

کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

جبران سازی خط (Line Compensation)



Classification of Compensators by Function and Type

Function	Passive	Active
Surge-impedance compensation (Virtual- Z_0 compensation) voltage control, reactive power management	Shunt reactors (linear or nonlinear) Shunt capacitors	Synchronous machines Synchronous condensers Saturated-reactor compensators Thyristor-switched capacitors Thyristor-controlled reactors
Line-length compensation (Virtual- θ compensation) voltage control, reactive power management, stability improvement	Series capacitors	—
Compensation by sectioning Dynamic shunt compensation, stability improvement on longer lines	—	Synchronous condensers Saturated-reactor compensators Thyristor-switched capacitors Thyristor-controlled reactors



جبرانسازی خطوط انتقال:

اهداف:

۱- پروفیل ولتاژ نسبتاً تخت در تحت بارهای مختلف



جبرانسازی امپدانس مشخصه (Z_0)

۲- حفظ پایداری خطوط بلند



اصلاح طول الکتریکی خط (θ)



۱- اصلاح امپدانس مشخصه

$$\begin{aligned} z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} \\ P_0 &= \frac{V_0^2}{z_0} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} z'_0 &= \sqrt{\frac{L'}{C'}} \\ P'_0 &= \frac{V_0^2}{z'_0} \end{aligned}$$

حال اگر $P = P_0$ باشد، پروفیل ولتاژ تخت بدست می آید.

۲- اصلاح طول الکتریکی خط :

$$\theta = a\omega\sqrt{LC} \quad \Rightarrow \quad \theta' = a\omega\sqrt{L'C'}$$

$$L, C \downarrow \quad \Rightarrow \quad \theta \downarrow$$



انواع جبرانسازی:

– جبرانسازی موازی (**shunt**)

– خازن موازی

– راکتور موازی

– جبرانسازی سری (**series**)

– خازن سری



جبرانسازی توزیع شده ی یکنواخت:

-جبرانسازی موازی (shunt)

- جبرانسازی سری (series)



جبران سازی موازی (SHUNT)

۱- اگر اندوکتانس L_γ را در واحد طول خط بصورت توزیع شده و موازی با آن قرار دهیم:

$$y' = j\left(\omega c - \frac{1}{\omega L_\gamma}\right) = j\omega c\left(1 - \frac{1}{\omega^2 c L_\gamma}\right)$$

$$\frac{1}{\omega L_\gamma} = K_{sh} \quad \Rightarrow \quad y' = j\omega c(1 - K_{sh}) = y(1 - K_{sh})$$

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{Z}{y'}} = \sqrt{\frac{Z}{y(1 - K_{sh})}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - K_{sh}}}$$

$$\theta' = \theta \sqrt{1 - K_{sh}}$$



جبران سازی موازی (SHUNT)

۱- اگر خازن $C_{\gamma sh}$ را در واحد طول خط بصورت توزیع شده و موازی با آن قرار دهیم:

$$y' = j(\omega c + \omega c_{\gamma sh}) = j\omega c \left(1 + \frac{C_{\gamma sh}}{c}\right)$$

$$\frac{C_{\gamma sh}}{c} = -K_{sh} \quad \Rightarrow \quad y' = j\omega c (1 - K_{sh}) = y(1 - K_{sh})$$

$$Z'_0 = \sqrt{\frac{Z}{y'}} = \sqrt{\frac{Z}{y(1 - K_{sh})}} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - K_{sh}}}$$

$$\theta' = \theta \sqrt{1 - K_{sh}}$$



جبران سازی سری (SERIES)

- اگر خازن $C_{\gamma se}$ را در واحد طول خط به صورت توزیع شده و سری با آن قرار دهیم:

$$z' = j\omega l + \frac{1}{j\omega C_{\gamma se}} = j\omega l \left(1 - \frac{1}{\omega^2 l C_{\gamma se}}\right)$$

$$\frac{1}{\frac{\omega C_{\gamma se}}{\omega l}} = K_{se} \quad \Rightarrow \quad z' = j\omega l (1 - K_{se})$$

$$\Rightarrow z'_0 = \sqrt{\frac{z'}{y}} = z_0 \sqrt{1 - K_{se}}$$

$$\Rightarrow \theta' = \theta \sqrt{1 - K_{se}}$$



جبرانسازی موازی و سری

اگر هر دو جبرانسازی موازی و سری با هم صورت گیرد:

$$z'_0 = \sqrt{\frac{z'}{y'}} = z_0 \sqrt{\frac{1-K_{se}}{1-K_{sh}}} \quad \theta' = \theta \sqrt{(1-K_{se})(1-K_{sh})} \quad P'_0 = P_0 \sqrt{\frac{1-K_{sh}}{1-K_{se}}}$$

در یک خط انتقال قبل از جبرانسازی :

$$P = P_{\max} \sin(\delta) \quad , \quad P_{\max} = \frac{P_0}{\sin(\theta)}$$

و بعد از جبرانسازی :

$$P'_{\max} = \frac{P'_0}{\sin(\theta')} \Rightarrow P'_{\max} = \frac{P_0 \sqrt{\frac{1-K_{sh}}{1-K_{ss}}}}{\sin(\theta \sqrt{(1-K_{se})(1-K_{sh})})}$$

$$P'_{\max} = \frac{P_0}{\sqrt{\frac{1-K_{se}}{1-K_{sh}}} \sin(\theta \sqrt{(1-K_{se})(1-K_{sh})})}$$

رابطه ی بالا نشان دهنده ی تاثیر بیشتر جبرانسازی سری نسبت به موازی بر توان قابل انتقال خط است



کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

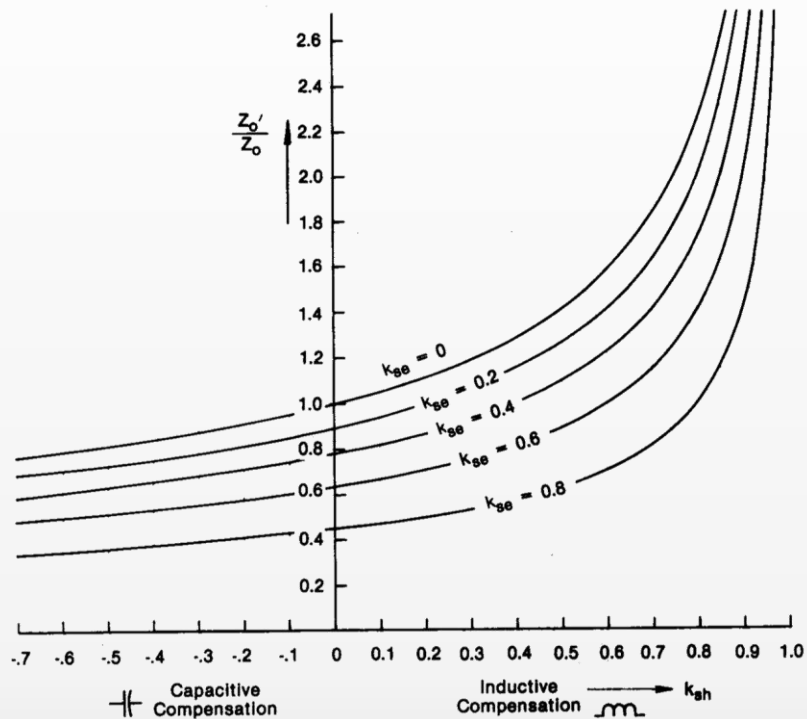


FIGURE 16. Virtual surge impedance Z'_0 as a function of k_{sh} and k_{se} . (Uniformly distributed compensation)

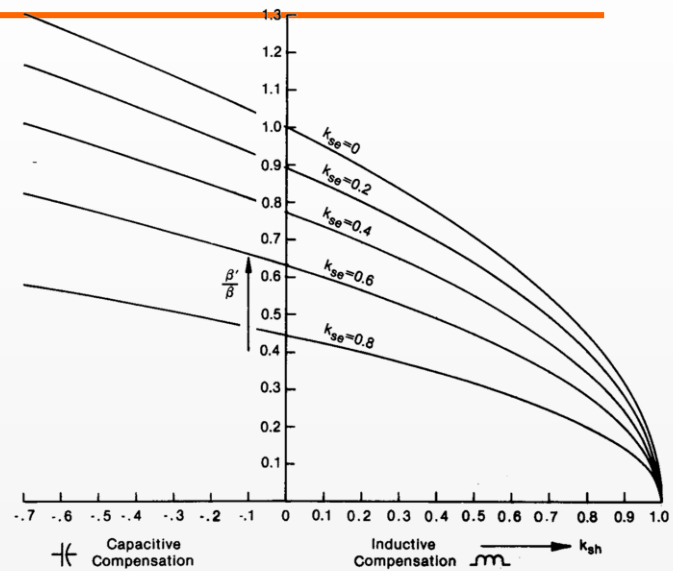


FIGURE 18. Virtual wavenumber β'/β as a function of k_{sh} and k_{se} . (Uniformly distributed compensation)

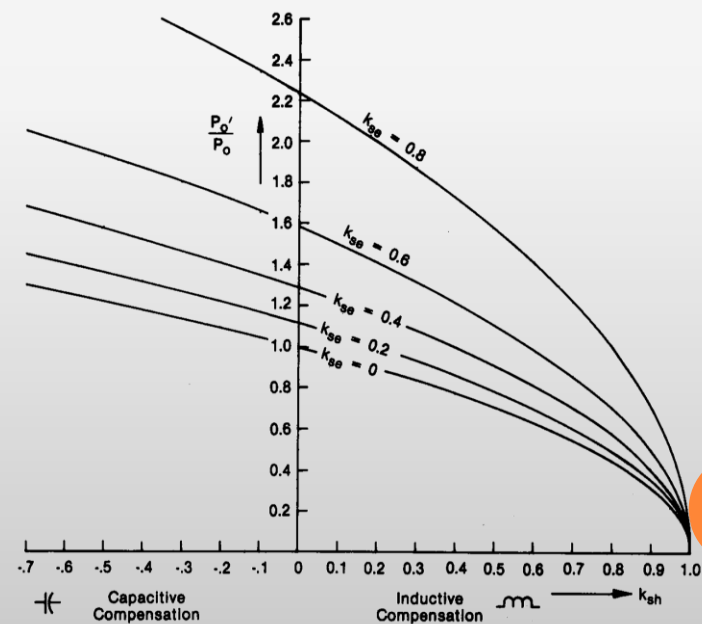


FIGURE 17. Virtual natural load P'_0 as a function of k_{se} , k_{sh} .

مثال: خط متقارن ۶۰۰ مایلی ($\delta = 69.7^\circ$):

$$|E_s| = |E_r| = 1pu$$

قبل از جبران سازی در بی باری داریم:

$$V_m = \frac{1}{\cos(\frac{\theta}{2})} = \frac{1}{\cos(\frac{69.7^\circ}{2})} = 1.22pu$$

$$Q_s = -Q_r = -P_0 \tan(\frac{\theta}{2}) = -P_0 \tan(\frac{69.7^\circ}{2}) = -0.696P_0 = -0.696pu$$

$$P = \frac{1}{2}P_0 = 0.5pu \quad \text{همچنین در}$$

$$E_s = V_m \cos(\frac{\theta}{2}) + jz_0 I_m \sin(\frac{\theta}{2}) \rightarrow |E_s|^2 = \left(V_m \cos(\frac{\theta}{2})\right)^2 + \left(z_0 I_m \sin(\frac{\theta}{2})\right)^2 \quad \text{داریم:}$$

$$\xrightarrow{I_m = \frac{P}{V_m}} 1 = \left(V_m \cos(\frac{69.7^\circ}{2})\right)^2 + \left(1 \times \frac{1}{2V_m} \sin(\frac{69.7^\circ}{2})\right)^2$$

$$\longrightarrow V_m^4 - 1.486V_m^2 + 0.122 \rightarrow V_m^2 = \frac{-1.486 \pm \sqrt{1.486^2 - 4 \times 0.122}}{2}$$

$$\longrightarrow V_m^2 = 0.743 \pm 0.656 \longrightarrow V_m = 1.18pu$$

پس در نصف بار طبیعی ۱۸٪ اضافه ولتاژ داریم.



ادامه مثال: خط متقارن ۶۰۰ مایلی ($\theta = 69.7^\circ$):

$$Q_s = -Q_r = P_0 \frac{\sin(\frac{\theta}{2})}{2} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \left(\frac{V_0}{V_m} \right)^2 - \left(\frac{V_m}{V_0} \right)^2 \right]$$

$$\longrightarrow Q_s = -Q_r = P_0 \frac{\sin(69.7^\circ)}{2} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 \left(\frac{1}{1.18} \right)^2 - (1.18)^2 \right] = -0.569 P_0 = -0.569 pu$$

$$P_{\max} = \frac{P_0}{\sin \theta} = \frac{P_0}{\sin 69.7^\circ} = 1.066 P_0$$

$$P = P_{\max} \sin(\delta) \longrightarrow \delta = \sin^{-1} \left(\frac{P}{P_{\max}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1}{2 \times 1.066} \right) \cong 28^\circ$$

لذا اگر با این طول زیاد بخواهیم حتی نصف بار طبیعی را انتقال دهیم به زاویه ی ۲۸ درجه ، یعنی نزدیک به حد پایداری استاتیک میرسیم.

$$E_s = 1 \angle 14^\circ \quad E_r = 1 \angle -14^\circ$$



ادامه مثال: خط متقارن ۶۰۰ مایلی ($\Theta = 69.7^\circ$):

با در نظر گرفتن جبران سازی با $K_{se} = 0.8$ داریم:

$$\theta' = \theta \sqrt{1 - K_{se}} = 69.7^\circ \sqrt{1 - 0.8} = 31.2^\circ$$

$$P_0' = \frac{P_0}{\sqrt{1 - K_{se}}} = 2.24P_0$$

$$P_{\max}' = \frac{P_0}{\sqrt{1 - K_{se}} \sin(\theta \sqrt{1 - K_{se}})} = 4.32P_0$$

در بی باری:

$$V_m = \frac{1}{\cos(\frac{\theta'}{2})} = \frac{1}{\cos(\frac{31.2^\circ}{2})} = 1.038pu$$

$$Q_s = -Q_r = -P_0' \tan(\frac{\theta'}{2}) = -2.24P_0 \tan(\frac{31.2^\circ}{2}) = -0.625P_0 = -0.625pu$$

همانگونه که مشاهده می شود اضافه ولتاژ نسبت به حالت بدون جبران سازی بهبود یافته است ولی مشکل جذب توان راکتیو در بی باری توسط منبع هنوز وجود دارد.



ادامه مثال: خط متقارن ۶۰۰ مایلی ($\Theta = 69.7^\circ$):

در بارداری اگر بار به اندازه ی بار طبیعی خط بعد از جبران سازی یعنی $P = P'_0 = 2.24P_0$ باشد، آنگاه $V_m = 1pu$ چون پروفیل ولتاژ تخت است و همچنین :

$$Q_s = -Q_r = 0$$

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{P}{P_{\max}}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2.24P_0}{4.32P_0}\right) \cong 31.2^\circ = \theta'$$

چون همواره در شرایط SIL خط $\theta = \delta$ می باشد.

حال فرض کنیم علاوه بر جبران سازی سری جبران سازی موازی با $K_{sh} = 0.5$ انجام دهیم، پس:

$$\theta' = \theta \sqrt{(1 - K_{se})(1 - K_{sh})} = 69.7^\circ \sqrt{(1 - 0.8)(1 - 0.5)} = 22^\circ$$

$$P'_0 = P_0 \sqrt{\frac{1 - K_{sh}}{1 - K_{se}}} = 1.581P_0$$

$$P'_{\max} = \frac{P_0}{\sqrt{\frac{1 - K_{se}}{1 - K_{sh}}} \sin(\theta \sqrt{(1 - K_{se})(1 - K_{sh})})} = 4.214P_0$$

لذا جبران سازی شنت تاثیر چندانی در $P'_{\max}$ نخواهد داشت.



ادامه مثال: خط متقارن ۶۰۰ مایلی ($\Theta = 69.7^\circ$):

حال در بی باری داریم:

$$P = 0$$

$$V_m = \frac{1}{\cos(\frac{\theta'}{2})} = \frac{1}{\cos(\frac{22^\circ}{2})} = 1.019 pu$$

$$Q_s = -Q_r = -P_0' \tan(\frac{\theta'}{2}) = -1.581 P_0 \tan(\frac{22^\circ}{2}) = -0.307 P_0 = -0.307 pu$$

همچنین در بارداری ($P = P_0'$) داریم:

$$\delta = \theta' = 22^\circ$$

و توان حد پایداری دینامیکی خط بصورت زیر است:

$$\delta = 30^\circ \Rightarrow P = P_{\max}' \sin(30^\circ) = \frac{P_{\max}'}{2} = \frac{4.214 P_0}{2} = 2.1 P_0$$



جبران سازی متمرکز

جبران ساز را معمولا در محلی نصب می کنیم که بدترین وضعیت را دارد.

- جبران سازی شنت متمرکز در انتهای خط شعاعی:

$$E_s = V_r \cos(\theta) + jz_0 I_r \sin(\theta)$$

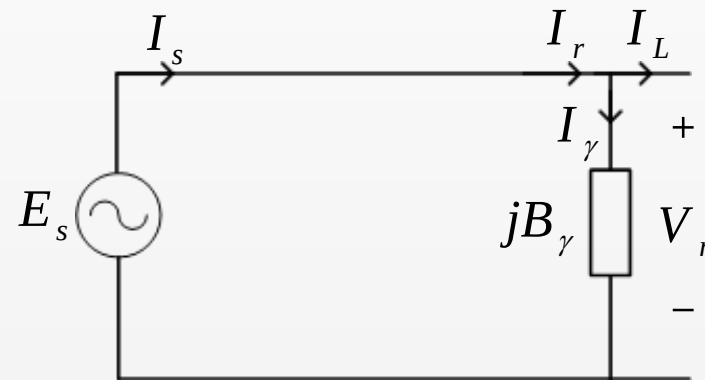
$$I_r = I_L + I_\gamma$$

$$V_r = |V_r| \angle 0$$

$$I_L = \frac{P_L - jQ_L}{V_r}$$

$$I_\gamma = jB_\gamma V_r = \frac{-jQ_\gamma}{V_r}$$

$$I_r = \frac{P_L - j(Q_L + Q_\gamma)}{V_r} = \frac{P_L - jQ_r}{V_r}, \quad Q_r = Q_L + Q_\gamma$$

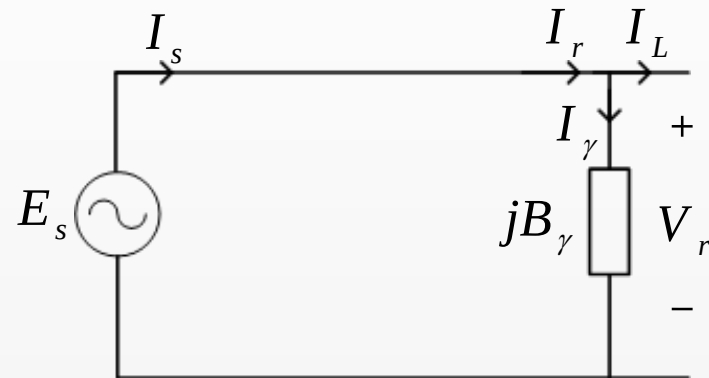


$$\text{if : } \begin{cases} B_\gamma > 0 \rightarrow \text{خازن} \\ B_\gamma < 0 \rightarrow \text{راکتور} \end{cases}$$

$$E_s = V_r \cos \theta + jZ_0 \frac{P_L - jQ_r}{V_r} \sin \theta$$

$$E_s = V_r \cos \theta + jZ_0 \frac{P_L - jQ_r}{V_r} \sin \theta$$

$$\Rightarrow E_s = V_r \cos(\theta) + \frac{z_0 \sin(\theta) Q_r}{V_r} + jz_0 \sin(\theta) \frac{P_L}{V_r}$$



$$|E_s|^2 = \left[V_r \cos(\theta) + \frac{z_0 \sin(\theta) Q_r}{V_r} \right]^2 + \left[z_0 \sin(\theta) \frac{P_L}{V_r} \right]^2$$

اگر بخواهیم در بی باری ولتاژ ابتدا و انتهای خط برابر ۱ p.u باشد

$$|E_s| = 1^{p.u.}$$

$$V_r = 1^{p.u.}$$

$$P_L = Q_L = 0 \Rightarrow |E_s| = \left| V_r \cos(\theta) + \frac{z_0 \sin(\theta) Q_r}{V_r} \right| \Rightarrow Q_r = \frac{1 - \cos(\theta)}{z_0 \sin(\theta)}$$



کنترل توان راکتیو در سیستمهای قدرت

جبران سازی شنت متمرکز در انتهای خط شعاعی

از رابطه ی $Q_\gamma = \frac{1 - \cos(\theta)}{z_0 \sin(\theta)}$ نتیجه می گیریم $Q_\gamma > 0$ پس به یک راکتور نیاز داریم.

$$B_\gamma = -\frac{Q_\gamma}{V_r^2}, \quad V_r = 1^{p.u.} \Rightarrow B_\gamma = -Q_\gamma = -\frac{1 - \cos\theta}{Z_0 \sin\theta}$$

$$X_\gamma = \frac{V_r^2}{Q_\gamma}, \quad V_r = 1^{p.u.} \Rightarrow X_\gamma = \frac{1}{Q_\gamma} = \frac{Z_0 \sin\theta}{1 - \cos\theta}$$

حال اگر فرض کنیم $|E_s| = |E_r| = V_0$ باشد در بی باری داریم:

$$V_0 = V_0 \cos(\theta) + \frac{z_0 \sin(\theta) Q_\gamma}{V_0} \Rightarrow V_0 (1 - \cos(\theta)) = \frac{z_0 \sin(\theta) Q_\gamma}{V_0}$$

$$\Rightarrow Q_\gamma = \frac{V_0^2 (1 - \cos(\theta))}{z_0 \sin(\theta)} = \frac{V_0^2}{z_0} \frac{1 - \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \xrightarrow{\frac{1 - \cos(\theta)}{\sin(\theta)} = \tan(\frac{\theta}{2})} Q_\gamma = \frac{V_0^2}{z_0} \tan(\frac{\theta}{2}) = P_0 \tan(\frac{\theta}{2})$$



جبران سازی شنت متمرکز در انتهای خط شعاعی

$$Q_s = \text{Im}(E_s I_s^*) \xrightarrow{\text{چون بی بار هستیم}} Q_s = E_s I_s^*$$

$$\left. \begin{aligned} I_s &= I_r \cos(\theta) + j \frac{V_r}{Z_0} \sin(\theta) \\ I_r = I_\gamma &= jB_\gamma V_r = -jV_r \frac{1 - \cos\theta}{Z_0 \sin\theta} \end{aligned} \right\} I_s = -jV_r \frac{1 - \cos(\theta)}{Z_0 \sin(\theta)} \cos(\theta) + j \frac{V_r}{Z_0} \sin(\theta)$$

$$I_s = j \frac{V_r}{Z_0} \left[\sin\theta - \frac{\cos\theta - \cos^2\theta}{\sin\theta} \right] = j \frac{V_r}{Z_0} \cdot \frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta}$$

$$Q_s = \text{Im} \left(-j \frac{E_s E_r}{Z_0} \cdot \frac{1 - \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \right) \Rightarrow Q_s = -\frac{V_0^2}{Z_0} \cdot \frac{1 - \cos(\theta)}{\sin(\theta)} = -\frac{V_0^2}{Z_0} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\Rightarrow Q_s = -Q_r = -P_0 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

می بینیم که خط همان شرایط خط متقارن در بی باری را دارد.



برای یک خط بطول ۲۰۰ مایل:

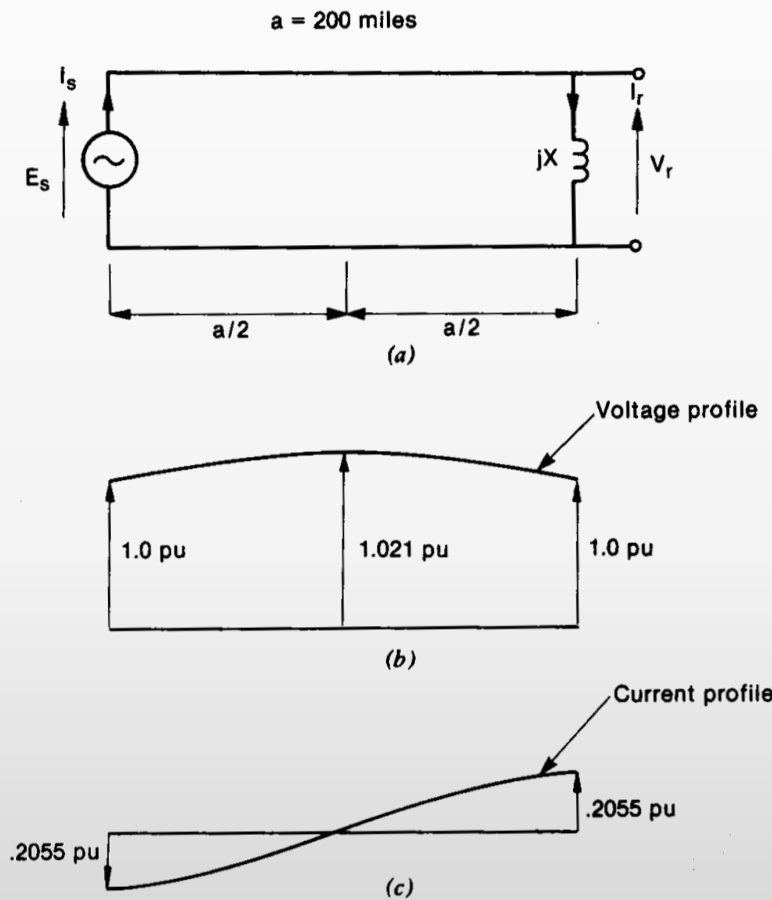


FIGURE 24. Voltage and current profiles of a shunt-compensated line at no-load. ($a = 200 \text{ mi}$)

جبران سازی شنت متمرکز در انتهای خط شعاعی

ولتاژ و جریان وسط خط در بی باری :

$$V_m = V_r \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + jz_0 I_r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \Rightarrow V_m = V_r \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + jz_0 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(-jV_r \frac{1 - \cos(\theta)}{z_0 \sin(\theta)} \right)$$
$$\Rightarrow V_m = V_r \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \frac{2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right) \Rightarrow V_m = V_r \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$V_m = \frac{V_r}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

$$I_m = I_r \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + j \frac{V_r}{z_0} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = -jV_r \frac{1 - \cos(\theta)}{z_0 \sin(\theta)} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + j \frac{V_r}{z_0} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\Rightarrow I_m = j \frac{V_r}{z_0} \left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$$

$$I_m = 0$$



مقدار توان راکتیو جبرانساز، برای اینکه در هر باری ولتاژ مورد نظر را در انتهای خط داشته باشیم، از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$|E_s|^2 = \left[V_r \cos(\theta) + z_0 \sin(\theta) \frac{Q_r}{V_r} \right]^2 + \left[z_0 \sin(\theta) \frac{P_L}{V_r} \right]^2$$

$$Q_\gamma = Q_r - Q_L$$

