

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO



Sumário

Unidade 1 | Introdução aos sistemas elétricos de potência (SEP)

Seção - 1.1 O sistema elétrico de potência (SEP)

Seção - 1.2 Equipamentos elétricos utilizados em SEP

Seção - 1.3 Subestações de energia

Unidade 2 | Análise do sistema elétrico de potência

Seção - 2.1 Sistema por unidade (PU)

Seção - 2.2 Geradores e cargas utilizados em SEP

Seção - 2.3 Introdução ao fluxo de potência



Sumário

Unidade 3 | Sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC)

Seção 3.1 - Introdução aos sistemas de transmissão em corrente contínua

Seção 3.2 - Sistemas HVDC com elo de corrente

Seção 3.3 - Sistemas HVDC com elo de tensão

Unidade 4 | Automação dos sistemas de distribuição de energia

Seção 4.1 - Motivações para a automação do sistema de distribuição de energia

Seção 4.2 - Monitoramento das redes de distribuição

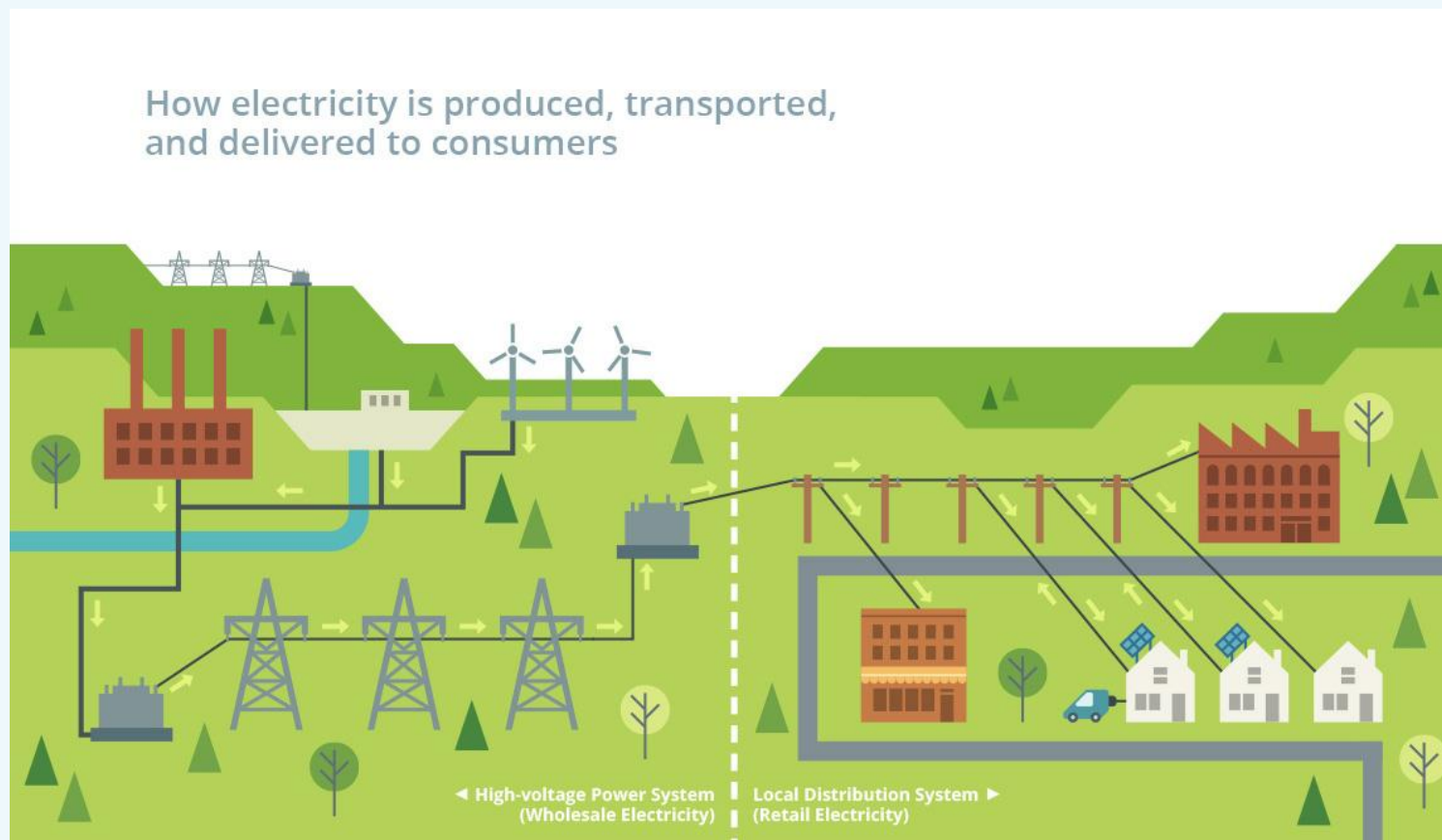
Seção 4.3 - O sistema de gerenciamento da distribuição e suas funções

CONCEITOS

Contextualização



SEP: a máquina mais complexa já inventada pelo homem!



Fonte: disponível em: <<https://images.app.goo.gl/gmNzHrGSy9TtFJks7>>. Acesso 13 abr. 2020.

CONCEITOS

Sistema por unidade



Sistema por Unidade (PU)

- O valor de determinada grandeza **por unidade (pu)** é definido como a relação entre esta grandeza e o valor adotado arbitrariamente como sua base, sendo expresso em decimal. O valor em **pu** pode ser também expresso em **porcentagem**.

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

$$Valor_{\%} = Valor_{pu} \times 100\%$$

- Em análises de redes, os valores % ou **pu** são determinados a partir das relações a seguir:

$$V = Z \cdot I$$

$$S = V \cdot I$$

Valores em pu são frequentemente encontrados em especificações e dados de placas de equipamentos elétricos (como geradores, transformadores, etc.)

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_p$$

V_L - tensão de linha;
 V_p - tensão de fase.

Exemplos Cuidado quando for tensão de linha ou tensão de fase

$$I_{base}[A] = \frac{S_{base}[kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base}[kV]_{LL}}$$

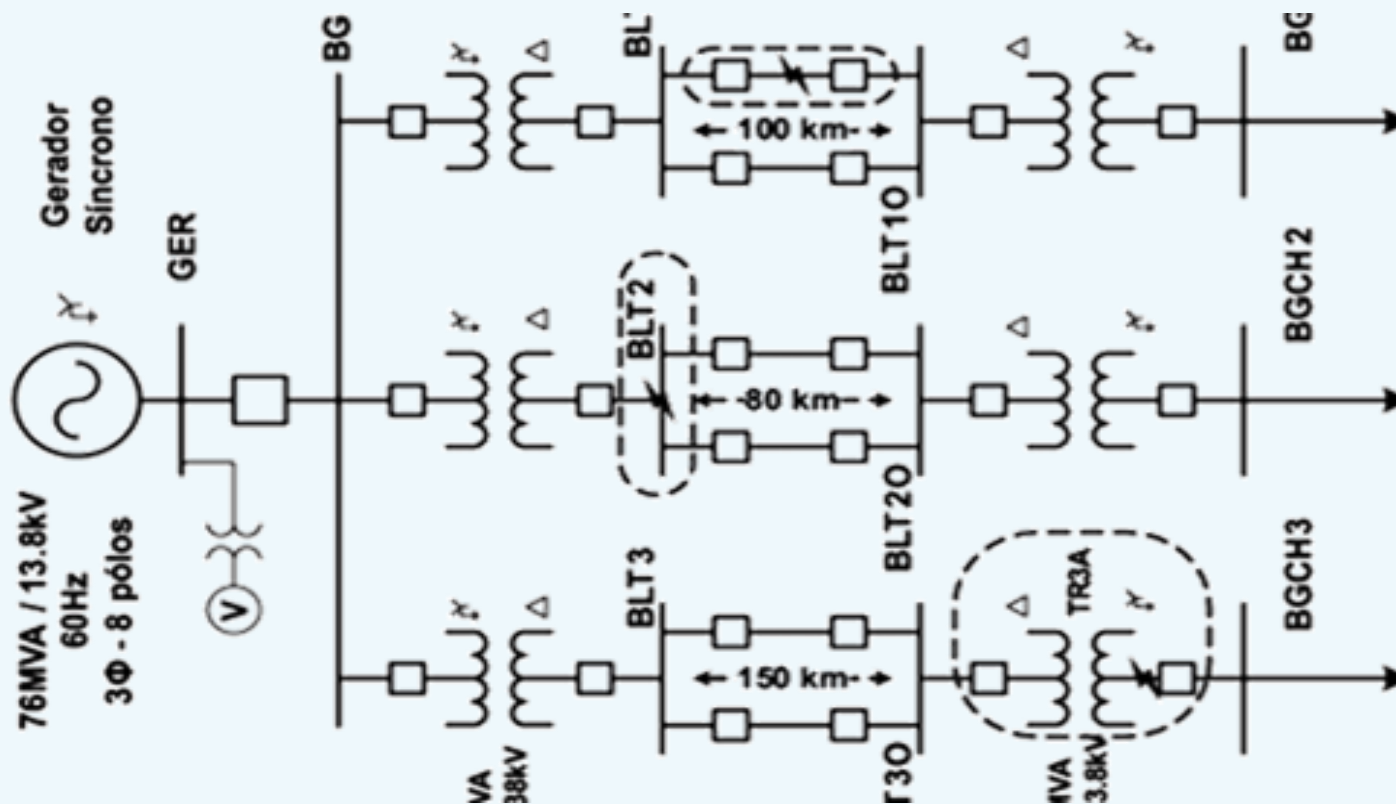
$$Z_{base}[\Omega] = \frac{(V_{base}[kV]_{LN}/\sqrt{3})^2}{S_{base}[kVA]_{3\phi}/3}$$

$$Z_{base}[\Omega] = \frac{(V_{base}[kV]_{LL})^2}{S_{base}[MVA]_{3\phi}}$$



Motivação

- Muitas unidades!
- Transformações ao longo das linhas!



Fonte: Barbosa, 2008.



1 – Obtenção de valores de base

➤ Assuma valores para $S_{base}[kVA]_{3\phi}$ e $V_{base}[kV]_{LL}$

➤ Calcule:
$$I_{base}[A] = \frac{S_{base}[kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{base}[kV]_{LL}}$$

$$Z_{base}[\Omega] = \frac{(V_{baseLL})^2}{S_{base3\phi}} = \frac{(V_{baseLN} \cdot \sqrt{3})^2}{3 \cdot S_{base1\phi}} = \frac{V_{baseLN}^2}{S_{base1\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$



Exemplo: Considere um SEP com $S_{base} = 100$ MVA. Parte desse sistema tem tensão $\frac{200}{\sqrt{3}}$ kV; Qual o valor em pu de uma corrente de 250 A nesse sistema?

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}V_{base}} = \frac{100 \text{ M}}{200 \text{ k}} = 500 \text{ A}$$

Logo, a corrente, em pu é:

$$I_{pu} = \frac{250}{500} = 0,5 \text{ pu}$$



2 – Mudança de base

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

- Um gerador de 50 MVA e 10 kV (valores de base) possui reatância de 0,12 pu. Caso ele seja conectado a um sistema de 100 MVA, qual será o valor da reatância do gerador em pu?

2 – Mudança de base

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

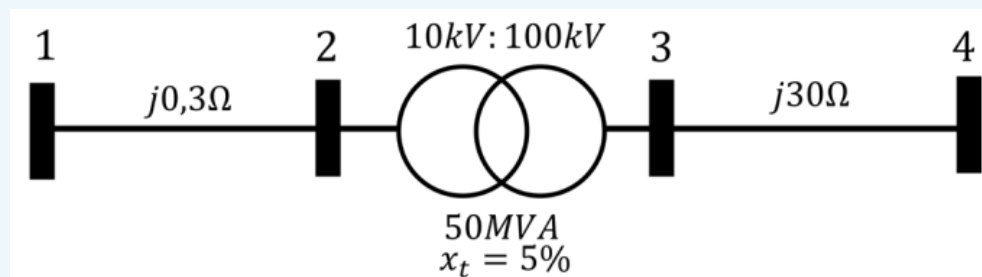
$$x_{pu}^{100MVA} = x_{pu}^{50MVA} \frac{Z_{base}^{50MVA}}{Z_{base}^{100MVA}} = x_{pu}^{50MVA} \frac{\frac{(10kV)^2}{50MVA}}{\frac{(10kV)^2}{100MVA}} = x_{pu}^{50MVA} \frac{100MVA}{50MVA}$$

$$x_{pu}^{100MVA} = 0,12 \frac{100}{50} = 0,24 \text{ pu}$$



Exemplo

Encontre os valores em pu para o sistema da figura. A impedância do transformador está na base do equipamento.



Fonte: Silva, 2019, p. 59.

$$V_{b1} = 10\text{kV}$$

$$V_{b2} = 100\text{kV}$$

$$Z_{b1} = \frac{(V_{b1})^2}{S_b} = \frac{(10 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 1 \Omega$$

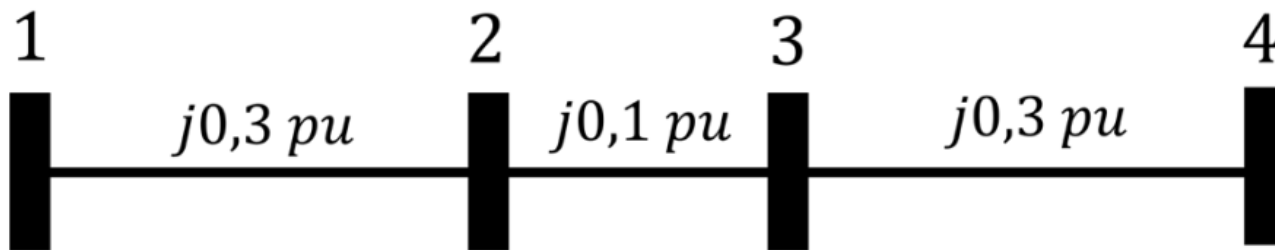
$$Z_{b2} = \frac{(V_{b2})^2}{S_b} = \frac{(100 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 100 \Omega$$

Impedância das linhas, em pu:

$$z_{1-2} = \frac{j0,3\Omega}{1\Omega} = j0,3 \text{ pu}$$

$$z_{3-4} = \frac{j30\Omega}{100\Omega} = j0,3 \text{ pu}$$

$$z_{2-3} = j0,05 \frac{100}{50} = j0,1 \text{ pu} \leftarrow \text{Mudança de base}$$

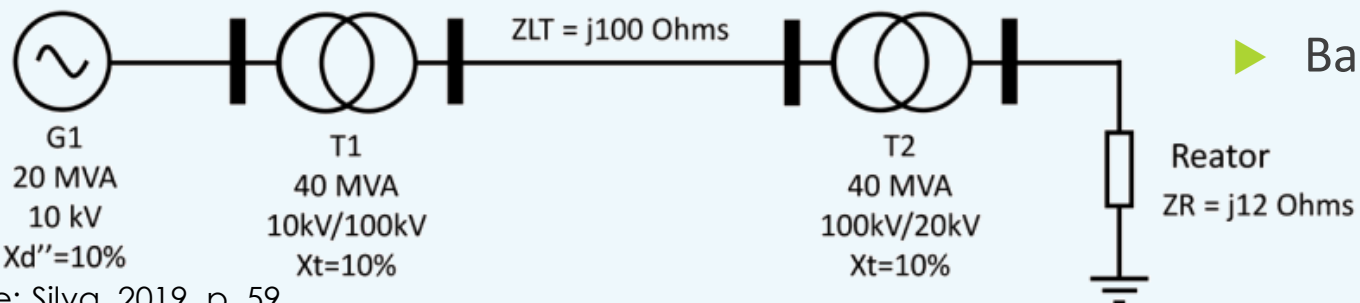


SITUAÇÃO PROBLEMA

Estudo de
sistema elétrico



SP: resolução



Fonte: Silva, 2019, p. 59.

$$V_{b1} = 10 \text{ kV}$$

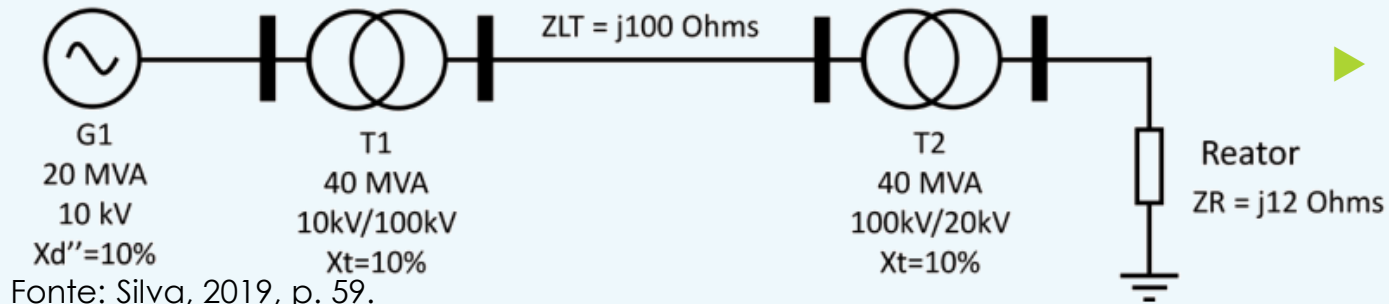
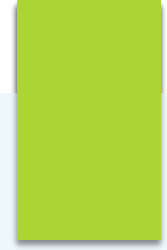
$$V_{b2} = 100 \text{ kV}$$

$$V_{b3} = 20 \text{ kV}$$

$$x_{d'}'' = x_d'' \left(\frac{S_b}{S_{bg}} \right) = 0,1 \left(\frac{100}{20} \right) = 0,5 \text{ pu}$$

$$x_{T1'}'' = x_{T1}'' \left(\frac{S_b}{S_{bg}} \right) = 0,1 \left(\frac{100}{40} \right) = 0,25 \text{ pu}$$

$$x_{T2'}'' = x_{T2}'' \left(\frac{S_b}{S_{bg}} \right) = 0,1 \left(\frac{100}{40} \right) = 0,25 \text{ pu}$$



Fonte: Silva, 2019, p. 59.

► Base de potência do software: 100 MVA

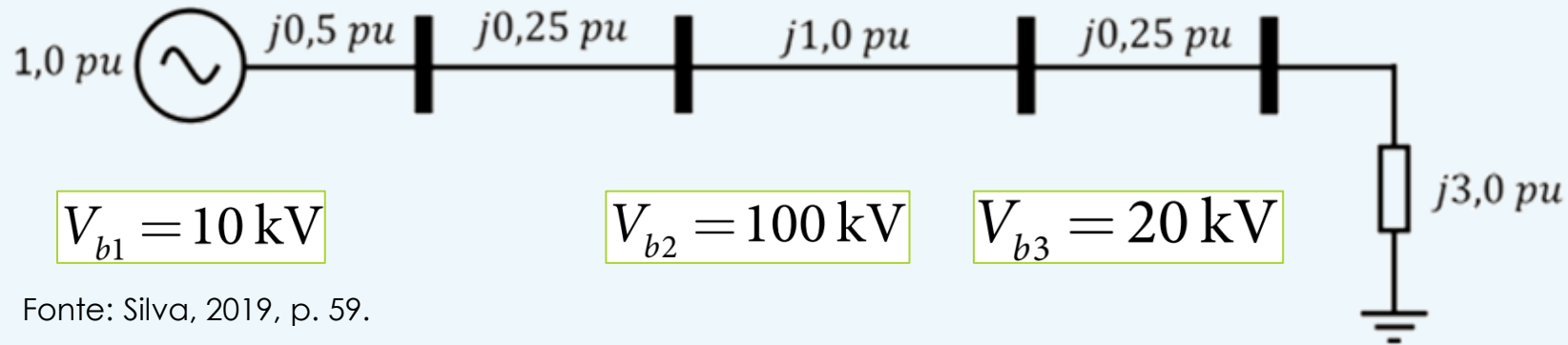
$$V_{b1} = 10 \text{ kV}$$

$$V_{b2} = 100 \text{ kV}$$

$$V_{b3} = 20 \text{ kV}$$

$$Z_{b2} = \frac{(V_{b2})^2}{S_b} = \frac{(100 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 100 \text{ } \Omega \longrightarrow z_{LT} = \frac{j100}{100} = j1,0 \text{ pu}$$

$$Z_{b3} = \frac{(V_{b3})^2}{S_b} = \frac{(20 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 4 \text{ } \Omega \longrightarrow z_R = \frac{j12}{4} = j3,0 \text{ pu}$$



► Base de potência do software: 100 MVA

Fonte: Silva, 2019, p. 59.

Corrente no reator:

$$I_R = \frac{1}{j0,5 + j0,25 + j1,0 + j0,25 + j3,0} = -j\frac{1}{5} \text{ pu}$$

Potência do reator:

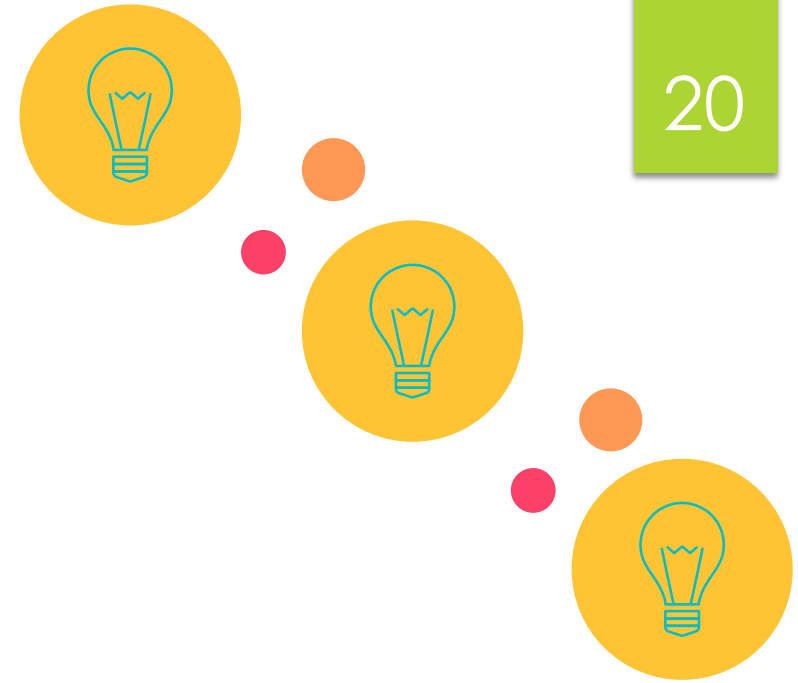
$$S_R = V_R I_R^* = Z_R I_R I_R^* = Z_R |I_R|^2 = j3,0 \cdot |-j0,2|^2 = j0,12 \text{ pu}$$

$$S_R = j0,12 \cdot 100 = j12 \text{ MVA}$$

$$Q_R = 12 \text{ MVar}$$

EXERCÍCIOS

20





O uso do sistema por unidade simplifica os esforços de cálculo na análise dos sistemas de potência. Considere as seguintes afirmações acerca do sistema pu.

I – A impedância em valor pu de qualquer transformador é a mesma independentemente do lado de alta ou de baixa.

II – Utilizando o sistema pu a possibilidade de se confundir as potências monofásicas com trifásicas é menor.

III – Em simulações de sistemas elétricos é possível utilizar o sistema pu para analisar o comportamento em regime permanente ou transitório.

Com relação às afirmativas assinale a alternativa correta.

- a) Apenas I e II são verdadeiras
- b) Apenas I e III são verdadeiras
- c) Apenas II e III são verdadeiras
- d) Apenas a II é verdadeira,
- e) Todas são verdadeiras.



Para que os esforços de cálculo empregados na análise de um sistema de potência possam ser minimizados, é necessário obter o equivalente da rede em por unidade. Seja uma linha de transmissão de 100 kV com impedância série, composta por uma resistência de 0,2 ohms por quilometro por fase e reatância de 0,6 ohms por quilometro por fase. Essa linha tem uma extensão de 200 km.

Assumindo uma potência de base de 100 MVA, e a tensão nominal da linha como tensão de base, assinale a alternativa que contém a impedância série da LT expressa em valores por unidade.

a) $0,2 + j0,6$.

b) $0,1 + j0,3$.

c) $0,4 + j1,2$.

d) $0,8 + j1,9$.

e) $0,3 + j1,9$.



Normalmente, as impedâncias dos transformadores são dadas em valores por unidade na base do equipamento. Isso significa que os valores nominais de tensão e potência do equipamento foram utilizados para obter o valor da impedância. Seja um transformador que tem uma impedância em pu de 5% na base de 50MVA.

Determine a impedância em pu desse transformador na base de 100 MVA.

a) 0,1 pu.

b) 0,2 pu.

c) 0,3 pu.

d) 0,4 pu.

e) 0,5 pu.

INTERVALO

Sistemas Elétricos de Potência I

PROF. LUCAS CLAUDINO

CONCEITOS

Geradores no SEP



Geradores

- Conectados ao SEP, **forneendo** potência;
- Garantir o balanço energético;
- Brasil: maior parte é gerador síncrono.
- Enrolamento trifásico no estator e um rotor com um enrolamento que é excitado com corrente continua de forma a criar um campo magnético estático.

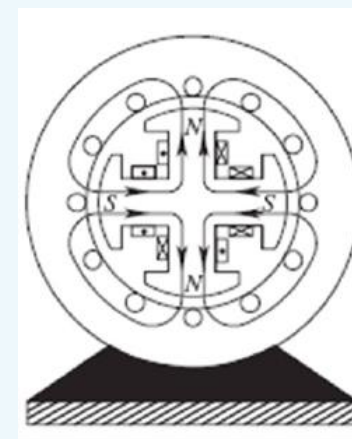
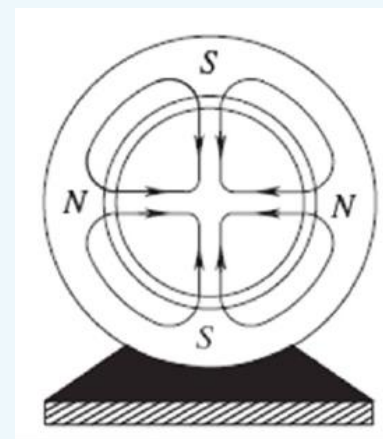


A máquina síncrona é uma máquina rotativa que possui um enrolamento trifásico em seu estator e um rotor com um enrolamento que é excitado com corrente contínua de forma a criar um campo magnético estático.

Os rotores da máquina síncrona podem ser de polos salientes ou polos lisos:

Os rotores de polos salientes se caracterizam por possuir um espaço variável nas faces polares nas quais os enrolamentos são construídos.

Os rotores de polos lisos se caracterizam pela distribuição uniforme do enrolamento por toda a superfície do rotor.

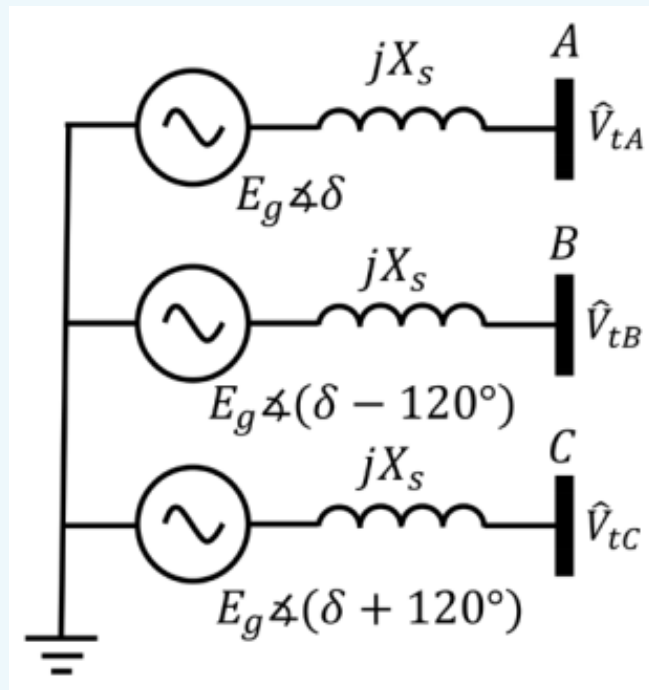


Fonte: Silva, 2019, p. 74.

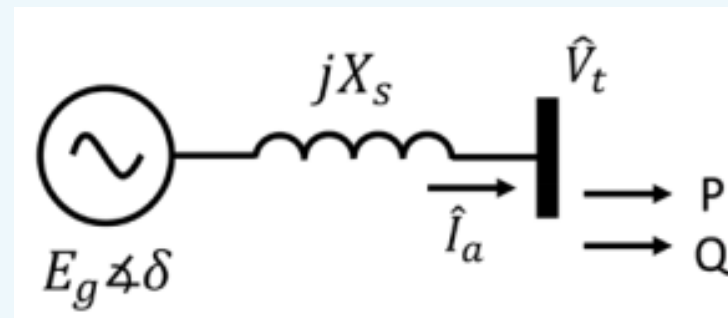


Modelo de gerador síncrono

- Utiliza-se o modelo para máquinas de polos lisos

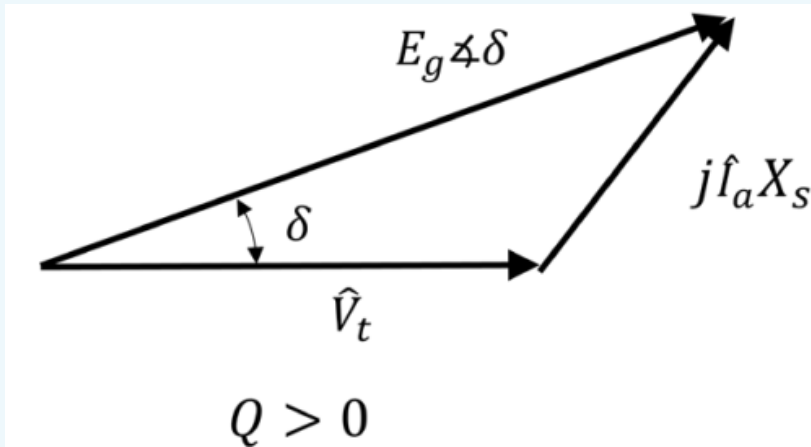
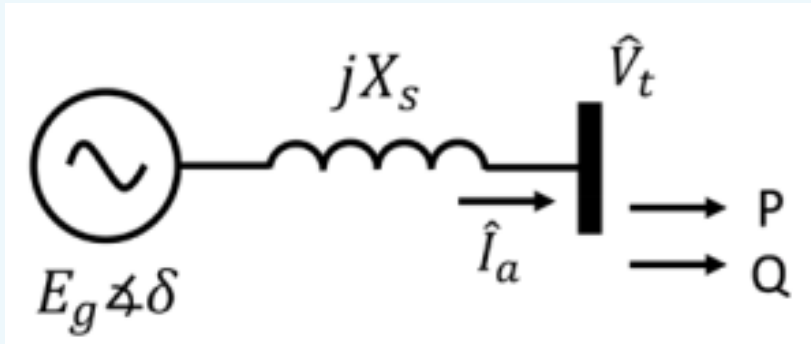


Fonte: Silva, 2019, p. 76.



Sistemas equilibrados

Sistemas desequilibrados

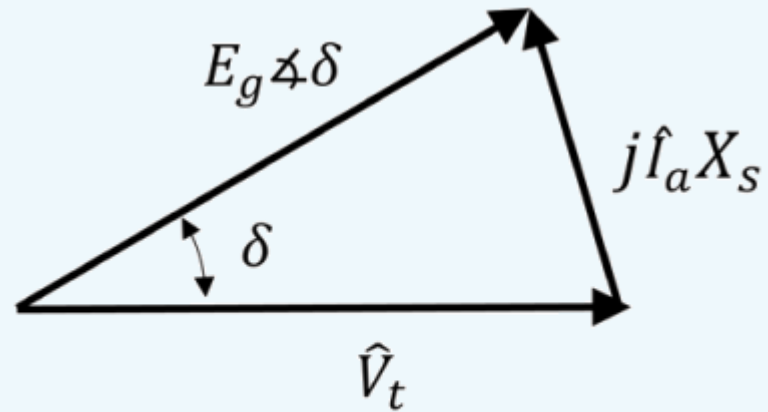


Fonte: Silva, 2019, p. 77.

Sobrexcitado

$$|\hat{V}_t| < E_g$$

$$\hat{V}_t = E_g \angle \delta - jX_s \hat{I}_a$$



$$Q < 0$$

Subexcitado

$$|\hat{V}_t| > E_g$$





Considerando a tensão terminal como sendo fixa.

A potência por fase é: $S = P + jQ = \hat{V}_t \hat{I}_a^*$



$$\hat{I}_a^* = \left(\frac{\hat{E}_g - \hat{V}_t}{jX_s} \right)^* = \left(\frac{\hat{E}_g}{jX_s} \right)^* - \left(\frac{\hat{V}_t}{jX_s} \right)^* = \left(\frac{E_g \angle (-\delta + 90^\circ)}{X_s} \right) - \left(\frac{|\hat{V}_t| \angle -\theta + 90^\circ}{X_s} \right)$$

$$S = \hat{V}_t \hat{I}_a^* = \frac{E_g V_t}{X_s} \angle (-\delta + 90^\circ) - \frac{V_t^2}{X_s} \angle 90^\circ$$

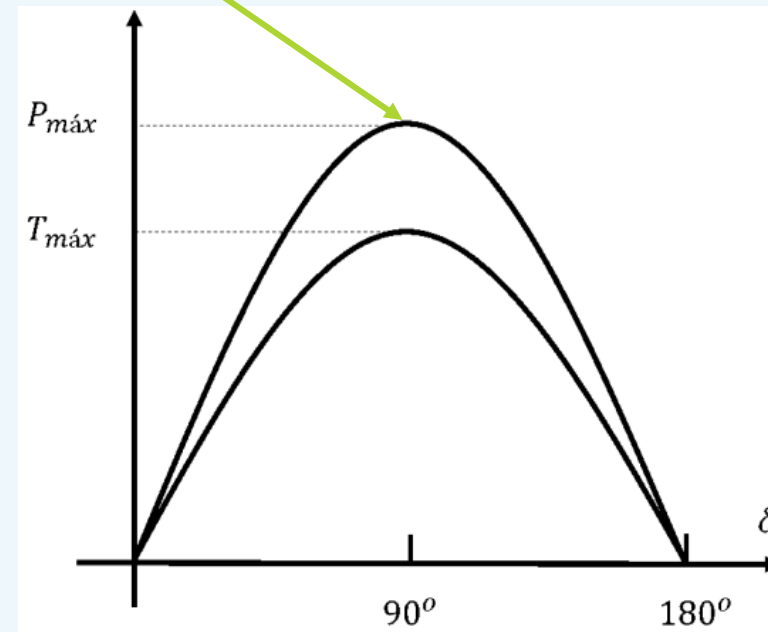
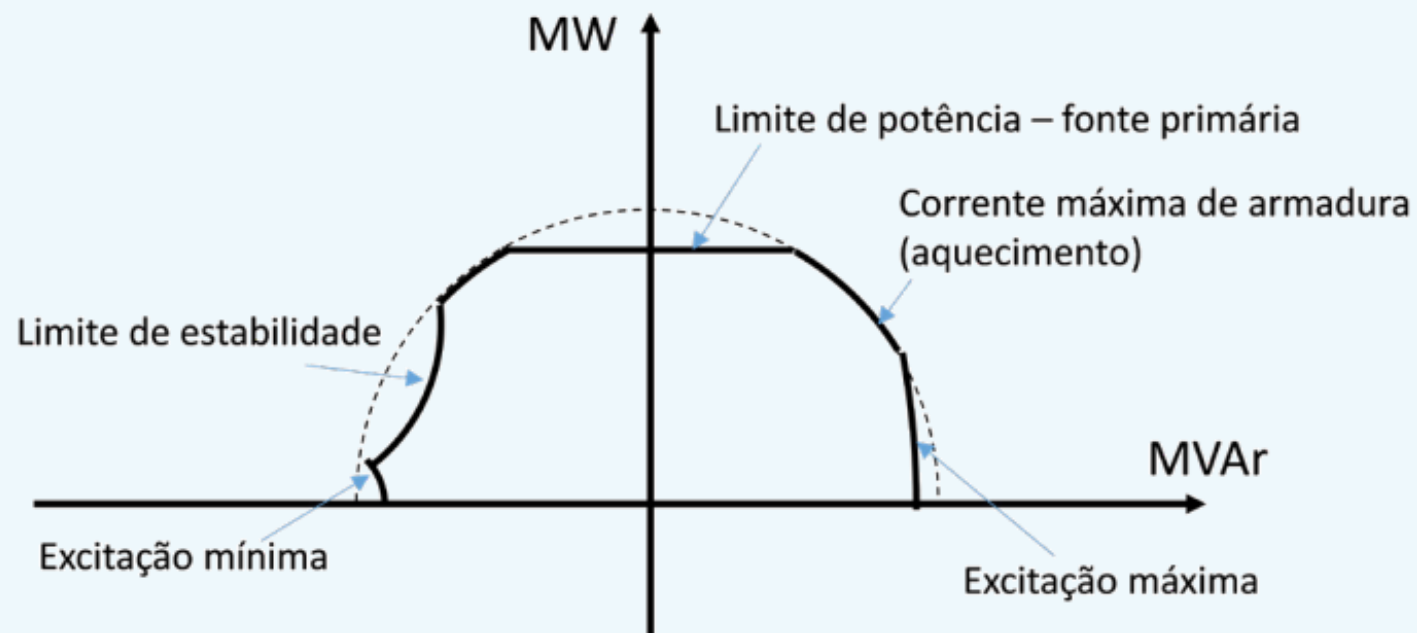
$$P = \frac{E_g V_t}{X_s} \sin(\delta)$$

$$Q = \frac{E_g V_t}{X_s} \cos(\delta) - \frac{V_t^2}{X_s}$$



Limite de estabilidade estático

Curva de capacidade



SITUAÇÃO PROBLEMA

SP: Identificação
de operação de
gerador



SP: operação de gerador

Turbo gerador de polos lisos conectado a um **barramento infinito**.

Inicialmente o gerador opera sobreexcitado, tensão 50% acima.

O *infinite bus* demanda uma pot. ativa de 25% da potência de base do sist.

Reatância síncrona do gerador é 1pu.

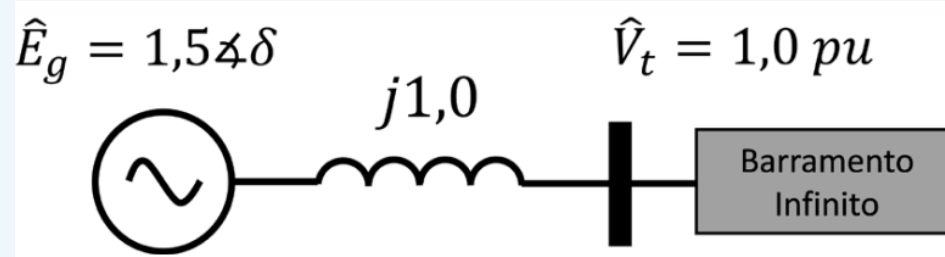
Máquina opera perto de seu limite estático?

Qual o menor valor de excitação para operação segura?



SP: resolução

► Diagrama do sistema:



Fonte: Silva, 2019, p. 84.

► Relação de potência ativa da máquina com ângulo da carga:

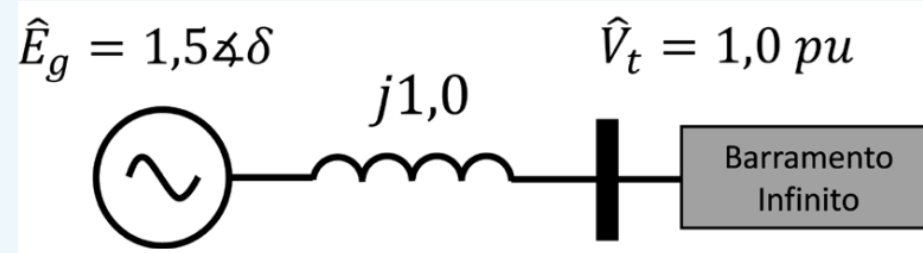
- Tensão no barramento inf é $V_t = 1,0 \text{ pu}$
- Excitação da máq. é $E_g = 1,5 \text{ pu}$
- Potência ativa é 25% da pot do sistema: $P_g = 0,25 \text{ pu}$

$$P_g = \frac{E_g V_t}{X_s} \text{sen}(\delta)$$

$$0,25 = \frac{1,5 \times 1}{1} \text{sen}(\delta) \rightarrow \text{sen}(\delta) = \frac{0,25}{1,5} = 0,1666... \simeq 0,17$$



SP: resolução



Fonte: Silva, 2019, p. 84.

► $\delta = \text{sen}^{-1}(0,17) = 9,6^\circ \rightarrow \text{Operação segura!}$

► Limite de operação \rightarrow ângulo de 90°

$$0,25 = \frac{E_g \times 1}{1} \text{sen}(90^\circ) \rightarrow 0,25 = \frac{E_g \times 1}{1} \rightarrow E_g = 0,25 \text{ pu}$$

CONCEITOS

Cargas no SEP



Modelagem de cargas

- **Impedância constante:** capacitores, aquecedores resistivos, lâmpadas incandescentes...
- Potência na carga varia **proporcionalmente ao quadrado da tensão:**

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R_0} \therefore R_0 = \frac{V_0^2}{P_0} \rightarrow P = \frac{V_k^2(t)}{R_0} = \frac{V_k^2(t)}{V_0^2/P_0} = P_0 \left(\frac{V_k(t)}{V_0} \right)^2$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V_k(t)}{V_0} \right)^2$$



Modelagem de cargas

- **Corrente constante:** fornos a arco, lâmpadas fluorescentes...
- Potência na carga varia **proporcionalmente à tensão:**

$$P_0 = V_0 I_0 \therefore I_0 = \frac{P_0}{V_0} \rightarrow P = V_k(t) I_0 = P_0 \frac{V_k(t)}{V_0}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V_k(t)}{V_0} \right)$$



Modelagem de cargas

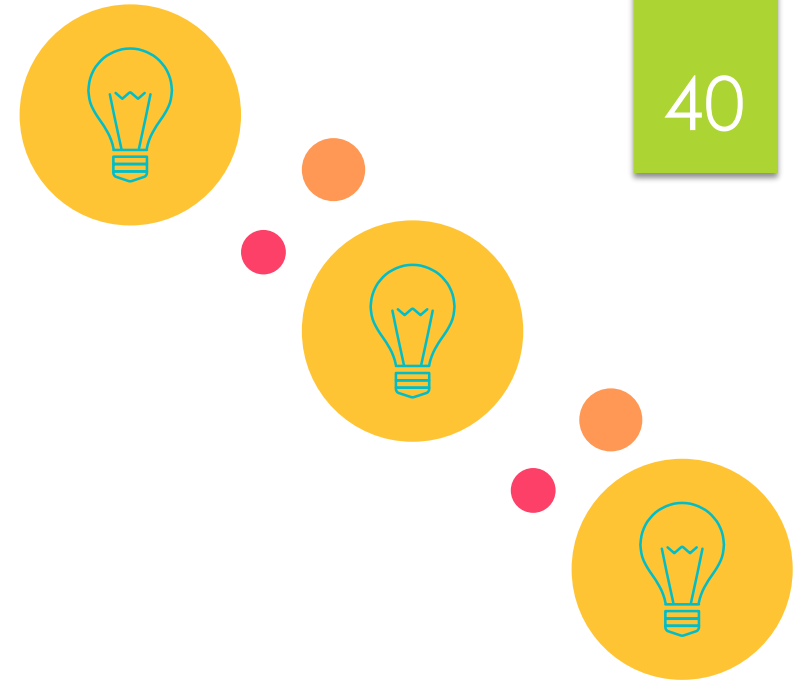
- **Potência constante:** modelo mais utilizado em fluxo de pot.
- Potência na carga **é constante:**

$$P = P_o$$

$$Q = Q_o$$

EXERCÍCIOS

40





Um dos principais geradores utilizados em sistemas elétricos de potência são os geradores síncronos. Esses geradores são capazes de produzir uma tensão com uma frequência fixa, sendo necessário para isso ajustar a excitação da máquina e a velocidade de rotação adequadamente.

Assinale a alternativa que contém o nome do elemento que controla a excitação e a localização dele na máquina.

- a) Regulador de sobretensão, rotor.
- b) Regulação de sobretensão, estator.
- c) Excitatriz, rotor.
- d) Excitatriz, estator.
- e) Regulador de velocidade, rotor.



Uma das questões cruciais na operação de geradores síncronos conectados à rede elétrica é com relação à sua estabilidade. Dessa forma, sabe-se que um gerador síncrono é capaz de fornecer potência elétrica até um valor máximo. Considere um gerador que tem reatância síncrona de 0,8 pu e está conectado a um barramento infinito.

Se a excitação da máquina está ajustada em 20% acima do valor nominal, qual deve ser o valor da potência ativa máxima entregue pela máquina, em pu?

- a) 1,2 pu.
- b) 1,3 pu.
- c) 1,4 pu.
- d) 1,5 pu.
- e) 1,6 pu.



Um modelo que apresenta um significado físico, correspondendo a um agregado de cargas que combina os tipos de impedância constante, corrente constante e potência constante é o modelo ZIP, largamente empregado em estudos de fluxo de potência e de estabilidade de tensão. Considere que a tensão em uma determinada barra está 0.1 pu abaixo do valor nominal em uma barra que contém 30% de cargas de impedância constante, 40% de cargas de corrente constante e 30% de cargas de potência constante.

Se, a potência ativa para a tensão nominal é de 0,8 pu, na situação descrita qual será o valor da potência ativa em pu?

- a) 0,6544.
- b) 0,7224.
- c) 0,8345.
- d) 0,9334.
- e) 0,2334.