O efeito Ferranti é um fenômeno que ocorre em linhas de transmissão longas, especialmente quando operam em vazio ou com cargas leves. O efeito Ferranti faz com que a tensão aumente ao longo da linha de transmissão provocando um aumento da tensão no terminal receptor em relação ao terminal transmissor.

Esse aumento de tensão é causado pela capacitância da linha, que gera uma corrente de carga que interage com a indutância da linha e pode atingir valores inaceitáveis, por exemplo, acima de 110% da tensão nominal da linha de transmissão no terminal receptor

A fórmula para calcular o efeito Ferranti, sem compensação na linha de transmissão, é dada abaixo:

$$\frac{\text{Vreceptor}}{\text{Vtransmissor}} = \frac{1}{\cosh(\gamma.\text{L})}$$

Onde:

- V receptor é a tensão no terminal receptor.
- V transmissor é a tensão no terminal transmissor.
- γ é a constante de propagação da linha.
- L é o comprimento da linha.

A compensação da linha de transmissão com reatores no terminal receptor é uma técnica utilizada para mitigar o efeito Ferranti. Os reatores absorvem a corrente de carga da linha, reduzindo o aumento de tensão.

A constante de propagação da linha de transmissão é calculada, como abaixo:

$$\gamma = \sqrt{Z.Y} \quad \Rightarrow \quad \gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

Onde:

- L' é a Indutância por unidade de comprimento (mH/km).
- C' é a Capacitância por unidade de comprimento (nF/km).
- R' é a Resistência por unidade de comprimento (Ω/km).
- G' é a Condutância por unidade de comprimento (S/km).

Uma forma simplificada rápida para cálculo do efeito Ferranti para calcular a tensão no receptor é considerar 6,2 graus para cada 100 km em sistemas 60 hz e 5,17 graus em sistemas de 50 Hz.

Resultando em uma fórmula conforme abaixo:

$$V_r = V_s \times \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Ou seja, para uma linha de transmissão de 450 km e tensão no emissor de 1,00 pu, teria no receptor uma tensão de:

$$Vr = 1{,}0.\left(\frac{1}{\cos(6.2 * 4{,}5)}\right) = 1{,}132\,pu$$

A formulação para compensação shunt em dois terminais é apresentada abaixo:

$$\frac{\text{Vreceptor}}{\text{Vtransmissor}} = \frac{1}{\cosh(\gamma.\mathrm{L}) + \mathrm{B.Zc.senh}(\gamma.\mathrm{L})}$$

Onde **Zc** é a Impedância característica de linha de transmissão dada por:

$$\mathrm{Zc} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

E **B** é a Susceptância da linha de transmissão dada por:

$$\mathrm{B} = \mathrm{y.(\%\ Compensação\ Shunt)} \quad \text{onde} \ \ \mathrm{y} = \mathrm{Y.L.}\left[\frac{\tanh(\gamma.\mathrm{L}/2)}{\gamma.\mathrm{L}/2}\right]$$

Utilizamos reatores shunt nos terminais da linha de transmissão para mitigar o efeito Ferranti; podemos compensar a linha de transmissão com um reator no terminal receptor ou dois reatores shunt, um no terminal transmissor e outro no terminal receptor.

Após estas considerações, vamos realizar os cálculos para verificar o efeito Ferranti em uma linha de transmissão sem compensação shunt, com compensação shunt em apenas um terminal e com compensação shunt nos dois terminais; que elucidará quaisquer dúvidas.

Exemplo de cálculo passo a passo:

1. **Dados da linha - cabo Grossbeak:**

Comprimento da linha (L): 450 km
Tensão da linha (Vtransmissor): 440 kV
Resistência por unidade de comprimento (R'): 0,02247 Ω/km
Reatância por unidade de comprimento ($2\pi.f.L'$): 0,3175 Ω/km
Admitância por unidade de comprimento considerando G=0 ($2\pi.f.C'$): 4,99234 $\mu S / km$

2. **Cálculo do efeito Ferranti sem compensação:**

$$Z = R + jX = 0{,}02247 + j\,0{,}3175 = 0{,}3183\,\angle 85{,}95^\circ$$

$$Y = j\,4{,}99234 \times 10^{-6}$$

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \sqrt{0{,}3183 \times 4{,}99234 \times 10^{-6}}\ \angle \frac{85{,}95 + 90}{2}$$

$$\gamma = 1{,}2606 \times 10^{-3}\,\angle 87{,}975^\circ$$

$$\gamma \cdot \text{compr LT} = 1{,}2606 \times 10^{-3} \times (450) = \overbrace{0{,}5672\,\angle 87{,}975}^{0{,}02 + j\,0{,}5669}$$

$$\cosh(\gamma \cdot \text{compr LT}) = \cosh(0{,}02 + j\,0{,}5669) \Rightarrow$$

$$\cosh(\overset{\text{rd}}{0{,}02}) \times \cos(\overset{\text{rd}}{0{,}5669}) + j\,\text{senh}(0{,}02) \times \text{sen}(0{,}5669)$$

$$1{,}0 \times 0{,}8436 + j\,0{,}02 \times 0{,}537 = 0{,}8437\,\angle 0{,}729^\circ$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cosh(\gamma \cdot \text{compr LT})} = \frac{1}{0{,}8437} = \boxed{1{,}1852\,\text{pu}}$$

$$Y \cdot \text{Compr} = 4{,}99234 \times 10^{-6}\,\angle 90 \times 450$$

$$= 2{,}2466 \times 10^{-3}\,\angle 90$$

Veja, que a fórmula rápida de 6,2graus por cada 100 km, não se mostra com a precisão adequada; pois 1,1852 pu é bem diferente de 1,132 pu.

3. **Cálculo do efeito Ferranti com compensação de 40% no terminal receptor:**

A compensação de 40% reduz a constante de propagação efetiva da linha.

γ compensado = γ * (1 - 0,40) = 1,2606*10^{-3} rad./km *0,60 = 0,00075636 rad./km

cosh (γ compensado * L) = cosh (0,00075636 rad./km * 450 km) =>

cosh (0,34 rad.) ≈ 1,0585

γ receptor / γ transmissor = 1 / 1,0585 ≈ 0,9447 pu

V receptor ≈ 440 kV * 0,9447 ≈ 415,683 kV.

4. **Cálculo do efeito Ferranti com compensação de 40%, porém, 20% de compensação em cada terminal da linha de transmissão:**

LT com 40% de compensação
reatores iguais nos dois lados

$$y = Y \cdot L \cdot \left[\frac{\tanh\left(\frac{\gamma \cdot L}{2}\right)}{\frac{\gamma \cdot L}{2}} \right]$$

$$\frac{\gamma \cdot L}{2} = \frac{0,5672\angle[illegible]}{2}$$

$$\frac{\gamma L}{2} = 0,2836\angle 87,975^\circ = 0,01 + j0,2834$$

$$\tanh(0,01 + j0,2834)$$

$$\to \frac{\operatorname{senh}(0,01) \cdot \cos(0,2834) + j\cosh(0,01) \cdot \operatorname{sen}(0,2834)}{\cosh(0,01) \cdot \cos(0,2834) + j\operatorname{senh}(0,01) \cdot \operatorname{sen}(0,2834)}$$

$$\to \frac{0,01 \times 0,96 + j\,1 \times 0,2796}{1 \times 0,96 + j\,0,01 \times 0,2796} = \frac{0,0096 + j0,2796}{0,96 + j0,002796} = \frac{0,2798\angle 88^\circ}{0,96\angle 0,167^\circ}$$

$$\tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right) = 0{,}2915 \angle 87{,}833^\circ \Rightarrow \frac{\tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right)}{\frac{\gamma L}{2}} = \frac{0{,}2915 \angle 87{,}833}{0{,}2836 \angle 87{,}975} = 1{,}0268 \angle -0{,}142$$

$$Y = Y \cdot L \times 1{,}0278 \angle -0{,}142 \qquad Y \cdot L = 2{,}24655 \times 10^{-3} \angle 90$$

$$Y = 2{,}24655 \times 10^{-3} \times 1{,}0278 = 2{,}309 \times 10^{-3} \angle 89{,}86^\circ$$

$$B = Y \times (\%\ \text{compensação}) = 2{,}309^{\times 10^{-3}} \times 0{,}4$$

$$B = Y \times (\%\ \text{compensação}) = 2{,}309^{\times 10^{-3}} \times 0{,}4 =$$

$$= 9{,}236 \times 10^{-4} \angle 89{,}86^\circ$$

$$\boxed{\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cosh(\gamma L) + B \cdot Z_C \times \operatorname{senh}(\gamma L)}}$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{0{,}3183 \angle 85{,}95}{4{,}99234 \times 10^{-6} \angle 90}} = 252{,}5 \angle \frac{-4{,}05}{2}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{0{,}8437 \angle 0{,}729 + (9{,}236 \times 10^{-4} \angle 89{,}86 \times 252{,}5 \angle -2{,}025 \times \operatorname{senh}(\gamma L)}$$

$$\operatorname{senh} \gamma L = \operatorname{senh}(0{,}02) \cdot \cos(0{,}5669) + j \cosh(0{,}02) \cdot \operatorname{sen}(0{,}5669)$$

$$\operatorname{senh} \gamma L = 0{,}02 \times 0{,}8436 + j\, 1 \times 0{,}537 = 0{,}5373 \angle 88{,}2^\circ$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{0{,}8437 \angle 0{,}729 + (9{,}236 \times 10^{-4} \angle 89{,}86 \times 252{,}5 \angle -2{,}02 \times 0{,}5373 \angle 88{,}2)}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\underbrace{0{,}8437\angle 0{,}729}_{0{,}8436 + j0{,}01} + \underbrace{0{,}1253\angle 176{,}04}_{+0{,}125 + j\,8{,}653 \times 10^{-3}}} = 1{,}032$$

5. **Análise dos resultados:**

Sem compensação, a tensão no terminal receptor seria de aproximadamente 521,49 kV.

Com compensação de 40% no terminal receptor, levaria a tensão no terminal receptor a cerca de 415,68 kV.

Com compensação de 20% em cada terminal – transmissor e receptor - levaria a tensão no terminal receptor a cerca de 454,08 kV.

Considerações:

E eu não errei em nenhuma conta, tudo leva a crer, que a compensação da linha de transmissão somente no terminal receptor é muito mais efetiva que metade dela, em cada terminal. No entanto, temos que levar em conta que uma linha de transmissão tem que ser energizada pelos dois terminais e portanto, parece mais lógico que a compensação seja repartida pelos dois terminais.

Uma cortesia do engenheiro Dirceu de almeida