

به نام خدا

# کاربرد خازن در شبکه توزیع برق



# مقدمه

- خازن تجهیز می است که به منظور کنترل ولتاژ و توان راکتیو در شبکه مورد استفاده قرار می گیرد.
- خازنها به صورت تکفاز و سه فاز قابل استفاده هستند
- خازنها به دو شکل در شبکه استفاده می شوند
  - سری: به طور مستقیم موجب کاهش راکتانس سلفی مدار می شود
  - موازی: موجب تغییر ضریب قدرت بار می شود.



# نمونه - خازن فشار متوسط

مشخصه	توضیح
ظرفیت	از ۵۰ الی ۶۰۰ کیلووار
ولتاژ نامی	از ۱/۵ الی ۱۳/۸ کیلوولت
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
تحمل اضافه ولتاژ	۱۰٪ ولتاژ نامی
تحمل اضافه جریان	۳۰٪ جریان نامی
محدوده حرارتی	+۵۵ تا -۲۵ - درجه سانتیگراد
تلفات	کمتر از ۰/۲ وات بر کیلووار
استانداردهای مرجع خازنها	IEC 871,1-2 BS 1650 VDE 0560 NEMA cp1

# نمونه - خازن فشار متوسط - نوع کتابی



# نمونه – خازن فشار ضعیف

ردیف	مشخصات (توان)	توضیحات
1	۵ کیلووار	کتابی
2	۷/۵ کیلووار	کتابی
3	۱۰ کیلووار	کتابی
4	۱۲/۵ کیلووار	کتابی
5	۱۵ کیلووار	کتابی
6	۲۰ کیلووار	کتابی
7	۲۵ کیلووار	کتابی
8	۳۰ کیلووار	کتابی
9	۴۰ کیلووار	کتابی
10	۵۰ کیلووار	کتابی
11	۶۰ کیلووار	کتابی
12	۲/۵ کیلووار	سیلندری
13	۵ کیلووار	سیلندری
14	۷/۵ کیلووار	سیلندری
15	۱۰ کیلووار	سیلندری
16	۱۲/۵ کیلووار	سیلندری
17	۱۵ کیلووار	سیلندری
18	۲۰ کیلووار	سیلندری
19	۲۵ کیلووار	سیلندری
20	۳۰ کیلووار	سیلندری
21	۴۰ کیلووار	سیلندری
22	۵۰ کیلووار	سیلندری



# نمونه - خازن فشار ضعیف - سیلندری



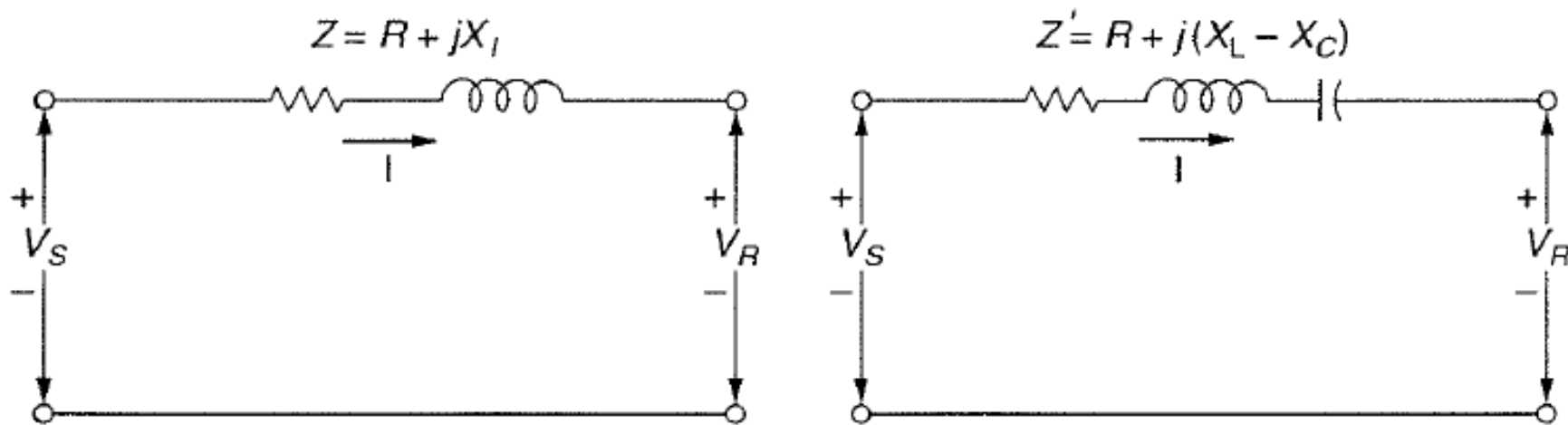


# خازن سری

- خازن سری به ندرت در شبکه توزیع مورد استفاده قرار می گیرد.
- خازن سری موجب کاهش راکتانس خط می شود، لذا موجب کاهش افت ولتاژ ناشی از راکتانس خط می شود.
- خازن سری می تواند به عنوان یک رگولاتور ولتاژ نیز عمل کند.
- خازن سری موجب بهبود اندک ضریب قدرت می شود.

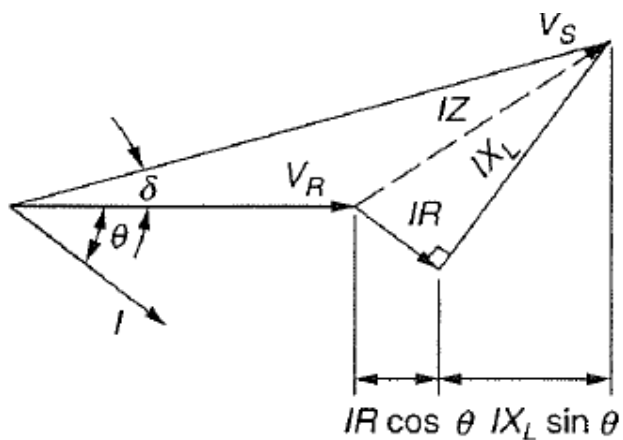


# کاربرد خازن سری

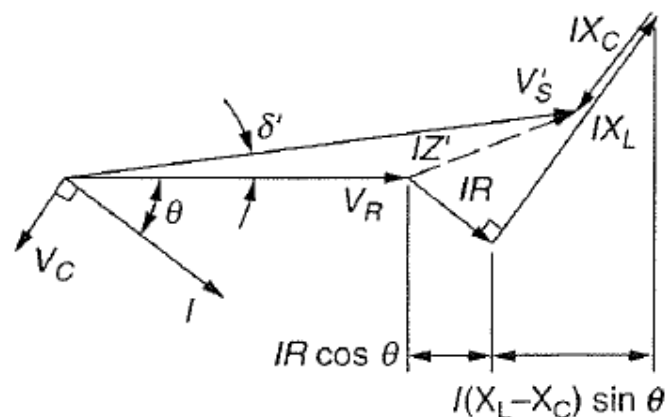


(a)

(b)



$$VD = IR \cos \theta + IX_L \sin \theta$$



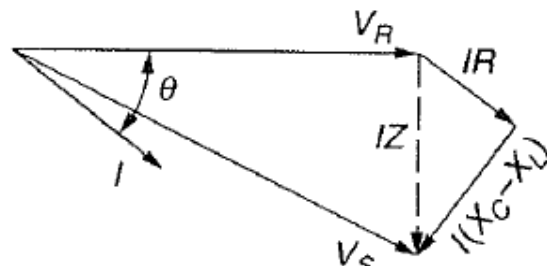
$$VD = IR \cos \theta + I(X_L - X_C) \sin \theta$$



# Over Compensation

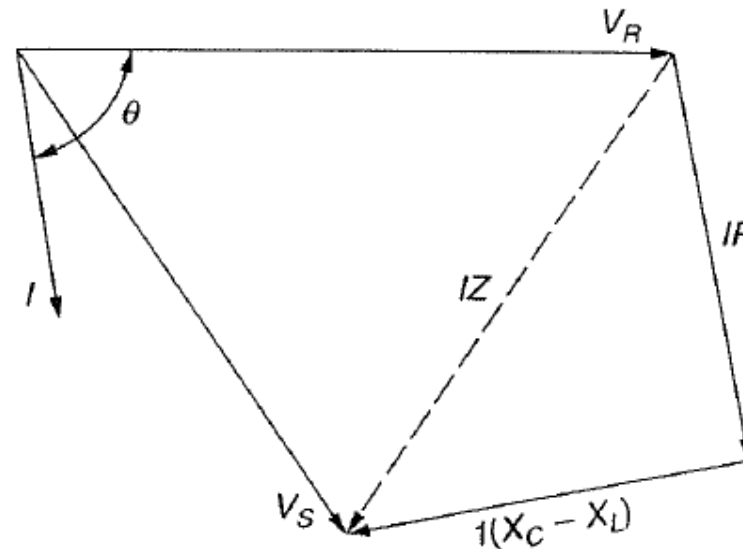
- اندازه خازن سری معمولاً کمتر از راکتانس سلفی خط است.
- در برخی شرایط به دلیل مقاومت بالای خط، اندازه خازن سری بزرگتر از راکتانس سلفی خط است.
- به این حالت Over Compensation گویند.

ولتاژ ابتدای خط در حالت  
OverComp. در بار نرمال



(a)

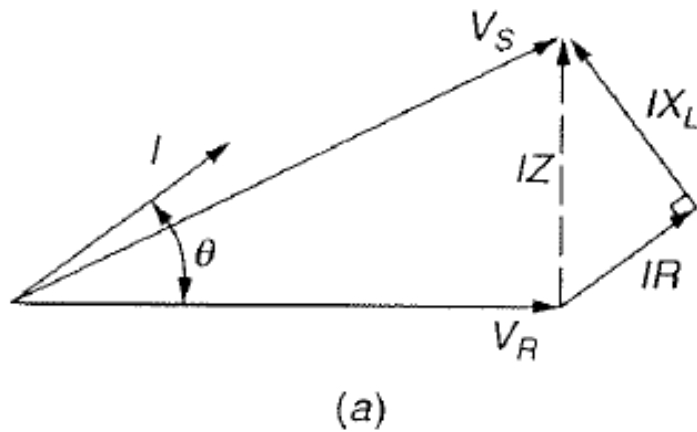
ولتاژ ابتدای خط در حالت  
OverComp. در زمان  
استارت موتور



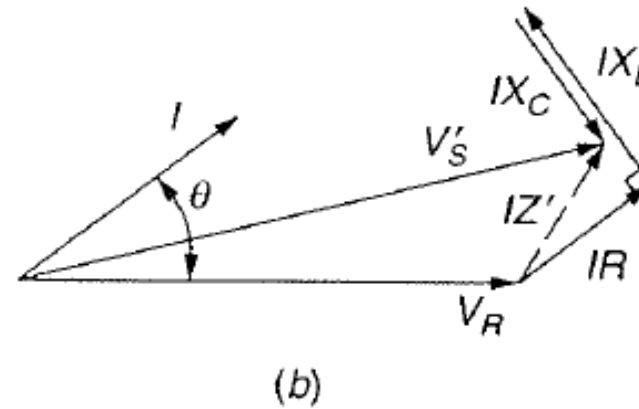
(b)

# بار پیش فاز

- برای کاهش افت ولتاژ توسط خازن سری، باید بار پسفاز باشد، در بار پیشفاز، خازن سری تاثیر چندانی در بهبود ولتاژ ندارد.



ولتاژ ابتدای خط با بار پیشفاز بدون خازن سری



ولتاژ ابتدای خط با بار پیشفاز با خازن سری

# معایب خازن سری

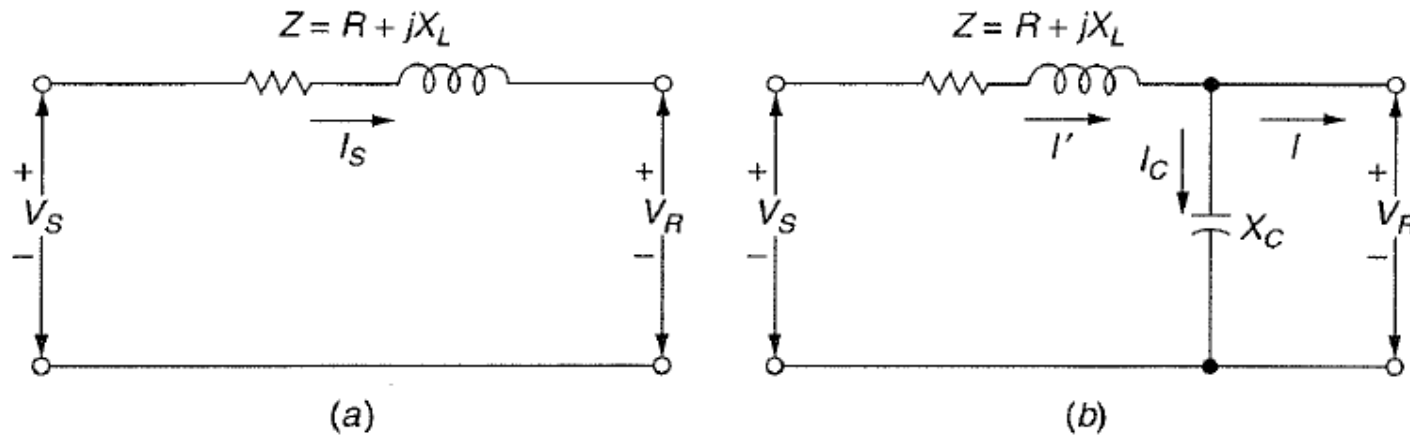
- به دلیل معایب زیر، خازن های سری به ندرت در شبکه توزیع مورد استفاده قرار می گیرند:
- عدم کارایی در بار پیشفاز
- بروز پدیده فرو رزونانس در ترانسفورماتور
- نوسانات زیر سنکرون در زمان استارت موتور
- مشکلات حفاظت از خازن در مقابل جریان خطا

# خازن موازی

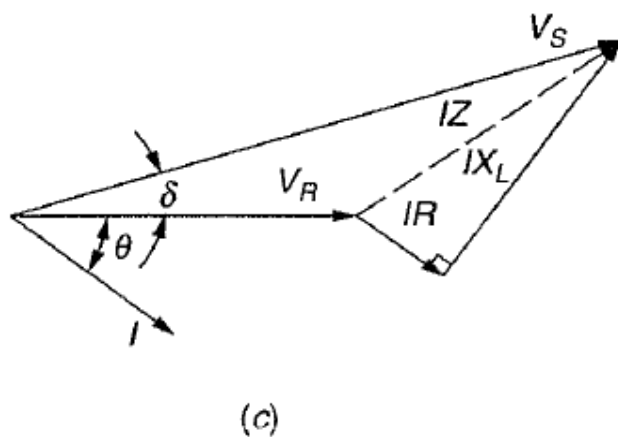
- خازن موازی، به صورت موازی با خط نصب می شود
- خازن موازی، موجب تزریق توان راکتیو به خط، جهت جبران توان راکتیو مصرفی بارهای پسفاز می شود.
- خازن موازی موجب بهبود ضریب قدرت، قبل از نقطه اتصال به شبکه (به سمت پست) می شود.



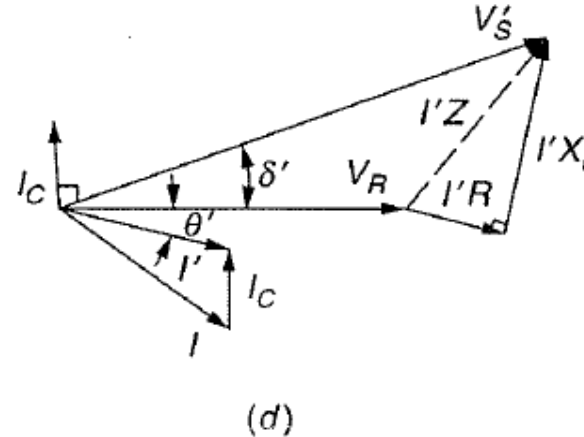
# تأثیر خازن موازی بر ولتاژ



ولتاژ ابتدای خط با بار  
پسفاز بدون خازن موازی



ولتاژ ابتدای خط با بار  
پسفاز با خازن موازی



# تأثیر خازن موازی بر ولتاژ

$$VD = I_R R + I_X X_L$$

- افت ولتاژ قبل از نصب خازن

- $I_R = I \cos\theta$
- $I_x = I \sin\theta$

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_L$$

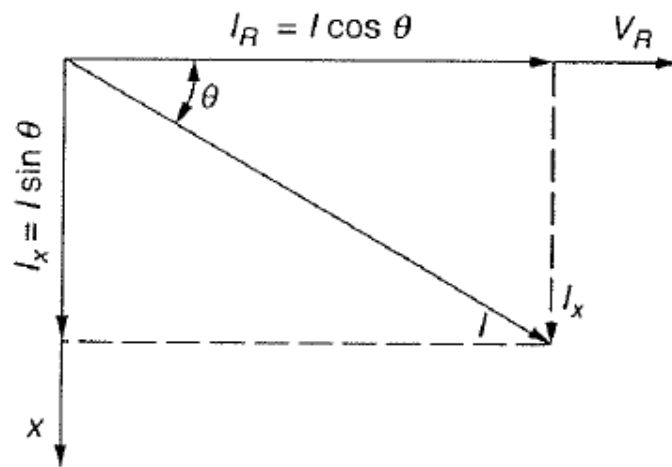
- افت ولتاژ بعد از نصب خازن

$$VR = I_C X_L$$

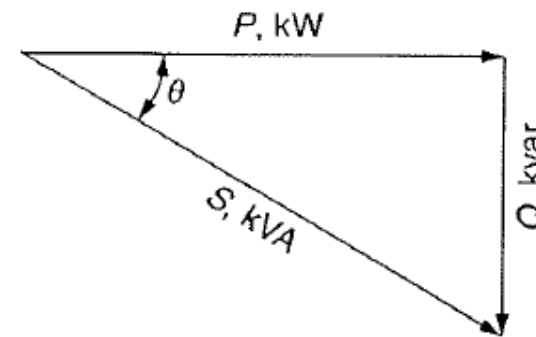
- اختلاف افت ولتاژ قبل و بعد از نصب خازن

# اصلاح ضریب توان

- به طور طبیعی در یک سیستم توزیع، بارها پسفاز می باشند
- عقب افتادگی جریان از ولتاژ



(a)



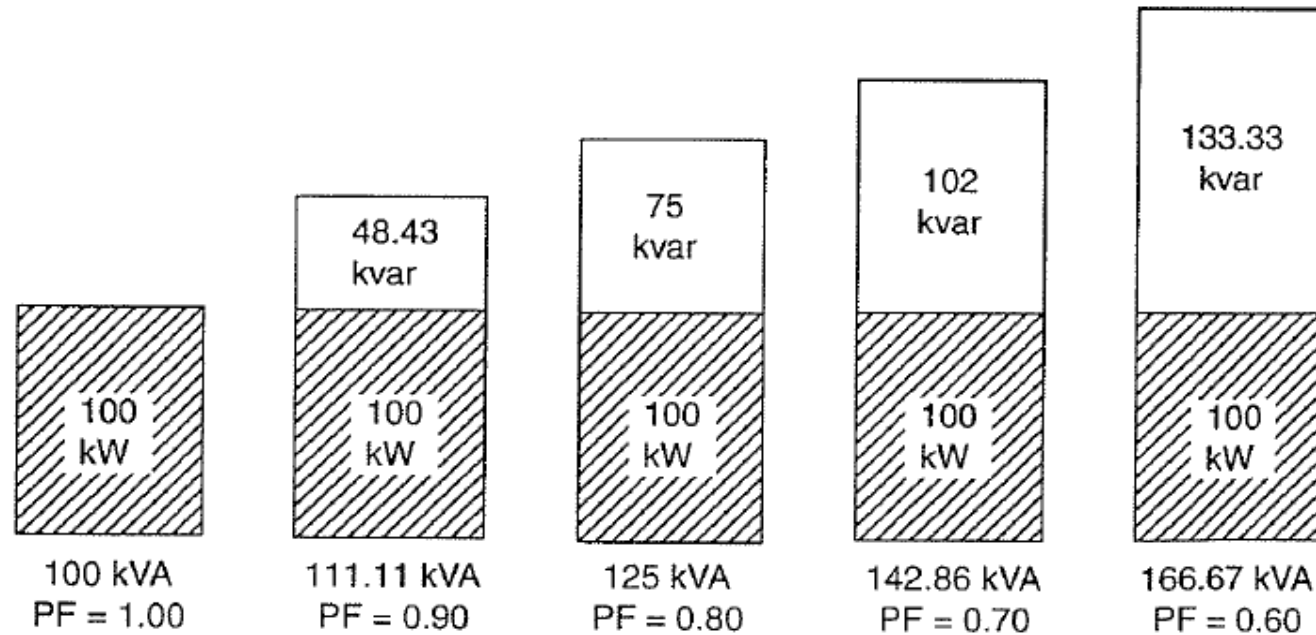
(b)

$$PF = \cos \theta$$

- با اضافه کردن خازن موازی، اندازه Q در مثلث توان، کوچک شده و لذا PF بهبود می یابد



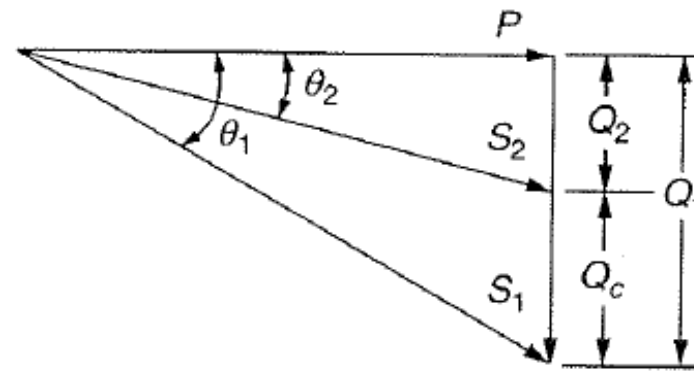
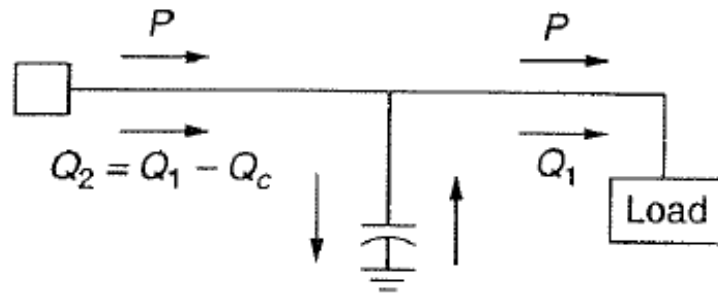
# اصلاح ضریب توان



میزان توان راکتیو سلفی افزایش یافته برای کاهش ۱۰ درصد در ضریب قدرت

به عنوان مثال: در ضریب قدرت 0.8 پسفاز بار با توان  $P=100\text{kW}$ ، باید خازن با ظرفیت  $75\text{kVar}$  برای اصلاح ضریب توان به یک نصب شود.

# اصلاح ضریب توان



- نصب خازن موجب کاهش  $Q$  تزریقی از پست می شود
- نصب خازن موجب کاهش  $I$  تزریقی از پست می شود
- نصب خازن موجب کاهش تلفات از پست تا محل خازن می شود

# اندازه خازن

- اندازه خازن به گونه ای باشد که هزینه خرید و نصب خازن، با هزینه کاهش تلفات شبکه و همچنین آزادسازی ظرفیت خط برابر باشد.
- به طور سرانگشتی، اندازه خازن بهینه، به گونه ای است که ضریب قدرت شبکه توزیع، برابر ۰.۹۵ باشد.
- اندازه خازن با توجه به ضریب قدرت مطلوب برابر است با:

$$Q = P(\tan \theta_{\text{orig}} - \tan \theta_{\text{new}})$$

$$= P \left( \sqrt{\frac{1}{\text{PF}_{\text{orig}}^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\text{PF}_{\text{new}}^2} - 1} \right)$$



# مثال

- اگر یک سیستم قدرت با ظرفیت 10000 kVA و ضریب قدرت 0.7 در حال بهره برداری باشد و هزینه نصب خازن \$10/kVA باشد، هزینه لازم برای اصلاح ضریب قدرت به 0.85 و 1 را محاسبه کنید.

• حل:

- نکته: مقدار توان اکتیو سیستم باید قبل و بعد از نصب خازن ثابت در نظر گرفته شود

$$\theta_{old} = \cos^{-1} PF = \cos^{-1} 0.7 = 45.57^\circ$$

$$P_{old} = S \cos \theta_{old} = (10,000 \text{ kVA})0.7 = 7000 \text{ kW}$$

$$Q_{old} = S \sin \theta_{old} = (10,000 \text{ kVA}) \sin 45.57^\circ = 7141.43 \text{ kvar.}$$

# مثال-ادامه

• برای  $PF=0.85$  داریم:

$$P_{\text{new}} = P_{\text{old}} = 7000 \text{ kW} \quad (\text{as before})$$

$$S_{\text{new}} = \frac{P_{\text{new}}}{\cos \theta_{\text{new}}} = \frac{7000 \text{ kW}}{0.85} = 8235.29 \text{ kVA}$$

$$Q_{\text{new}} = S_{\text{new}} \sin(\cos^{-1} PF) = (8235.29 \text{ kVA}) \sin(\cos^{-1} 0.85) = 4338.21 \text{ kvar}$$

$$Q_c = Q_{\text{required}} = Q_{\text{old}} - Q_{\text{new}} = 7141.43 - 4338.21 = 2803.22 \text{ kvar correction needed.}$$

• هزینه نصب خازن با ظرفیت  $2803.22 \text{ kvar}$  برابر است با

$$\text{Cost}_{\text{capacitor}} = (2803.22 \text{ kVA})(\$10/\text{kVA}) = \$28,032.20.$$

# مثال – ادامه



• برای  $PF=1$  داریم:

$$Q_c = Q_{\text{required}} = Q_{\text{old}} - Q_{\text{new}} = 7141.43 - 0.0 = 7141.43 \text{ kvar.}$$

$$\text{Cost}_{\text{capacitor}} = (7141.43 \text{ kVA})(\$10/\text{kVA}) = \$71,414.30.$$

# شیوه نصب خازن

- حدود ۶۰ درصد خازنها در طول فیدرهای فشار متوسط نصب می شوند
- حدود ۳۰ درصد خازنها در پستهای فوق توزیع
- حدود ۱۰ درصد خازنها در خطوط فوق
- به دلیل موضوع هزینه-فایده، به ندرت در فیدرهای فشار ضعیف، خازن نصب می شود، خازنهای نصب شده در سمت فشار ضعیف، معمولاً در بخشهای صنعتی برای بهبود ضریب توان استفاده میشود.
- خازنهای نصب شده در طول فیدر، معمولاً بر روی پایه ها نصب می شوند.

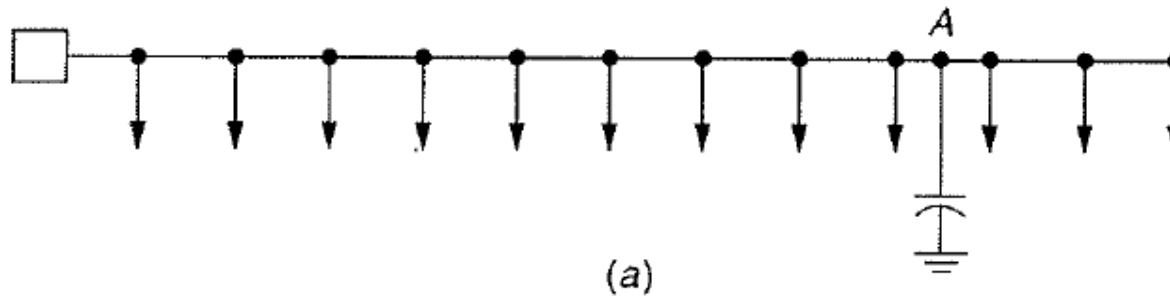


# خازن ثابت

- اگر خازن از نوع ثابت باشد:

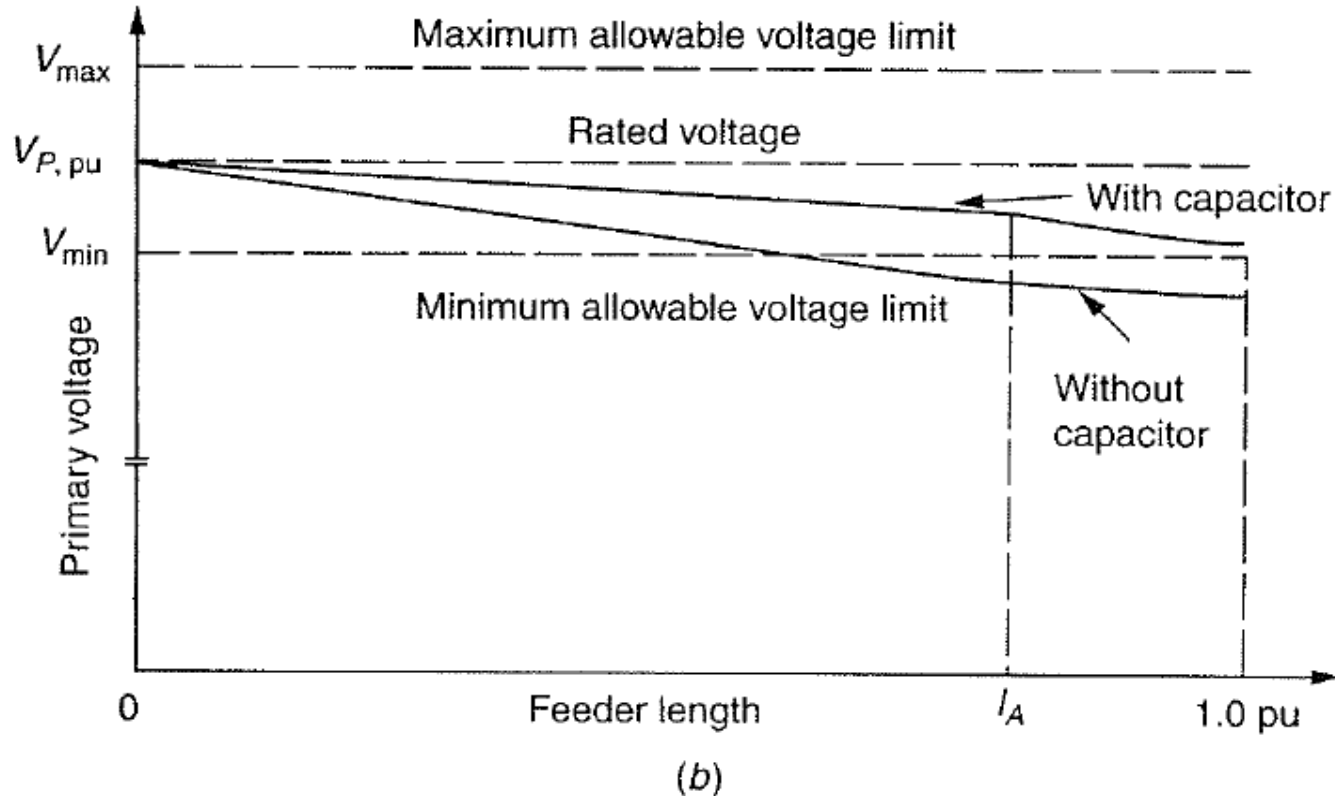
- تمام ظرفیت خازن، بدون توجه به میزان بار، همواره در فیدر وجود دارد و تزریق توان راکتیو را انجام می دهد.

- بررسی اثر نصب خازن ثابت در یک فیدر



# خازن ثابت – ادامه

- تاثیر خازن ثابت در پرباری (برای فیدر مفروض)
- بهبود ولتاژ و حفظ ولتاژ در محدوده مجاز
- کاهش افت ولتاژ
- در شرایط پرباری، بعد از نصب خازن، بار همچنان پسفاز می ماند.



# خازن ثابت – ادامه

• تاثیر خازن ثابت در کم باری (برای فیدر مفروض)

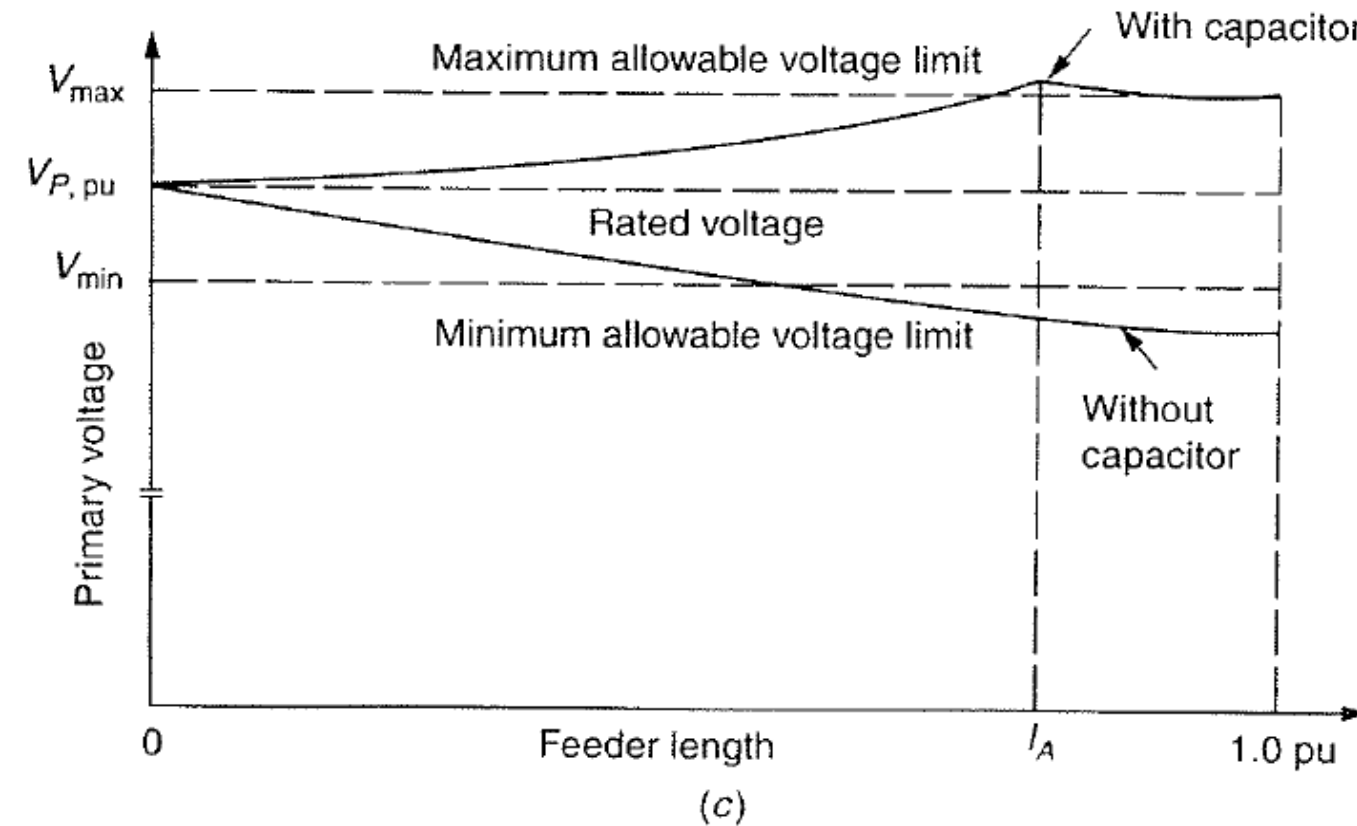
• بهبود ولتاژ و خارج شدن ولتاژ از محدوده مجاز در

محل نصب خازن

• افزایش شدید ولتاژ

• در شرایط کم باری، بعد از نصب خازن، بار طول

فیدر پیشفازی می شود.

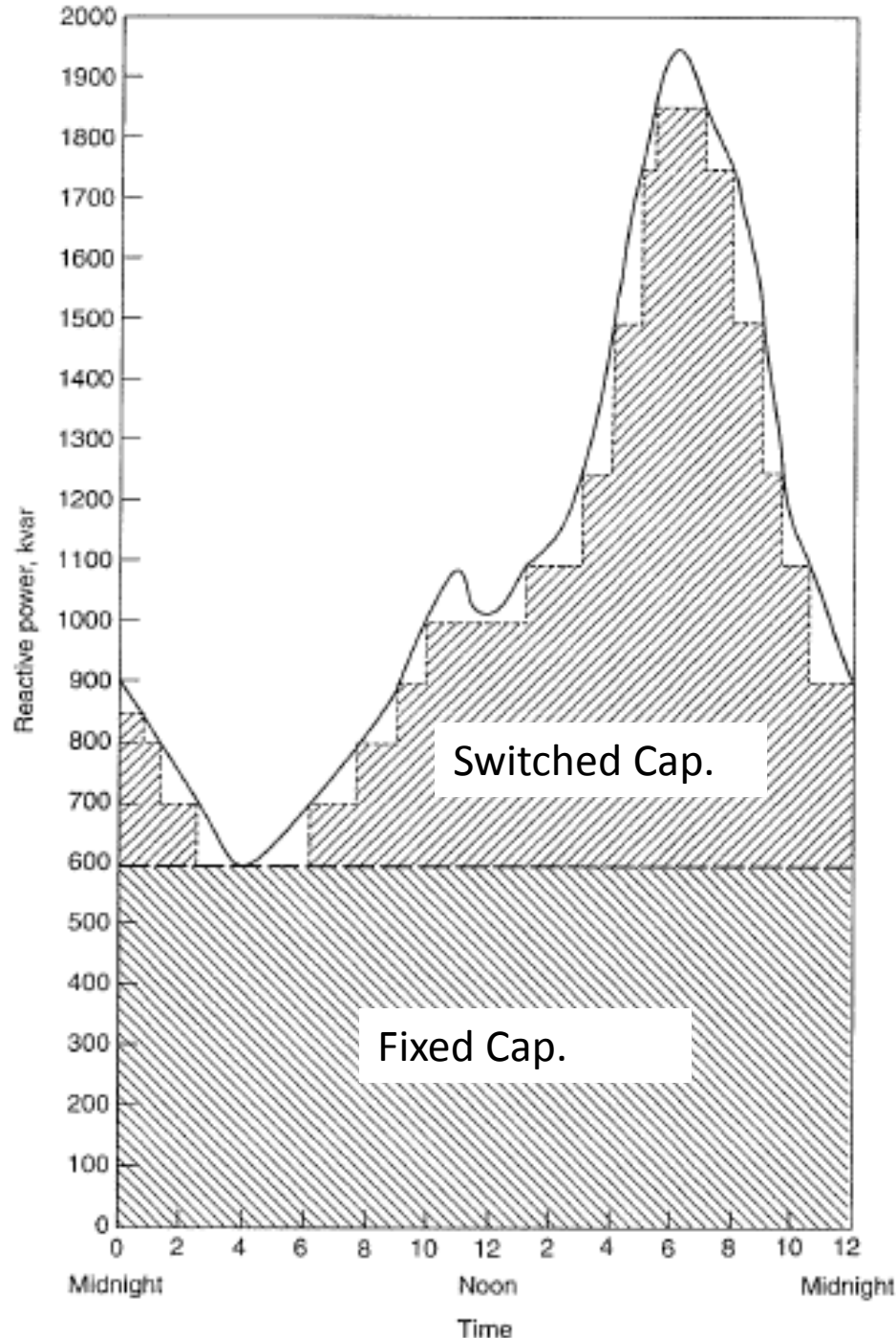


# بانک خازن سویچ شونده

- برای رفع مشکل اضافه ولتاژ در شرایط کم باری ناشی از خازن ثابت، از بانک خازنی سویچ شونده استفاده می شود.
- یکی از واحدهای بانک خازنی، خازن ثابت است و مابقی خازن سویچ شونده و یا پله ای هستند.
- در شرایط کم باری، خازن سویچ شونده از مدار خارج می باشد.
- خازن ثابت برای کم باری طراحی می شود و همواره در مدار است.
- واحدهای سویچ شونده متناسب با میزان راکتیو بار، یا به صورت بلوکی و یا پله ای وارد مدار می شوند.
- به منظور کاهش هزینه های سویچینگ و کنترل، تعداد پله های خازن سویچ شونده خیلی زیاد نمی باشد.



# بانک خازن سویچ شونده – ادامه



- به منظور انتخاب تعداد پله های خازن، باید مطالعات بار راکتیو انجام شود.
- با توجه به منحنی بار راکتیو، اندازه خازن ثابت، خازن سویچ شونده و تعداد پله ها تعیین می شود
- برای منحنی روبرو:
  - اندازه خازن ثابت: 600 kvar
  - خازن سویچ شونده با توجه به میزان بار راکتیو و با توجه به مسئله افت ولتاژ و یا اصلاح ضریب قدرت تعیین می شود

# بانک خازن سویچ شونده – ادامه

- معمولاً شرکتهای توزیع به طور سرانگشتی، خازن سویچ شونده را بر اساس رابطه زیر وارد مدار می کنند:

$$\frac{\text{kvar from switched + fixed capacitors}}{\text{kvar of peak reactive feeder load}} \geq 0.70.$$

# تعیین ظرفیت خازن ثابت

- تعیین ظرفیت خازن ثابت:
- از دیدگاه تنظیم ولتاژ، اندازه خازن ثابت می تواند به گونه ای تعیین می شود که در حداقل بار، ولتاژ انتهای خط در حداکثر مقدار مجاز باشد.
- به طور تقریبی می توان گفت که **میزان افزایش ولتاژ** ناشی از نصب خازن ثابت، نباید از افت ولتاژ انتهای خط در کم باری بیشتر شود.
- **میزان افزایش ولتاژ** ناشی از تزریق توان راکتیو خازن ثابت به طور تقریبی از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\%VR = \frac{Q_{c,3\phi} \times x \times l}{10 \times V_{L-L}^2}$$

$$\%VR = \frac{I_c \times x \times l}{10 \times V_{L-N}}$$

$$I_c = \frac{Q_{c,3\phi}}{\sqrt{3} \times V_{L-L}}$$

- % VR: افزایش ولتاژ ناشی از نصب خازن ثابت
- $Q_{c,3\phi}$ : توان راکتیو سه فاز خازن ثابت (kvar)
- $l$ : طول فیدر از پست تا محل نصب خازن (mi)
- $x$ : راکتانس خط ( $\Omega/\text{mi}$ )
- $V_{L-L}$ : ولتاژ خط (kV)



# تعیین ظرفیت خازن ثابت – ادامه

- اگر خازن ثابت به انتهای خط متصل شود و اگر درصد افزایش ولتاژ تعیین شود، حداکثر مقدار خازن ثابت از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\text{Max } Q_{c,3\phi} = \frac{10(\% \text{VR})V_{L-L}^2}{x \times l} \text{ kvar.}$$

- از رابطه صفحه قبل می توان برای تعیین افزایش ولتاژ ناشی از خازن سویچ شونده نیز استفاده کرد.
- لذا، افزایش ولتاژ ناشی از هر دو خازن ثابت و سویچ شونده از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\sum \% \text{VR} = \% \text{VR}_{\text{NSW}} + \% \text{VR}_{\text{SW}}$$

# قاعده سر انگشتی تعیین ظرفیت خازن

- قاعدن سر انگشتی تعیین ظرفیت خازن ثابت و سویچ شونده

مجموع ظرفیت خازن ثابت و سویچ شونده برای یک فیدر باید به میزانی باشد که ولتاژ انتهای خط در

زمانی که بار معادل ۵۰ درصد بار اوج است، در حداکثر مقدار مجاز قرار گیرد.

# قاعده سر انگشتی تعیین ظرفیت خازن

- بعد از تعیین ظرفیت خازن، قاعده سرانگشتی تعیین محل خازن:

- خازن ثابت

در یک فیدر با بار یکنواخت، در دو سوم طول فیدر از پست قرار گیرد.

در یک فیدر با بار کاهشی یکنواخت، در **وسط** فیدر قرار گیرد.

- خازن سویچ شونده

محل خازن، بر اساس الزامات تنظیم ولتاژ تعیین می شود و معمولاً در یک سوم انتهایی فیدر قرار می گیرد.

# کنترل خازن موازی

- دستی

- محلی

- از راه دور

- خودکار

- کنترل بر اساس زمان

- کنترل بر اساس سطح ولتاژ

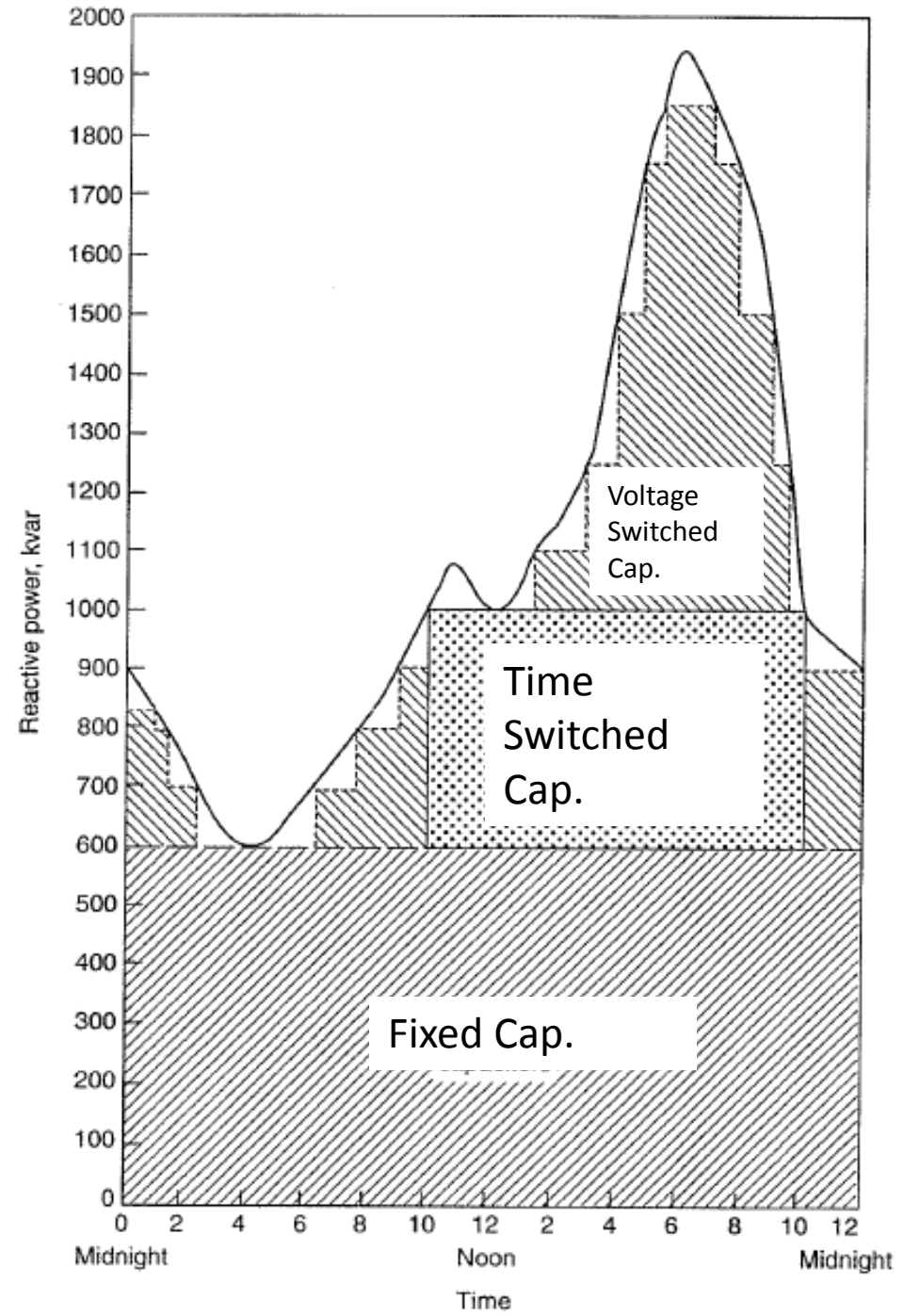
- کنترل بر اساس جریان

- کنترل بر اساس ولتاژ-جریان

- خازن کنترل شونده با زمان، ارزاترین مدل خازن سویچ شونده است.



# نمونه ای از کنترل خازنهای



# مزایای اقتصادی نصب خازن

- آزاد سازی ظرفیت واحدهای تولید
- کاهش جریان خطوط و پستها تا مرکز تولید
- کاهش تلفات خطوط و پستها تا مرکز تولید
- کوچک شدن اندازه خطوط و پستها تا مرکز تولید
- در صورتیکه ضریب توان سیستم قدرت با نصب خازن اصلاح شود، به طور تقریبی ۳۰ درصد از توانایی سیستم برای بارگیری اضافی را افزایش می دهد.
- افزایش ولتاژ و در نتیجه افزایش درآمد
- تاخیر انداختن سرمایه گذاری خطوط و پستها

# مزایای اقتصادی نصب خازن – ادامه

از منظر اقتصادی ظرفیت بهینه خازن، ظرفیتی است که منفعت اقتصادی حاصل از اضافه کردن آخرین کیلووار برابر با هزینه نصب آخرین کیلووار باشد.

$$\text{Marginal Benefit} = \text{Marginal Cost}$$



# منافع خازن – آزاد سازی ظرفیت تولید

• مقدار ظرفیت آزاد شده تولید تقریباً برابر است با:

$$\bullet \Delta S_G = S_G - S_{Gnew} = \sqrt{(P^2 + Q^2)} - \sqrt{(P^2 + (Q - Q_c)^2)}$$

$$\bullet P = S_G \cos \theta$$

$$\bullet Q = S_G \sin \theta$$

• با جایگذاری و ساده سازی داریم:

$$\Delta S_G = \begin{cases} \left[ \left( 1 - \frac{Q_c^2 \times \cos^2 \theta}{S_G^2} \right)^{1/2} + \frac{Q_c \times \sin \theta}{S_G} - 1 \right] S_G & \text{when } Q_c > 0.10 S_G \\ Q_c \times \sin \theta & \text{when } Q_c \leq 0.10 S_G \end{cases}$$

•  $\cos \theta$ : ضریب قدرت سیستم قبل از نصب خازن

# منافع خازن – آزاد سازی ظرفیت تولید

- منفعت سالانه ناشی از نصب خازن در سمت تولید

$$\Delta \$_G = \Delta S_G \times C_G \times i_G$$

- $C_G$ : هزینه احداث نیروگاه (\$/kW)
- $i_G$ : نرخ بازگشت سرمایه در سمت تولید

# منافع خازن – آزاد سازی ظرفیت انتقال

- ظرفیت آزاد شده خطوط انتقال:

$$\Delta S_T = \begin{cases} \left[ \left( 1 - \frac{Q_c^2 \times \cos^2 \theta}{S_T^2} \right)^{1/2} + \frac{Q_c \times \sin \theta}{S_T} - 1 \right] S_T & \text{when } Q_c > 0.10S_T \\ Q_c \times \sin \theta & \text{when } Q_c \leq 0.10S_T \end{cases}$$

- منفعت سالانه ناشی از نصب خازن در خط انتقال

$$\Delta \$_T = \Delta S_T \times C_T \times i_T$$

- $C_T$ : هزینه احداث خط انتقال (\$/kVA)

- $i_T$ : نرخ بازگشت سرمایه در بخش انتقال

# منافع خازن – آزاد سازی ظرفیت پست

- ظرفیت آزاد شده پست :

$$\Delta S_s = \begin{cases} \left[ \left( 1 - \frac{Q_c^2 \times \cos^2 \theta}{S_s^2} \right)^{1/2} + \frac{Q_c \times \sin \theta}{S_s} - 1 \right] S_s & \text{when } Q_c > 0.10 S_s \\ Q_c \times \sin \theta & \text{when } Q_c \leq 0.10 S_s \end{cases}$$

- منفعت سالانه ناشی از نصب خازن در پست

•  $C_s$ : هزینه احداث پست (\$/kVA)

•  $i_s$ : نرخ بازگشت سرمایه در بخش پست

$$\Delta \$_s = \Delta S_s \times C_s \times i_s$$

# منافع خازن – کاهش تلفات انرژی

• کاهش تلفات سالانه انرژی ناشی از نصب خازن

•  $\Delta ACE$ : کاهش تلفات سالانه انرژی (kWh/yr)

•  $S_{L,3\phi}$ : توان ظاهری سیستم قبل از نصب خازن (kVA)

•  $R$ : مقاومت خط تا مرکز بار ( $\Omega$ )

•  $V_{L-L}$ : ولتاژ خط-خط (kV)

• با جایگذاری داریم:

• منفعت سالانه کاهش تلفات

•  $EC$ : هزینه انرژی (\$/kwh)

$$\Delta ACE = 3R(I_1 - I_2)^2 * 8760 \times LSF$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{(S \cos \theta)^2 + (S \sin \theta)^2}}{\sqrt{3} \times V_{L-L}}$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{(S \cos \theta)^2 + (S \sin \theta - Q_c)^2}}{\sqrt{3} \times V_{L-L}}$$

$$\Delta ACE = \frac{Q_{c,3\phi} R (2S_{L,3\phi} \sin \theta - Q_{c,3\phi}) 8760}{1000 \times V_{L-L}^2} \times LSF$$

$$\Delta \$_{ACE} = \Delta ACE \times EC$$

# منافع خازن – کاهش تلفات توان

- نصب خازن موجب کاهش تلفات توان، به الطبع کاهش ظرفیت تولید می شود
- میزان کاهش ظرفیت تولید، باید براساس کاهش تلفات در پیک محاسبه شود.

$$\Delta P = 3R(I_1 - I_2)^2$$

$$\Delta P = \frac{Q_{c, 3\phi} R (2SL_{3\phi} \sin\theta - Q_{c, 3\phi})}{1000 \times VLL}$$

- منفعت مالی حاصل از آزاد سازی ظرفیت اکتیو بخش تولید:

$$\Delta \$_G = \Delta P \times C_G \times i_G$$

# منافع خازن – کاهش افت ولتاژ

- نصب خازن از دو جهت می تواند موجب بهبود ولتاژ شود

$$\%VD = \frac{S_{L,3\phi} (r \cos \theta + x \sin \theta) l}{10 \times V_{L-L}^2}$$

• کاهش جریان عبوری از خط  
 • بهبود ضریب قدرت

- افزایش ولتاژ ناشی از نصب خازن در طول فیدر

$$\%VR = \frac{Q_{c,3\phi} \times x \times l}{10 \times V_{L-L}^2}$$

- افزایش ولتاژ در ترانس ناشی از نصب خازن

$$\%VR_T = \left( \frac{Q_{c,3\phi}}{S_{T,3\phi}} \right) x_T$$

- $x_T$ : امپدانس درصد ترانس
- $S_{t,3\phi}$ : ظرفیت نامی ترانس

# منافع خازن – آزاد سازی ظرفیت فیدر

- بر اساس اطلاعات فصل ۴، ظرفیت فیدر با توجه به محدودیت افت ولتاژ مقید می شود نه ظرفیت حرارتی. اما نصب خازن، افت ولتاژ را کاهش می دهد و در نتیجه اجازه بارگیری بیشتر به فیدر را می دهد.
- با نصب خازن، افت ولتاژ به اندازه VR کاهش می یابد.

$$\bullet \quad VD_2 = VD_1 - VR = \frac{S(rcos\theta + xsin\theta) \times l}{10 \times V_{LL}^2} - \frac{Q_{c,3\phi} \times x \times l}{10 \times V_{LL}^2}$$

- لذا می توان بار را به اندازه  $\Delta S_F$  افزایش داد به طوریکه افت ولتاژ ناشی از آن، برابر افزایش ولتاژ VR ناشی از نصب خازن شود.

$$\bullet \quad \frac{\Delta S_F (rcos\theta + xsin\theta) \times l}{10 \times V_{LL}^2} = \frac{Q_{c,3\phi} \times x \times l}{10 \times V_{LL}^2} \quad \rightarrow \quad \Delta S_F = \frac{(Q_{c,3\phi})x}{x \sin \theta + r \cos \theta} \text{ kVA.}$$



# منافع خازن – آزاد سازی ظرفیت فیدر – ادامه

$$\Delta \$_F = \Delta S_F \times C_F \times i_F$$

- منفعت سالانه ناشی از نصب خازن در فیدر
- $C_F$ : هزینه احداث فیدر ( $\$/kVA$ )
- $i_s$ : نرخ بازگشت سرمایه در بخش فیدر



# منافع خازن – بهبود ولتاژ

## Additional kWh Energy Increase After Capacitor Addition

$\frac{V_{av, after}}{V_{av, before}}$	$\Delta kWh \text{ Increase (\%)}$
1.00	0
1.05	8
1.10	16
1.15	25
1.20	34
1.25	43
1.30	52

جدول افزایش انرژی مصرفی متناسب با افزایش ولتاژ برای یک فیدر متداول توزیع

- با بهبود ولتاژ، میزان انرژی فروخته شده به مشترکان افزایش می یابد
- با توجه به نوع بارهای متصل به شبکه، افزایش ولتاژ موجب افزایش توان مصرفی و بالطبع انرژی می شود.
- به عنوان مثال بارهای روشنایی (لامپها)، از آنجایی که بار امپدانس ثابت هستند، با افزایش ولتاژ، توان مصرفی آنها با مربع ولتاژ افزایش می یابد.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

# منافع خازن – بهبود ولتاژ – ادامه

- منفعت سالانه ناشی از نصب خازن در افزایش انرژی فوخته شده

- $\Delta BEC$ : درصد افزایش مصرف

- $BEC$ : بار اصلی شبکه توزیع

$$\Delta \$_{BEC} = \Delta BEC \times BEC \times EC$$

# کل منافع خازن – بهبود ولتاژ – ادامه

- کل منافع سالانه حاصل از نصب خازن

$$\begin{aligned}\sum \Delta \$ &= (\text{demand reduction}) + (\text{energy reduction}) + (\text{revenue increase}) \\ &= (\Delta \$_G + \Delta \$_T + \Delta \$_S + \Delta \$_F) + \Delta \$_{ACE} + \Delta \$_{BEC}.\end{aligned}$$

- هزینه سالانه نصب خازن

$$\Delta EIC_c = \Delta Q_c \times IC_c \times i_c$$

- در آمریکا، تقریباً به ازای هر ۲ کیلووات ظرفیت نیروگاهی منصوبه، ۱ کیلووات خازن نصب شده است.

# مثال

- مثال: سیستم قدرت بزرگی را فرض کنید که ضریب قدرت آن ۰.۹ باشد. قصد داریم ضریب قدرت را به ۰.۹۸ افزایش دهیم. برای این امر چند پخش بار در سیستم انجام شده است که نتایج آن به شرح جدول زیر است.

Comment	At 90% Power Factor	At 98% Power Factor
Total loss reduction due to capacitors applied to substation buses (kW)	495,165	491,738
Additional loss reduction due to capacitors applied to feeders (kW)	85,771	75,342
Total demand reduction due to capacitors applied to substation buses and feeders (kVA)	22,506,007	21,172,616
Total required capacitor additions at buses and feeders (kvar)	9,810,141	4,213,297

## مثال – ادامه

- فرض کنید متوسط نرخ بازگشت سرمایه، 0.2، هزینه دیماند  $\$250/\text{kW}$ ، هزینه انرژی  $\$0.04/\text{kWh}$ ، ضریب تلفات سیستم 0.17، هزینه احداث خط انتقال  $\$27/\text{kVA}$  و متوسط هزینه نصب خازن  $\$4.75/\text{kvar}$  باشد. ضریب مسئولیت خازن نصب شده در شین پست و فیدر به ترتیب ۱ و ۰.۹ است. مطلوبست
  1. زمانی که همه خازنها در پست نصب شده اند، میزان کاهش تلفات در ضریب قدرت 0.98 را تعیین کنید.
  2. زمانی که برخی از خازنها در فیدرها نصب شده اند، میزان کاهش تلفات در ضریب قدرت 0.98 را تعیین کنید.
  3. کل کاهش تلفات
  4. ظرفیت  $\text{kVA}$  آزاد شده سیستم
  5. میزان خازن اضافی
  6. صرفه جویی سالانه ناشی از کاهش دیماند ناشی از نصب خازن در فیدر و پست
  7. صرفه جویی سالانه ناشی از آزاد سازی ظرفیت خط انتقال ناشی از نصب خازن در فیدر و پست

# مثال – ادامه

8. صرفه جویی سالانه ناشی از کاهش تلفات انرژی
9. هزینه سالانه نصب خازن اضافی
10. کل صرفه جویی سالانه
11. آیا ضریب قدرت 0.98، ضریب قدر اقتصادي است.

# حل مثال

۱- میزان کاهش تلفات توان ناشی از نصب خازن در پست

$$\Delta P_{LS} = 495,165 - 491,738 = 3427 \text{ kW.}$$

۲- میزان کاهش تلفات توان اضافی ناشی از نصب خازن در فیدر

$$\begin{aligned} \Delta P_{LS} &= 85,771 - 75,342 \\ &= 10,429 \text{ kW.} \end{aligned}$$

۳- کل تلفات توان کاهش یافته

$$\begin{aligned} \Delta P_{LS} &= 3427 + 10,429 \\ &= 13,856 \text{ kW.} \end{aligned}$$

کاهش تلفات ناشی از نصب خازن در فیدر ۳ برابر بیشتر از کاهش تلفات ناشی از نصب خازن در پست است. علت این است که

تلفات در ولتاژهای پایین تر بیشتر هستند.  $P_L = RI^2 = R(S/V)^2$

۴- ظرفیت آزاد شده

$$\begin{aligned} \Delta S_{sys} &= 22,506,007 - 21,172,616 \\ &= 1,333,391 \text{ kVA.} \end{aligned}$$



# حل مثال – ادامه

$$\Delta Q_c = 9,810,141 - 4,213,297 \\ = 5,596,844 \text{ kvar.}$$

۵- ظرفیت خازن اضافی نصب شده

۶-

صرفه جویی سالانه ناشی از کاهش دیماند ناشی از نصب خازن در پست

$$(3427 \text{ kW})(1.0)(\$250/\text{kW})(0.20/\text{yr}) = \$171,350/\text{yr}$$

صرفه جویی سالانه ناشی از کاهش دیماند ناشی از نصب خازن در فیدر

$$(10,429 \text{ kW})(0.9)(\$250/\text{kW})(0.20/\text{yr}) = \$469,305/\text{yr.}$$

صرفه جویی کل

$$\$171,350 + \$469,305 = \$640,655/\text{yr.}$$

# حل مثال – ادامه

۷- صرفه جویی سالانه ناشی از آزاد سازی ظرفیت خط انتقال ناشی از نصب خازن در فیدر و پست

$$(1,333,391 \text{ kVA})(\$27/\text{kVA})(0.20/\text{yr}) = \$7,200,311/\text{yr}.$$

۸- صرفه جویی سالانه ناشی از کاهش تلفات انرژی

$$(\$13,856 \text{ kW})(8760 \text{ hr/yr})(0.17)(\$0.045/\text{kWh}) = \$928,546/\text{yr}.$$

۹- هزینه سالانه نصب خازن اضافی

$$(5,596,844 \text{ kvar})(\$4.75/\text{kvar})(0.20/\text{yr}) = \$5,317,002/\text{yr}.$$

۱۰-

کل صرفه جویی سالانه ناشی از دیماند، ظرفیت و انرژی

$$\$640,655 + \$7,200,311 + \$928,5466 = \$8,769,512/\text{yr}.$$

# حل مثال – ادامه

$$\$8,769,512 - \$5,317,002 = \$3,452,510/\text{yr.}$$

خالص صرفه جویی

۱۱- خیر، زیرا خالص صرفه جویی سالانه صفر نشده است.!!؟!!

# اتصالات بانک خازنی ۳ فاز

- در رده ولتاژی فشار ضعیف اتصال مثلث و در رده فشار متوسط اتصال ستاره مرسوم است.
- دلایل کاربرد خازن مثلث در شبکه فشار ضعیف (مشترکین)
- توان راکتیو قابل استحصال از اتصال مثلث با سه بانک خازنی مشابه، ۳ برابر اتصال ستاره است.

- $Q = C\omega V^2$   
 $V_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot V_Y$   
 $Q_{\Delta} = 3 \cdot Q_Y$

- دلایل کاربرد خازن ستاره در شبکه فشار متویط:

- در رده فشار متوسط به دلایل اقتصادی ایجاد ایزولاسیون بالاتر گران تر از ظرفیت خازنی بالاتر است
- علاوه بر آن در اتصال ستاره جریانهای گردشی مزاحم هم فاز ( هارمونیک سوم و غیر آن ) که در اتصال مثلث وجود دارد حضور ندارند.
- حفاظت بهتر، بعنوان مثال رله آن بالانسی جمع جبری جریانها را در اتصال ستاره میتوان در نقطه صفر قرار داد و به محض خرابی یکی از خازنها، رله بانک را خارج کرده و بهره بردار متوجه عیب می گردد .
- علاوه برآن در اتصال ستاره زمین شده اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از سوئیچینگ بانک خازنی بهتر تحت کنترل قرار می گیرند.

# فرایند عملی تعیین محل بهینه خازن

• بهترین محل خازن با استفاده از بهینه سازی تلفات تعیین می شود. سپس با استفاده از مطالعه پروفیل ولتاژ محل بهینه انتخابی مورد تایید قرار می گیرد و تایید می کند که ولتاژ در محدوده مجاز باشد.

• مراحل تعیین محل بهینه

۱- اطلاعات مورد نیاز جمع آوری شود

- دو تا از اطلاعات زیر در خصوص هر نقطه بار جمع آوری شود:  $kVA$ ,  $kW$ ,  $Kvar$ ,  $PF$
- ضریب قدرت مطلوب
- ولتاژ فیدر
- نقشه جغرافیایی فیدر که محل بار و خازنهای فعلی را نشان دهد.

۲- توان اکتیو و ضریب قدرت بار فیدر را محاسبه کنید.

۳- مقدار  $kvar$  مورد نیاز برای اصلاح ضریب توان فعلی به ضریب توان مطلوب را محاسبه کنید.

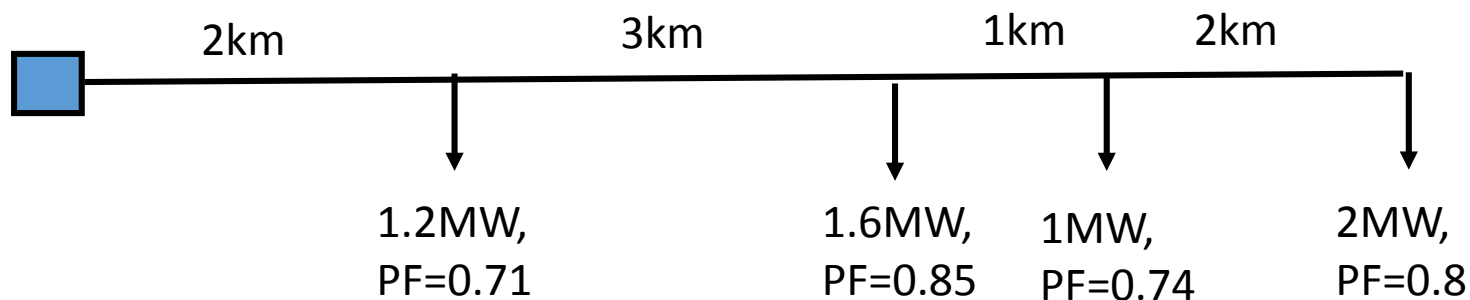
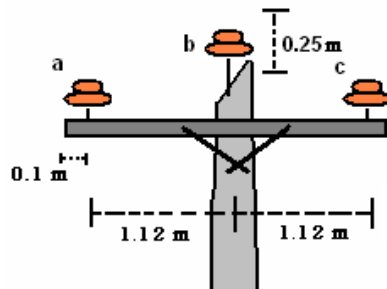
۴- توان ظاهری و ضریب قدرت هر نقطه بار را جداگانه محاسبه کنید.

# فرایند عملی تعیین محل بهینه خازن – ادامه

- ۵- توان راکتیو مربوط به هر نقطه بار را جداگانه تعیین کنید.
- ۶- یک منحنی بسازید که تلفات خط را بر اساس توان راکتیو سلفی به ازای واحد طول تعیین میکند.  $(R \times (I \sin \theta)^2)$ . تلفات خط را در طول خط مربوطه ضرب کنید و این کار را برای تمام قسمت های خط و نقاط بار اجرا کنید.
- ۷- در شرایطی که خازن در خط وجود دارد، مرحله ۶ را با خارج کردن توان راکتیو خازن از توان راکتیو بار اجرا کنید.
- ۸- برای تعیین محل خازن، کل تلفات راکتیو سلفی خط را به تلفات راکتیو خازنی خط به ازای واحد طول تقسیم کنید. اگر حاصل تقسیم، بزرگتر از طول قسمت خط شد:
- الف- باقیمانده تلفات راکتیو سلفی خط را به تلفات راکتیو خازنی در قسمت بعدی خط تقسیم کنید.
- ب- اگر این تقسیم از طول قسمت بعدی خط بیشتر شد، قسمت ۸-الف را تکرار کنید.
- ۹- پروفیل ولتاژ را به صورت دستی یا کامپیوتری برای فیدر رسم کنید. اگر پروفیل نشان دهد که ولتاژ در محدوده مجاز قرار دارد، پس محل قرار گرفتن خازن، نقطه ای است که تلفات را حداقل کرده است. و اگر ولتاژ در محدوده مجاز نباشد، با استفاده از نظر مهندسی نقطه دیگری را برای خازن انتخاب کنید که ولتاژ در محدوده قرار گیرد.

# مثال

- فیدری سه فاز با ولتاژ خط 20kV مطابق شکل زیر را در نظر بگیرید، هادی کل مسیر خط از نوع هاینای با سطح مقطع  $126\text{mm}^2$  می باشد. ضریب قدرت مطلوب فیدر ۰.۹۵ می باشد. اندازه و محل خازن را مشخص کنید.
- اندوکتانس خط تک مداره هاینای با آرایش زیر برابر  $0.348 \Omega/\text{km}$  و مقاومت خط در دمای ۷۰ درجه  $0.336 \Omega/\text{km}$  می باشد.
- ولتاژ مجاز ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ پریونیت است.



# حل مثال

۱- توان خروجی پست (ابتدای فیدر) را بدست می آوریم:

- $P_4=2 \text{ MW}$ ,  $Q_4= 2 \times \tan(\arccos(0.8))= 1.5 \text{ Mvar}$
- $P_3= 1 \text{ MW}$ ,  $Q_3= 1 \times \tan(\arccos(0.74))= 0.9 \text{ Mvar}$
- $P_2= 1.6 \text{ MW}$ ,  $Q_2= 1.6 \times \tan(\arccos(0.85))= 1 \text{ Mvar}$
- $P_1= 1.2 \text{ MW}$ ,  $Q_1= 1.2 \times \tan(\arccos(0.71))= 1.2 \text{ Mvar}$
- $P_t=5.8 \text{ MW}$ ,  $Q_t= 4.6 \text{ Mvar}$       $S= 7.4 \text{ MVA}$ ,      $PF=0.78$

۲- خازن مورد نیاز برای رسیدن به ضریب قدرت مطلوب ۰.۹۵

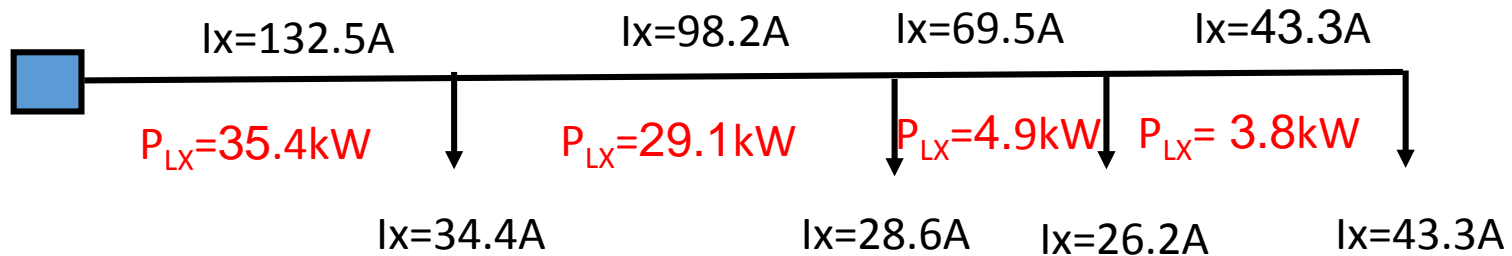
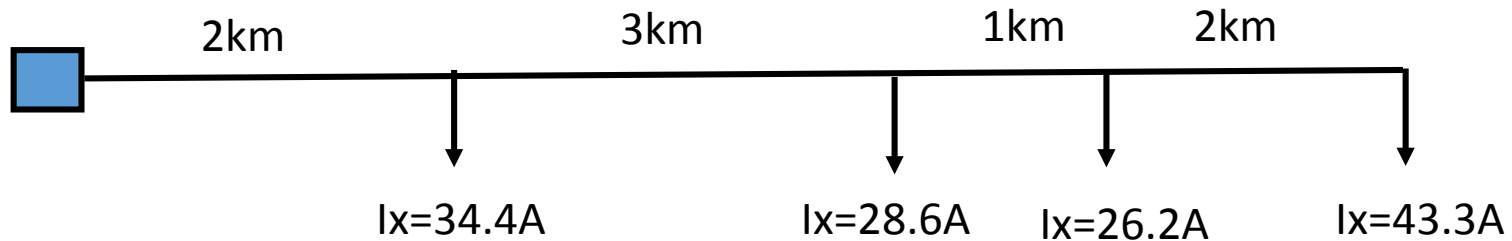
$$Q = P(\tan \theta_{\text{orig}} - \tan \theta_{\text{new}})$$

$$= P \left( \sqrt{\frac{1}{PF_{\text{orig}}^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{PF_{\text{new}}^2} - 1} \right)$$

•  $Q_c=2.75 \text{ Mvar}$

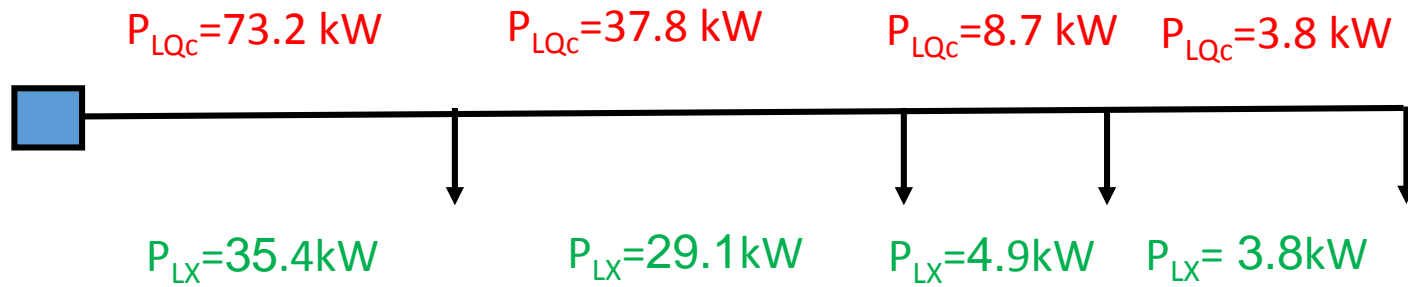


# حل مثال – ادامه



- جریان راکتیو را محاسبه کنید
- $I_X=Q/(\sqrt{3}V)$
- تلفات هر قسمت از خط ناشی از توان راکتیو را محاسبه کنید
- $P_{LX}=3R \times (I_X)^2$

# حل مثال – ادامه



در سکشن های اول تا سوم، طول محاسبه شده بیشتر از طول سکشن است و لذا نمی توان در این سکشن ها خازن نصب کرد، لذا خازن باید در فاصله ۰.۶ کیلومتری آخرین سکشن و یا در فاصله ۰.۶ کیلومتری ابتدای خط قرار گیرد.

## • تعیین محل خازن

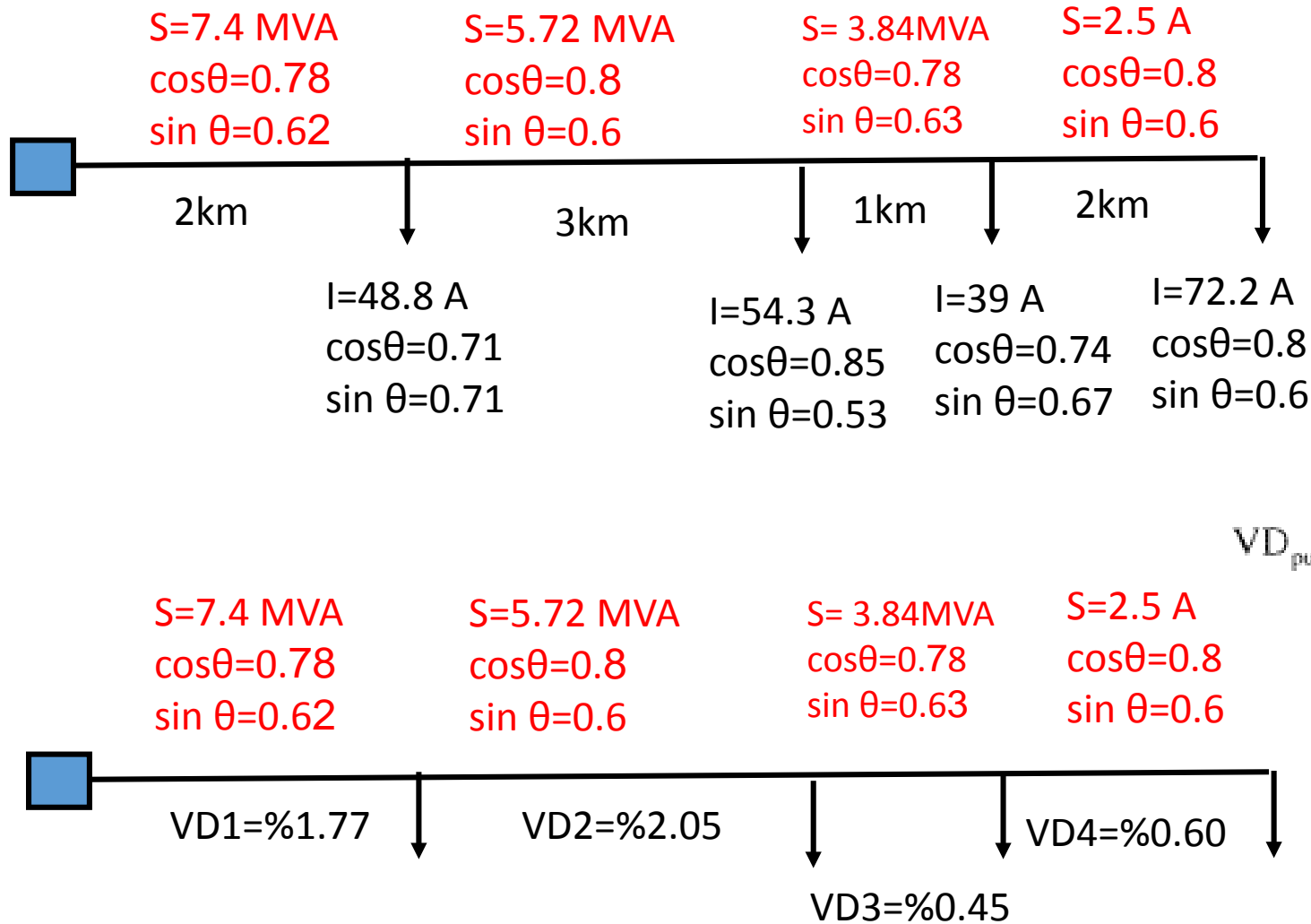
- ابتدا، تلفات تجمعی را محاسبه می کنیم  
( $P_{LQc}$ )
- تلفات مربوط به خازن را محاسبه می کنیم

- $P_{Lc} = 3R * (I_c)^2$
- $I_c = Q_c \div (\sqrt{3} \times V_{LL})$
- $I_c = 2750 \div (\sqrt{3} \times 20) = 79.4A$
- $P_{Lc} = 3 * 0.336 * 79.4^2 = 6.4 kW$

- مطابق بند ۸ تلفات تجمعی هر قسمت را

بر تلفات خازن تقسیم می کنیم

# حل مثال – ادامه

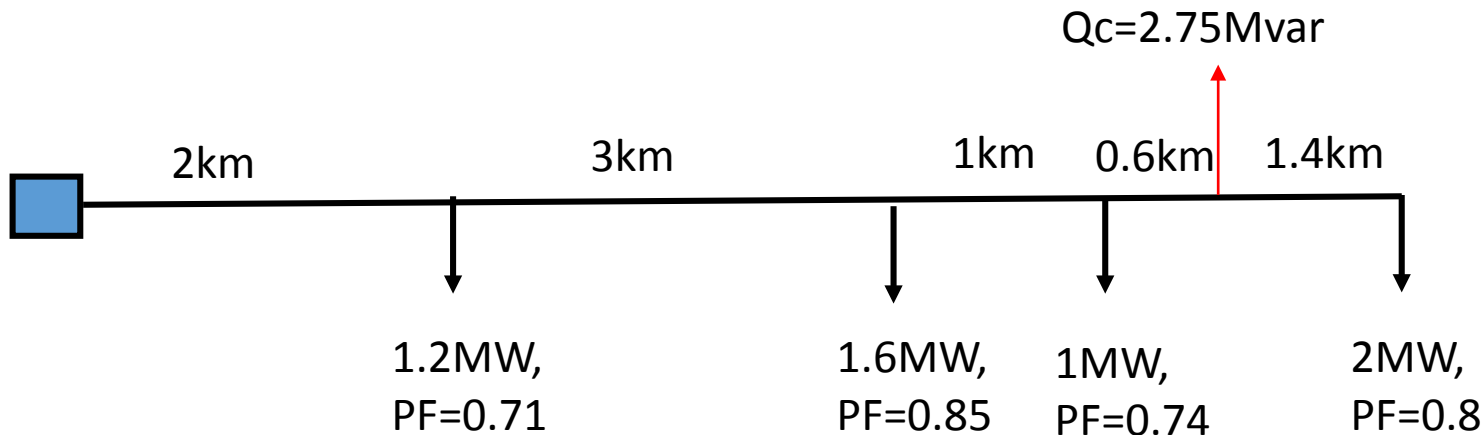


- بر اساس بند ۹، کنترل می کنیم که آیا نصب خازن در این نقطه، ولتاژ را از محدوده خارج نسازد.
- ابتدا محاسبه افت ولتاژ بدون خازن و استخراج پروفیل ولتاژ

$$VD_{pu} \equiv \frac{(S_{\phi})(s)(r \cos \theta + x \sin \theta) \left( \frac{1}{3} \times 1000 \right)}{V_r V_B} pu \ V$$

- افت ولتاژ در انتهای خط برابر است با 4.88%. این افت ولتاژ در محدوده مجاز قرار دارد.

# حل مثال – ادامه



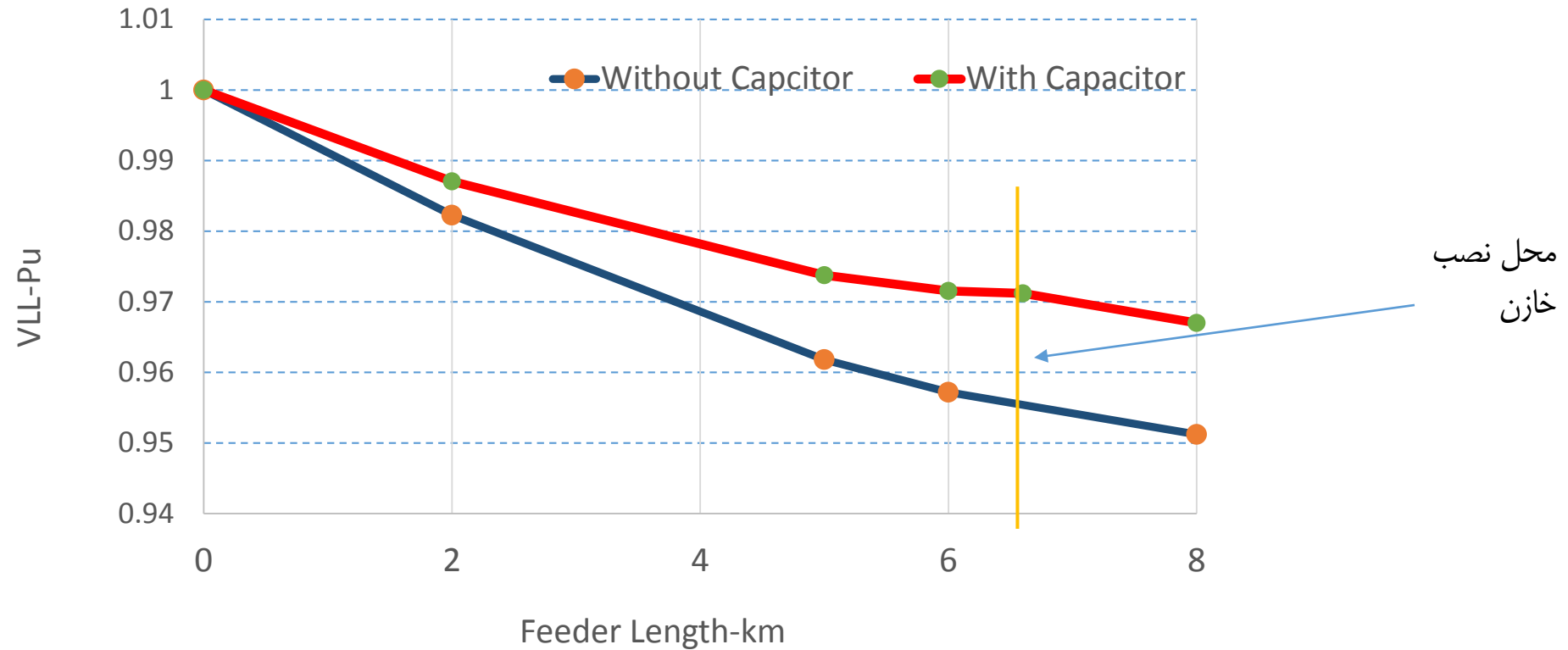
$$\%VR = \frac{Q_{c,3\phi} \times x \times l}{10 \times V_{L-L}^2}$$

$$\%VR = \frac{2750 \times 0.348 \times 6.6}{10 \times 20^2} = 1.58$$

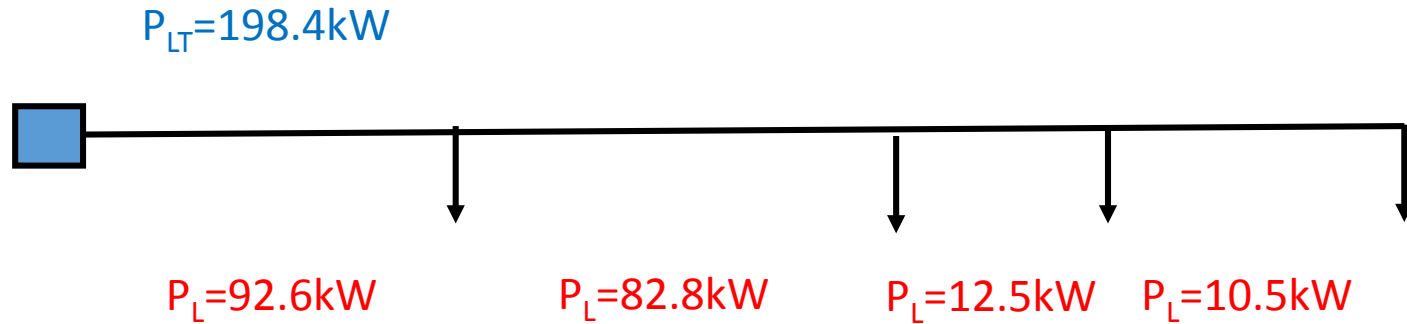
- نصب خازن موجب افزایش ولتاژ به میزان زیر می شود:
- از آنجایی که نصب خازن موجب بهبود ولتاژ به میزان ۱.۵۸ درصد می شود لذا ولتاژ در محدوده مجاز است.
- تا زمانی که افزایش ولتاژ ناشی از نصب خازن بیش از ۵ درصد نباشد، نیازی به محاسبه پروفیل ولتاژ خط قبل و بعد از نصب خازن نیست.

# حل مثال – ادامه

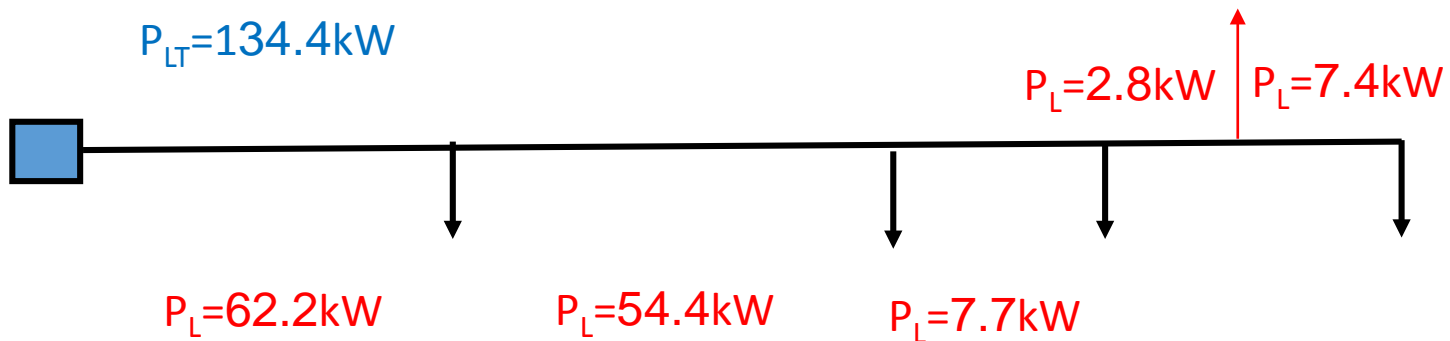
• پروفیل ولتاژ قبل و بعد از نصب خازن



# حل مثال – ادامه



- تلفات توان سیستم قبل از خازن

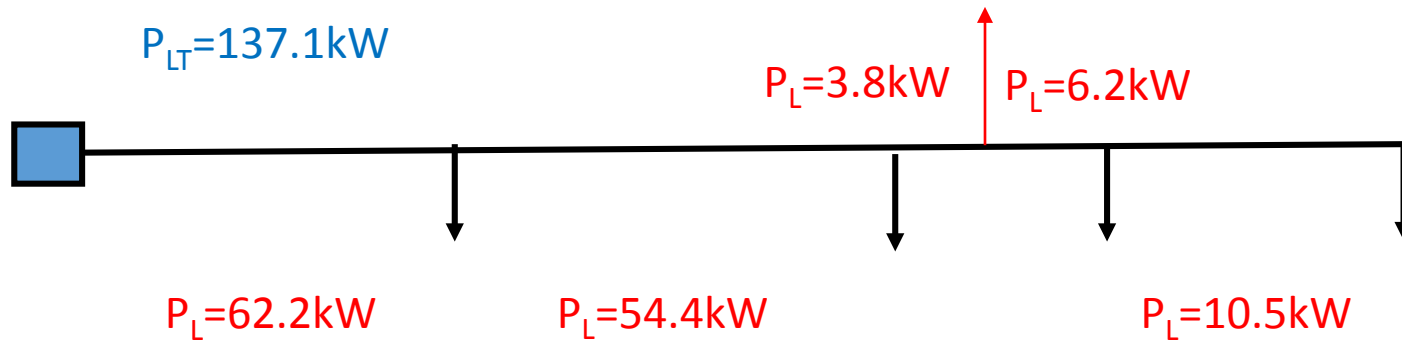


- تلفات توان بعد از خازن

- لازم به ذکر است تلفات زمانی کمینه است که خازن در انتهای سگشن منتخب قرار گیرد.

# حل مثال – ادامه

- تلفات توان: اگر خازن در سگشنی غیر از سگشن منتخب قرار دهیم مثلا سگشن ۳، تلفات برابر است با:



# فرایند ریاضی تعیین محل خازن

- در این روش از یک بهینه سازی کلاسیک برای تعیین محل بهینه خازن استفاده می شود.
- هدف بهینه سازی، کمینه کردن تلفات می باشد.
- $P_{LS}=RI^2=R(I\cos\varphi)^2+R(I\sin\varphi)^2$
- تلفات از دو جز تشکیل شده است،
  - بخش مربوط به جریان اکتیو
  - بخش مربوط به جریان راکتیو
- در ادامه نشان خواهیم داد که بخش مربوط به جریان اکتیو، از نصب خازن چندان متاثر نخواهد شد.



# تأثير نصب خازن بر روى تلفات

$$I^2R = (I \cos \phi)^2R + (I \sin \phi)^2R.$$

- تلفات سيستم قبل از نصب خازن

- تلفات بعد از نصب خازن با جريان  $I_c$ :

- خازن موجب تغيير جريان راكتيو و به الطبع تغيير جريان كل به ميزان  $I_1$  مى شود ولى جريان اکتیو را تغيير نمى دهد. لذا داريم

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

- اختلاف تلفات دو حالت

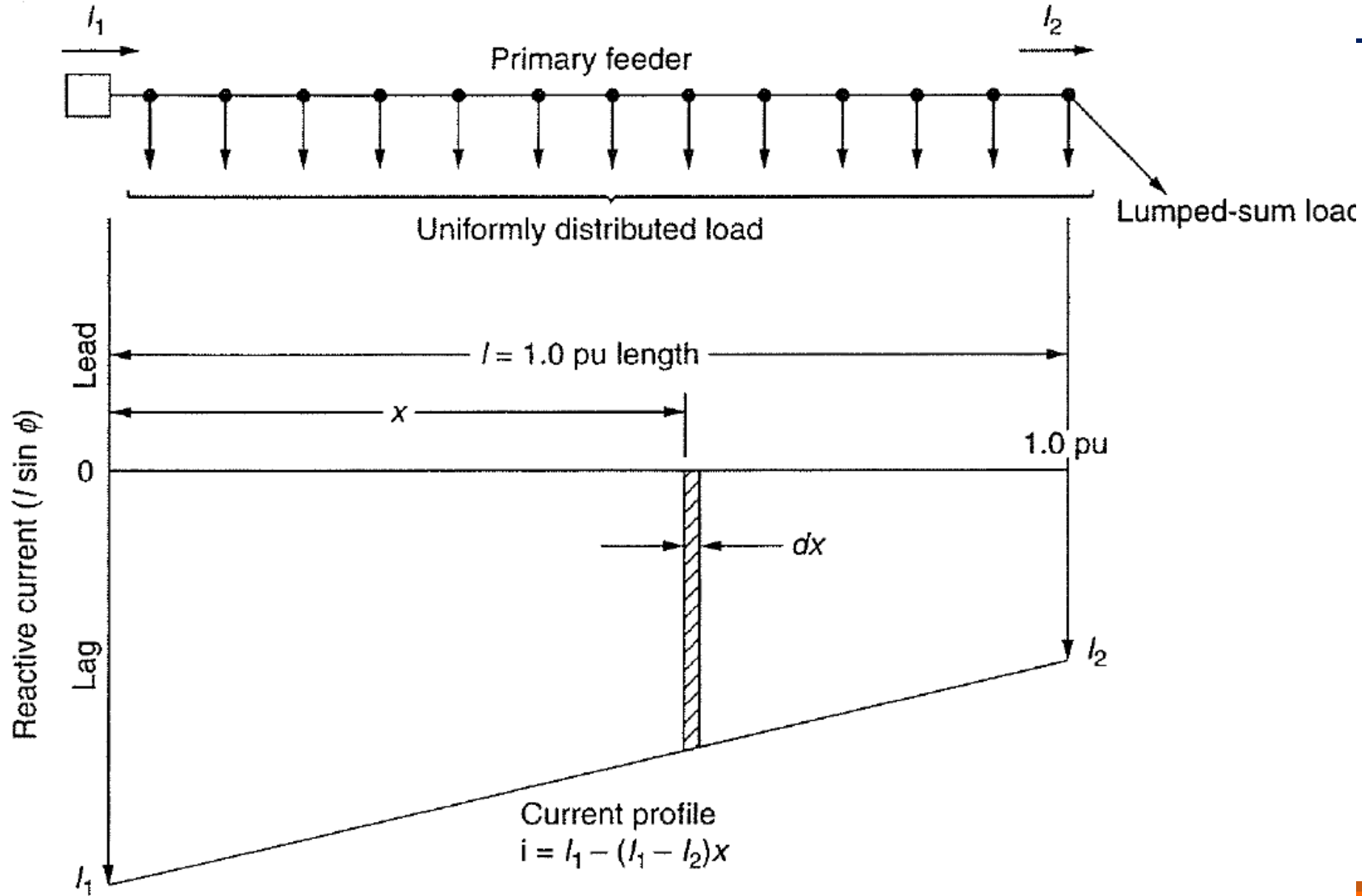
$$\Delta P_{LS} = I^2R - I_1^2R$$

- با جايگذاري داريم

$$\Delta P_{LS} = 2(I \sin \phi) I_c R - I_c^2 R.$$

- از اين معادله مشخص است كه تنها مولفه جريان راكتيو بار در معادله کاهش تلفات ظاهر مى شود.

# معادله تلفات فیدر



- فیدری مشابه شکل زیر را فرض کنید که از دو نوع بار تشکیل شده است:

- توزیع یکنواخت بار در طول فیدر
- بار متمرکز در انتهای فیدر

# معادله تلفات مولفه راکتیو فیدر – ادامه

• در فیدر شکل قبل، جریان در هر قسمت از فیدر تابع فاصله از پست است.

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

• مثلاً در نقطه X از ابتدای فیدر، جریان برابر است با:

• تلفات در قسمت dx از شکل برابر است با

$$dP_{LS} = 3 \underbrace{[I_1 - (I_1 - I_2)x]^2}_{\text{جریان}} \underbrace{R}_{\text{مقاومت}} dx.$$

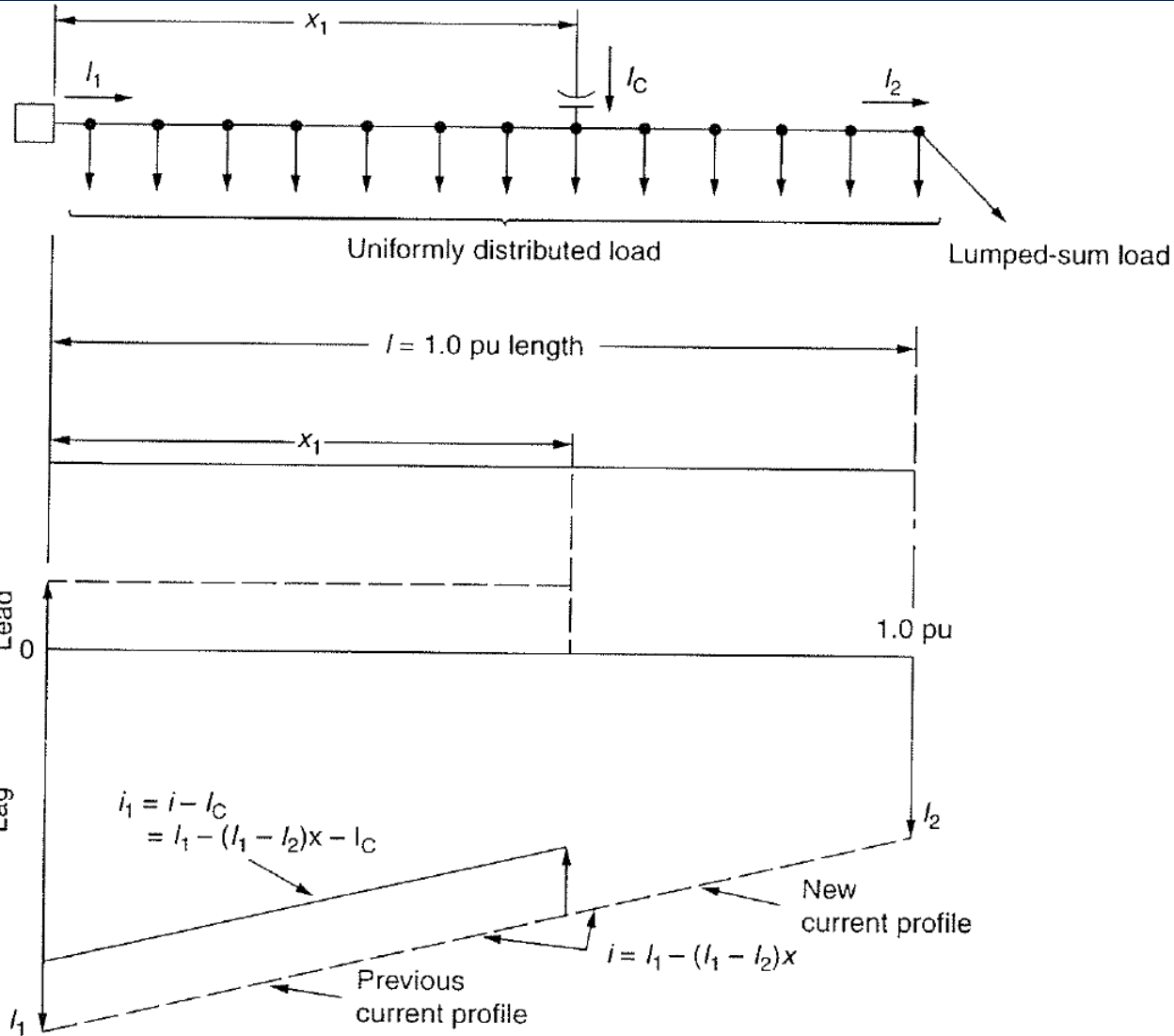
• لذا تلفات راکتیو کل فیدر قبل از اتصال خازن

•  $I_1$ : جریان راکتیو ابتدای فیدر

•  $I_2$ : جریان راکتیو انتهای فیدر

$$\begin{aligned} P_{LS} &= \int_{x=0}^{1.0} dP_{LS} = 3 \int_{x=0}^{1.0} [I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx \\ &= (I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2) R \end{aligned}$$

# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن - تک بانک خازن



- فیدری مشابه شکل زیر را فرض کنید. نصب بانک خازنی در  $X_1$  پروفیل جریان راکتیو را در فیدر تغییر می دهد.
- جریان راکتیو بعد از نصب خازن، از ابتدای فیدر تا محل نصب خازن ( $X_1$ ) به اندازه  $I_c$  کاهش می یابد.
- جریان راکتیو بعد از نصب خازن، از نقطه  $X_1$  تا انتهای فیدر تغییری نمی کند.

# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن – تک بانک خازن

- معادله تلفات بعد از نصب خازن در نقطه  $X_1$  برابر است با:

$$P'_{LS} = 3 \int_{x=0}^{x_1} [I_1 - (I_1 - I_2)x - I_c]^2 R dx + 3 \int_{x=x_1}^{1.0} [I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx$$

- خروجی انتگرال برابر است با:

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

- پریونیت کاهش تلفات بعد از نصب خازن برابر است با:

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

# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن – تک بانک خازن

• با جایگذاری داریم:

$$\Delta P_{LS} = \frac{-3x_1 \left[ (x_1 - 2)I_1 I_c - x_1 I_2 I_c + I_c^2 \right] R}{\left( I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2 \right) R}$$

• با بازنویسی داریم:

$$\Delta P_{LS} = \frac{3x_1}{1 + (I_2/I_1) + (I_2/I_1)^2} \left[ (2 - x_1) \left( \frac{I_c}{I_1} \right) + x_1 \left( \frac{I_2}{I_1} \right) \left( \frac{I_c}{I_1} \right) - \left( \frac{I_c}{I_1} \right)^2 \right]$$

• اگر ضریب جبران C را به صورت زیر تعریف کنیم (نسبه جریان خازن به جریان ابتدای خط):

$$c = \frac{\text{ckVA of capacitor installed}}{\text{total reactive load}}$$



$$c = \frac{I_c}{I_1}$$

# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن – تک بانک خازن

- و اگر پارامتر  $\lambda$  را به صورت زیر تعریف کنیم داریم (نسبت جریان انتهای خط به جریان ابتدای خط):

$$\lambda = \frac{\text{Reactive current at the end of the line segment}}{\text{Reactive current at the beginning of the line segment}} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{I_2}{I_1}$$

- $\lambda=0$  برای توزیع کاملاً یکنواخت بار و  $\lambda=1$  برای بار متمرکز در انتهای خط

- با جایگذاری  $c$  و  $\lambda$  در معادله کاهش تلفات داریم:

$$\Delta P_{LS} = \frac{3x_1}{1 + \lambda + \lambda^2} \left[ (2 - x_1)c + x_1\lambda c - c^2 \right]$$

- که در آن  $x_1$  فاصله نصب خازن از ابتدای فیدر بر حسب پریونیت است.

- اگر پارامتر  $\alpha$  را به صورت زیر تعریف کنیم:

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

# کاهش تلفات ناشی از جایابی خازن – تک بانک خازن

- با جایگذاری داریم:

$$\Delta P_{LS} = 3\alpha c x_1 [(2 - x_1) + \lambda x_1 - c].$$

- به ازای مقدار معین  $c$  و  $\lambda$  می توان با مشتق گیری از معادله فوق محل نصب خازن را تعیین کرد.

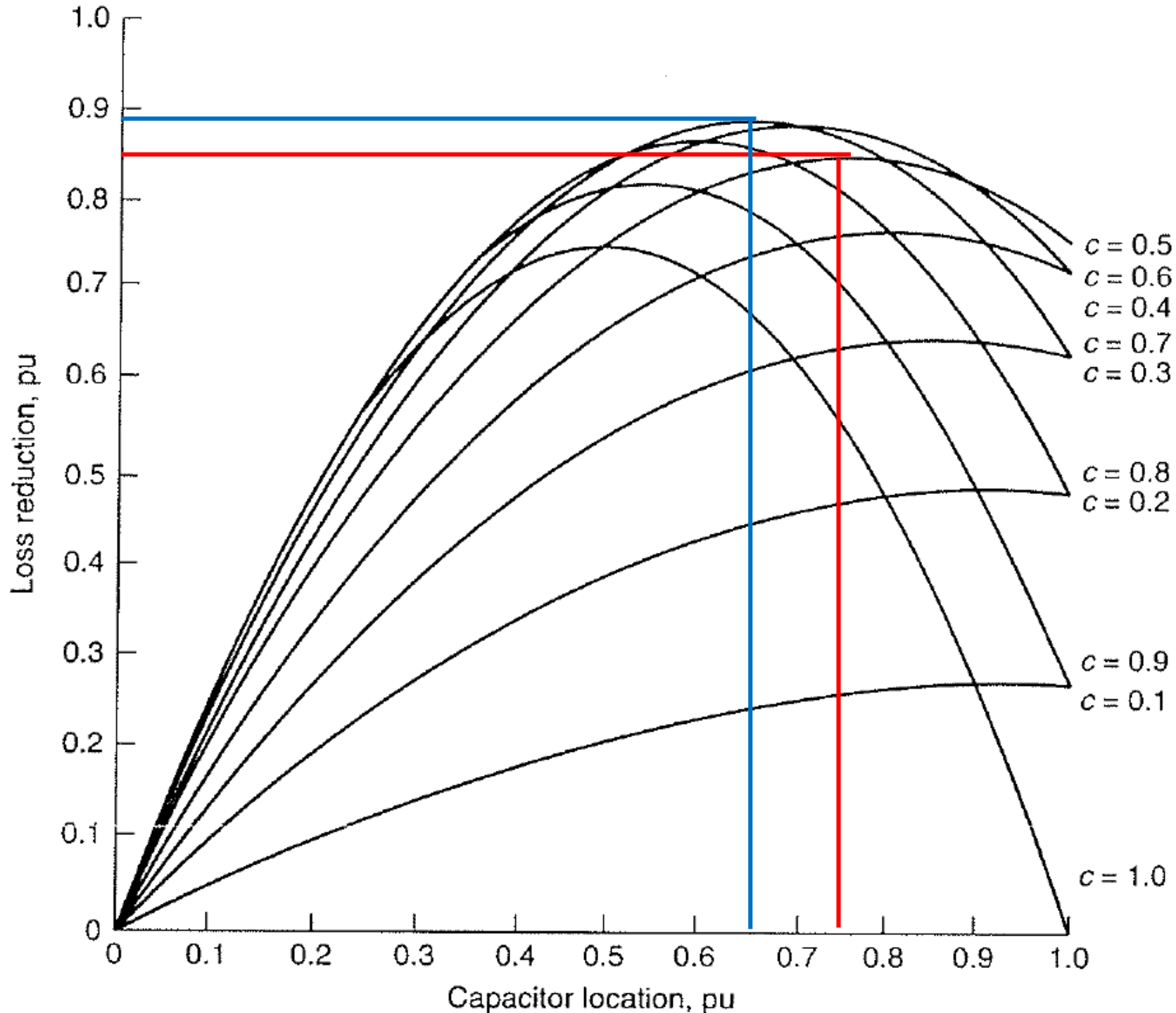
- $$\frac{\partial \Delta P_{LS}}{\partial x_1} = 3\alpha c (2 - x_1 + \lambda x_1 - c - x_1 + \lambda x_1) = 0$$

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

- با استفاده از معادله کاهش تلفات، منحنی های مختلف براساس ضریب جبران مختلف و  $\lambda$  های مختلف رسم می کنند و از

روی آن می توانند بهترین اندازه خازن و مناسبترین نقطه نصب خازن را مشخص کرد به طوریکه تلفات حداقل شود.

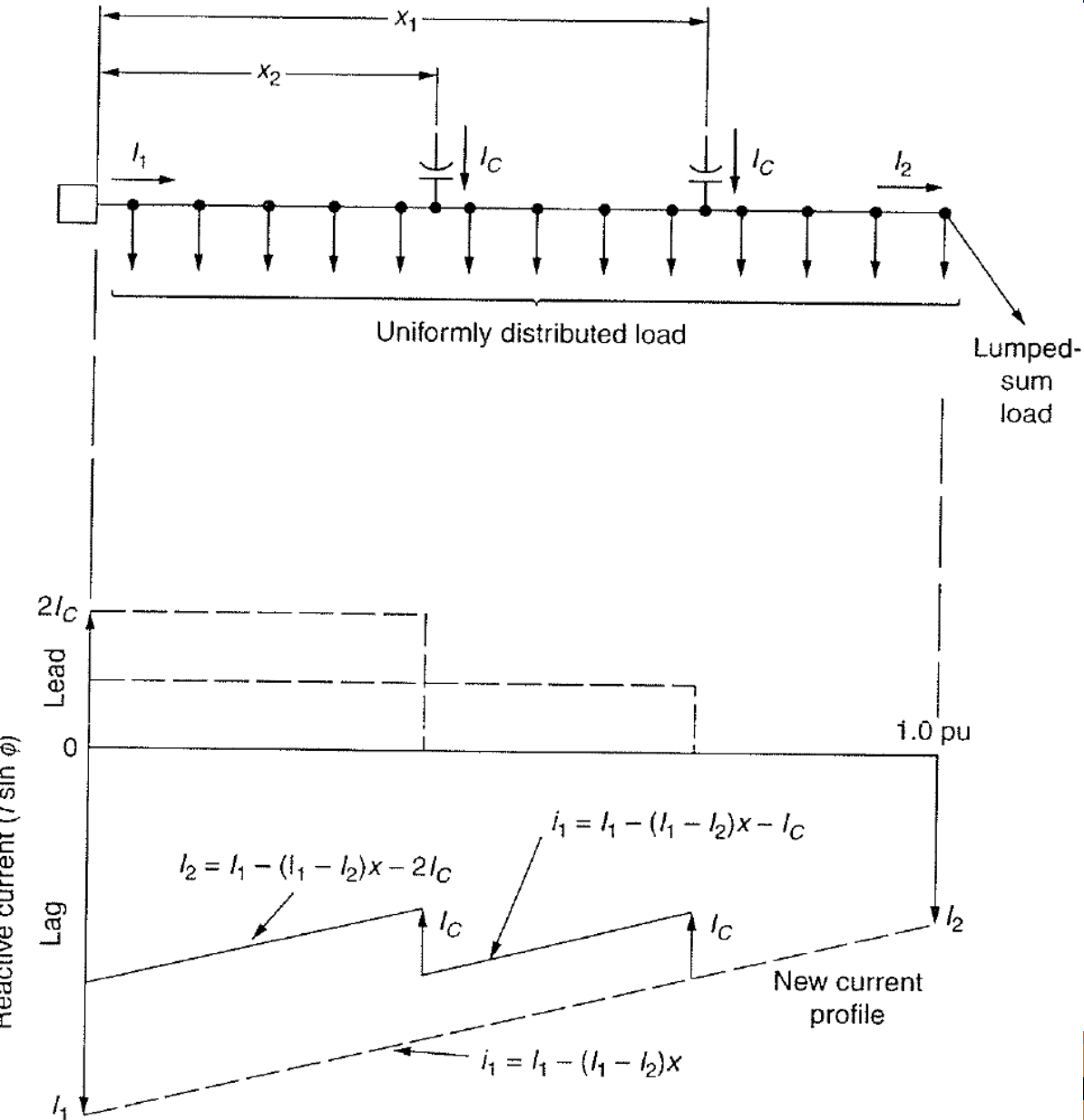




- منحنی کاهش تلفات بر حسب محل خازن برای  $C$  های مختلف در یک فیدر با  $\lambda=0$
- به عنوان نمونه، برای  $c=0.5$  بهترین محل نصب خازن  $0.75pu$  از ابتدای فیدر می باشد که کاهش تلفاتی معادل  $0.85pu$  خواهد داشت.
- از روی منحنی، کمترین تلفات زمانی ایجاد خواهد شد که  $c=0.7$  و  $x1=0.65$  باشد که کاهش تلفات برابر  $0.89pu$  می شود.

# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن - دو بانک خازن

- اگر فرض شود که دو خازن مساوی در نقاط  $X_1$  و  $X_2$  نصب شود، پروفیل جریان راکتیو در طول فیدر به صورت شکل زیر تغییر می کند



# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن – دو بانک خازن

- معادله تلفات بعد از نصب خازنها

$$P'_{LS} = 3 \int_{x=0}^{x_1} [I_1 - (I_1 - I_2)x - 2I_c]^2 R dx + 3 \int_{x=x_1}^{x_2} [I_1 - (I_1 - I_2)x - I_c]^2 R dx + 3 \int_{x=x_2}^{1.0} [I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R dx.$$

- با انتگرال گیری داریم:

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

- که در آن  $c$  ضریب جبران هر خازن (نه کل خازنها) است.

# کاهش تلفات ناشی از جابجایی خازن-N بانک خازن

- اگر  $n$  خازن مساوی در فیدر نصب شود، معادله کاهش تلفات برابر خواهد بود با:

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



# محل بهینه خازن

- محل بهینه خازن  $i$ ام از طریق مشتق اول نسبت به  $X_i$  و برابر صفر قرار دادن تعیین می شود:

$$x_{i,opt} = \frac{1}{1-\lambda} - \frac{(2i-1)c}{2(1-\lambda)}$$

- با قراردادن معادله فوق در معادله کاهش تلفات، کاهش تلفات بهینه تعیین می شود:

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

- معادله فوق یک سری زمانی نامحدود است که می توان به صورت زیر ساده شود

# محل بهینه خازن

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

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

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

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

• با جایگذاری و ساده سازی داریم:

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

- ضریب بهینه  $C$  در هر نقطه با مشتق گیری معادله فوق از  $C$  و برابر صفر قرار دادن تعیین می شود و داریم:

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

- به این معادله، قاعده  $2/(2n+1)$  نیز گویند.

- به عنوان مثال، برای  $n=1$ ، ضریب جبران  $c=2/3$  می شود و نقطه بهینه برابر خواهد بود:

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

- و کاهش تلفات بهینه برابر خواهد بود:

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



- و برای  $\lambda=0$  و  $\alpha=1$  داریم

$$\Delta P_{LS, opt} = \frac{8}{9} \text{ pu} \quad x_1 = \frac{2}{3} \text{ pu} \quad c = \frac{2}{3} \text{ pu.}$$