



ET 520 - Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia

1^a Semestre de 2010 – 2^a Prova – Prof. Edson Bim

Questão 1 (25 PONTOS):

Um banco de três transformadores monofásicos idênticos de 110 MVA, $13,8\text{ kV}/(230/\sqrt{3})\text{ kV}$ é utilizado para entregar a potência trifásica de 300 kW com f.p.=0,92 atrasado a uma carga representada por uma subestação cuja tensão de linha é igual a 230 kV. A impedância de curto-circuito de cada transformador, referida ao lado de baixa igual, é $j0,21\ \Omega$. O primário do banco é conectado em delta e o secundário em estrela. Determinar a magnitude da tensão nos terminais de baixa do transformador.

Questão 2 (25 PONTOS):

Um transformador $Y - \Delta$ de 850 MVA, 26 kV/345 kV e impedância expressa em sua própria base igual a $z_{eq} = j0,087\text{ p.u.}$ tem os seus terminais de baixa conectados aos terminais de um gerador em Y e dados nominais iguais a 800 MVA e 26 kV (linha). Este gerador é representado no circuito equivalente por fase por uma fonte de tensão interna em série com uma impedância $z_g = j1,57\text{ p.u.}$ na base do gerador. A tensão interna do gerador é ajustada para que a tensão nos terminais de alta do trafo seja sempre 345 kV.

- (a) Escrever o circuito equivalente em p.u. do sistema, adotando os valores de base do transformador e supondo que os terminais de alta do transformador entregue a potência de 700 MVA com f.p.=1.0.
- (b) Determinar a magnitude da tensão interna do gerador em p.u.
- (c) Determinar a magnitude da tensão aplicada ao primário do transformador em p.u. e em Volt.

Questão 3 (25 PONTOS):

O enrolamento de baixa de um transformador monofásico de 500 kVA, 60 Hz foi alimentado em 11 kV e 60 Hz, com o enrolamento de alta aberto: a corrente e a potência medidas foram 3,35 A e 2,96 kW, respectivamente. Outro transformador tem um núcleo com todas suas dimensões lineares $\sqrt{2}$ vezes as dimensões correspondentes do primeiro transformador. O material do núcleo e a espessura de laminação dos dois transformadores são os mesmos. Se os enrolamentos primários dos dois transformadores têm o mesmo número de espiras, quais serão os valores esperados para a corrente e a potência do segundo transformador, se o seu lado de baixa for alimentado com tensão de 22 kV e frequência de 60 Hz?

Questão 4 (25 PONTOS):

Um banco constituído por três transformadores idênticos alimenta uma carga de f.p.=0,92 atrasado e potência e tensão iguais aos respectivos valores nominais do transformador. A impedância equivalente de cada transformador é $z_{eq}=j0,1\text{ pu}$. Determinar a tensão de entrada do primário em p.u. para as seguintes conexões do transformador:

- (a) $\Delta - \Delta$
- (b) $\Delta - Y$
- (c) $Y - \Delta$
- (d) $Y - Y$



ET 520 - Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia 1º
Semestre de 2010 – Solução da Prova 2

Questão 1 (25 PONTOS):

- A corrente de carga referida para o lado de baixa é

$$\hat{I}_c = \frac{300 \text{ kW} / (0.92 \times 3)}{13.800 / \sqrt{3}} e^{-j23,07^\circ} = 13,64 e^{-j23,07^\circ} \text{ A}$$

A tensão de fase no terminal de baixa em equivalente Y do transformador é

$$\Rightarrow \hat{V}_1 = \left(\frac{0,21}{3} e^{j90^\circ} \times 13,64 e^{-j23,07^\circ} \right) + 13.800 / \sqrt{3} = 7967,81 e^{j0,0063^\circ} \text{ V} \quad \text{fase Y equivalente}$$

A tensão nos terminais de baixa do trafo é

$$\Rightarrow \hat{V}_1 = \sqrt{3} \times 7967,81 = 13.800,65 \text{ V}$$

Questão 2 (25 PONTOS):

- (a) O circuito em p.u. fica:

$$\hat{V}_c = 1 e^{j0^\circ} \text{ pu} \quad \hat{S}_c = \frac{700/3}{850/3} e^{j0^\circ} = 0,8235 \text{ pu}$$

$$\hat{I}_c = \left(\frac{\hat{S}_c}{\hat{V}_c} \right)^* = 0,8235 e^{j0^\circ} \text{ pu} \quad z_{eq} = 0,087 e^{j90^\circ} \text{ pu}$$

A valor da impedância do gerador em pu na base do transformador é dado por

$$Z_g = j1,57 \times \frac{(26/\sqrt{3})^2}{800/3} = j1,3266 \Omega$$

Portanto a impedância em pu na base do transformador é

$$z_g = j1,3266 \times \frac{850/3}{(26/\sqrt{3})^2} = j1,668 \text{ pu}$$

- (b) A tensão interna do gerador é

$$\begin{aligned} \hat{V}_g &= (0,087 e^{j90^\circ} + 1,668 e^{j90^\circ}) \times 0,8235 e^{j0^\circ} + 1 e^{j0^\circ} \\ &\Rightarrow \hat{V}_g = 1,7574 e^{j55,32^\circ} \text{ pu} \end{aligned}$$

- (c) A magnitude da tensão aplicada ao primário do transformador é

$$\begin{aligned} \Rightarrow \hat{V}_1 &= (0,087 e^{j90^\circ}) \times 0,8235 e^{j0^\circ} + 1 e^{j0^\circ} = 1,0026 e^{j4,0974^\circ} \text{ pu} \\ &\Rightarrow \hat{V}_1 = \frac{26 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \times 1,0026 = 15,05 \text{ kV} \end{aligned}$$

Questão 3 (25 PONTOS):

Como a área A_c e a tensão aplicada são multiplicadas por 2, a densidade de fluxo B_N do novo transformador é igual à densidade de fluxo B_0 do transformador original:

$$B_0 = \frac{V_1}{\frac{\sqrt{2} \pi f_1 N_1}{A_c}}$$

$$B_N = \frac{\frac{2V_1}{\sqrt{2}\pi f_1 N_1}}{2A_c}$$

Portanto, a intensidade de campo magnético não se altera:

$$H_{c,0} l_{c,0} = H_{c,N} \underbrace{l_{c,N}}_{\sqrt{2} l_{c,0}}$$

Assim,

$$I_{\phi,N} = \sqrt{2} \underbrace{\frac{H_{c,0} l_{c,0}}{N_1}}_{3,35 \text{ A}}$$

$$\Rightarrow I_{\phi,N} = \sqrt{2} 3,35 = 4,74 \text{ A}$$

As perdas (W) ferro por unidade de massa (kg) do material (p_{fe}) são as mesmas, pois não houve mudança na densidade de fluxo (verificar figura 1.22(a) do livro) e nem no material utilizado e, consequentemente, a densidade do material ρ_c é a mesma. Escreve-se, então,

$$P_{fe,N} = \underbrace{\rho_c}_{k} \underbrace{p_{fe}}_{=2\sqrt{2} V_{c,0}} V_{c,N}$$

$$P_{fe,N} = 2\sqrt{2} \underbrace{k V_{c,0}}_{2,96 \text{ kW}}$$

$$\Rightarrow P_{fe,N} = 8,37 \text{ kW}$$

Questão 4 (25 PONTOS):

Seja qual for a conexão trifásica, cada transformador alimenta a carga nas condições nominais de tensão e de potência aparente. Tem-se, então, que a corrente de carga é

$$I_c = \frac{S_c}{V_c} = 1,0 \text{ p.u.}$$

Como o fator de potência é 0,92 atrasado, o que significa diferença de fase entre a tensão e a corrente sobre a carga é $\phi = -23^\circ$, o fasor da corrente é dado por

$$\hat{I}_c = 1 e^{-j23^\circ} \text{ p.u.}$$

e a tensão de entrada do primário em p.u. resulta em

$$\hat{V}_1 = x_{eq} e^{j90^\circ} \hat{I}_c + \hat{V}_c = 0,1 e^{j90^\circ} \times 1,0 e^{-j23,07^\circ} + 1,0 \times e^{j0^\circ}$$

$$\Rightarrow \hat{V}_1 = 1,043 e^{j5,06^\circ} \text{ pu}$$