

Valores PU

$$\text{Valor PU} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor de base}}$$

Selecionar: 3ϕ

$$\text{Tensão de Base} \quad KV_{L-L}$$

$$\text{Potência de Base} \quad KVA_{3\phi}$$

$$\text{Corrente de Base} = \frac{\text{base } KVA_{3\phi}}{\sqrt{3} \text{ base } KV_{L-L}} = \text{A}$$

$$\text{base impedance} = \frac{(\text{base } KV_{L-L})^2}{\text{base } MVA_{3\phi}} = \Omega$$

$$= \frac{(\text{base } KV_{L-N})^2}{\text{base } MVA_{1\phi}} = \Omega$$

Exemplo Numerico 1

$$\text{Base } KVA_{3\phi} = 30,000 \text{ KVA}$$

$$\text{Base } KV_{ll} = 120 \text{ KV}$$

$$\text{Base } KA = \frac{\text{base } MVA_{3\phi}}{\sqrt{3} \text{ base } KV_{ll}} = \frac{30}{\sqrt{3} * 120} = \frac{1}{4\sqrt{3}} KA$$

$$\text{Base } \Omega = \frac{(\text{Base } KV_{ll})^2}{\text{Base } MVA_{3\phi}} = \frac{(120)^2}{30} = 480\Omega$$

Exemplo Numerico 2

Tensão de linha atual: 108 KV

$$\text{Tensão PU} = \frac{108KV}{120KV} = 0.90$$

Potência atual trifásica: 18,000KW

$$\text{Potência em PU} = \frac{18}{30} = 0.6$$

$$\text{Corrente atual} = \sqrt{3} / 18 \text{ A}$$

$$\text{Corrente em PU} = \frac{\sqrt{3}/18}{1/4\sqrt{3}} = 2/3$$

$$\text{Resistencia atual} = 648 \Omega$$

$$\text{Resistência em PU} = \frac{648}{480} = 1.35$$

Exemplo Numerico 3

$$V_{l-l} = 108KV \quad V_{L-N} = \frac{108}{\sqrt{3}} = 62.3KV \quad P_{3\phi} = 18000KW \quad P_{1\phi} = \frac{18000}{3} = 6000KW$$

Assumindo que : $\cos \theta = 1$

$$I_L = \frac{18000}{\sqrt{3} * 108} \longleftrightarrow I_L = \frac{6000}{62.3}$$

Selecionamos Base $KVA_{3\phi} = 36000KVA$

Base $V_{L-L} = 120KV$

então Base $KVA_{1\phi} = 12000KVA$

Base $V_{L-N} = \frac{120}{\sqrt{3}} = 69.2KV$

Base $I_L = \frac{3600}{69.2} = 100\sqrt{3}$

Base $I_L = \frac{12000}{69.2} = 100\sqrt{3}$

Diagrama Unifilar e Diagrama de Impedâncias da Rede

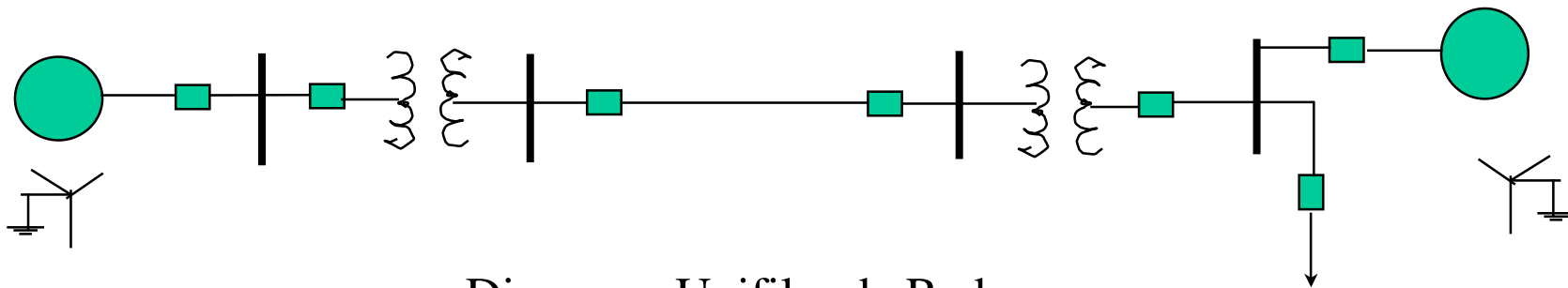


Diagrama Unifilar da Rede

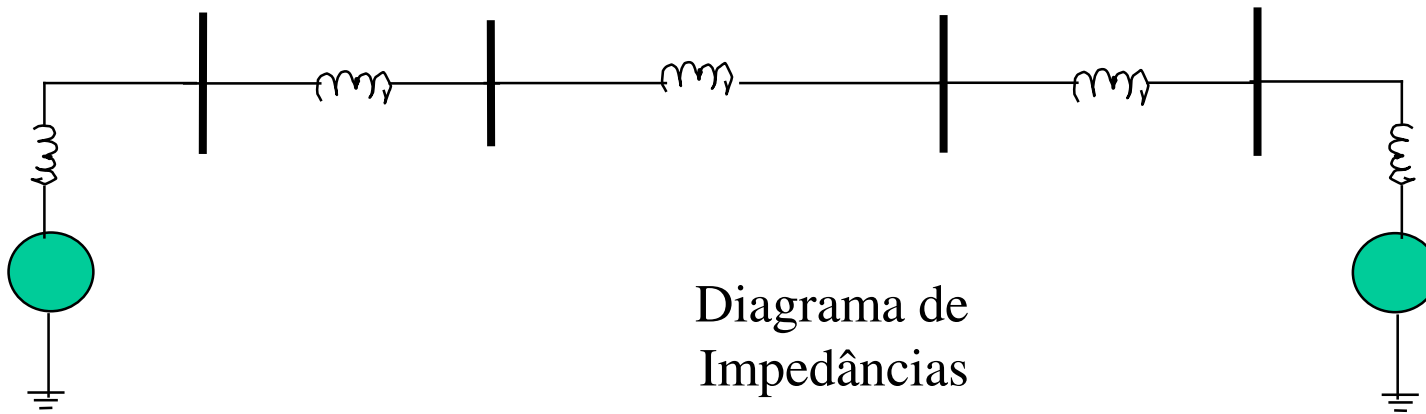


Diagrama de Impedâncias

Mudança de Base de Variáveis em PU 1

$$\text{impedancia em PU} = \frac{(\text{impedancia atual, } \Omega) * (\text{base kVA})}{(\text{Base tensão, kV})^2 * 1000}$$

$$Z_{\text{novo}} pu = Z_{\text{dado}} \left(\frac{\text{base kV}_{\text{dado}}}{\text{base kV}_{\text{nova}}} \right)^2 \left(\frac{\text{base kVA}_{\text{nova}}}{\text{base kVA}_{\text{dado}}} \right)$$

Mudança de Base de Variáveis em PU 2

Exemplo A reatância de um gerador X'' tem um valor de 0.25 PU na base nominal do gerador de 18 kV, 500MVA.

Pra uma base 20 kV, 100MVA. Ache X'' nesta nova base.

Utilizando a equação de conversão de base teremos:

$$X'' = 0.25 \left(\frac{18}{20} \right)^2 \left(\frac{100}{500} \right) = 0.0405 \text{ pu}$$

Ou convertendo o valor dado para Ohms e de dividindo pelo novo valor de base de impedância :

$$X'' = \frac{0.25(18^2 / 500)}{20^2 / 100} = 0.0405 \text{ pu}$$

Sistema PU

- Os engenheiros utilizam o sistema em pu onde cada valor real de uma variável (ohms, amperes, volt, watts, etc.) é dividido pelo valor de base dela e expresso em porcentagem ou em valores pu que estão entre 0 e 1.

$$S_{pu} = \frac{S_{real}}{S_{base}}$$

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}}$$

$$I_{pu} = \frac{I_{real}}{I_{base}}$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$$

- A vantagem do sistema por unidade é a eliminação dos transformadores dos circuitos.

Sistema PU

- Os valores de base da potência e da tensão são fixados por trecho da rede
- Os valores de base das impedância por trecho é dado em função dos valores de base da tensão e da potência como:

$$\mathbf{Z}_{\text{base}} = \frac{\mathbf{V}_{\text{rated}}}{\mathbf{I}_{\text{rated}}} = \frac{\mathbf{V}_{\text{rated}}^2}{\mathbf{S}_{\text{rated}}} \quad \text{pois} \quad \mathbf{S}_{\text{rated}} = \mathbf{I}_{\text{rated}} \mathbf{V}_{\text{rated}}$$

- Valem também as seguintes relações:

$$\mathbf{Z}_{\text{pu}} = \frac{\mathbf{Z}_{\text{ohm}}}{\mathbf{Z}_{\text{base}}} = \mathbf{Z}_{\text{ohm}} \left(\frac{\mathbf{S}_{\text{rated}}}{\mathbf{V}_{\text{rated}}^2} \right) \quad \mathbf{Z}_{\text{ohm}} = \mathbf{Z}_{\text{pu}} \mathbf{Z}_{\text{base}} = \mathbf{Z}_{\text{pu}} \left(\frac{\mathbf{V}_{\text{rated}}^2}{\mathbf{S}_{\text{rated}}} \right)$$

Impedância em PU de Transformadores

- $S_1 = S_2$ e $s_1 = S_1/S_b$ e $s_2 = S_2/S_b'$ para $s_1 = s_2$ então $S_b = S_b'$
- $N_1 I_1 = N_2 I_2$
- $I_2 = I_1 (N_1/N_2) = I_1 (V_{n1}/V_{n2})$
- $I_b = S_b/I_b$ e $I_b' = S_b'/V_b' = S_b/I_b (V_{n1}/V_{n2}) = I_b (V_{n1}/V_{n2})$
- $i_1 = I_1/I_b$ e $i_2 = I_2/I_b' = (I_1 (V_{n1}/V_{n2})) / (I_b (V_{n1}/V_{n2})) = I_1/I_b = i_1$
- $I_1^2 Z_1 = I_2^2 Z_2 = I_1^2 (V_{n1}/V_{n2}) \rightarrow Z_2 = Z_1 (V_{n2}/V_{n1})^2$
- $Z_b = V_b^2/S_b$ e $Z_b' = V_b'^2/S_b' = (V_b^2/S_b)(V_{n2}/V_{n1})^2 = Z_b (V_{n2}/V_{n1})^2$
- $z_1 = Z_1/Z_b = Z_1 (S_b/V_b^2) (V_{n2}/V_{n1})^2$
- $z_2 = Z_2/Z_b' = (Z_1 (V_{n2}/V_{n1})^2) / (Z_b (V_{n2}/V_{n1})^2) = Z_1 (S_b/V_b^2) = z_1$

Transformador com 3 Enrolamentos

- $z_p = 1/2(z_{ps} + z_{pt} - z_{st})$
- $z_s = 1/2(z_{ps} + z_{st} - z_{pt})$
- $z_t = 1/2(z_{pt} + z_{st} - z_{ps})$
- Exemplo 127/69/13,8 kV - 15 MVA -3 enrolamentos
 - ensaio CC em 69 kV visto por 127 kV - 300kW, 118,1 A e 10,465 kV
 - ensaio CC 13,8 kV visto por 127 kV - 450kW, 118,1 A e 15,697 kV
 - ensaio CC 13,8 kV visto por 69 kV - 225kW, 217,29 A e 4,264 kV
 - $r_{12}=0,02$, $x_{12} = 0,08$ e $r_{13}=0,03$, $x_{13}=0,12$ e $r_{23}=0,015$, $x_{23}=0,06$ pu
 - $z_p=0,0175 + j 0,07$, $z_s = 0,015 + j0,01$ e $z_t = 0,0125 + j0,05$ pu

Sistema Pu em Circuitos Trifásicos

- $V_f = ZI$ e $S_f = V_f I$, $V = 1,73 V_f$ e $S = 3S_f$
- adotando V_{bf} e S_{bf}
- $I_{bf} = S_{bf}/V_{bf}$, $Z_{bf} = V_{bf}/I_{bf} = V_{bf}^2/S_{bf}$
- $v_f = V_f/V_{bf}$, $s_f = S_f/S_{bf}$, $i = I/I_{bf} = I(V_{bf}/S_{bf})$ e $z = Z/Z_{bf} = Z(S_{bf}/V_{bf}^2)$
- $V_b = 1,73 V_{bf}$ e $S_b = 3S_{bf}$
- $I_b = S_b/(1,73 V_b) = 3S_{bf}/(3 V_{bf}) = S_{bf}/V_{bf} = I_{bf}$, $Z_b = (V_b/1,73)/I_b = (V_b/1,73)/(S_b/(1,73 V_b)) = V_b^2/S_b = V_{bf}^2/S_{bf} = Z_{bf}$
- $v = V/V_b = 1,73 V_f/1,73 V_{bf} = V_f/V_{bf} = v_f$
- $s = S/S_b = 3S_f/3S_{bf} = S_f/S_{bf} = s_f$
- $i = I/I_b = i/i_{bf} = i_f$ e
- $z = Z/Z_b = Z/Z_{bf} = z_f$

Sistema PU - Exercício

Um gerador alimenta uma carga através de um transformador. Os dados do sistema são os seguintes:

Gerador: 450 MVA	25 kV	$X_{\text{gen}} = 85\%$	Transformador:
500 MVA	25 kV /120 kV	$X_{\text{tr}} = 13 \%$	

- Converta as impedâncias do gerador e do transformador em ohm.
- Desenhe o diagrama unifilar e o de impedâncias.
- Calcular a corrente de curto-circuito quando os 3 terminais de alta tensão do transformador são curto-circuitados e a tensão do gerador é de 30kV fase terra.