/km$

$$X_{AB} = 8 \times 0.33 = 2.66\ \Omega$$

$$D_{c_{BC}} = 0.7788 \times \frac{10.98}{2} = 4.26 \Rightarrow X_{BC} = 0.06283 \ln \frac{1.51 \times 10^{-3}}{4.26} = 0.3688$$

$X_{BC} = 10 \times x_{BC} = 3.688$

$$\Delta U = \frac{\sum P_i^+ r_i + Q_i^+ x_i}{U}$$

$P_B = \sqrt{3} \times 20 \times 50 \times 0.8 = 1385.6$ kw

$Q_B = \sqrt{3} \times 20 \times 50 \times \sin(\cos^{-1} 0.8) = 1039.2$ kVAR

$$\Delta U = \frac{(P_B + P_C) \times 1.3 + (Q_B + Q_C) \times 2.66}{20}$$

$P_C = \sqrt{3} \times 20 \times 30 \times 0.9 = 935.3$ kw

$Q_C = \sqrt{3} \times 20 \times 30 \times \sin(\cos^{-1} 0.9) = 453$ kVAR

$$+ \frac{P_C \times 4.67 + Q_C \times 3.29}{20} =$$

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{20 \times 1.3} \times 1000 = 5.1 \Rightarrow$$ قابل قبول

اگر از شما خواسته شده بیشتر می‌شود باید ببینید که افت ولتاژ در کدام قسمت بیشتر می‌شود در سطح مقطع آن را بیشتر کنیم.

پس از انتخاب سطح مقطع اقتصادی، آن را بررسی کنیم که آیا هادی ~~X~~ جریان را می‌توانند تحمل کنند یا خیر. که از روی جدول مشخص می‌شود

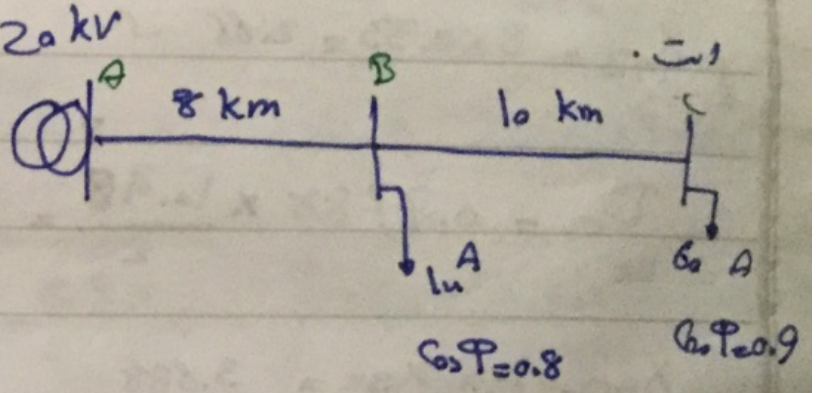
جریان مجاز $\Rightarrow$ { mink 179^A A >30 ; lynx 386^A جریان مجاز >80 }

نتیجه: در این مثال جریان مجاز و افت ولتاژ نکته رعایت شده بود در صورتی که جریان مجاز یا افت ولتاژ نکته رعایت نگردد. بصورت تصادفی سطح مقطع را افزایش می‌دهیم تا جداگانه جریان مجاز و جداگانه افت ولتاژ بررسی. ترجیحاً سطح مقطع‌هایی را انتخاب می‌کنیم که افت ولتاژ در آن‌ها بیشتر باشد.

مثال ۳: مثال قبل را دوباره ابتدا حل کنید که از کابل سه رشته XLPE با هادی آلومینیم استفاده شده باشد، تعیین کنید $2.6\times10^{-5}(A+130)$

دمای متوسط زمین = 25°، مقاومت مخصوص خاک برابر 2.5 است و کابل AB در مجاورت کابل‌های دیگر نیز باشد، عمق دفن برابر 1.5

$$J=\sqrt{\frac{6\alpha S}{3gT_0}}=\sqrt{\frac{35\times2.6\times10^{-5}\times0.1}{3\times3800\times80}}=1\ A/mm^2$$



$$I_{BC}=60\ A \Rightarrow A_{BC}=60\ mm^2 \xrightarrow[\text{جدول}]{} A_{BC}=70\ mm^2$$

$$I_{AB}=100\angle-\cos^{-1}0.8+60\angle-\cos^{-1}0.9=159.3\angle-32.7\simeq160\ A$$ اندازه

جدول AC:
- $x_{AB}=0.104\ \Omega/$
- $r_{AB}=0.264\ \Omega/$
- $R_{BC}=0.568\ \Omega$
- $x_{BC}=0.118\ \Omega$

$$A_{BC}=160=160\ mm^2 \longrightarrow A_{BC}=150\ mm^2$$
AB AB

AC:
- $X_{AB}=8\times0.104=9.832\ \Omega$
- $R_{AB}=8\times0.264=2.11\ \Omega$
- $X_{BC}=1.18\times10=11.8$
- $R_{BC}=5.68\times10=56.8$

$$\Delta U=\sum\frac{P_i^+r_i+Q_i^+x_i}{U}$$

$$\Delta U = \underbrace{\frac{(P_B+P_C)\times 2.1 + (Q_B+Q_C)\times 0.832}{20}}_{3.1} + \underbrace{\frac{P_C\times 5.68 + Q_C\times 1.18}{20}}_{2.9} =$$

$$\Delta U\,\% = \frac{\Delta U}{20\times 11.3}\times 100 = 6\,\% \Rightarrow \text{مجاز است}$$

چون انت رشته AB سبک است $\leftarrow A_{AB} = 185\ mm^2 \Leftarrow \begin{cases} R_{AB} = 1.688 \\ X_{AB} = 0.808 \end{cases}$

جریان مجاز جدول $\begin{cases} AB & 330\ A \\ BC & 195\ A \end{cases}$

ضریب تصحیح‌های زمین $= 0.93$

" " مقاومت خاک $= 0.74$

" " همجواری $= 1$

" " عمق خاک $= 0.95$

ضریب تصحیح کل $= 0.93 \times 0.74 \times 1 \times 0.95$

جریان مجاز در شرایط کاری $\Rightarrow \begin{cases} AB: 330 \times \text{ضریب تصحیح کل} = 172.6\ A \\ BC: 195 \times \text{"} = 130.9\ A \end{cases}$

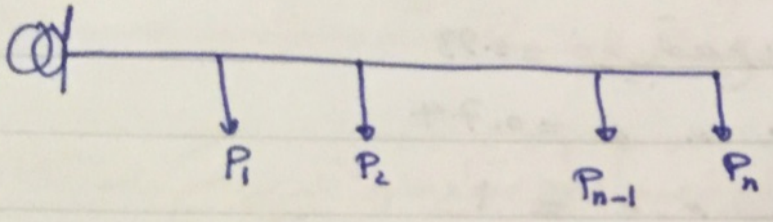
نتیجه: جریان مجاز کابل AB، $172\ A$ است، این جریان مجاز رعایت شده و دیگر کابل BC، $130\ A$ است که این جریان نیز رعایت شده. بدین ترتیب، جریان مجاز رعایت نشود قطع متقطع بالاتر را باعث شده، جریان مجاز نزدیک‌تر قرار ندارد. انتخاب کنیم.

در کابل‌ها باید جریان مجاز حتماً رعایت شود ولی در هادی‌ها جریان مجاز زیاد اهمیت

انتخاب هادی برای خطوط فشار ضعیف:

در شبکه فشار ضعیف انتخاب هادی بیشتر براساس عوامل فنی صورت گرفته در حالیکه در شبکه های فشار متوسط عامل اقتصاد مهم بوده.

در شبکه های فشار ضعیف طراحی براساس افت ولتاژ انجام می شود و جریان مجاز نیز بررسی می گردد.

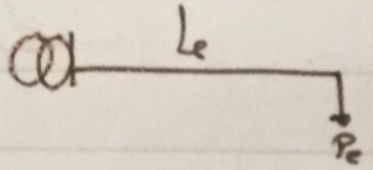


$\cos\varphi$ = ثابت

X_D = ثابت

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U} \times 100$$

شبکه معادل از نظر افت ولتاژ



$$P_e = \sum P_i$$

$$l_e = \frac{\sum P_i l_i}{\sum P_i}$$

$$\Delta U = \frac{1}{u}\left(\frac{1}{\sigma A} + X_D \operatorname{tg}\varphi\right) P_e l_e$$

$$\Delta u'/_{\circ} = \frac{1m}{u^2}\left(\frac{1}{\sigma A} + X_D \operatorname{tg}\varphi\right) P_e l_e$$

طول معادل یک سیم که در آن افت ولتاژ

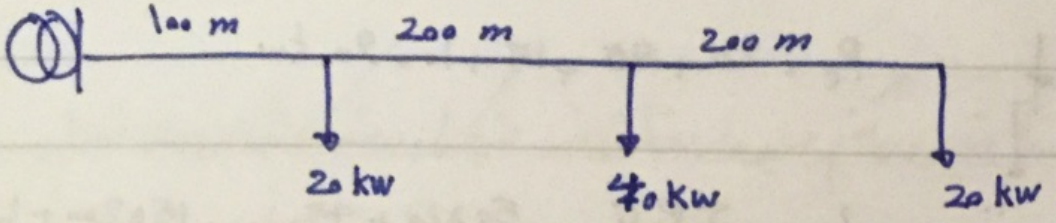
$$L_I = \frac{u^2}{1m\left(\frac{1}{\sigma A} + X_D \operatorname{tg}\varphi\right) P_e} = \frac{l_e}{\text{در صد افت ولتاژ مجاز } \Delta u'/_{\circ}}$$

$$1 = \frac{1m}{u^2}\left(\frac{1}{\sigma A} + X_D \operatorname{tg}\varphi\right) P_e l_e \Rightarrow A = \frac{100 L_I P_e}{\sigma\left(u^2 - 100 \operatorname{tg}\varphi X_D P_e L_I\right)}$$

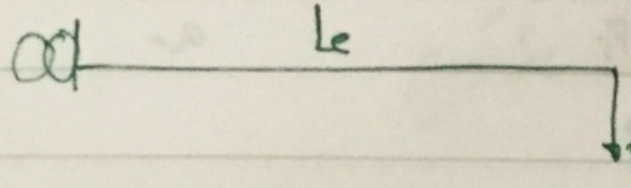
(m, W, σ, V, km)

سطح مقطع: از نوع سیم و درصد افت ولتاژ

$\frac{\Omega \cdot m}{\Omega \cdot mm^2}$



مثال 1: برای شبکه شعاعی زیر سطح مقطع کابل مس را بدست آورید



$P_e = \sum P_i = 20 + 40 + 20 = 80$ kw

$l_e = \frac{\sum P_i l_i}{\sum P_i} = \frac{20\times100 + 40\times300 + 20\times500}{80} = 300$ m

$l_I = \frac{l_e}{3} = \frac{300}{3} = 100$ m

$A_{cu} = \frac{100\, l_I P_e}{\sigma (u^2 - 100 \operatorname{tg}\varphi P_e x_D l_I)} = \frac{100\times100\times80\times10^3}{55\,(380^2 - 1\times\operatorname{tg}\varphi\times80\times10^3\times0.12)\times0.1}$

$A_{cu} = 148.5\ mm^2 \xrightarrow{\text{جدول}} A_{cu} = 150\ mm^2$

$A_{Al} = 233\ mm^2 \xrightarrow[\text{بالاتر از این رقم}]{\text{جدول}} A_{Al} = 240\ mm^2$

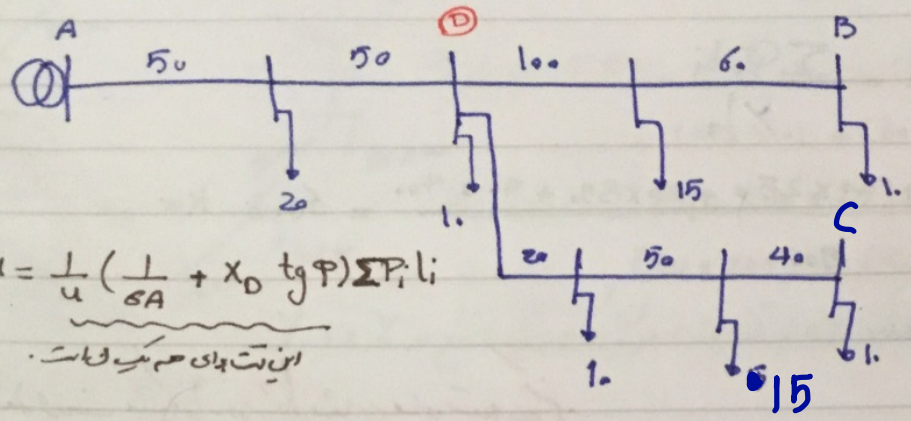
و بنا بر ۳ درصد حساب کنید اگر از کابل آلومینیوم استفاده گردد سطح مقطع

حقیقت است. $x_D = 0.12\ \Omega/km$ ، 0.9 ← $\cos\varphi$

شبکه شعاعی زیر:

مثال ۲: دو شبکه زیر مقاطع کابل مس را برای افت ولتاژ ۴٪ تعیین کنید.

$X_p = 0.084\ \Omega/km$, $\cos\varphi = 0.9$



ابتدا افت ولتاژ در دو سیم AB و AC را حساب می‌کنیم.

و هر کدام بیشتر بود را به عنوان شاخه اصلی و در نظر می‌گیریم. (D)

جای آن قسمت دیگر بار مجموع آنرا در نظر می‌گیریم تا به یک شبکه شعاعی ساده تبدیل شود.

$$\Delta U = \frac{1}{U}\left(\frac{1}{\sigma A} + X_p \tan\varphi\right)\sum P_i l_i$$

این قسمت برای هر سه فاز است.

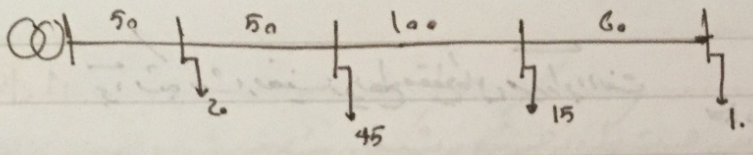
$\sum P_i L_i$

$$M_{AB} = 20\times 50 + (10+10+15+10)\times 100 + 15\times 200 + 10\times 260 = 11100\ kw.m$$

$\sum P_i L_i$

$$M_{AC} = 20\times 50 + (10+15+10)\times 100 + 10\times 120 + 15\times 170 + 10\times 210 = 10350\ kw.m$$

$$M_{AB} > M_{AC} \Rightarrow \Delta U_{AB} > \Delta U_{AC}$$



$$P_e = 20 + 45 + 15 + 10 = 90\ kw$$

$$l_e = \frac{\sum P_i l_i}{\sum P_i} = \frac{50\times 20 + 45\times 100 + 15\times 200 + 10\times 260}{90}$$

$$l_e = 123\ m$$

$$l_{eAC} = \frac{10350}{90} = 115\ m$$

از طرفی نیز می‌توانیم لنگری طول معادل (l_e) بفهمیم که

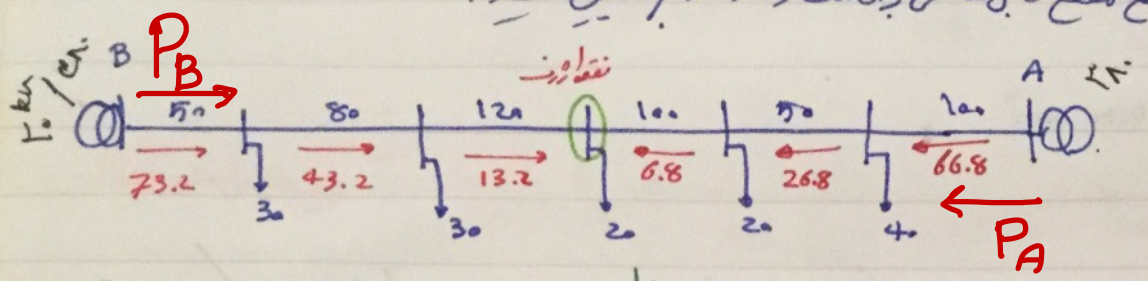
$$l_{eAB} > l_{eAC} \Rightarrow \Delta U_{AB} > \Delta U_{AC}$$

و نتایج دو کدام سیم تر باشیتر است که هر چه طول آن بیشتر شود افت ولتاژ نیز بیشتر خواهد شد.

$$l_I = \frac{l_e}{4} = \frac{123}{4} = 31\ m$$

$$A = \frac{100\times 31\times 90\times 10^3}{55\,(380^2 - 100\times 0.48\times 90\times 10^3\times 0.84\times 0.31)} = 38\ mm^2 \rightarrow A = 50\ mm^2$$

مثال ۳: (شبکه حلقوی): شبکه حلقوی زیر سطح مقطع کابل‌های آن را برای افت ولتاژ 3٪ تعیین کنید.



$\cos\varphi = 0.9$

$X_D = 0.08\ \Omega/km$

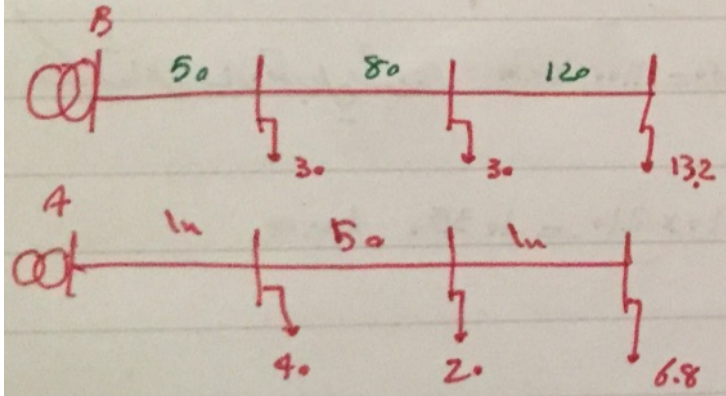
$$P_A = \frac{M_B}{R} = \frac{\sum P_i R_i}{R} = \frac{\sum P_i \frac{L_i}{SA}}{\frac{L}{SA}} = \frac{\sum P_i L_i}{L}$$

$$Q_A = \frac{N_B}{X} = \frac{\sum Q_i X_i}{X} = \frac{\sum Q_i X_0 L_i}{L X_0} = \frac{\sum Q_i L_i}{L}$$

$$P_A = \frac{\sum P_i L_i}{L} = \frac{30\times50 + 30\times130 + 20\times250 + 20\times350 + 40\times400}{500} = 66.8\ kw$$

$$P_B = \sum P_i - P_A = 140 - 66.8 = 73.2\ kw$$

از نقطه اوت شبکه را به دو شبکه شعاعی ساده تبدیل می‌کنیم.



$$L_{eA} = \frac{40\times100 + 20\times150 + 6.8\times250}{66.8} = 130.24$$

$$L_{eB} = \frac{30\times50 + 30\times130 + 13.2\times250}{73.2} = 118.85$$

$$L_{IB} = \frac{L_{eB}}{3} = \frac{118.85}{3} = 39.62$$

$$L_{IA} = \frac{130.24}{3} = 43.41$$

$$A_A = \frac{100\times43.41\times44.8\times10^{-3}}{55\left(38.2^2 - 100\times\tan(\cos^{-1}0.9)\times0.08\times44.8\right)} = 49.9$$

جدول $\Rightarrow A = 50\ mm^2$

$$A_B = \frac{100\times39.42\times73.2\times10^{-3}}{55\left(38.2^2 - 100\times\tan(\cos^{-1}0.9)\times0.08\times73.2\times39.42\right)} = 44.5$$

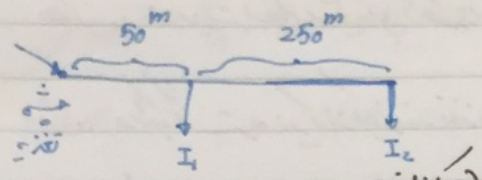
محاسبات شبکه‌های ساده فشار ضعیف:

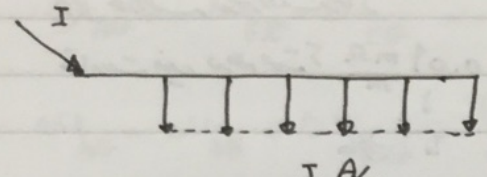
مدل خط: مقاومت واحد طول r Ω/km — R

انواع بار در شبکه‌های توزیع:

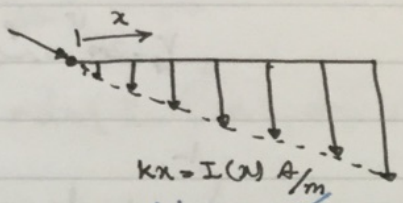
۱- بار متمرکز:

۲- بار گسترده:
- ۱- یکنواخت
- ۲- خطی
- ۳- غیرخطی

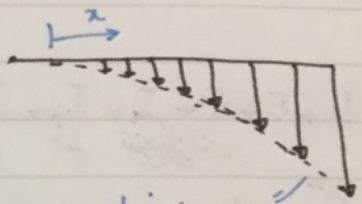




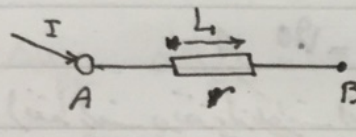
بار گسترده یکنواخت



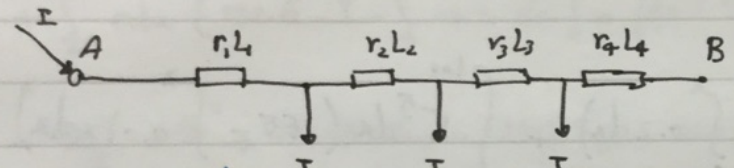
بار گسترده خطی



بار گسترده غیرخطی

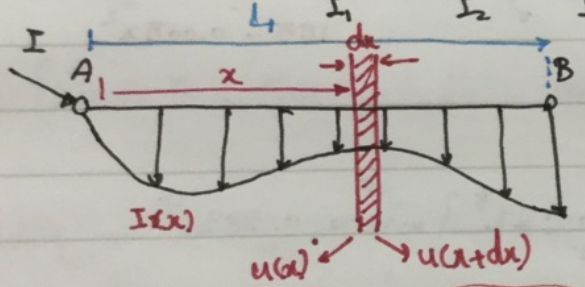


$$\Delta U_{AB} = r L_1 I = RI$$



$$\Delta U_{AB} = r_1 L_1 I + r_2 L_2 (I - I_1) + r_3 L_3 (I - I_1 - I_2)$$

$$r_4 L_4 (I - I_1 - I_2 - I_3)$$



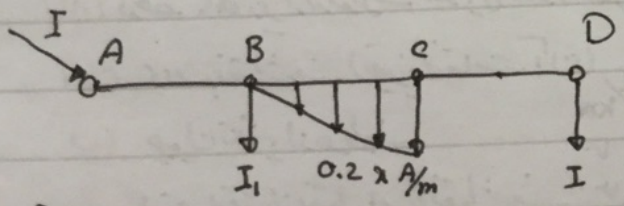
$$\Delta U = \Delta u(x) - \Delta u(x+dx)$$

$$\Delta U = r\,dx\left(I - \int_0^x i(x)\,dx\right)$$

$$\Delta U_{AB} = \int_{x=0}^{x=L_1} \Delta U = \int_0^{L_1 = x_B} r\,dx\left(I - \int_0^x i(x)\,dx\right)$$

انواع تغذیه در شبکه‌های گسترده:

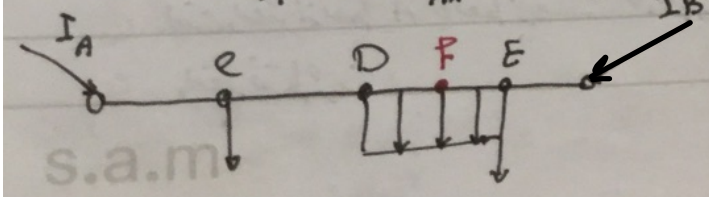
۱- تغذیه از یک طرف:



۲- تغذیه از دو طرف:

اگر نقطه F نقطه افت باشد I_A بر نقطه E تأثیری ندارد.

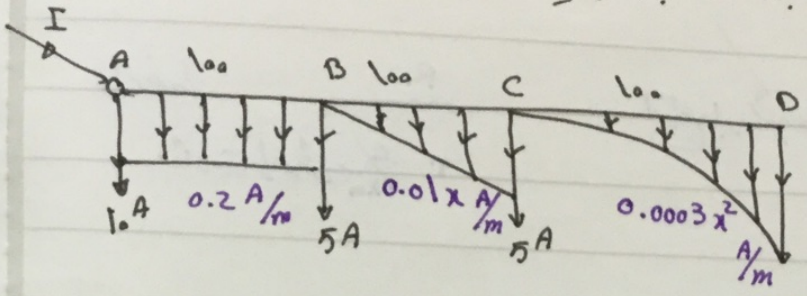
جریان از I_B تغذیه می‌شود.



s.a.m

هدف: محاسبات سطح مقطع کابل؛ طوری که افت ولتاژ از حد مجاز 3٪ تا 5٪ بیشتر نشود.

مثال: دو شبکه گسترده زیر که از کابل‌های تغذیه برق شود مطلوب است:



الف) جریان وارد شده به نقطه A

ب) محاسبه ولتاژ نقطه اول و فاصله آن از نقطه A

ج) حداکثر درصد افت ولتاژ

مقاومت فیدر در هر متر $0.01 \frac{m\Omega}{m}$ برابر $10^{-5}\ \Omega/m$، $V_A = 200^{V}$

$$I = 10 + 5 + 5 + I_1 + I_2 + I_3$$

(همواری ضربی توزیع یکنواخت)

$$I_1 = \int_0^{100} 0.2\,dx = 0.2(100) = 20\ A \qquad I_2 = \int_0^{100} 0.01x\,dx = 0.005x^2 = 50\ A$$

$$I_3 = \int_0^{100} 0.0003x^2\,dx = 0.0001x^3 = 100\ A \Rightarrow I = 20 + 20 + 50 + 100 = 190\ A$$

(نقطه اول در تغذیه از کابل‌ها انتهایی‌ترین نقطه از سمت منبع است یعنی D)

$$\Delta U_{AD} = U_A - U_D \Rightarrow U_D = U_A - \Delta U_{AD}$$

$$\Delta U_{AD} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} = \int_0^{100} 10^{-5}\,dx \left(180 - \int_0^x 0.2\,dx\right) + \int_0^{100} 10^{-5}\,dx \left(155 - \int_0^x 0.01x\,dx\right)$$

$180 - 0.2x$ ، $155 - 0.005x^2$

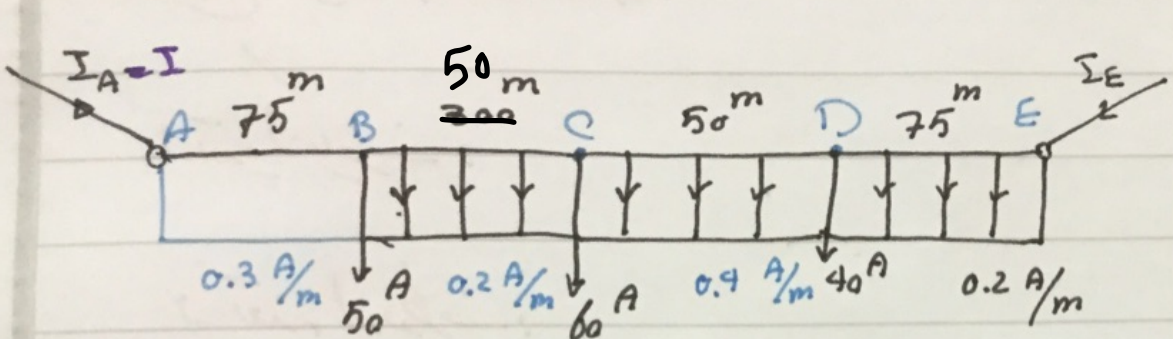
$$+ \int_0^{100} 10^{-5}\,dx \left(100 - \int_0^x 0.0003x^2\,dx\right)$$

$100 - 0.0001x^3$

$$\Delta U_{AD} = \left\{ 18000 - 1000 + 15500 - \frac{0.005}{3} \times 10^6 + 10000 - \frac{0.0001}{4} \times 10^8 \right\} \times 10^{-5} = 0.383^{V}$$

$$U_D = 200 - 0.383 = 199.617 \Rightarrow \%\Delta U_{AD} = \frac{\Delta U_{AD}}{U_A} = 100 \times \frac{0.383}{200} = 0.19 \simeq 0.2\%$$

مثال: دو خط dc زیر که از دو طرف تغذیه می‌شود مطلوبست:



الف) محاسبه نقطه اثر ف (تعیین مختصات آن)

ب) جریان تغذیه از دو طرف $\begin{cases} r = 1.5\ \Omega/km \\ V_A = 380\ V \\ V_E = 380\ V \end{cases}$

ج) افت ولتاژ از نقطه A تا نقطه اثر ف

د) ولتاژ نقطه اثر ف

$\Delta U_{AE} = 0 \Rightarrow \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CD} + \Delta U_{DE} = 0$ نقطه اثر ف نقطه‌ای است که در آن جریان I_A از طرف A وارد شده و با اثر بقیه بارها برابر است.

ولتاژ کل را بدست آوریم.

$$r\left[\int_0^{75} dx\left(I_A - \int_0^x 0.3\,dx\right) + \int_0^{50} dx\left(I_A - 72.5 - \int_0^x 0.2\,dx\right) + \int_0^{50} dx\left(I_A - 142.5 - \int_0^x 0.9\,dx\right)\right.$$

$$\left. + \int_0^{75}\left(I_A - 202.5 - \int_0^x 0.2\,dx\right)dx = 0\right] \Rightarrow \left[75 I_A - 0.15 \times 75^2 + 50 I_A - 72.5 \times 50 - 0.1 \times 50^2\right.$$

$$\left. + 50 I_A - 142.5 \times 50 \times 0.2 \times 50^2 + 75 I_A - 202.5 \times 75 - 0.1 \times 75^2\right] = 0$$

$$250 I_A = 27843.75 \Rightarrow I_A = 111.375\ A \Rightarrow I_{total} = I_A + I_E \Rightarrow I_E = 116.125\ A$$

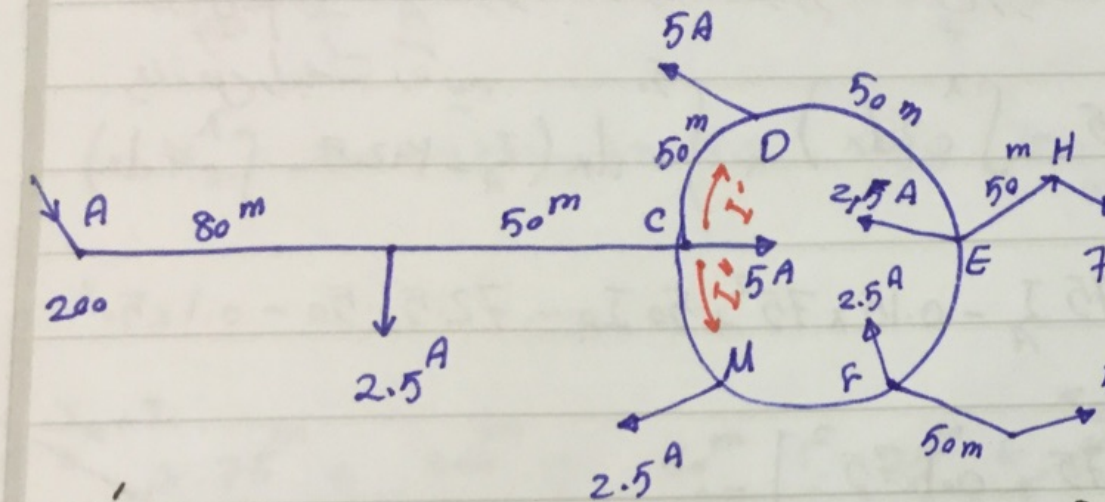
نقطه C نقطه اثر ف است.

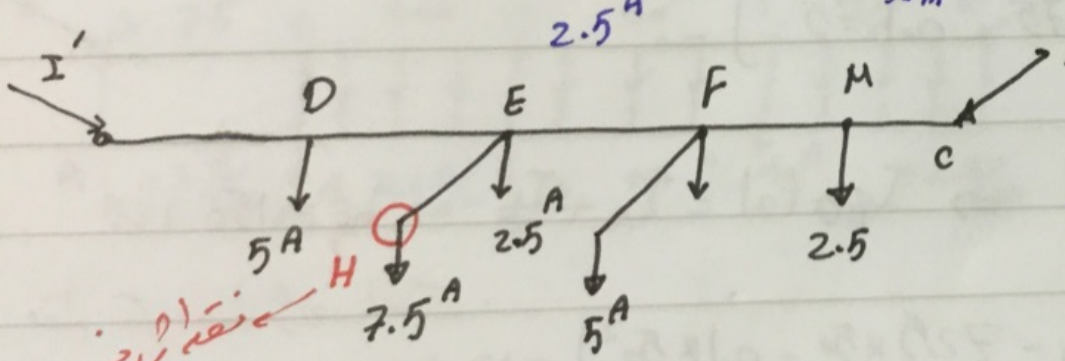
$$\Delta U_{AG} = \Delta U_{AC} = r \times (75 I_A - 0.65 \times 75^2 + 50 I_A - 725 \times 50 - 0.1 \times 50^2) = 13.8\ V$$

$r = 1.5 \times 10^{-3}$

$$\Delta U_{AG} = U_A - U_G = 13.8 \Rightarrow U_G = U_A - 13.8 = 366.2\ V$$

مثال: در شبکه DC زیر مختصات نقطه گره را بدست آورید.





$$\Delta U_{cc} = 0 \Rightarrow \Delta U_{cc} = \Delta U_{CD} + \Delta U_{DE} + \Delta U_{EF} + \Delta U_{FM} + \Delta U_{MC} = 0$$

$$0 = 50rI' + 50r(I'-5) + 50r(I'-15) + 50r(I'-22.5) + 50r(I'-25)$$

$$0 = I' + I'-5 + I'-15 + I'-22.5 + I'-25$$

(۸۹) $$I' = \frac{67.5}{5} = 13.5 \ A$$

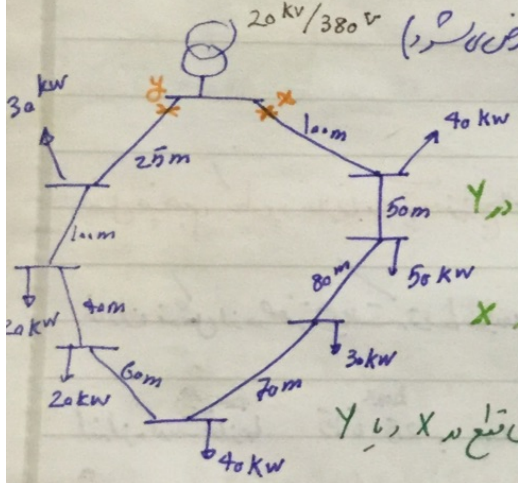
s.a.m

قطع بهینه شبکه های حلقوی:

در انجام محاسبات مربوط به افت ولتاژ شبکه های حلقوی باید این واقعیت را در نظر گرفت و ترتیبی اتخاذ نمود تا بهداشت قطع خط در کمترین حالت ممکن با تامین انرژی مصرف کنندگان همراه باشد. هیچ یک از کابل ها از حد مجاز تجاوز نکرده، افت ولتاژ هم در حد مطلوب باقی بماند. البته چون قطع خط به قدرت پیش بینی شده و طول آن بستگی دارد، مقدار افت ولتاژ هر یک از کابل ها نیز در حالت کارهای مختلف مورد نظر گرفته شود. معمولا افت ولتاژ حدود ۲ برابر حالت عادی در شرایط اضطراری قابل قبول است.

مثال: در شبکه زیر از کابل سه رشته مسی با قطع $150\ mm^2$ که در زمین دفن شده است استفاده بعمل آمده است. با تعیین بهترین محل از نظر قطع مشخص نمائید که آیا در حالت قطع کابل های شبکه تحمل عبور جریان بار را دارند و افت ولتاژ شبکه در این حالت چه مقدار می شود؟ (حداکثر مجاز ۸٪)

برجستگی و قدرتها بر حسب کیلووات روی شکل مشخص شده و ضریب قدرت شبکه 0.9 فرض می شود)



بهترین حالت قطع در یکی از نقاط X و یا Y می باشد با این فرض که بار در نقاط تغذیه برابر است با:

هر یک از دو حالت را داریم:

قطع در Y $\Sigma PI_1 = (40\times100)+(50\times150)+(30\times230)+(40\times300)+(20\times360)+(20\times400)+(30\times500) = 60600\ kw-m$

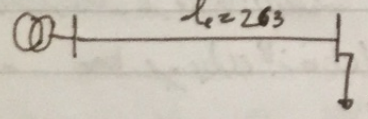
قطع در X $\Sigma PI_1 = (30\times25)+(20\times125)+(20\times165)+(40\times225)+(30\times295)+(50\times375)+(40\times425) = 6150\ km-m$

لذا قطع در Y بیشترین افت ولتاژ را ایجاد می کند. با در نظر گرفتن از تلفات، جریان کابل برای قطع در X و یا Y برابر است با:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,u\cos\varphi} = \frac{230\times10^3}{\sqrt{3}*380*0.9} = 388\ A$$

از روی جدول، جریان مجاز برای $150\ mm^2$ است تحمل در حد مجاز اضافه بار برای مدت کوتاه، در شرایط اضطراری مورد نظر است.

در صورت قطع در Y: $l_e = \frac{\Sigma Pl}{\Sigma P} = \frac{60600}{230} = 263\ m$



درصد افت ولتاژ $\%\Delta u = \frac{PR+QX}{u^2}\times100$ جدول $\rightarrow$ $R=0.15\ \Omega/km$, $X=0.076\ \Omega/km$

$$\Delta u = \frac{1}{u}\left(\frac{1}{6A}+X_D\,tg\varphi\right)P_e l_e = \frac{1}{380}\left(\frac{1}{55*150}+0.076\times tg\varphi\times10^{-3}\right)230\times10^3\times263 = 25.15$$

$$\%\Delta u = 6.62$$

$$\begin{cases} R = 0.15 * 263 \times 10^{-3} = 0.0395 \ \Omega \\ X = 0.076 * 263 \times 10^{-3} = 0.02 \ \Omega \end{cases}$$

$$Q = P \, tg\varphi = 230 \times 10^{-3} \times tg \cos^{-1} 0.9 = 111.394 \ KVAR$$

این روش صحیح تر است.

$$\%\Delta U = \frac{230 \times 10^{+3} * 0.0395 + 111.394 \times 10^{3} * 0.02}{(380)^2} * 100 = \%7.8$$

که است بیانگر درصد اضافه ای تلفات نسبت قابل قبول است

فصل پنجم : کاربرد خازن در سیستم های توزیع انرژی الکتریکی

خازن متشکل از دو صفحه فلزی است که توسط مواد عایق یا دی الکتریک از هم جدا شده اند.

$$kvar = \frac{E^2}{X_c} = \frac{E^2 2\pi f c}{1m}$$

اندازه قدرت خازنها 15 تا 25 kvar و 200 تا 300 kvar افزایش یافته است.

تولرانس ساخت خازن از صفر تا 15 درصد تغییر کند. به عنوان مثال خازن با قدرت 50 kvar کمتر از 50 kvar و بیشتر از 57.5 kvar نیست.

برای کلید برای قطع و وصل خازن حداقل 135 درصد جریان نامی خازن باشد.

حداکثر ولتاژ کار مجاز خازنهای قدرت 110 درصد ولتاژ نامی آنهاست. به دلیل افت ولتاژ در شبکه از خازن با قدرت بیشتر نسبت به آنچه که نیاز است استفاده نکنید.

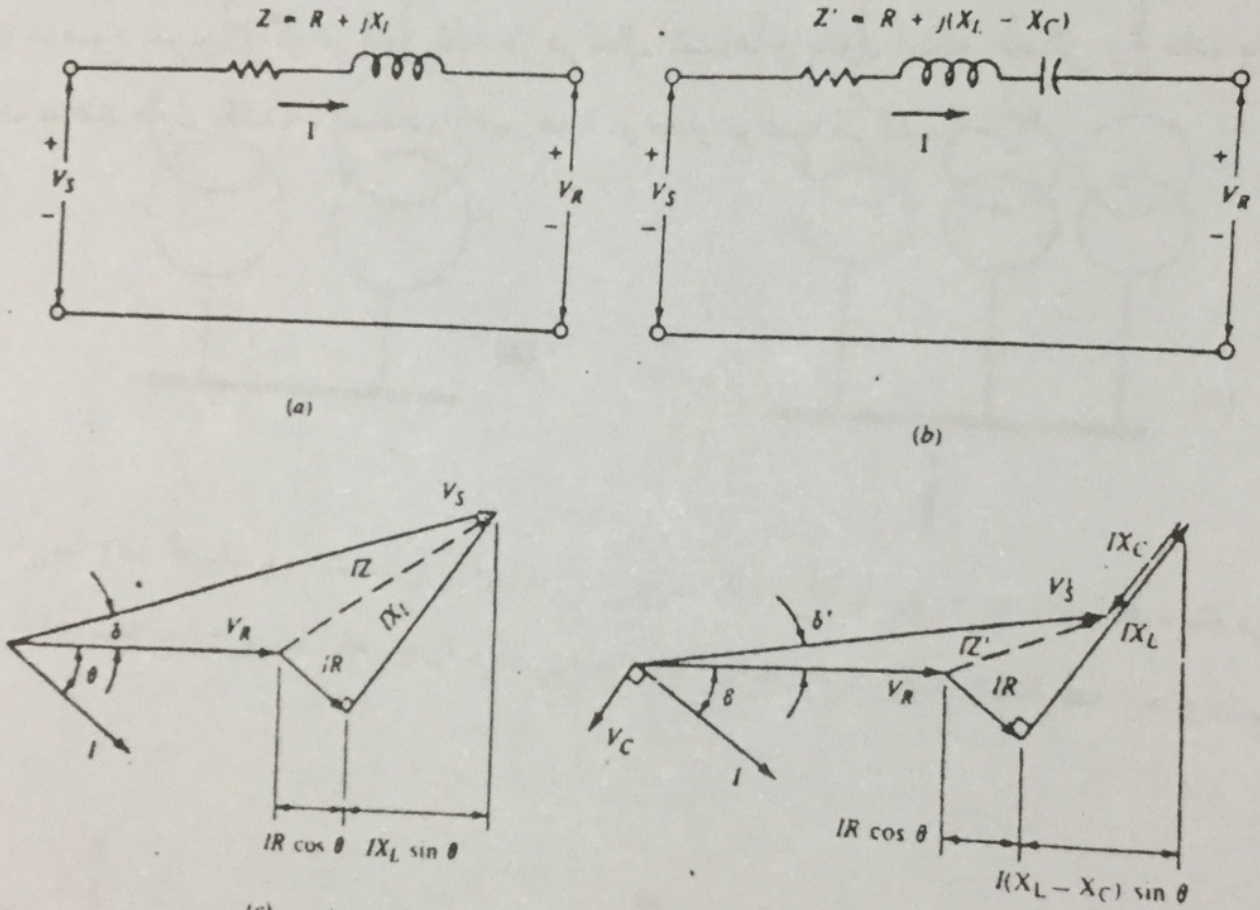
حداکثر جریان مجاز خازن برای بهره برداری 135 درصد جریان نامی است.

کاربرد خازن:
1. تنظیم ولتاژ
2. کنترل توان راکتیو

(به صورت سری و موازی)

۱۱ - ۲ خازن‌های سری :

خازن‌های سری که موجب کاهش امپدانس معادل خطوط انتقال و یا توزیع می‌شوند، بدلایل فنی متعدد مانند ایجاد فرو رزنانس در ترانسفورماتورها، رزنانس زیر سنکرون به هنگام راه‌اندازی موتورها و افزایش جریان خطا، کاربرد بسیار محدودی در شبکه‌های توزیع دارند. همانگونه که در شکل ۱۱-۱ نشان داده شده است خازن سری راکتانس سلفی خط را جبران می‌کند. در نتیجه اثر اصلی یک خازن سری کاهش و یا حتی حذف افت ولتاژ ناشی از راکتانس سلفی خط می‌باشد. علاوه بر این خازن سری را می‌توان بعنوان یک تنظیم کننده ولتاژ که متناسب با اندازه و ضریب قدرت جریان عمل می‌کند، در نظر گرفت.



یک خازن سری در مقایسه با خازن موازی در ضریب قدرت‌های پائین اثر جبران‌سازی بیشتری در رابطه با افت ولتاژ دارد ولی در تصحیح ضریب قدرت سیستم بسیار محدودتر از خازن موازی عمل می‌کند. با توجه به شکل‌های ۱۱-۱-a و ۱۱-۱-c افت ولتاژ در یک فیدر را می‌توان تقریباً با رابطه زیر بیان کرد:

$$\Delta V = IR\cos\theta + IX_L \sin\theta \qquad (۱)$$

در این رابطه R مقاومت و X_L راکتانس سلفی فیدر است و θ زاویه بین ولتاژ و جریان بار میباشد. با نصب یک خازن سری با توجه به شکل‌های ۱۱-۱-b و ۱۱-۱-d افت ولتاژ فیدر عبارت خواهد بود از :

$$\Delta V = IR\cos\theta + I(X_L - X_C)\sin\theta \qquad (۲)$$

در این رابطه X_C راکتانس خازنی مربوط به خازن سری می‌باشد. گرچه معمولاً اندازه خازن سری برای یک فیدر توزیع بنحوی انتخاب میشود که راکتانس آن کوچکتر از راکتانس سلفی باشد ولی در برخی موارد بویژه برای حالتی که مقاومت فیدر در مقایسه با راکتانس سلفی آن قابل توجه است، ممکن است عکس این وضعیت در نظر گرفته شود. در این صورت :

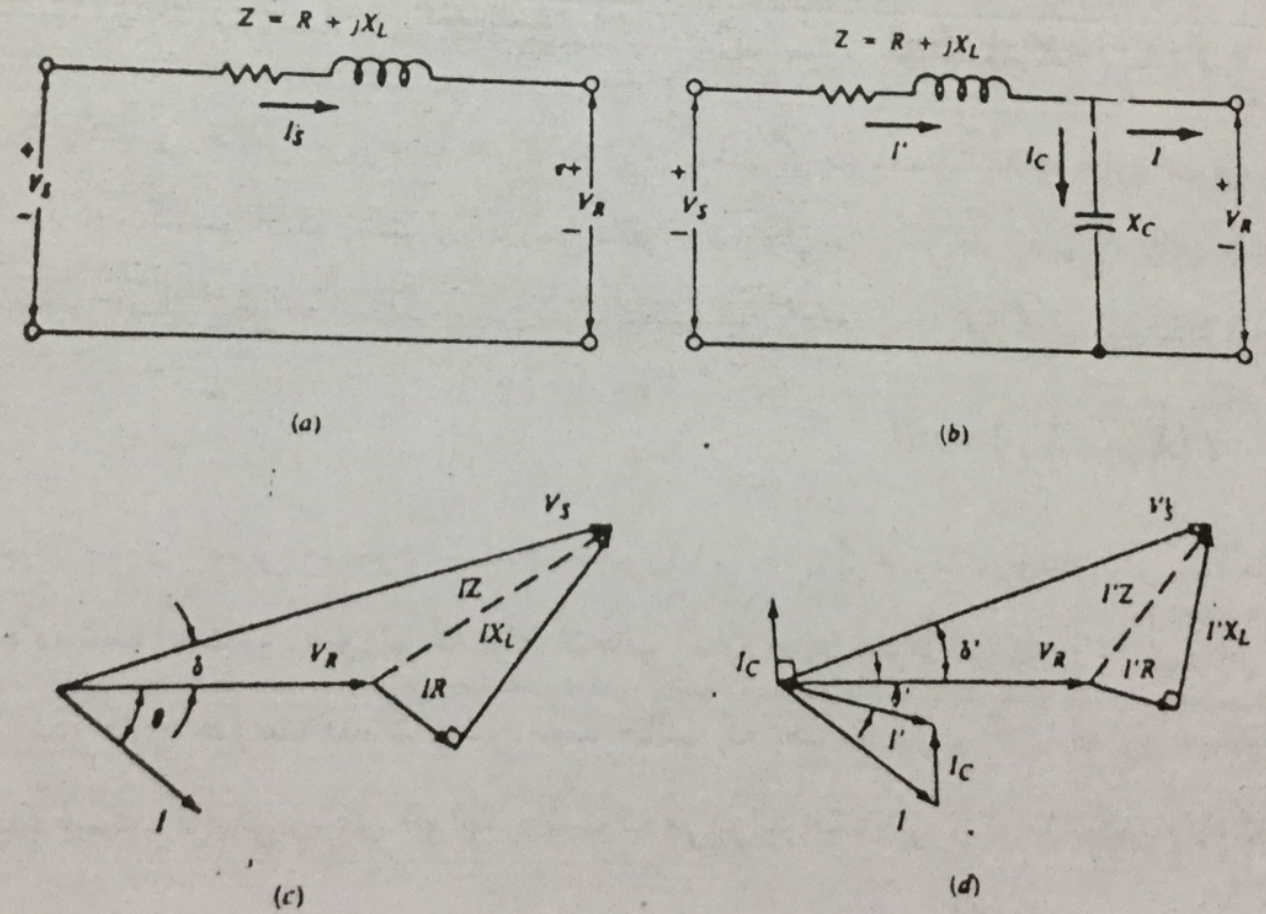
$$\Delta V = IR\cos\theta - I(X_C - X_L)\sin\theta \qquad (۳)$$

این شرایط به جبران سازی اضافی موسوم است. در شکل ۱۱-۲-a دیاگرام برداری ولتاژ برای شرایط جبران سازی اضافی و برای بار عادی نشان داده شده است. در صورتی که برای انتخاب اندازه خازن صرفاً شرایط بار عادی را در نظر بگیریم، ولتاژ بار در صورت عبور جریان پس فاز با ضریب قدرت پائین مانند حالتی که یک موتور بزرگ راه‌اندازی میشود، همانطور که در شکل ۱۱-۲-b نشان داده شده است، افزایش زیادی خواهد داشت که می‌تواند خساراتی را به مشترکین وارد کند.

VR VR

۱۱ ـ ۳ خازن‌های موازی:

خازن‌های موازی، که به موازات مصرف کنندگان نصب می‌شوند، در سیستمهای توزیع کاربرد گسترده‌ای دارند. این خازن‌ها تأمین مولفه راکتیو جریان مورد نیاز مصرف کنندگان در واقع مشخصات مصرف کنندگان راکتیو را اصلاح می‌کنند. همانگونه که در شکل ۱۱ـ۳ نشان داده شده است نصب یک خازن به انتهای یک فیدر توزیع، اندازه جریان منبع راکاهش می‌دهد، ضریب قدرت را اصلاح می‌کند و در نتیجه افت ولتاژ فیدر راکاهش می‌دهد. در عین حال، خازنهای موازی در جریان و یا ضریب قدرت یک فیدر در نقاطی که بعد از محل نصب خازن قرار دارند، تأثیری ندارند.



شکل ۱۱ـ۳ دیاگرام برداری ولتاژ در یک فیدر با بار پس فاز ، با و بدون خازن موازی

خازن‌های موازی:

۱- کاربرد خازن‌های موازی

۱- تنظیم ولتاژ:

۲- کنترل توان راکتیو

۱- کاهش تلفات توان (RI^2) ← بخاطر کاهش اندازه جریان

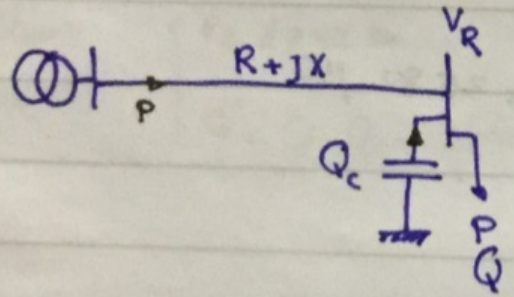
۲- " " راکتیو XI^2 ← " " " " "

۳- اصلاح ضریب قدرت

۴- آزادسازی ظرفیت شبکه ← کاهش بارهای روی ژنراتور منبع (kva) و روی خود خازن مربوطه و در نتیجه آزادسازی ظرفیت

۵- کاهش پیک ← " " " " " " kw بیشتری توسط ژنراتور تغذیه می‌شود

۶- بالا بردن قدرت تغذیه منبع، سرباری برای تأسیس واحدهای خطوط جدید، تعدیل نیافته.



در صورت عدم نصب خازن $\Delta U_1 = \frac{PR+QX}{U}$

در صورت نصب خازن $\Delta U_2 = \frac{PR+X(Q-Q_c)}{U}$

$P = V_R^2$

$Q_1 = \frac{V^2}{X_c}$

افزایش ولتاژ $= \Delta U_1 - \Delta U_2 = \frac{PR+QX}{U} - \frac{PR+X(Q-Q_c)}{U} = \frac{XQ_c}{U}$

اصلاح ضریب قدرت به کمک خازن موازی

نوع مصرف کننده	ضریب قدرت
صنایع نساجی	۰/۷۵ - ۰/۶۵
صنایع شیمیائی	۰/۸۵ - ۰/۷۵
کوره‌های الکتریکی	۰/۹ - ۰/۷
چاپخانه‌ها	۰/۷ - ۰/۵۵
کارخانه‌های فولاد	۰/۸۵ - ۰/۶
معادن ذغال سنگ	۰/۸ - ۰/۶۵
سردخانه‌ها	۰/۸ - ۰/۷

نوع مصرف کننده	ضریب قدرت
یخچال	۰/۶۱ - ۰/۵
فریزر	۰/۸۵ - ۰/۶۱
ماشین لباسشوئی	۰/۶
ماشین ظرفشویی	۰/۶
پمپ چاه نیمه عمیق	۰/۶۹ - ۰/۶۵
پمپ گردش آب گرم	۰/۶۲
معادن سنگ	۰/۷ - ۰/۵

برای شبکه برق ایران ضریب قدرت مناسب حدود ۰.۹۵ در نظر گرفته شده است.

مثال: یک موتور سنکرون با قدرت 500 hp با ولتاژ 4160 و فرکانس 60 Hz با اتصال ستاره دارای بازده 88٪ و ضریب توان 0.75 پس فاز یک

فید متصل است اگر لازم باشد ضریب توان را به 0.9 پس فاز اصلاح کنیم مقدار بانک خازنی مورد نیاز چقدر است؟

$\eta = 88\%$

$500\,hp = 500 \times 746 = 373\ kw$ ← توان مکانیکی خروجی

$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \Rightarrow P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{500 \times 746}{0.88} = 424\ KW$

ب) ظرفیت خازنی هر واحد اگر خازن‌ها به صورت مثلث هم متصل شده باشند.

ج) ظرفیت خازنی هر واحد اگر خازن‌ها به صورت ستاره هم متصل شده باشند.

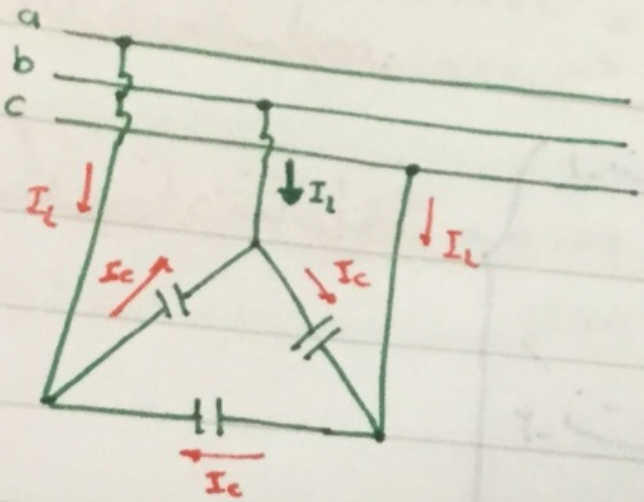
$Q_{in} = P_{in}\, tg\, \varphi = 424 \times tg(\cos^{-1} 0.75) = 374\ kw$

خازن نصب کنیم
$$\begin{cases} P_{in} = 424\ KW \\ Q'_{in} = P_{in}\, tg \cos^{-1} 0.9 = 205\ KVAR \end{cases}$$

متدار خازن $= Q_{in} - Q'_{in} = 374 - 205 = 169\ KVAR$

یا

متدار خازن مورد نیاز: $Q = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$



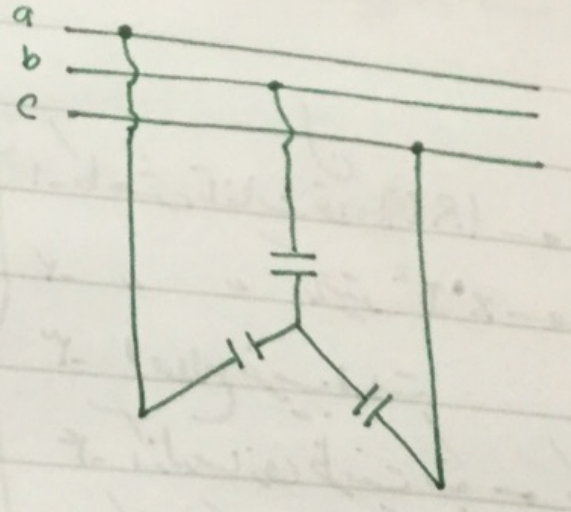
$$I_L = \frac{Q}{\sqrt{3} \times V_{L-L}} = \frac{168.5}{\sqrt{3} \times 4.16} = 23.41\ A$$

$$I_c = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{23.41}{\sqrt{3}} = 13.53\ A$$

$$X_C = \frac{V_{L-L}}{I_c} = \frac{416.}{13.53} = 307.38$$

$$C = \frac{1.^6}{wX_c} = \frac{1^6}{2\pi \times 6_6 \times 307.38} = 517.78\ \mu F$$

خازن هو
ولعد



$$I_c = I_L = 23.41\ A$$

$$X_C = \frac{V_{L-N}}{I_c} = \frac{416./\sqrt{3}}{23.41} = 10.2.72\ \Omega$$

$$C = \frac{1.^6}{2\pi \times 2.\times 10.2.72} = 25.82\ \mu F$$

مثال ۲: فرض کنید یک مدکتف خازن با ولتاژ 2.4 کیلوولت بار با قدرت 360 kw را با ضریب توان پس فاز تغذیه کند و جریان بار ۲۰۰ آمپر باشد.

ضریب قدرت را پس از نصب خازن با قدرت 300 kvar به دست آورید؟

$$S_1 = V \times I = 2.4 \times 200 = 480 \text{ kVA}$$

$$\cos\theta_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{360 \text{ kW}}{480 \text{ kW}} = 0.75$$

$$Q_1 = P \tan\varphi_1$$

$$Q_1 = S_1 \times \sin(\cos^{-1} 0.75) = 480 \times 0.661 = 317.5 \text{ kvar}$$

$$Q_2 = Q_1 - Q_c = 317.5 - 300 = 17.5 \text{ kvar}$$

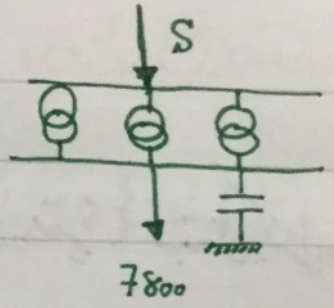
$$\cos\theta_2 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_1 - Q_c)^2}} = \frac{360}{(360^2 + 17.5^2)^{1/2}} = 0.9989$$

مثال ۳: یک پست فشارقوی دارای سه ترانس سه فاز به قدرت 2000 kVA باری به قدرت 7800 kVA را در ضریب قدرت 0.89 تغذیه می‌کند.

هر سه ترانس دارای ظرفیت حرارتی 120 درصد ظرفیت نامی هستند. تراز است خازنی با قدرت 1000 kVA در محل پست مدی نیز نصب گردیده است.

الف) آیا پس از نصب خازن با بترانسفورماتور به مقدار ظرفیت حرارتی کاهش می‌یابد؟

ب) اگر برای دستیابی بار ترانس به ظرفیت حرارتی به خازن اضافی نیاز باشد مقدار آنرا تعیین کنید؟



ظرفیت ترانس = 2000 kVA

ظرفیت حرارتی = 2400 kVA

حداکثر 3 ترانس در شرایط ظرفیت حرارتی $3 \times 2400 = 7200$ kVA می‌توانند تأمین کنند.

چون بار ما از تولید سه ترانس بیشتر است از خازن استفاده می‌کنیم

$$\begin{cases} S = 7800 \\ \cos\varphi = 0.89 \\ Q_c = 1000 \text{ kVA} \end{cases} \qquad P = S\cos\varphi = 7800 \times 0.89 = 6942 \text{ kw}$$

$$Q = 7800 \sin(\cos^{-1} 0.89) = 3556.8 \text{ kVAR}$$

با خازن $\Rightarrow$

$$\begin{cases} P = 6942 \text{ kw} \\ Q' = Q - Q_c = 3556.8 - 1000 = 2556.8 \end{cases}$$

$$\Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q'^2} = 7397.8 \text{ kVA}$$

چون از 7200 بیشتر شد باز از خازن استفاده می‌کنیم.

$$\begin{cases} S = 7200 \text{ kVA} \\ P = 6942 \text{ kw} \\ Q_c = ? \end{cases}$$

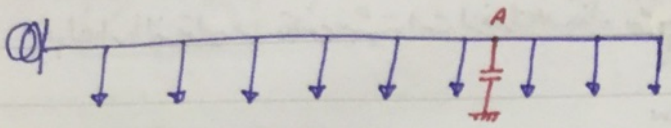
$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{6942}{7200} = 0.9642$$

خازن مورد نیاز $Q = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 6942(tg\cos^{-1}0.89 - tg\cos^{-1}0.9) = 1647 \text{ KVAR}$

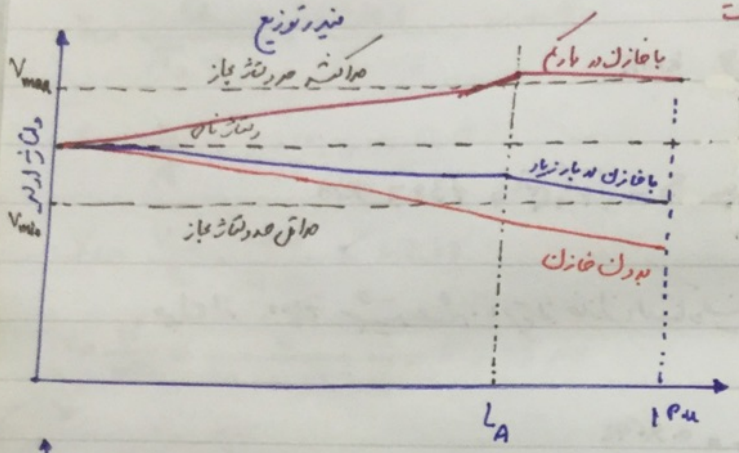
$Q_c = 1647 - 1000 = 647 \text{ KVAR}$ مقدار خازن به علاوه یک 1000^{KVAR} باید نصب گردد.

نصب خازن در شبکه توزیع :

عموماً خازن‌ها در شبکه‌های توزیع شعاعی، بین پست و انتهای فیدر (بالای $\frac{2}{3}$) مصرف‌کننده نصب می‌شوند تا توان راکتیو خطوط را جبران کنند و ضریب توان بار را بهبود بخشند.



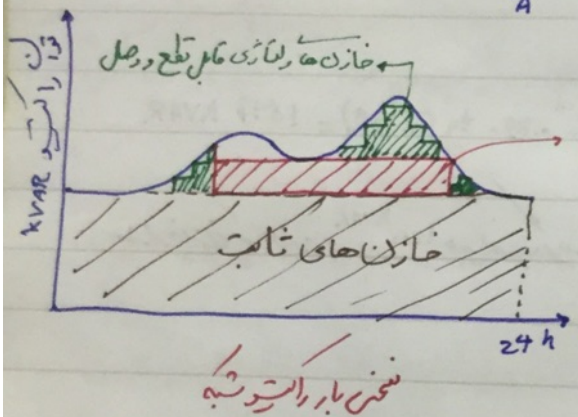
اثر نصب خازن ثابت روی پروفیل ولتاژ یک فیدر با بار گسترده چگونه است



در بار کم و بار زیاد ←

خازن گذاری ثابت باید در حداکثر بار انجام شود تا اضافه ولتاژی در شبکه ایجاد نشود.

خازن
- ۱- ثابت
- ۲- متغیر
  - ۱- با زمان
  - ۲- با ولتاژ } توزیع
  - ۳- با دما ← در پست بار مثلاً در کارخانجات
  - ۴- توان



تغییر بار راکتیو شبکه

تغییر بار با استفاده از محاسبات پخش بار بهبود می‌یابد.

کنترل خازن‌های قابل قطع و وصل (خازن متغیر)
- ۱- دستی
- ۲- اتوماتیک
  - ۱- کلیدهای زمانی ← اندازه‌گیری
  - ۲- ← ولتاژی
  - ۳- ← جریانی
  - ۴- ← ولتاژ - جریان
  - ۵- ولتاژ - زمان
  - ۶- درجه حرارت

از لحاظ افت ولتاژ بهترین نقطه نصب خازن در یک شبکه شعاعی ساده، $\frac{2}{3}$ فاصله است.

توجیه اقتصادی نصب خازن موازی:

توان راکتیو توانه در نیروگاه یا توسط خازن‌ها در محل تولید می‌شود. خازن‌های موازی از ارزان‌ترین منبع تولید توان راکتیو می‌باشند.

مزایای اقتصادی نصب خازن موازی:

۱- کاهش تلفات در خطوط توزیع، (S_1 = کاهش تلفات انرژی) × (قیمت kwh انرژی) شود

۲- آزادسازی ظرفیت شبکه (ظرفیت خطوط توزیع، فوق توزیع، ظرفیت ترانس توزیع و فوق توزیع و انتقال تا ژنراتور) S_2

۳- اصلاح ولتاژ: ۱- کیفیت مطلوب ۲- افزایش فرزش انرژی ($P=V^2/R$) می‌تواند بجای رله‌های کنترل ولتاژ یا ترانس‌های با تپ متغیر استفاده شود. S_3

هزینه خازن‌های موازی (ثابت و متغیر) $F = S_1 + S_2 + S_3 - S_c$ هزینه صرفه‌جویی شده پس از نصب خازن

روش‌های دقیق و جابجایی خازن در شبکه بسیار پیچیده است و نیاز به محاسبات طولانی دارد. یک روش برای جابجایی خازن ثابت در یک فیدر با بار یکنواخت گسترده در $\frac{2}{3}$ طول فیدر از محل منبع است. برای بارهای کاهنده، یکنواخت خازن‌های ثابت را در وسط فیدر قرار می‌دهند. محل خازن‌های قابل قطع و وصل معمولاً بوسیله تنظیم ولتاژ تعیین می‌شود و معمولاً در انتهای فیدر در $\frac{1}{3}$ طول آن از انتهاست.

روش ریاضی برای جابجایی بهینه خازن‌ها:

فرضیات:
۱- بار یکنواخت توزیع شده
۲- شبکه شعاعی ساده است
۳- از تعیین مشخص بودن تعداد و محل خازن
۴- صرفنظر کردن از تلفات هسته در اثر افزایش ولتاژ بوسیله نصب خازن

را بطور تقریبی به اعلب برای نصب خازن روی یک فیدر شعاعی بکار می‌رود:

$$\text{درصد افزایش ولتاژ در اثر نصب خازن} = \frac{(kvar)(d)(X)}{10\,(kv)^2}$$

kvar: کل قدرت خازن که باید نصب شود.
d: فاصله پست تا محل خازن برحسب مایل
X: راکتانس فیدر برحسب اهم در مایل
kv: ولتاژ خط به خط سیستم برحسب KV