

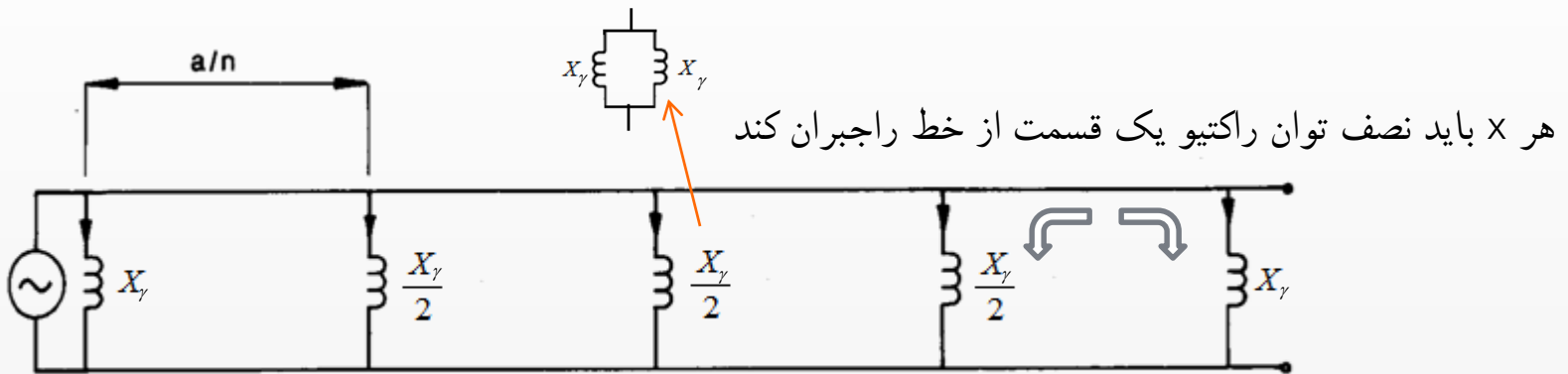
کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

جبران سازی خط (Line Compensation)



کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

تقسیم خط به n قسمت و قرار دادن راکتور در نقاط تقسیم:



با توجه به رابطه $X_\gamma = \frac{z_0 \sin(\theta)}{1 - \cos(\theta)}$ برای جبران سازی شنت متمرکز در انتهای خط شعاعی ،

اگر خط را به n قسمت تقسیم کنیم:

$$X_\gamma = z_0 \frac{\sin\left(\frac{\theta}{n}\right)}{1 - \cos\left(\frac{\theta}{n}\right)}, \quad K_{sh} = \frac{1}{\frac{X_\gamma}{\frac{B_c}{2n}}} = \frac{B_\gamma}{\frac{B_c}{2n}}$$

$$K_{sh} = \frac{\left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{n}\right)\right) \cdot 2n}{z_0 \sin\left(\frac{\theta}{n}\right) \cdot \omega c a} \rightarrow K_{sh} = \frac{\left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{n}\right)\right) \cdot 2n}{\sin\left(\frac{\theta}{n}\right) \cdot \sqrt{\frac{\ell}{c}} \omega c a} \xrightarrow{a\omega\sqrt{\ell c} = \theta} K_{sh} = \frac{2n \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\theta}{n}\right)\right)}{\theta \cdot \sin\left(\frac{\theta}{n}\right)}$$

کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

تقسیم خط به n قسمت و قرار دادن راکتور در نقاط تقسیم:

$$n \rightarrow \infty \Rightarrow K_{sh} \rightarrow 1$$

با در نظر گرفتن بی نهایت راکتور موازی K_{sh} به سمت یک میل می کند و یک پروفیل ولتاژ تخت در مدار خواهیم داشت.

مثال:

$$n = 3, \quad a = 600 \text{ mile}$$

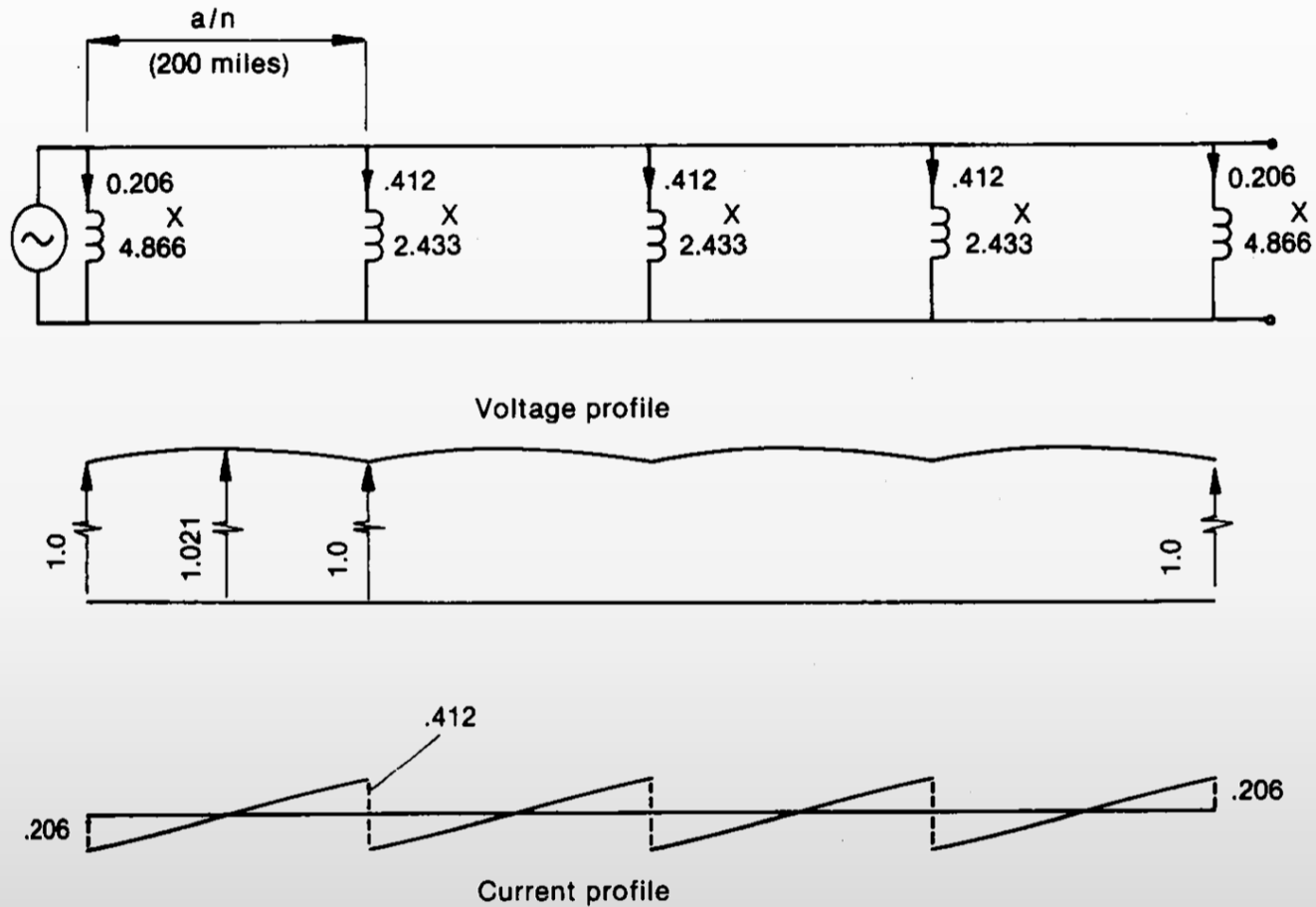
$$\Rightarrow \frac{\theta}{n} = \frac{69.7^\circ}{3} = 23.2^\circ$$

$$\Rightarrow K_{sh} = \frac{2 \times 3 \times (1 - \cos(23.2^\circ))}{\left(\frac{\pi}{180^\circ} 69.7^\circ\right) \times \sin(23.2^\circ)} = 1.014 \approx 1$$

یعنی در یک خط ۶۰۰ مایلی با تقسیم کردن خط به سه قسمت و قرار دادن راکتورها به پروفیل ولتاژ خوبی با توجه به K_{sh} نزدیک به یک دست یافته ایم.

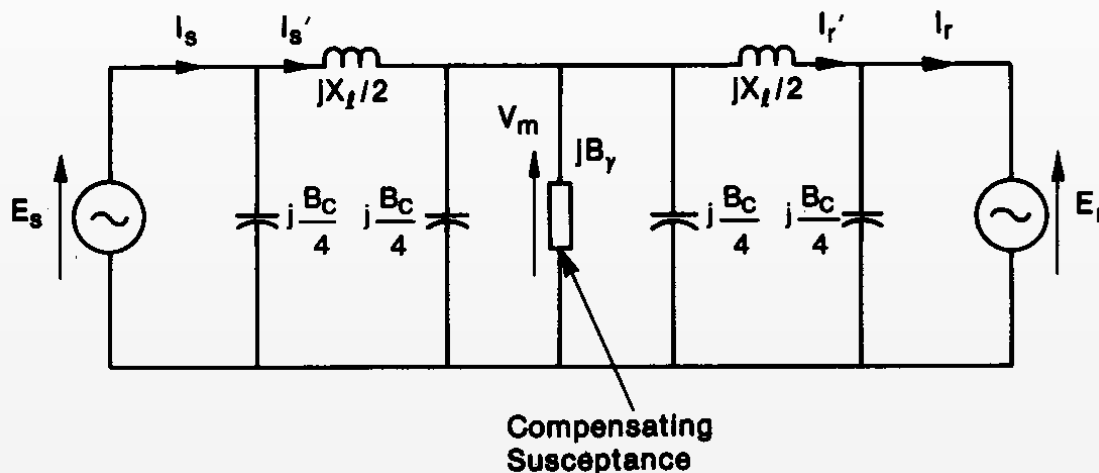
کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

تقسیم خط به n قسمت و قرار دادن راکتور در نقاط تقسیم:



جبران‌ساز موازی در وسط خط متقارن

برای هر نیم خط مدل π آنرا جایگزین می‌کنیم:



X_ℓ : راکتانس سری کل خط

B_c : سوسپتانس موازی کل خط

K_m را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

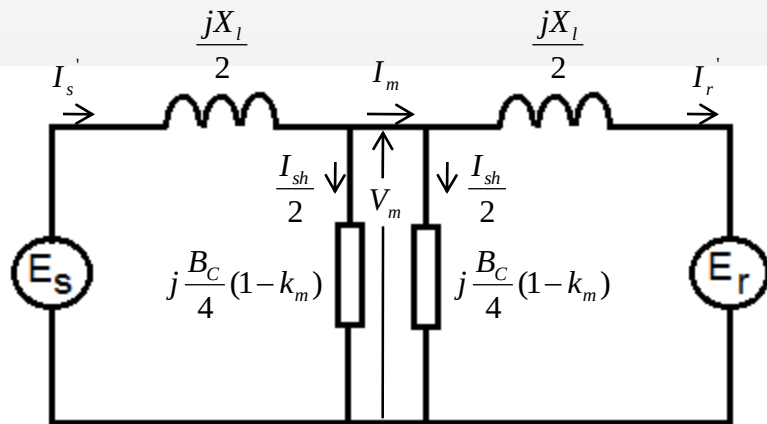
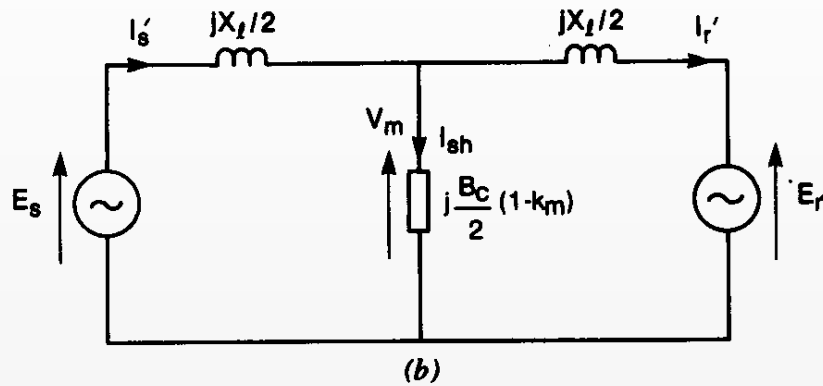
$$K_m = \frac{B_\gamma}{\underbrace{\frac{B_c}{4} + \frac{B_c}{4}}_{\text{خازن وسط خط}}} = \frac{2B_\gamma}{B_c}$$

خازن وسط خط

$K_m > 1$: جبران‌ساز اندوکتیو

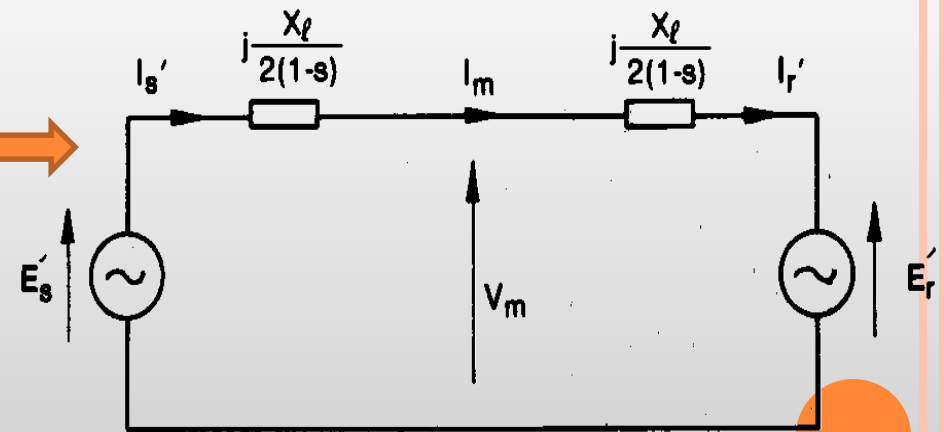
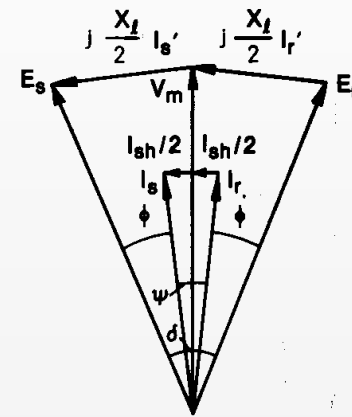
$K_m < 1$: جبران‌ساز کاپاسیتیو

مدار قبلی را بصورت زیر ساده می کنیم:

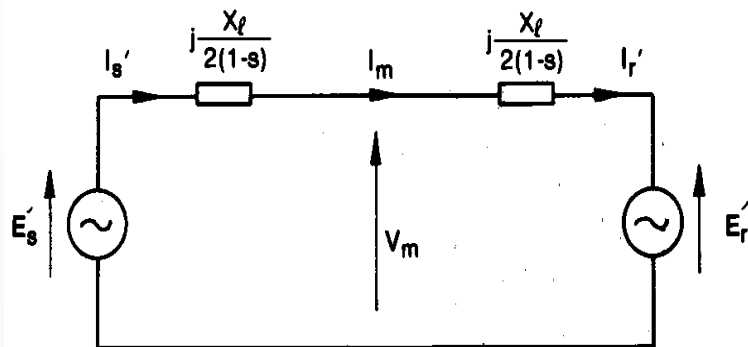


$$E'_s = \frac{E_s}{1-s}$$

$$E'_r = \frac{E_r}{1-s}$$



$$s = \frac{X_L}{2} \cdot \frac{B_c}{4} \cdot (1-K_m)$$



توان عبوری از خط با توجه به شکل رو بر بصورت زیر است:

$$P = \frac{|E_s'| \cdot |E_r'|}{X_L (1-s)} \sin(\delta)$$

همفازند E_r', E_r
 $\Rightarrow$
 همفازند E_s', E_s

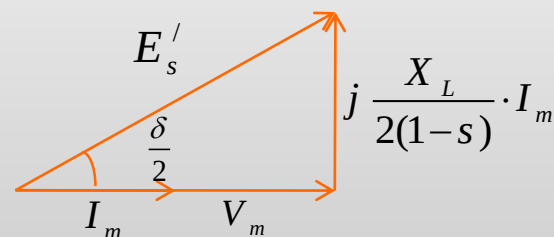
$$P = \frac{|E_s| \cdot |E_r|}{X_L (1-s)} \sin(\delta)$$

حال اگر $|E_s| = |E_r| = E$

$$P = \frac{E^2}{X_L \cdot (1-s)}$$

باتوجه به دیاگرام برداری ولتاژ وسط خط برابر است با:

$$V_m = E_s' \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{E_s}{1-s} \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$



برای یافتن توان راکتیو در ابتدا و انتهای خط ابتدا جریان و ولتاژهای ابتدا خط را می یابیم:

$$\begin{cases} I_s = I'_s + E_s \left(j \frac{B_c}{4} \right) \\ E_s = V_m + j \frac{X_L}{2} \cdot I'_s \\ I'_s = I_m + V_m \left[j \frac{B_c}{4} (1 - K_m) \right] \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_s = V_m + j \frac{X_L}{2} \cdot \left[I_m + \frac{B_c}{4} \cdot (1 - K_m) \cdot V_m \right] \\ I_s = I_m \left(1 - \frac{B_c X_L}{8} \right) + j V_m \frac{B_c}{4} \cdot (2 - K_m - s) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} E_s = V_m \left[1 - \frac{B_c \cdot X_L}{8} (1 - K_m) \right] + j \frac{X_L}{2} \cdot I_m \\ I_s = I_m \left(1 - \frac{B_c X_L}{8} \right) + j V_m \frac{B_c}{4} \cdot (2 - K_m - s) \end{cases}$$

بنابراین:

$$Q_s = \text{Im } g(E_s I_s^*)$$

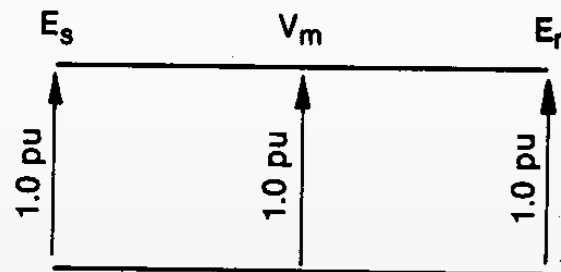
$$\Rightarrow Q_s = \frac{P^2}{V_m^2} \cdot \frac{X_L}{2} \left(1 - \frac{B_c X_L}{8} \right) - V_m^2 \cdot \frac{B_c}{4} (1 - s) \cdot (2 - K_m - s) = -Q_r$$



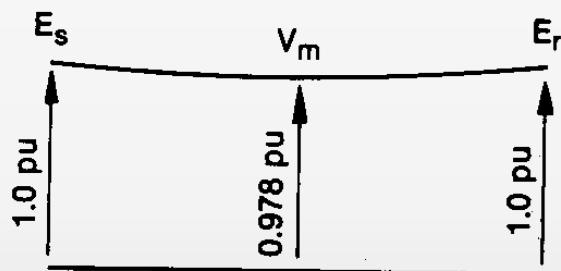
کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

پروفیل ولتاژ خط متقارن با جبران ساز موازی در وسط خط

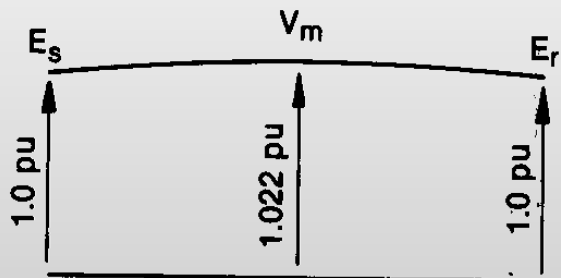
(a) No load
Reactor connected



(b) $P=P_0$
Reactor connected

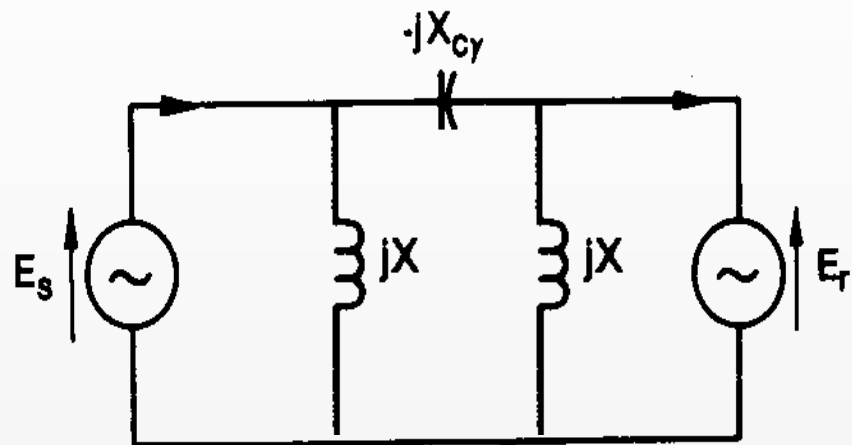


(c) $P=P_0$
Capacitor connected



کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

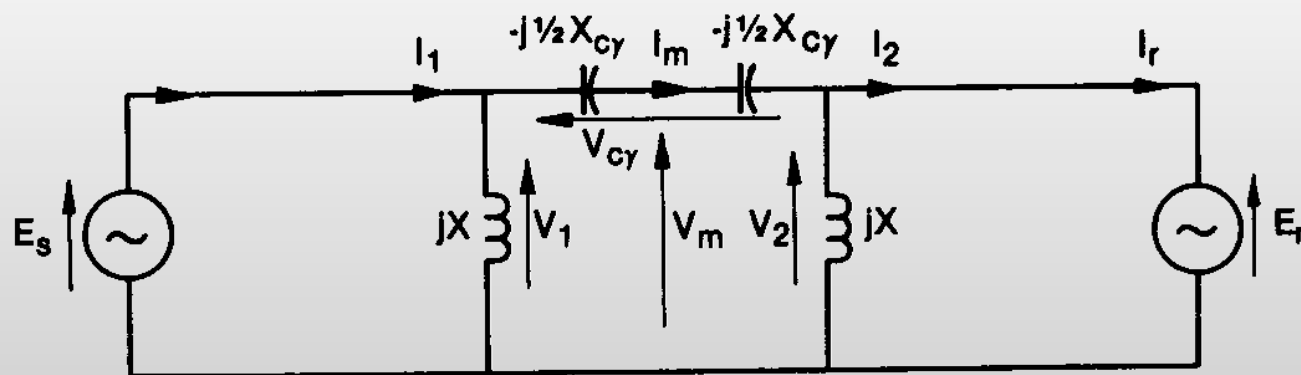
جبران ساز سری متمرکز در وسط خط

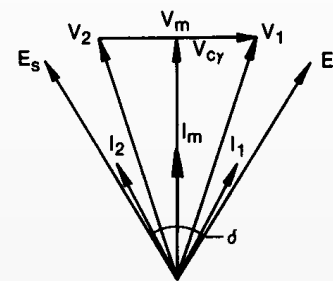
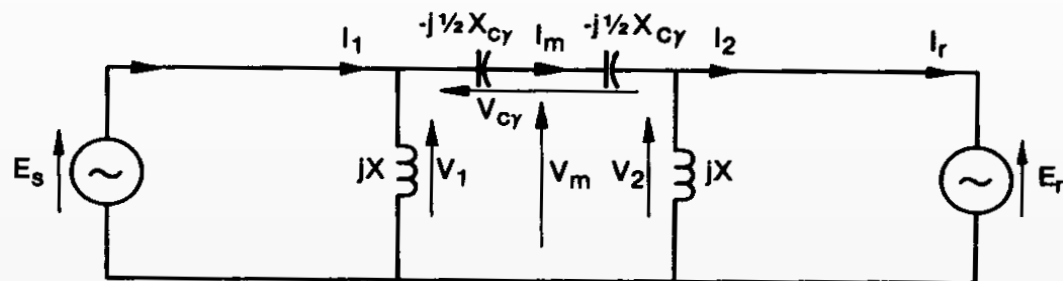


-از خازن سری برای تنظیم بار در خطوط موازی نیز استفاده می شود ، ولی در اینجا هدف جبران سازی است.

-برای اینکه توان راکتیو تولیدی توسط خازن به ماشین های دو طرف اعمال نشود، از دو راکتور شنت در دو سر خازن استفاده می کنند.

-برای تحلیل مدار و بدست آوردن ولتاژ و جریان نقطه ی وسط، مدار را بصورت زیر در نظر می گیریم:





$$\begin{cases} V_1 = V_m - j \frac{X_{C_y}}{2} \cdot I_m \\ I_1 = I_m - j \frac{V_1}{X} \end{cases}$$

و

$$\begin{cases} E_s = V_1 \cos(\frac{\theta}{2}) + j z_0 I_1 \sin(\frac{\theta}{2}) \\ I_s = I_1 \cos(\frac{\theta}{2}) + j \frac{V_1}{z_0} \sin(\frac{\theta}{2}) \end{cases}$$



$$\begin{cases} E_s = (V_m - j \frac{X_{C_y}}{2} I_m) \cos(\frac{\theta}{2}) + j z_0 \sin(\frac{\theta}{2}) \left(I_m - j \frac{1}{X} (V_m - j \frac{X_{C_y}}{2} I_m) \right) \\ I_s = \left(I_m - j \frac{1}{X} (V_m - j \frac{X_{C_y}}{2} I_m) \right) \cos(\frac{\theta}{2}) + j \frac{1}{z_0} (V_m - j \frac{X_{C_y}}{2} I_m) \sin(\frac{\theta}{2}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_s = A + jB \\ I_s = C + jD \end{cases}$$



$$E_s = |E_s| \left(\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + j \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right)$$

$$\begin{cases} |E_s| \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = A \longrightarrow V_m = \frac{|E_s| \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{z_0}{X} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \\ |E_s| \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = B \longrightarrow P = \frac{|E_s| \cdot V_m \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{z_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{X_{C_\gamma}}{2} \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{z_0}{X} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)} \end{cases}$$

با استفاده از دو رابطه ی بالا و در نظر گرفتن $|E_s| = |E_r|$:

$$\Rightarrow P = \frac{|E_s| \cdot |E_r|}{\left[z_0 \sin(\theta) - \frac{X_{C_\gamma}}{2} (1 + \cos(\theta) \mu_x) \right] \cdot \mu_x} \cdot \sin(\delta)$$

$$Q_s = \text{Im } g(E_s I_s^*)$$

$$Q_s = -Q_r = \frac{P_0}{2} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{V_0}{V_m}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{X_{C_\gamma}}{2z_0} (\mu'_x - \mu_x) - (\mu'_x + \mu_x) \cdot \cos(\theta) \right) + \left(1 - \left(\frac{X_{C_\gamma}}{2z_0}\right)^2 \mu'_x \mu_x \right) \cdot \sin(\theta) \right] - \frac{P_0}{2} \cdot \left(\frac{V_m}{V_0}\right)^2 \mu'_x \mu_x \sin(\theta)$$

$$\mu_x = 1 + \frac{z_0}{X} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \mu'_x = 1 - \frac{z_0}{X} \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

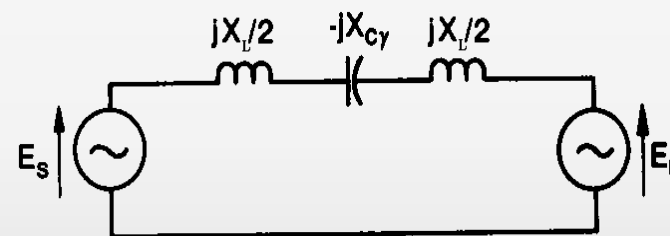


جبران ساز سری متمرکز در وسط خط

$$\begin{cases} V_{C_\gamma} = V_1 - V_2 \\ V_1 = V_m - j \frac{X_{C_\gamma}}{2} \cdot I_m \\ V_2 = V_m + j \frac{X_{C_\gamma}}{2} \cdot I_m \end{cases} \Rightarrow V_{C_\gamma} = -jX_{C_\gamma} I_m \quad I_m = \frac{P}{V_m} \Rightarrow V_{C_\gamma} = -jX_{C_\gamma} \frac{P}{V_m}$$

اگر از کاپاسیته ی خط صرف نظر کنیم، مدار بصورت زیر در می آید :

$$c = 0 \Rightarrow \begin{cases} \theta = a\omega\sqrt{\ell c} = 0 \\ z_0 \sin(\theta) \cong z_0 \cdot \theta = \sqrt{\frac{\ell}{c}} \cdot a\omega\sqrt{\ell c} = a\omega\ell = X_L \end{cases}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} \sin(\theta) = 0 \\ \cos(\theta) = 1 \\ z_0 \sin(\theta) \cong X_L \end{cases} \Rightarrow P = \frac{|E_s| \cdot |E_r|}{X_L - X_{C_\gamma}} \cdot \sin(\delta) \quad K_{se} = \frac{X_{C_\gamma}}{X_L} \Rightarrow P = \frac{|E_s| \cdot |E_r|}{X_L (1 - K_{se})} \cdot \sin(\delta)$$



مثال: خط ۴۰۰ مایلی :

$$\theta = 46.5^\circ = 0.8108 \text{ rad}$$

$$X_p^{p.u} = \frac{X_L}{z_0} = \frac{a\omega\ell}{\sqrt{\frac{\ell}{c}}} = a\omega\sqrt{\ell c} = \theta$$

$$B_c^{p.u} = \frac{B_c}{\frac{1}{z_0}} = z_0 B_c = \sqrt{\frac{\ell}{c}} a\omega c = a\omega\sqrt{\ell c} = \theta$$

قبل از جبرانسازی:

$$V_m = \frac{1}{\cos(\frac{\theta}{2})} = \frac{1}{\cos(23.2^\circ)} = 1.08 \quad (\text{بی باری})$$

$$P_{\max} = \frac{P_0}{\sin(\theta)} = \frac{P_0}{\sin(46.5^\circ)} = 1.38 P_0 = 1.38$$

$$Q_s = -P_0 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = -P_0 \tan(23.2^\circ) = -0.42 P_0 = -0.42$$



مثال: خط ۴۰۰ مایلی :

اگر جبرانسازی سری با $K_{se} = 0.5$ انجام دهیم ولی راکتور موازی در وسط خط استفاده

نکنیم ($X = \infty$):

$$\mu'_x = \mu_x = 1$$

$$V_m = \frac{|E_s| \cdot \cos(\frac{\delta}{2})}{\cos(\frac{\theta}{2}) + \frac{z_0}{X} \sin(\frac{\theta}{2})} = \frac{1}{\cos(\frac{\theta}{2})} = \frac{1}{\cos(23.2^\circ)} = 1.088 pu \quad |E_s| = |E_r| = V_0 = 1^{pu} \text{ بی باری و } \delta = 46.5^\circ$$

$$K_{se} = 0.5 \Rightarrow X_{C_\gamma} = \frac{X_L}{2} = \frac{\theta}{2} = \frac{0.8108}{2} = 0.405$$

$$P_{\max} = \frac{|E_s| \cdot |E_r|}{\left[z_0 \sin(\theta) - \frac{X_{C_\gamma}}{2} (1 + \cos(\theta) \mu_x) \right] \cdot \mu_x} = \frac{1}{\left[\sin(46.5^\circ) - \frac{0.405}{2} (1 + \cos(23.2^\circ)) \right]} = 2.61 pu$$

$$Q_s = \left[0.207 \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{V_0}{V_m} \right)^2 - 0.3624 \left(\frac{V_m}{V_0} \right)^2 \right] P_0$$

این در حالی است که در جبرانسازی سری توزیع شده داشتیم:

$$P_{\max} = \frac{1}{\sqrt{1-K_{se}} \sin(\theta \sqrt{1-K_{se}})} = \frac{1}{\sqrt{1-0.5} \sin(46.5^\circ \times \sqrt{1-0.5})} = 2.6 pu$$

