

TE140 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

The background of the slide features a silhouette of a high-voltage electrical transmission tower and power lines against a sunset sky. The sky is a mix of orange, yellow, and grey, with the sun low on the horizon. The tower is a complex lattice structure with multiple cross-arms. Power lines stretch across the frame, supported by insulators. The overall scene is industrial and dramatic.

Capítulo VIII

OPERAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

PhD. Eng. Clodomiro Unsihuay Vila

Federal University of Paraná, Curitiba- Brazil

LT como Quadripolos

Das equações de onda:

$$V_S = V_R \cosh \gamma \ell + Z_C I_R \sinh \gamma \ell$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma \ell + (V_R / Z_C) \sinh \gamma \ell$$

$$V(x) = V(\ell) \cosh \gamma x + Z_C I(\ell) \sinh \gamma x$$

$$I(x) = I(\ell) \cosh \gamma x + \frac{1}{Z_C} V(\ell) \sinh \gamma x$$

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_C \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

LT como Quadripolos

A equação matricial representa o modelo de um quadripolo com duas portas (entrada/saída), quatro variáveis (V_t , I_t , V_r , I_r) e com as constantes do quadripolo dadas por:



Figura Quadripolo Representativo de uma Linha de Transmissão.

LT como Quadripolos

- Os parâmetros $ABCD$ são conhecidos como constantes genéricas do quadripolo equivalente de uma LT de parâmetros distribuídos:

$$A = \cosh(\gamma x) \quad [\text{p.u.}]$$

$$B = Z_c \cdot \sinh(\gamma x) \quad [\Omega]$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma x) = \frac{B}{Z_c^2} \quad [\text{S}]$$

$$D = A \quad [\text{p.u.}]$$

LT como Quadripolos

- Dada às condições de **simetria de uma LT**, ou seja, seus terminais podem ser invertidos (entrada → saída e saída → entrada) sem alterar o comportamento do sistema a que pertence, tem-se que

$$\mathbf{A=D.}$$

- Assim, o quadripolo equivalente de uma LT é simétrico e satisfaz à condição:

$$\mathbf{AD - BC = 1}$$

- A representação da linha como quadripolo é totalmente adequada para o cálculo de seu desempenho, do ponto de vista de seus terminais transmissor e receptor.

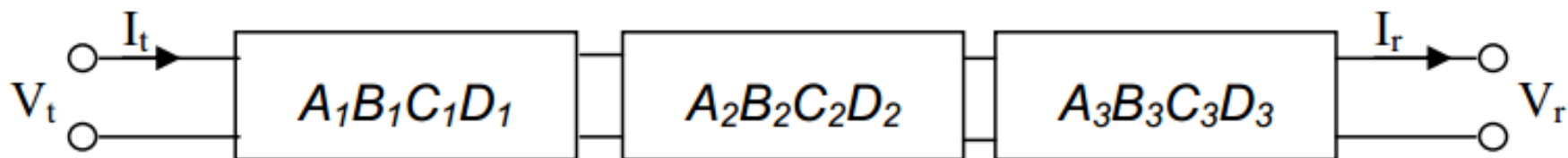


Figura Associação em Cascata de Quadripolos.

Para o primeiro quadripolo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ I_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t2} \\ I_{t2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Note que as variáveis de saída do quadripolo 1 são iguais às variáveis de entrada do quadripolo 2, i.é.:

$$\begin{aligned} V_{r1} &= V_{t2} \\ I_{r1} &= I_{t2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Para o segundo quadripolo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_{t2} \\ I_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r2} \\ I_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t3} \\ I_{t3} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Uma vez mais tendo que a saída do quadripolo 2 é igual à entrada do quadripolo 3.

$$\begin{aligned} I_{r2} &= I_{t3} \\ V_{r2} &= V_{t3} \end{aligned} \tag{3.12}$$

Para o terceiro quadripolo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_{t3} \\ I_{t3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Fazendo-se as devidas substituições de 3.13 em 3.11 e em 3.9, resulta:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

Tem-se então que as constantes genéricas resultantes da associação em cascata dos quadripolos da Figura 3.13 são dadas por:

$$A_R = [(A_1 A_2 A_3 + A_1 B_2 C_3) + (A_3 B_1 C_2 + B_1 C_3 D_2)]$$

$$\begin{aligned}
 B_R &= [(A_1 A_2 B_3 + B_1 B_3 C_2) + (A_1 B_2 D_3 + B_1 D_2 D_3)] \\
 C_R &= [(A_2 A_3 C_1 + A_3 C_2 D_1) + (B_2 C_1 C_3 + C_3 D_1 D_2)] \\
 D_R &= [(A_2 B_3 C_1 + B_3 C_2 D_1) + (B_2 C_1 D_3 + D_1 D_2 D_3)]
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Em uma associação de dois quadripolos em cascata, as constantes genéricas resultantes são definidas por:

$$\begin{aligned}
 A_R &= A_1 A_2 + B_1 C_2 \\
 B_R &= A_1 B_2 + B_1 D_2 \\
 C_R &= A_2 C_1 + C_2 D_1 \\
 D_R &= B_2 C_1 + D_1 D_2
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

Em caso de dois quadripolos em paralelo a representação gráfica é mostrada na Fig.3.15 e as constantes genéricas do quadripolo equivalente são:

$$A_R = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2} \quad B_R = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} \quad D_R = \frac{B_2 D_1 + B_1 D_2}{B_1 + D_2}
 \tag{3.17}$$

C_R pode ser obtido a partir de $(A_R D_R - B_R C_R) = 1$.

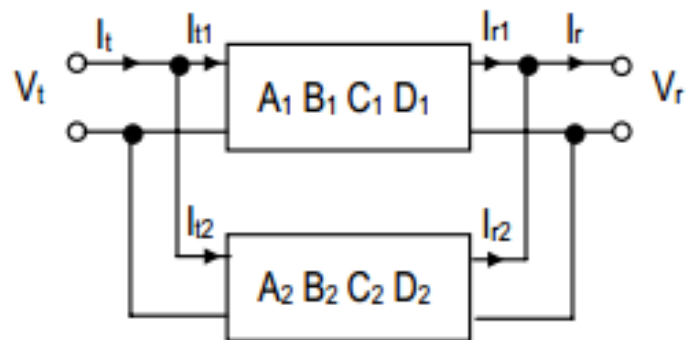


Figura 3.15 Associação de Quadripolos em Paralelo.

Exemplo 1

Dois circuitos de transmissão são definidos pelas seguintes constantes genéricas $ABCD$.

$A_1=1$ pu	$A_2=0,9 \angle 2^\circ$ pu
$B_1=50 \Omega$	$B_2=150 \angle 79^\circ \Omega$
$C_1=0$ S	$C_2=9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ$ S
$D_1=1$ pu	$D_2=0,9 \angle 2^\circ$ pu

Determine as constantes do circuito resultante da associação em cascata.

Exemplo 1

Dois circuitos de transmissão são definidos pelas seguintes constantes genéricas $ABCD$.

$A_1=1$ pu	$A_2=0,9\angle 2^\circ$ pu
$B_1=50$ Ω	$B_2=150\angle 79^\circ$ Ω
$C_1=0$ S	$C_2=9\times 10^{-4}\angle 91^\circ$ S
$D_1=1$ pu	$D_2=0,9\angle 2^\circ$ pu

Determine as constantes do circuito resultante da associação em cascata.

As constantes genéricas resultantes podem ser obtidas por:

$$A_R = A_1 A_2 + B_1 C_2 = 1 \times (0,9 \angle 2^\circ) + 50 \times (9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ) = 0,9 \angle 4,86^\circ \text{ pu}$$

$$B_R = A_1 B_2 + B_1 D_2 = 1 \times (150 \angle 79^\circ) + 50 \times (0,9 \angle 2^\circ) = 166,2 \angle 63,7^\circ \Omega$$

$$C_R = A_2 C_1 + C_2 D_1 = (0,9 \angle 2^\circ) \times 0 + (9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ) \times 1 = 9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ \text{ S}$$

$$D_R = B_2 C_1 + D_1 D_2 = (150 \angle 79^\circ) \times 0 + (1) \times (0,9 \angle 2^\circ) = 0,9 \angle 2^\circ \text{ pu}$$

Tabela Sumário dos Parâmetros Genéricos ABCD de uma LT.

Parâmetros	A=D	B	C
Unidade	Por Unidade	Ω	S
Linha Curta (<100 km)	1	$Z=z.l$	0
Linha Média: Circuito Π Nominal (100 a 250 km)	$1 + \frac{YZ}{2} = 1 + \frac{(y_l)(z_l)}{2}$	$Z=z.l$	$Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) = y_l \left(1 + \frac{(y_l)(z_l)}{4} \right)$
Linha Longa: Circuito Π Equivalente (>250 km)	$\cosh(\gamma l)$	$Z_c \sinh(\gamma l)$	$\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l)$
Linha longa sem perdas $R=G=0$	$\cos(\beta l)$	$j \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \text{sen}(\beta l)$	$j \sqrt{\frac{C}{L}} \text{sen}(\beta l)$

Considerações Importantes

- Nas linhas de transmissão tem-se normalmente que a relação X/R é maior do que 5. Para valores maiores de relação X/R a resistência da impedância série pode ser desconsiderada.
- Nas redes de distribuição são, em geral, modelados como linhas curtas, desprezando-se a admitância shunt da linha.
- Nas Redes de distribuição geralmente a relação X/R é pequena, o que pode levar à desconsideração de X em relação a R .

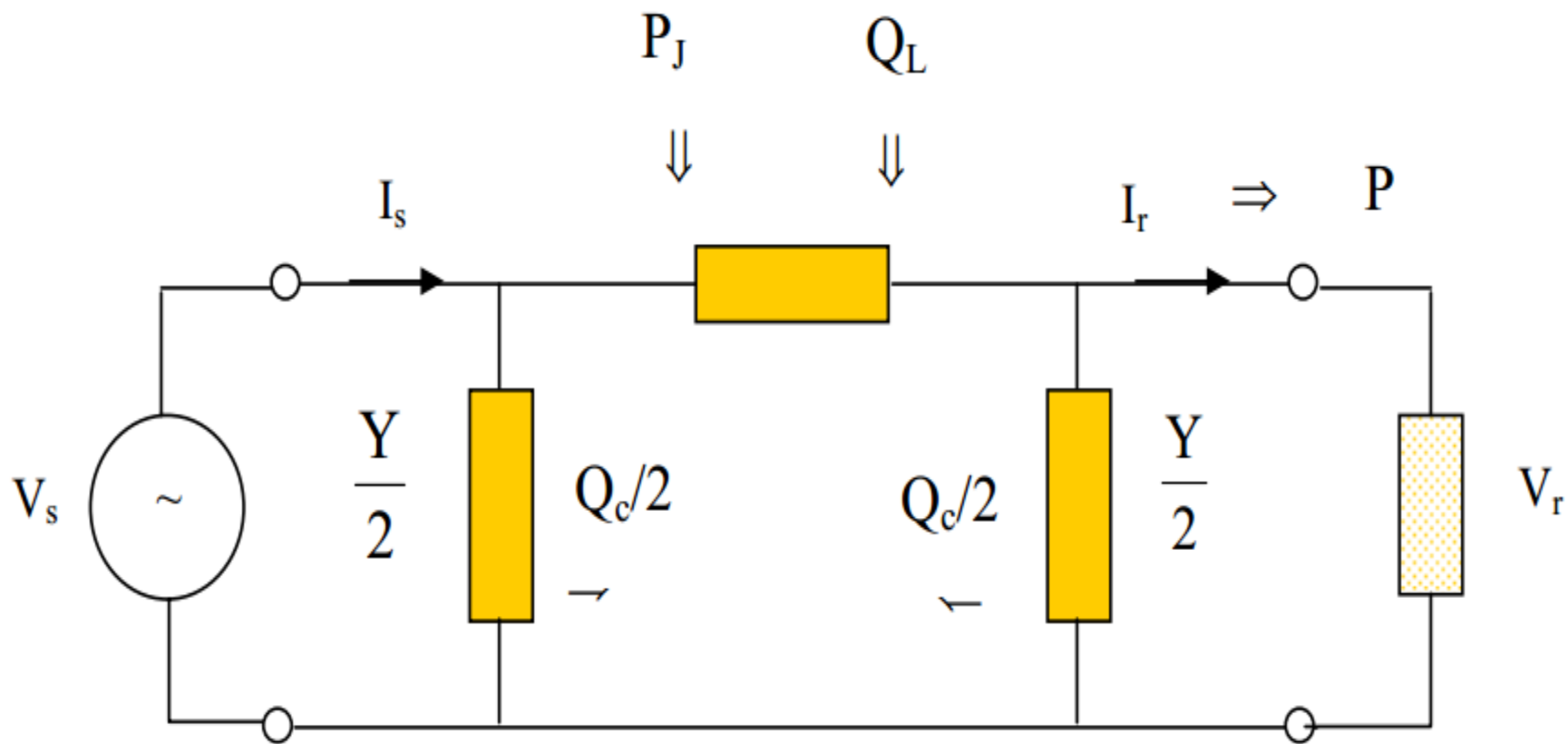


Figura 3.20 Potências Relacionadas a uma Linha de Transmissão.

- P Potência ativa absorvida pela carga
- P_J Potência ativa dissipada na linha, I^2R
- Q_L Potência reativa absorvida pela linha, I^2X_L
- Q_C Potência reativa gerada pela linha, V^2/X_C

- A validade para o modelo simplificado de uma linha de transmissão com a eliminação de alguns elementos do modelo Π depende da magnitude relativa das potências ativas e reativas associadas com a linha, comparada à potência ativa P entregue à carga.
- Com exceção de P , todas as outras potências são proporcionais ao comprimento da linha. Se uma delas, P_J , Q_L , ou Q_C , for pequena em relação à potência ativa P , pode-se desprezar o elemento de circuito correspondente que a produz.
- Linhas de baixa tensão são sempre curtas e porque a tensão é baixa V^2/XC é sempre desprezado. Portanto, as linhas de baixa tensão podem ser representadas por um circuito sem os componentes em derivação.
- Se o condutor é curto em comprimento, como os circuitos residenciais, a resistência predomina e a porção indutiva pode ser desprezada.

Considerações Importantes

- Linhas de extra-alta tensão são sempre longas, e assim a potência reativa associada com a capacitância da linha e a indutância da linha tornam-se importantes. Além disso, porque a eficiência da linha é alta, segue-se que as perdas I^2R são pequenas. O circuito equivalente pode, portanto ser representado por um circuito sem a componente resistiva série.

Exemplo 2

Dada uma linha de transmissão com os parâmetros como abaixo especificados:

$$r=0,065 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$x_L=0,5 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$x_C=750 \times 10^6 \text{ } \Omega \text{ km}$$

$$l=50 \text{ km}$$

$$V=230 \text{ kV}$$

$$P_{\text{carga}}=300\text{MW}, \text{ FPD}=0,92 \text{ indutivo}$$

Determinar:

- Os parâmetros do modelo Pi Nominal.
- Potência reativa gerada pela LT.
- Potência reativa absorvida pela LT.
- Potência dissipada pela LT.
- Percentual de Q_C , Q_L e P_J em relação à potência da carga P .
- Quais as constantes genéricas da LT?

Solução

a) Parâmetros do modelo Pi Nominal

Impedância série:

$$\begin{aligned} Z &= (r + j\omega L) \cdot l \\ &= (0,065 + j0,5) \cdot 50 \\ &= 3,25 + j25 = 25,21 \angle 82,59^\circ [\Omega] \end{aligned}$$

Admitância shunt:

$$\begin{aligned} X_c &= -jx_c / l \\ &= -j 750 \times 10^6 / 50 \\ &= -j15 \times 10^6 [\Omega] \end{aligned}$$

$$\frac{Y}{2} = j \frac{1}{2X_c} = j3,34 \times 10^{-8} [S]$$

b) Potência reativa gerada pela linha

No terminal receptor:

$$Q_{C,r} = \frac{Y^*}{2} \cdot V_r^2$$
$$= 3,34 \times 10^{-8} \angle -90^\circ \times \left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 = -j588,95 [\text{var}/\text{fase}]$$

No terminal transmissor:

$$Q_{C,t} = \frac{Y^*}{2} \cdot V_t^2$$

A tensão no terminal transmissor:

$$V_t = V_r + Z \left(I_r + V_r \cdot \frac{Y}{2} \right)$$

A corrente no terminal receptor que alimenta a carga:

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \times FPD} \angle -\cos^{-1}(FPD) \\ &= \frac{300 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \times 10^3 \cdot 0,92} \angle -\cos^{-1}(0,92) = 818,55 \angle -23,07^\circ [A] \end{aligned}$$

Assim, a tensão no transmissor:

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + (25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot \left[818,55 \angle -23,07^\circ + \left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) \cdot 3,34 \times 10^{-8} \angle 90^\circ \right] \\ &= \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + (25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot (818,55 \angle -23,07^\circ) \\ &= 132790,56 \angle 0^\circ + 20635,60 \angle 59,52^\circ \\ &= 144357,25 \angle 7,08^\circ [V] \end{aligned}$$

A tensão de linha no terminal transmissor: $V_t = 250,034 \angle 37,08^\circ [kV]$

Note que enquanto a tensão no terminal da carga é de 230 kV, a tensão no transmissor é de 250 kV, 8,7% acima do nominal. Uma linha de 500 kV pode operar com variação de $\pm 10\%$ na tensão sem reatores shunt.

E a potência reativa monofásica no transmissor:

$$\begin{aligned} Q_{C,t} &= \frac{Y^*}{2} \cdot V_t^2 \\ &= 3,34 \times 10^{-8} \angle -90^\circ \cdot (144357,25)^2 \\ &= -j696,02 [\text{var} / \text{fase}] \end{aligned}$$

Portanto, a potência reativa monofásica total gerada pela LT:

$$Q_{C,Total} = Q_{C,t} + Q_{C,r} = -j(696,02 + 588,95) = -j1284,97 [\text{var} / \text{fase}]$$

c) Potência absorvida pela Rede

$$\begin{aligned}Q_L &= jX_L I^2 \\ &= j25 \cdot (818,55)^2 = j16750,60 [k \text{ var/ fase}]\end{aligned}$$

d) Potência dissipada pela LT

$$\begin{aligned}P_J &= R \cdot I^2 \\ &= 3,25 \cdot (818,55)^2 = 2177,58 [kW]\end{aligned}$$

e) Percentual de Q_C , Q_L e P_J em relação à potência da carga P .

A potência trifásica da carga é de 300 MW, a potência reativa trifásica consumida pela linha 50,25 Mvar indutivo (16,67%), e a potência trifásica dissipada na linha 6,53 MW (2,18%). A potência reativa trifásica gerada pela linha é de 3854,91 var capacitivo, o que é desprezível em relação à potência da carga e como tal a admitância em derivação pode ser desconsiderada. A componente resistiva também pode não ser considerada no modelo de linha de parâmetros concentrados.

P	Q_L	Q_C	P_J
300 MW	50,25 Mvar	3,85 kvar	6,53 MW
$\Delta\%$	16,67%	0,001%	2,18%

f) As constantes genéricas da linha são:

$$A = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot (6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ)}{2} = 1 \angle 6,22 \times 10^{-6} [pu]$$

$$B = Z = 25,21 \angle 82,59^\circ = 3,25 + j25,0 [\Omega]$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) = (6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ) \left(1 + \frac{(25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot (6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ)}{4} \right)$$

$$= 6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ \cong 0$$

Limites térmico e de estabilidade

- ▶ A equação de onda pode ser colocada na forma:

$$V_S = AV_R + BI_R$$

em que:

V_S, V_R : tensões nas barras inicial e final, respectivamente

I_S, I_R : correntes nas barras inicial e final, respectivamente

$$A = \cosh \gamma \ell$$

$$B = Z_c \sinh \gamma \ell$$

► Considerando:

$$V_R = V_R \angle 0^\circ$$

$$V_S = V_S \angle \delta$$

$$A = A \angle \alpha$$

$$B = B \angle \beta$$

tem-se:

$$I_R = \frac{V_S - AV_R}{B} = \frac{V_S}{B} \angle (\delta - \beta) - \frac{AV_R}{B} \angle (\alpha - \beta)$$

- ▶ A potência complexa na barra receptora é:

$$S_R = V_R I_R^* = \frac{V_S V_R}{B} \angle (\beta - \delta) - \frac{AV_R^2}{B} \angle (\beta - \alpha)$$

⇓

$$P_R = \frac{V_S V_R}{B} \cos (\beta - \delta) - \frac{AV_R^2}{B} \cos (\beta - \alpha)$$

$$Q_R = \frac{V_S V_R}{B} \sen (\beta - \delta) - \frac{AV_R^2}{B} \sen (\beta - \alpha)$$

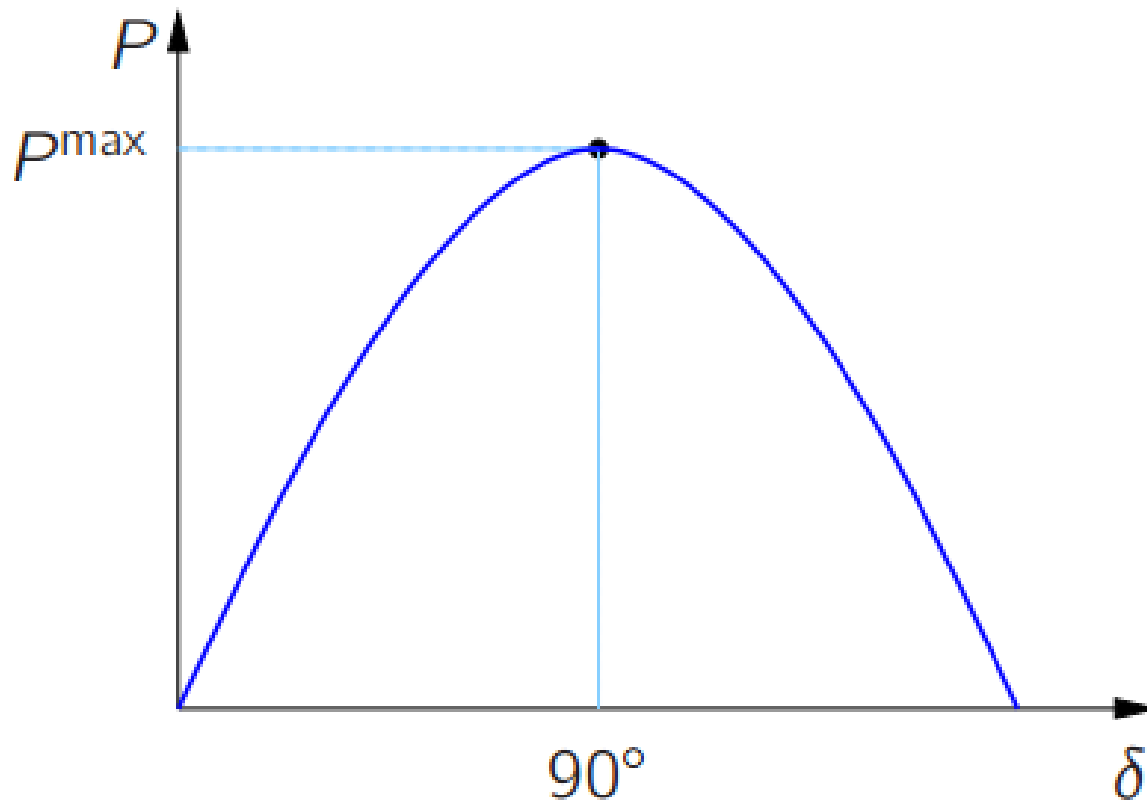
- ▶ Para facilitar a análise, considera-se uma linha média sem perdas:

$$A = \cosh \gamma l \approx 1 \angle 0^\circ$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l \approx Z_c \gamma l = z l = (j\omega L) l = jX = X \angle 90^\circ$$

- ▶ Com relação à potência ativa:

$$P_R = \frac{V_S V_R}{X} \cos(90^\circ - \delta) = \frac{V_S V_R}{X} \text{sen } \delta$$



- ▶ Mantendo V_S e V_R constantes, um aumento da carga implica em um aumento do ângulo δ . Existe um limite máximo de potência ativa que pode ser entregue:

$$\frac{d}{d\delta} P_R = \frac{V_S V_R}{X} \cos \delta = 0$$

ou $\delta = 90^\circ$ e:

$$P_R^{\max} = \frac{V_S V_R}{X}$$

que representa o **limite de estabilidade da linha** sem perdas

- ▶ Considere que:

$$V_S = V_R = V$$

$$\delta = 90^\circ$$

$$X = x l$$

Logo:

$$P_R^{\max} = \frac{V_S V_R}{X} = \frac{V^2}{x l} = \frac{K}{l}$$

Na prática, no entanto, considera-se (por motivos de segurança):

$$V_S = V$$

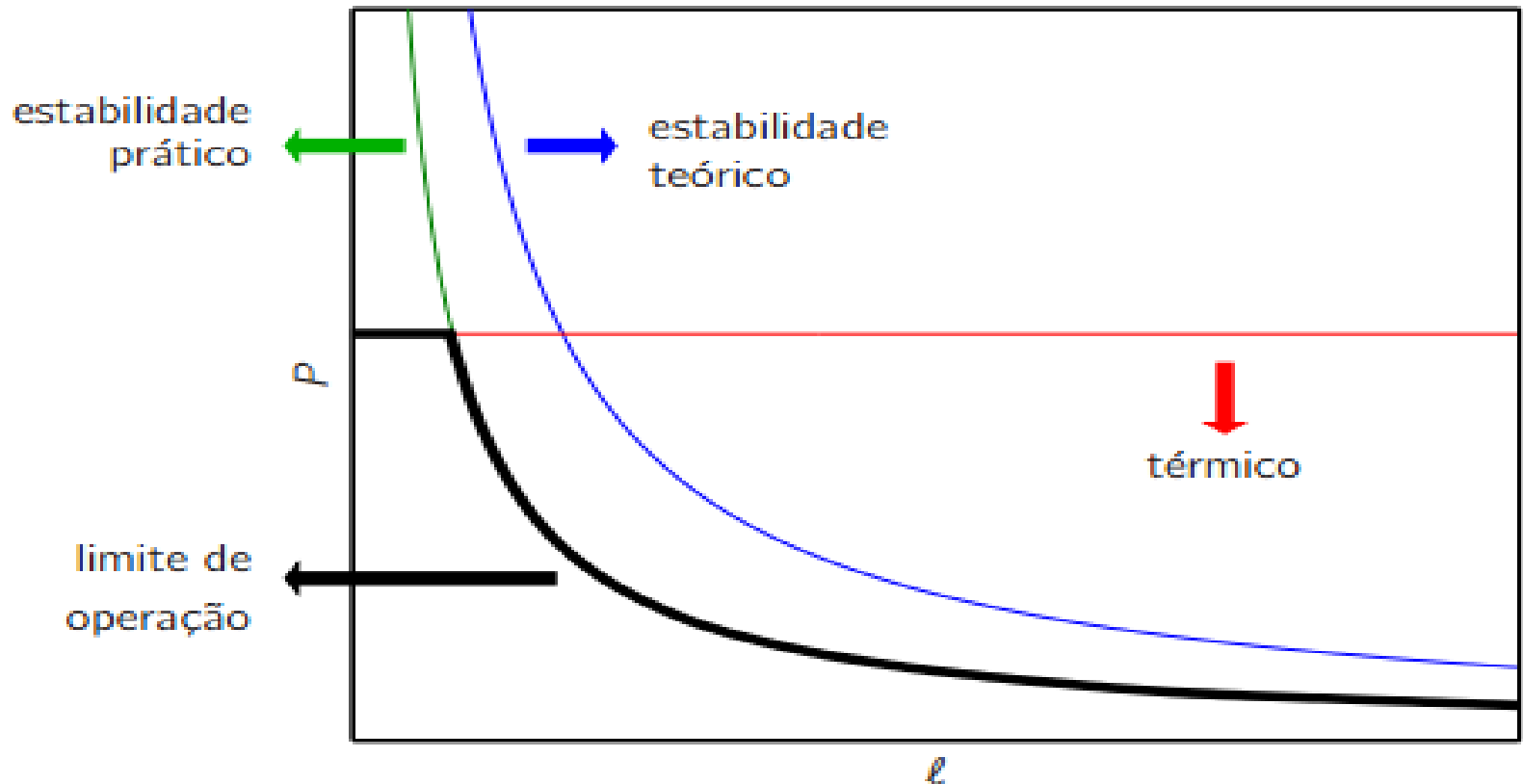
$$V_R \approx 0,95V$$

$$\delta \approx 30^\circ$$

$$X = x\ell$$

Logo:

$$P_R^{\max'} = \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta = \frac{0,95V^2}{x\ell} \sin 30^\circ = 0,475 \frac{V^2}{x\ell} = 0,475 P_R^{\max} = \frac{K'}{\ell}$$



Potência Natural ou SIL – *Surge Impedance Loading*

- Em uma linha sem perdas a **impedância característica** Z_c é simplificada para:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 \quad [\Omega]$$

- tornando-se puramente resistiva. Neste caso, $Z_c = Z_0$ passa a ser denominada de **impedância de surto ou impedância natural** da linha.
- As linhas de transmissão produzem potência reativa (Mvar) devido à sua capacitância

- Potência reativa também é armazenada nos campos magnéticos das linhas de transmissão.
- A potência natural da linha (SIL) é simplesmente a potência real (com fator de potência unitário) na condição em que a potência Mvar absorvida é igual à potência Mvar produzida, ou seja,

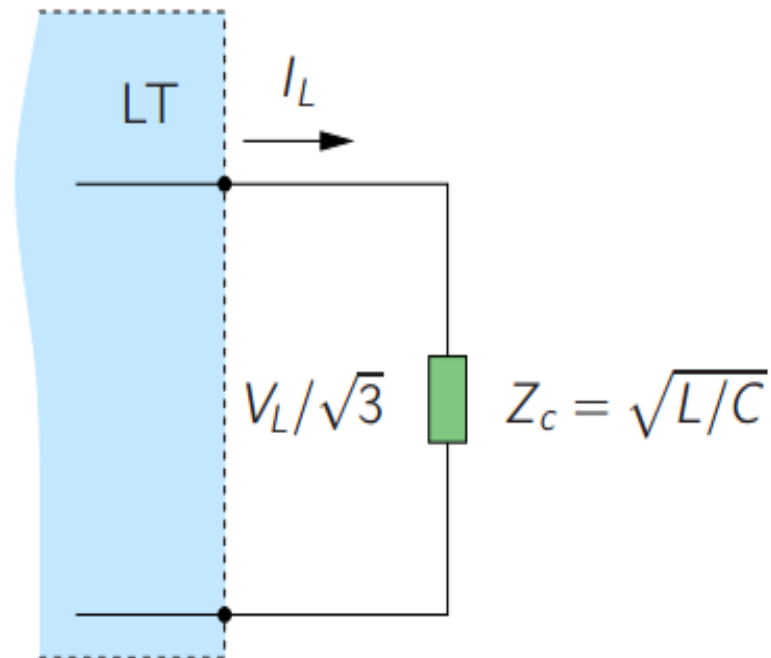
$$I^2 X_L = \frac{V^2}{X_C} \quad \text{Ou} \quad X_L X_C = \frac{V^2}{I^2}$$

O que resulta em impedância igual a impedância de surto.

$$\frac{V}{I} = Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- O significado teórico da impedância de surto é que se uma carga puramente resistiva e igual à impedância de surto da linha fosse conectada aos terminais de uma linha sem perdas, a potência entregue pela linha à carga seria somente ativa (útil), a **qual é denominada de potência natural**.
- Assim, a potência natural de uma linha é a potência entregue pela linha a uma carga cuja impedância é igual à sua impedância natural, $Z_0 = \sqrt{L/C}$ [Ω].

- ▶ Carregamento característico: potência fornecida a uma carga resistiva pura igual à impedância de surto:



Esta potência é transmitida através da linha de transmissão

Em Inglês SIL – Surge Impedance Loading

- ▶ Se V_L é a tensão de linha no final da linha, onde está conectada uma carga resistiva de impedância igual a $R_c = \sqrt{L/C}$ (impedância de surto), a corrente vale:

$$I_L = \frac{V_L/\sqrt{3}}{\sqrt{L/C}} \text{ A}$$

- ▶ Potência total entregue à carga (carregamento característico):

$$SIL = \sqrt{3}V_L I_L = \sqrt{3}V_L \frac{V_L/\sqrt{3}}{\sqrt{L/C}} = \frac{V_L^2}{\sqrt{L/C}}$$

- ▶ Em geral a tensão utilizada para o cálculo de SIL é a tensão nominal da linha. Portanto:

$$SIL = \frac{V_{\text{nominal}}^2}{\sqrt{L/C}}$$

- ▶ SIL fornece um termo de comparação das capacidades de carregamento das linhas
- ▶ É comum a representação da potência transmitida por uma linha em valores por unidade de SIL (p.ex. 0,2 pu SIL)
- ▶ SIL não corresponde à máxima potência que pode ser transmitida pela linha. Esta depende de outros fatores, como o comprimento da linha etc.

- Assim, a potência reativa que flui em uma linha sem perdas operando à potência natural é nula e a **potência real permanece constante entre os terminais transmissor e receptor.**
- Neste regime toda a energia reativa gerada pela linha é consumida pela própria linha.
- Note que a potência natural **independe do comprimento da linha**, sendo, portanto característico da linha
- Quanto maior a capacitância, ou menor a indutância, menor a impedância de surto Z_0 e maior a potência característica ou natural da linha.

Se a tensão de uma linha é duplicada, i.é., $2V_r$, tem-se que a potência natural da linha de tensão duplicada torna-se quatro vezes maior.

$$P_0 = \frac{V_r^2}{Z_0}$$

e

$$P'_0 = \frac{(2V_r)^2}{Z_0} = 4P_0$$

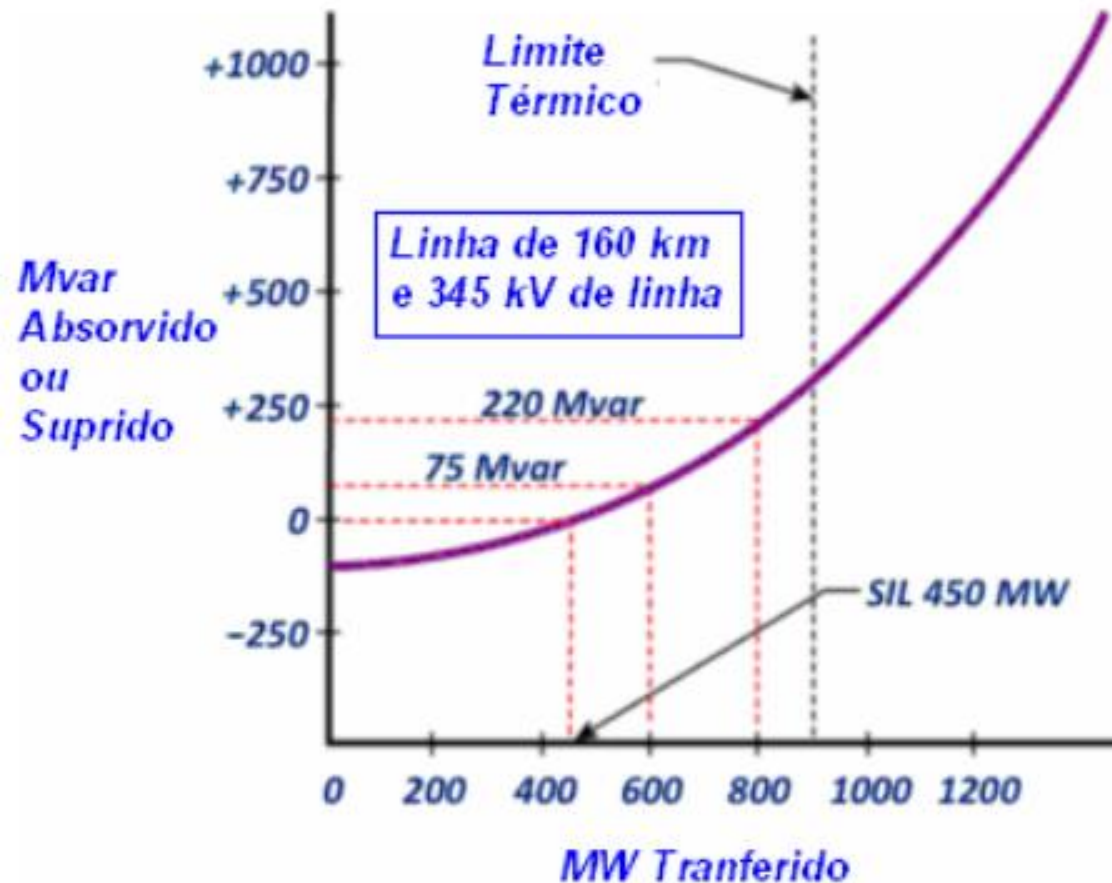
Uma outra medida para aumentar a potência natural seria diminuir Z_0 , diminuindo L e/ou aumentando C . Neste caso, significa compensar a linha.

Tabela Valores Típicos de Impedância de Surto e Potência Natural para linhas aéreas trifásicas em 60 Hz.

V_{nominal} (kV)	$Z_c = \sqrt{L/C}$ (Ω)	$SIL = V_{\text{nom}}^2 / Z_c$ (MW)
69	366-400	12-13
138	366-405	47-52
230	365-395	134-145
345	280-366	325-425
500	233-294	850-1075
765	254-266	2200-2300

Uma linha quando carregada acima de sua SIL ela age como um reator em derivação – absorvendo reativo do sistema, e quando a linha é carregada abaixo de sua SIL ela age como um capacitor em derivação – suprindo Mvar ao sistema.

- A Fig. abaixo ilustra o conceito de SIL. A potência natural da linha considerada no gráfico é de 450 MW. Portanto, **se a linha tem um carregamento de 450 MW**, a potência Mvar produzida pela linha é exatamente igual à potência Mvar consumida pela linha. **Acima da SIL a linha absorve Mvar, tendendo a baixar a tensão. Operar abaixo da SIL a linha produz Mvar, tendendo a elevar a tensão da linha.**



- A capacidade de transmissão de potência de uma linha está relacionada à sua potência natural.
- Aumentar a potência natural de uma linha significa aumentar sua capacidade de transmissão.

$$P_{\max} = \frac{|V_t|_{pu} \cdot |V_r|_{pu}}{\text{sen}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \cdot \text{SIL} \quad [\text{W}]$$

Aumentar a potência natural de uma linha significa aumentar sua capacidade de transmissão.

Que comprimento de linha corresponde a um menor limite de estabilidade P_{\max} ? Quando $\sin(2\pi l/\lambda)$ for igual a 1. Para tanto:

$$\frac{2\pi}{\lambda}l = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \xi_0} \cdot l = \frac{\pi}{2} \quad \therefore l = \frac{1}{4} \cdot \lambda$$

Semelhantemente, o comprimento de linha que resulta em um máximo limite de estabilidade em estado permanente corresponde a

$$\frac{2\pi}{\lambda}l = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \xi_0} \cdot l = \pi \quad \therefore l = \frac{1}{2} \cdot \lambda$$

Assim, P^{\max} é mínimo para $l=\lambda/4$ ou $l=(3/4)\lambda$ e P^{\max} é máximo para $l=\lambda/2$ ou $l=\lambda$.

Linhas cujo comprimento físico seja equivalente a um quarto do comprimento de onda podem ser compensadas de modo a tornarem-se eletricamente mais curtas e, como resultado, aumentar a capacidade de transporte.

Se em um projeto de uma linha compacta (condutores fases mais próximos que em linhas convencionais) é assumido que a distância entre as fases é a metade da distância de uma linha convencional, tem-se que a relação entre a potência natural para a linha convencional P_0 e linha compacta P_0' é dada por:

$$P_0 = \frac{V_r^2}{\sqrt{L/C}} = \frac{V_r^2}{\sqrt{\frac{D}{\mu_0 \epsilon_0 r}}} \quad P_0' = \frac{V_r^2}{\sqrt{\frac{D}{2\mu_0 \epsilon_0 r}}} = \sqrt{2}P_0 = 1,414P_0$$

Compensação de LT

- Para linhas com grandes comprimentos, acima de 400 km, é necessário o uso de equipamentos de compensação, **tais como reatores em paralelo e capacitores em série**, para aumentar a capacidade da linha.
- Os reatores em paralelo (também chamados de reatores shunt) anulam parcialmente o efeito capacitivo da linha, minimizando o **Efeito Ferranti**, que ocorre quando a linha opera em carga leve.
- Ao adicionarmos capacitores série e reatores em derivação (Shunt), estamos diminuindo a reatância serie da linha, diminuindo Z_o , **diminuindo** teta (ou comprimento elétrico da linha de transmissão $teta = w(LC)^{(1/2)l} = 2\pi l / \lambda$) consequentemente aumentando a capacidade da linha.
- Ao adicionarmos cuidadosamente, reatores em derivação (Shunt), estamos diminuindo a capacitância (shunt) da linha, aumentando Z_o , **porém diminuindo** teta **consequentemente aumentando a capacidade da linha**.

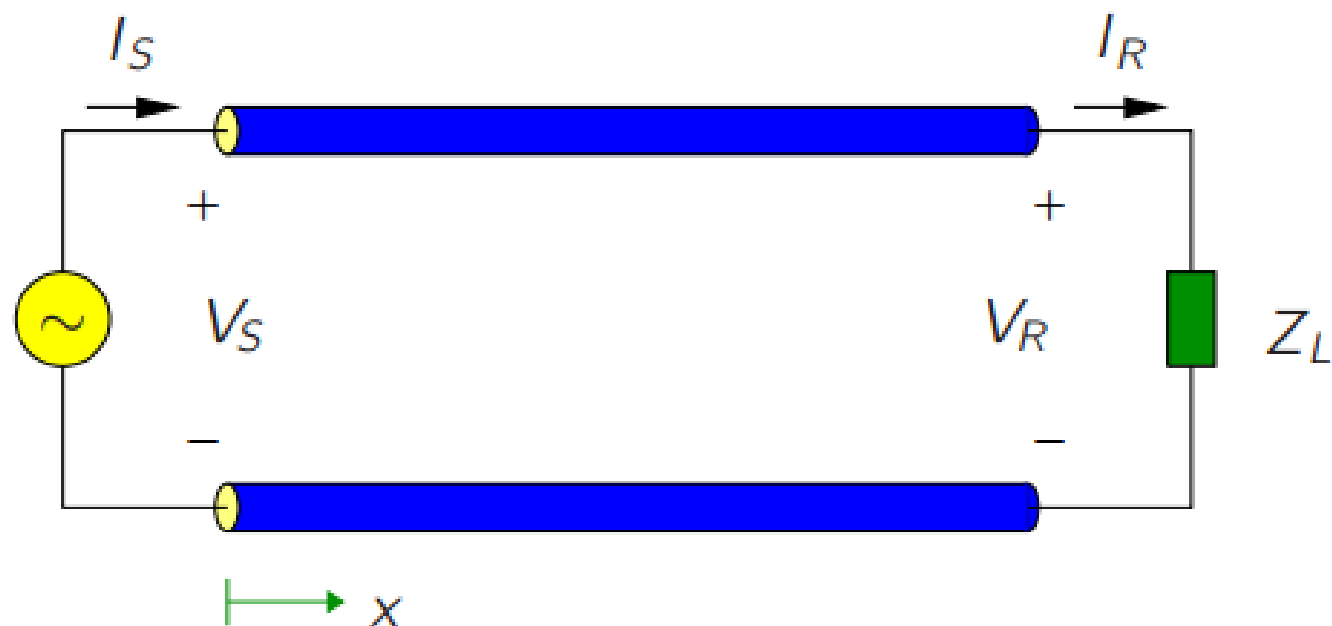
$$P_{\max} = \frac{|V_l|_{pu} \cdot |V_r|_{pu}}{\text{sen}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \cdot \text{SIL} \quad [\text{W}]$$

- Em linhas longas da ordem de 700 km a 1000 km ou mais, de certa forma utilizam essa combinação de recursos, ao instalarem reatores em shunt e capacitores em serie em subestações de seccionamento intermediarias que permitem a adição desses equipamentos ao longo da rota da linha.
- Dessa forma estamos adequando as indutâncias e capacitâncias da linha para uma operação mais segura diante das várias condições de carregamento, ou ate mesmo de linha em vazio.
- A tarefa de compensação reativa shunt e serie de uma linha de longa distancia, é uma tarefa relativamente ampla e complexa, que deve abordar todas as condições normais e de emergência.

Perfil de tensão da Linha (Estudar em casa)

Considere novamente a linha de transmissão trifásica de 60 Hz de circuito simples de um exemplo anterior, que tem um comprimento de 370 km (230 mi). Os condutores são do tipo Rook com espaçamento horizontal plano de 7,25 m (23,8 ft) entre condutores. Obtenha o perfil de tensão da linha, considerando as seguintes situações: (a) linha em vazio; (b) linha em curto-circuito; (c) carga SIL conectada à barra receptora (neste caso, desprezar as perdas ôhmicas da linha); (d) carga nominal conectada à barra receptora; (e) carga leve conectada à barra receptora; (f) carga pesada conectada à barra receptora.

Tem-se o seguinte circuito por fase:



Os dados da linha são:

$$z = 0,8431 \angle 79,04^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$y = 5,105 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S}/\text{mi}$$

$$\gamma = 2,0746 \cdot 10^{-3} \angle 84,52^\circ \text{ mi}^{-1}$$

$$Z_c = 406,4 \angle -5,48 \Omega$$

(a) Em vazio: tem-se $Z_L \rightarrow \infty$ e, portanto, $I_R = 0$. Da equação de onda de corrente:

$$I_R = I_S \cosh \gamma \ell - \frac{V_S}{Z_c} \sinh \gamma \ell = 0$$

$$\rightarrow I_S = \frac{V_S}{Z_c} \operatorname{tgh} \gamma \ell$$

A equação de onda da tensão fica:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_S \cosh \gamma x - Z_c I_S \sinh \gamma x \\ &= V_S (\cosh \gamma x - \operatorname{tgh} \gamma \ell \sinh \gamma x) \end{aligned}$$

(b) Em curto-circuito: tem-se $Z_L = 0$, e, portanto, $V_R = 0$. Da equação de onda da tensão:

$$V_R = V_S \cosh \gamma \ell - Z_c I_S \sinh \gamma \ell = 0$$

$$\rightarrow I_S = \frac{V_S}{Z_c \operatorname{tgh} \gamma \ell}$$

A equação de onda da tensão fica:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_S \cosh \gamma x - Z_c I_S \sinh \gamma x \\ &= V_S \left(\cosh \gamma x - \frac{\sinh \gamma x}{\operatorname{tgh} \gamma \ell} \right) \end{aligned}$$

(c) Neste caso, as perdas ôhmicas da linha são desprezadas, logo:

$$z' = 0,8277 \angle 90^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$y' = y = 5,105 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/mi}$$

$$\gamma' = 2,0556 \cdot 10^{-3} \angle 90^\circ \text{ mi}^{-1}$$

$$Z'_c = 402,66 \Omega = Z_L$$

Conforme visto anteriormente, a equação de onda da tensão neste caso fica:

$$V_R = V_S \cos \beta l - j Z'_c I_S \sin \beta l = Z'_c I_R$$

$$I_R = \frac{V_S}{Z'_c} \cos \beta l - j I_S \sin \beta l$$

Tomando a equação de onda de corrente tem-se:

$$I_R = I_S \cos \beta \ell - j \frac{V_S}{Z_c'} \sin \beta \ell$$

Comparando as duas equações para I_R , verifica-se que a tensão fica:

que $V_S = Z_c' I_S$ e a equação das

$$V(x) = V_S (\cos \beta x - j \sin \beta x) = V_S e^{j\beta x}$$

(d) Considerando uma carga nominal Z_L : as equações de onda são:

$$V_R = V_S \cosh \gamma \ell - Z_c I_S \sinh \gamma \ell = Z_L I_R \quad (1)$$

$$I_R = I_S \cosh \gamma \ell - \frac{V_S}{Z_c} \sinh \gamma \ell = V_R / Z_L \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) obtém-se a seguinte expressão para I_S :

$$I_S = \left(\frac{V_S \cosh \gamma \ell + \frac{Z_L}{Z_c} V_S \sinh \gamma \ell}{Z_L \cosh \gamma \ell + Z_c \sinh \gamma \ell} \right)$$

Portanto, a equação de onda de tensão fica:

$$V(x) = V_S \cosh \gamma x - Z_c I_S \sinh \gamma x$$

em que I_S é dado por (3).

(e) Carga leve: vale a equação do item (d) com o valor apropriado de Z_L .

(f) Carga pesada: vale a equação do item (d) com o valor apropriado de Z_L .

A figura a seguir mostra os perfis de tensão para todos os casos estudados.

