UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA A

DJONATHAN LUIZ DE OLIVEIRA QUADRAS (15200695)

TRABALHO 2

FLORIANÓPOLIS
2021

Introdução

O presente trabalho as respostas das questões 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.13, 1.14, 1.15 e 1.16 presentes na versão 6t da apostila desenvolvida pelo Professor Doutor Renato Lucas Pacheco. O trabalho foi inteiramente desenvolvido em linguagem RMarkdown. Os códigos fonte para a sua elaboração contam em anexo. Importante: o padrão de numeração utilizado é do formato americano (com separação decimal utilizando ponto e não vírgula). Você pode acessar aos códigos fontes utilizados para a realização deste trabalho aqui.

Questão 1.7

Transformador de 2×10^4VA, 2400/240, 60Hz. Se três transformadores iguais ao especificado forem ligados na configuração estrela/delta ($Y - \Delta$) e alimentados a partir de um gerador de tensão trifásica equilibrada de sequência positiva, com valor eficaz (de linha) igual a raiz quadrada de três vezes a tensão nominal do lado primário do transformador (lado de alta tensão), qual a tensão entre os terminais abertos (em módulo e ângulo) em cada um dos casos mostrados a seguir? Explicar cuidadosamente os resultados, concluindo se a ligação delta pode ou não ser fechada e por quê!! Para esta análise, os transformadores podem ser considerados ideais!

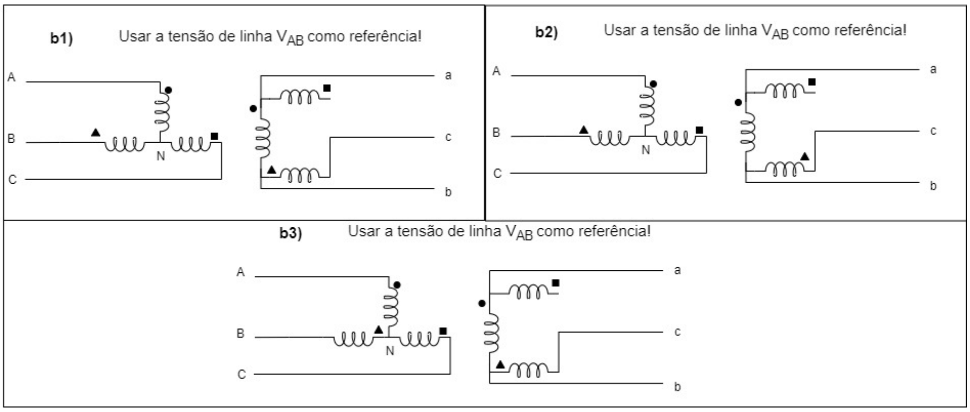

Figura 1: Enunciado

Resolução

De acordo com o enunciado, o sistema é alimentado por um gerador com tensão eficaz (de linha) de 4156.92V. Com isso, podemos concluir que as tensões de linha em Y são

$$\begin{cases} V_{AB} = 4156.92\angle 0° V \\ V_{BC} = 4156.92\angle -120° V \\ V_{CA} = 4156.92\angle 120° V \end{cases}$$

E como para sistemas balanceados temos que $V_L = \sqrt{3} V_P$ (com defasamento de 30°), temos que

$$\begin{cases} V_{AN} = 2400\angle -30° V \\ V_{BN} = 2400\angle -150° V \\ V_{CN} = 2400\angle 90° V \end{cases}$$

Dessa forma, é possível calcular as tensões de linha no circuito em Δ. Para cada um dos casos será feita a comparação com base nas marcas de polaridade.

Para circuito b1 Para o circuito apresentado em **b1**, tem-se as seguintes resultados para tensão de linha.

$$\begin{cases} V_{ab} = 4156.92\angle-30°V \\ V_{bc} = 4156.92\angle-150°V \\ V_{?a} = 4156.92\angle 90°V \end{cases}$$

Com isso, a tensão no terminal aberto é

$$V_{c?} = V_{ab} + V_{bc} + V_{?a}$$

$$\boxed{V_{c?} = 0\angle 74.4°V}$$

Como $V_{c?}$ tem magnitude nula, é possível fechar o circuito tranquilamente.

Para circuito b2 Para o circuito apresentado em **b2**, tem-se as seguintes resultados para tensão de linha.

$$\begin{cases} V_{ab} = 4156.92\angle-30°V \\ V_{bc} = 4156.92\angle 30°V \\ V_{?a} = 4156.92\angle 90°V \end{cases}$$

Com isso, a tensão no terminal aberto é

$$V_{c?} = V_{ab} + V_{bc} + V_{?a}$$

$$\boxed{V_{c?} = 8313.8\angle 30°V}$$

Como $V_{c?}$ tem magnitude não nula (e, num caso ainda pior, tendo o dobro da tensão de fase), **não é possível fechar o circuito de forma alguma**.

Para circuito b3 Para o circuito apresentado em **b3**, tem-se as seguintes resultados para tensão de linha.

$$\begin{cases} V_{ab} = 4156.92\angle-30°V \\ V_{bc} = 4156.92\angle 30°V \\ V_{?a} = 4156.92\angle 90°V \end{cases}$$

Com isso, a tensão no terminal aberto é

$$V_{c?} = V_{ab} + V_{bc} + V_{?a}$$

$$\boxed{V_{c?} = 8313.8\angle 30^{\circ} V}$$

Como $V_{c?}$ tem magnitude não nula (e, num caso ainda pior, tendo o dobro da tensão de fase), **não é possível fechar o circuito de forma alguma**.

Questão 1.8

Um transformador trifásico abaixador de 6×10^4 VA, 4156.92/240 V, 60 Hz, ligado em Y/Δ foi submetido a um ensaio de curto-circuito realizado pelo lado de baixa tensão (240V) de onde se obteve a seguinte impedância equivalente, por fase: 0.0370376+0.0635895i [Ω]. Os seguintes resultados foram obtidos de um ensaio de circuito aberto, realizado pelo lado de baixa tensão, a 60 Hz: $P_{3\phi} = 366$ W; $I_l = 1.8$ A; $V_l = 240$ V. O equipamento está alimentando uma carga trifásica equilibrada de 3.6×10^4W, com um fator de potência 0.6 adiantado. A tensão na carga foi ajustada para 240 V.

Para a sua versão, pede-se:

a. A tensão na fonte, a corrente e a potência aparente fornecidas pela fonte, referidas ao primário (lado 1), e o fator de potência "visto" pela fonte, usando o modelo impedância série;
b. O rendimento e a regulação do transformador, usando o modelo impedância série. Usar a potência do ensaio a vazio, se realizado com tensão nominal;
c. Comentar os resultados!

Resolução

Inicialmente, para facilitar os cálculos, será feita a conversão do formato Δ para um formato Y. Assim,

$$Z_{eq} = \frac{0.0370376 + 0.0635895i}{3} \implies \boxed{0.0123 + 0.0212i\Omega}$$

Tem-se do enunciado do problema para o primário uma tensão de 240V de linha e 2400V de fase, além de uma tensão no secundário de 240V de linha e 138.56V de fase no estrela equivalente. Assim, será utilizado um fator de conversão de

$$a = \frac{2400}{138.56} \quad \boxed{a = 17.32}$$

Desse modo, tem-se a impedância equivalente

$$\boxed{Z_{eq} = 3.7 + 6.36i = 7.36\angle(59.78)^\circ\Omega}$$

Também é possível encontrar a tensão na carga fazendo-se $V_c = aV_c$. Assim: $V_c = 2400$V. É possível calcular a corrente na carga por meio de $P_{c_{3\phi}} = \sqrt{3}V_c I_c fp$. Assim:

$$I_c = \frac{3.6 \times 10^4}{\sqrt{3}4156.92(0.6)} \implies \boxed{I_c = 8.33\angle(53.13)^\circ A}$$

Com o valor da corrente de saída, e sabendo que $I_e = aI_c$, tem-se que a corrente de entrada é de

$$\boxed{I_e = 86.6 + 115.47iA = 144.34\angle(53.13)^\circ A}$$

Com a corrente de entrada, tensão na carga e impedâncias do circuito, é possível agora calcular a tensão na fonte (pelo lado primário) por meio das Tensões de Kirchhoff.

$$V_e = (Z_T)(I_e) + V_c = (3.7 + 6.36i)(86.6 + 115.47i) + 2400$$

Assim,

$$V_e = 2376.12 + 56.49i = 2376.8\angle 1.36^\circ V$$

Com os valores de V_e e I_e, é possível calcular S_e por meio de $S_e = \sqrt{3}I_eV_e$. Assim, $S_e = 5.94199 \times 10^5 VA$. O fator de potência na fonte é de $fp_e = \cos(\theta_v - \theta_i) = 0.62$

A regulação é calculada como

$$\Re = \frac{|V_e| - |V_s|}{|V_s|} = \frac{2376.8 - 2400}{2400} = -0.01 \implies \Re = -0.97\%$$

o rendimento é definido por

$$\eta = \frac{P_{s3\phi}}{P_{e3\phi}} = \frac{P_{s3\phi}}{P_{s3\phi} + P_{f3\phi} + P_{j3\phi} + P_{sup3\phi}}$$

Assim,

$$\eta = \frac{3.6 \times 10^4}{3.6 \times 10^4 + 366 + 2.572058 + 0} \implies \eta = 98.99\%$$

Questão 1.9

Para a sua versão, no exemplo anterior, ajustando a tensão na entrada do transformador para o seu valor nominal, se o transformador está fornecendo corrente nominal a fator de potência 0,6 capacitivo, pede-se:

a. A tensão sobre a carga, corrente e a potência aparente fornecidas pela fonte, referidas ao primário (lado 1), e o fator de potência "visto" pela fonte, usando o modelo impedância série;
b. O rendimento e a regulação do transformador, usando o modelo impedância série. Usar a potência do ensaio a vazio, se realizado com tensão nominal;
c. Comparar com os resultados do Exemplo 1.8: Transformador trifásico abaixador com tensão especificada na carga. Comentar os resultados!

Resolução

Inicialmente, para facilitar os cálculos, será feita a conversão do formato Δ para um formato Y. Assim,

$$Z_{eq} = \frac{0.0370376 + 0.0635895i}{3} \implies \boxed{0.0123 + 0.0212i\Omega}$$

Tem-se do enunciado do problema para o primário uma tensão de 240V de linha e 2400V de fase, além de uma tensão no secundário de 240V de linha e 138.56V de fase no estrela equivalente. Assim, será utilizado um fator de conversão de

$$a = \frac{2400}{138.56} \quad \boxed{a = 17.32}$$

Desse modo, tem-se a impedância equivalente

$$\boxed{Z_{eq} = 3.7 + 6.36i = 7.36\angle(59.78)^\circ\Omega}$$

Considerando que o transformador fornece uma corrente nominal, é possível fazer $S = \sqrt{3}VI$ ou $I_c = \frac{S}{\sqrt{3}V_s}$. Assim:

$$I_c = \frac{3.6 \times 10^4}{\sqrt{3}(4156.92)(0.6)} \implies \boxed{I_c = 8.66\angle(53.13)^\circ A}$$

Com o valor da corrente de saída, e sabendo que $I_e = aI_c$, tem-se que a corrente de entrada é de

$$\boxed{I_e = 90 + 120iA = 150\angle(53.13)^\circ A}$$

Com a corrente de entrada, tensão na fonte e impedâncias do circuito, é possível agora calcular a tensão na carga por meio das Tensões de Kirchhoff.

$$V_c = V_e - (Z_T)(I_e) = 2400 - (3.7 + 6.36i)(90 + 120i)$$

Assim,

$$V_c = 2424.81 - 58.7i = 2425.52\angle - 1.39°V$$

Com os valores de V_e e I_e, é possível calcular S_e por meio de $S_e = \sqrt{3}I_eV_e$. Assim, $S_e = 6.23538 \times 10^5 VA$. O fator de potência na fonte é de $fp_e = \cos(\theta_v - \theta_i) = 0.6$

A regulação é calculada como

$$\Re = \frac{|V_e| - |V_s|}{|V_s|} = \frac{2400 - 2425.52}{2425.52} = -0.01 \implies \Re = -1.05\%$$

o rendimento é definido por

$$\eta = \frac{P_{s3\phi}}{P_{e3\phi}} = \frac{P_{s3\phi}}{P_{s3\phi} + P_{f3\phi} + P_{j3\phi} + P_{sup3\phi}}$$

Assim,

$$\eta = \frac{3.6 \times 10^4}{3.6 \times 10^4 + 366 + 2.7778226 + 0} \implies \eta = 98.99\%$$

Questão 1.10

Os dois transformadores abaixo são ligados em paralelo para alimentar uma carga trifásica equilibrada.

TRANSFORMADOR 1: Um transformador trifásico abaixador de 6×10^4 VA, 4156.92/240 V, 60 Hz, ligado em Y/Δ foi submetido a um ensaio de curto-circuito realizado pelo lado de baixa tensão (240V) de onde se obteve a seguinte impedância equivalente, por fase: 0.0370376+0.0635895i [Ω]. Os seguintes resultados foram obtidos de um ensaio de circuito aberto, realizado pelo lado de baixa tensão, a 60 Hz: $P_{3\phi} = 366$ W; $I_l = 1.8$ A; $V_l = 240$ V.

TRANSFORMADOR 2: Um transformador trifásico abaixador de 1.2×10^5 VA, 4156.92/240 V, 60 Hz, ligado em Y/Δ foi submetido a um ensaio de curto-circuito realizado pelo lado de baixa tensão (240V) de onde se obteve a seguinte impedância equivalente, por fase: 0.02337967+0.0432287i [Ω]. Os seguintes resultados foram obtidos de um ensaio de circuito aberto, realizado pelo lado de alta tensão, a 60 Hz: $P_{3\phi} = 961.87$ W; $I_l = 10.25$ A; $V_l = 240$ V.

Se o conjunto está alimentando uma carga nominal (tensão e corrente nominais), sob fator de potência 0.6 capacitivo, pede-se:

a. A tensão na fonte, a corrente e a potência aparente fornecidas pela fonte e por cada transformador em paralelo, referidas ao primário (lado 1), e o fator de potência “visto” pela fonte e o fator de potência de cada transformador, usando o modelo impedância série;
b. O rendimento e a regulação de cada transformador;
c. Comentar os resultados!

Resolução

Para o lado primário, é considerado uma tensão de 4156.92V de linha e 2400V de fase, além de uma tensão no secundário de 240V de linha e 138.56V de fase no estrela equivalente. Assim, será utilizado um fator de conversão igual

$$a = \frac{2400}{138.56} \quad \boxed{a = 17.32}$$

Inicialmente, transforma-se as impedâncias para o seu modelo estrela equivalente (ao lado primário).

$$Z_{eq1Y} = a\frac{0.0370376 + 0.0635895i}{3} \quad Z_{eq2Y} = a\frac{0.02337967 + 0.0432287i}{3}$$

Assim,

$$\boxed{Z_{eq1} = 3.7 + 6.36i = 7.36\angle(59.78)°\Omega} \quad \text{e} \quad \boxed{Z_{eq2} = 0.01 + 0.01i = 4.91\angle(61.59)°\Omega}$$

Também é possível encontrar a tensão na carga fazendo-se $V_c = aV_{c_{fase}}$. Assim: $V_c = 2400$V. É possível calcular a corrente na carga por meio de $P_{c_{3\phi}} = \sqrt{3}V_{c_{linha}}I_{c_{linha}}fp$. Assim:

$$I_c = 0.6\frac{3.6 \times 10^4}{\sqrt{3}4156.92} \implies \boxed{I_c = 0.08\angle(53.13)°A}$$

Com isso, é possível calcular as correntes de saída de ambos os transformadores por meio de

$$I_1 = \frac{Z_{eq2}}{Z_{eq1}}I_2 \quad \text{e} \quad I_1 + I_2 = I_c$$

Assim, tem-se

$$\boxed{I_1 = 0.02 + 0.03iA = 0.03\angle(54.22)°A} \quad \text{e} \quad \boxed{I_2 = 0.03 + 0.04i = 0.05\angle(52.4)°A}$$

Assim, é possível descobrir a potência fornecida por cada transformador fazendo-se $S = VI$. Tem-se, então:

$$\boxed{S_1 = 81.43VA} \quad \text{e} \quad \boxed{S_2 = 121.93VA}$$

Com o valor da corrente de saída, e sabendo que $I_e = aI_c$, tem-se que a corrente de entrada é de

$$\boxed{I_e = 0.88 + 1.17iA = 1.47\angle(53.13)°A}$$

Tendo a corrente de saída, os valores das impedâncias e o valor da tensão na carga é possível encontrar o valor de tensão na fonte fazendo-se $V_e = (Z_{eq1}||Z_{eq2})I_e + Vc$. Assim,

$$V_e = (1.43 + 2.57i)(0.88 + 1.17i) + 2400 \implies \boxed{V_e = 2398.24 + 3.95iV = 2398.24\angle(0.09)°V}$$

Com os valores de V_e e I_e, é possível calcular S_e por meio de $S_e = \sqrt{3}I_eV_e$. Assim, $S_e = 6095.54VA$. O fator de potência na fonte é de $fp_e = \cos(\theta_v - \theta_i) = 0.6013171$

Com os valores de impedância, corrente de saída e tensões, é possível determinar a tensão de entrada de cada um dos dois transformadores.

$$\boxed{V_{e1} = 2398.24\angle(0.09)^{\circ}V} \quad \text{e} \quad \boxed{V_{e2} = 2398.24\angle(0.09)^{\circ}V}$$

Com os valores de tensão e corrente é possível determinar o fator de potência de entrada de cada um dos dois transformadores.

$$\boxed{fp_1 = 0.59} \quad \text{e} \quad \boxed{fp_2 = 0.61}$$

O rendimento dos dois transformadores é dado por $\Re = \frac{V_e - V_s}{V_s}$, então.

$$\boxed{\Re_1 = -0.07\%} \quad \text{e} \quad \boxed{\Re_2 = -0.07\%}$$

Por fim, a regulação dos dois transformadores é dado por $\eta = \frac{P_{s3\phi}}{P_{e3\phi}}$, então.

$$\boxed{\eta_1 = 96.58\%} \quad \text{e} \quad \boxed{\eta_2 = 96.73\%}$$

Questão 1.13

Um transformador de potência de 2×10^4 VA, 2400/240 V, 60 Hz, possui os seguintes parâmetros:

$$\begin{cases} r_1 = 1.85188[\Omega]; \quad x_1 = 3.17947[\Omega]; \quad g_m = 2.11806 \times 10^{-5}[S]; \quad b_m = 3.7708707 \times 10^{-5}[S] \\ r_2 = 0.01852[\Omega]; \quad x_2 = 0.03179[\Omega] \quad \text{(Referidos ao lado 2)} \end{cases}$$

Usando os valores nominais do equipamento como valores de base e **usando a técnica p.u.**, para a sua versão, Pede-se:

a. A tensão na fonte e a potência aparente fornecida pela fonte se o transformador estiver alimentando carga nominal (potência aparente e tensão nominais), fator de potência 0,6 capacitivo, usando o modelo impedância série;
b. O rendimento e a regulação do transformador;
c. Retornar aos valores reais e comparar as grandezas obtidas com aquelas similares para o mesmo fator de potência, obtidas no Exemplo 1.5. Comentar!

Resolução

Inicialmente, são determinados os valores base. De acordo com o enunciado, tem-se como valores base: $S_{base} = 2 \times 10^4 VA$, $V_{a_{base}} = 2400V$, $V_{b_{base}} = 240V$. Como $I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}}$, então $I_{a_{base}} = 8.33A$ e $I_{b_{base}} = 83.33A$

Considerando o modelo de impedância em série, tem-se a impedância equivalente de $Z = 3.70388 + 6.35847i\Omega$. Também é possível determinar a corrente de entrada fazendo-se

$$I_e = \frac{S}{(a)(V_2)} \angle(-\arccos fp) = 8.33\angle(53.13)^\circ A.$$

Assim, a corrente de saída é tida por $I_c = 0.83\angle(53.13)^\circ A$. Com os valores de I_e, Z e V_c, é possível calcular a tensão na fonte fazendo-se $V_e = (Z)(I_e) + V_c$. Assim,

$$V_e = 2376.8\angle(1.36)^\circ V.$$

Dessa forma, tem-se que a potência aparente fornecida pela fonte como

$$S_e = 1.980667 \times 10^4.$$

Tendo os valores calculados, é possível encontrar os valores de tensão por unidade, fazendo-se

$$V_{e_{p.u.}} = \frac{V_e}{V_{a_{base}}} = \frac{2376.1296 + 56.48488333333i}{2400} \Longrightarrow \boxed{V_{e_{p.u.}} = 0.99\angle(1.36)^{\circ}pu}$$

e o valor da potência por unidade fazendo-se

$$S_{e_{p.u.}} = \frac{S_e}{S_{base}} = \frac{1.9806674 \times 10^4}{2 \times 10^4} \Longrightarrow \boxed{S_{e_{p.u.}} = 0.99pu}$$

A regulação é dada por

$$\Re = \frac{V_{e_{p.u.}} - V_{c_{p.u.}}}{V_{c_{p.u.}}} \Longrightarrow \boxed{\Re = -0.97\%}$$

O rendimento é dado por

$$\eta = \frac{P_{c_{p.u.}}}{P_{e_{p.u.}}} \Longrightarrow \boxed{\eta = 97.9\%}$$

Percebe-se que, como esperado, o rendimento é precisamente o mesmo que o encontrado no exemplo 1.5. No entanto, houve uma variação em relaçao à regulação, também conforme esperado, devido a uma alteração de uma carga indutiva para uma carga capacitiva.

Questão 1.14

Um transformador de potência de 2×10^4 VA, 2400/240 V, 60 Hz, possui os seguintes parâmetros:

$$\begin{cases} r_1 = 1.85188[\Omega]; \quad x_1 = 3.17947[\Omega]; \quad g_m = 2.11806 \times 10^{-5}[S]; \quad b_m = 3.7708707 \times 10^{-5}[S] \\ r_2 = 0.01852[\Omega]; \quad x_2 = 0.03179[\Omega] \quad \text{(Referidos ao lado 2)} \end{cases}$$

Três transformadores idênticos são ligado formando um banco trifásico Δ/Y. Usando os valores nominais do banco trifásico como valores de base (valores trifásicos!) e **usando a técnica p.u.**, pede-se:

a. A tensão na fonte e a potência aparente fornecida pela fonte se o transformador estiver alimentando carga nominal (potência aparente e tensão nominais), fator de potência 0,6 capacitivo, usando o modelo impedância série;
b. O rendimento e a regulação do transformador;
c. Retornar aos valores reais e comparar as grandezas de fase obtidas com aquelas similares para o mesmo fator de potência, obtidas no Exemplo 1.13. Comentar!

Resolução

Inicialmente, determina-se que para simplificar a solução será optado por reduzir o sistema trifásico equilibrado a uma única fase de um sistema estrela equivalente. Será considerado um fator de conversão como $a = \frac{2400}{240} = 10$. Também pode-se determinar os valores nominais de tensão. Assim, tem-se 2400V de fase e 2400V de linha para o primário e 240V de fase e 415.69V de linha para o secundário.

Assim, como as impedâncias já foram dadas sendo consideradas pelo lado de baixa tensão, tem-se a impedância equivalente de $Z = 3.70388 + 6.35847i\Omega$. Também pode-se determinar os valores base de acordo com o enunciado, tem-se como valores base: $S_{base} = 6 \times 10^4 VA$ (triplo da potência por serem três transformadores), $V_{a_{base}} = 2400V$, $V_{b_{base}} = 415.69V$. Como $I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}}$, então $I_{a_{base}} = 25A$ e $I_{b_{base}} = 144.34A$

Considerando o modelo de impedância em série também é possível determinar a corrente de entrada fazendo-se

$$I_e = \frac{S}{(a)(V_2)} \angle(-\arccos fp) = 14.43\angle(53.13)^\circ A.$$

Assim, a corrente de saída é tida por $I_c = 1.44\angle(53.13)^\circ A$. Com os valores de I_e, Z e V_c, é possível calcular a tensão na fonte fazendo-se $V_e = (Z)(I_e) + V_c$. Assim,

$$V_e = 4116.74\angle(1.36)^\circ V.$$

Dessa forma, tem-se que a potência aparente fornecida pela fonte como

$$S_e = 5.942002 \times 10^4.$$

Tendo os valores calculados, é possível encontrar os valores de tensão por unidade, fazendo-se

$$V_{e_{p.u.}} = \frac{V_e}{V_{a_{base}}} = \frac{4115.57719256831 + 97.83468779293i}{2400} \implies \boxed{V_{e_{p.u.}} = 1.72\angle(1.36)^\circ pu}$$

e o valor da potência por unidade fazendo-se

$$S_{e_{p.u.}} = \frac{S_e}{S_{base}} = \frac{5.9420022 \times 10^4}{6 \times 10^4} \implies \boxed{S_{e_{p.u.}} = 0.99pu}$$

A regulação é dada por

$$\Re = \frac{V_{e_{p.u.}} - V_{c_{p.u.}}}{V_{c_{p.u.}}} \implies \boxed{\Re = -0.97\%}$$

O rendimento é dado por

$$\eta = \frac{P_{c_{p.u.}}}{P_{e_{p.u.}}} \implies \boxed{\eta = 97.9\%}$$

Percebe-se que, como esperado, o rendimento e a regulação são precisamente os mesmos que os encontrados no exemplo 1.13.

Questão 1.15

Um transformador de potência monofásico, de 2.75×10^4VA, 4400/440 V, 60Hz, deve ser usado como autotransformador para alimentar um circuito de 4400V a partir de um gerador de 4840V. Sob carga nominal e fator de potência 0.6 indutivo, o rendimento do transformador monofásico foi calculado como de 94.5%. Para o autotransformador, pede-se:

a. O diagrama de suas ligações (incluir as marcas de polaridade!);
b. Sua potência aparente nominal, separando em potência transformada, potência passante e potência total;
c. Seu rendimento a plena carga, com fatores de potência 0.6 indutivo e 0.8 indutivo. COMENTAR!

Resolução

Em função das funções disponiveis e desejadas foi desenhado o diagrama abaixo.

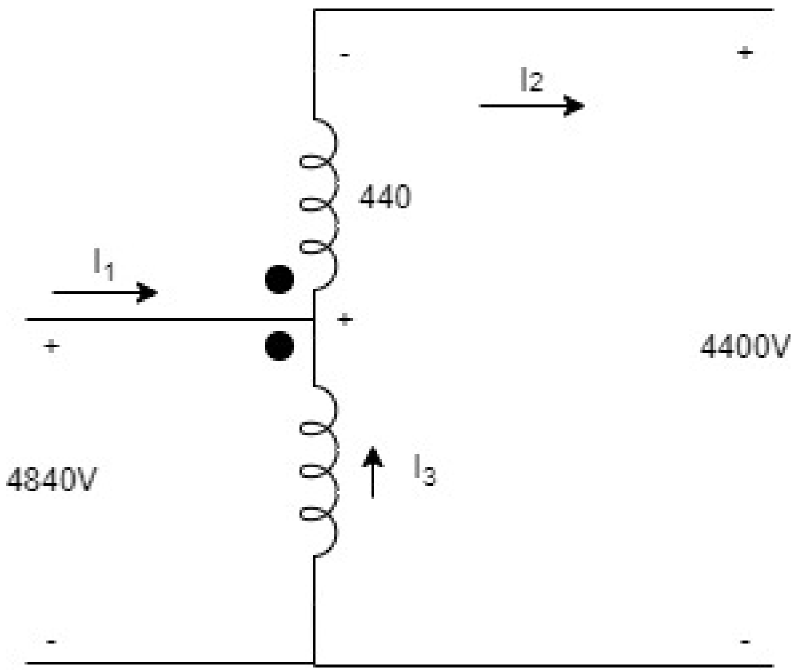

Figura 2: Enunciado

Inicialmente calcula-se as correntes nominais nos enrolamentos. Começando por I_2,

$$I_2 = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal_2}} = \frac{2.75 \times 10^4}{440} \implies \boxed{I_2 = 62.5A}$$

Em seguida, calcula-se I_3,

$$I_3 = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal_1}} = \frac{2.75 \times 10^4}{4400} \implies \boxed{I_3 = 6.25A}$$

Por fim, calcula-se I_1,

$$I_1 = I_2 - I_3 = 62.5 - 6.25 \implies \boxed{I_1 = 56.25A}$$

Com estes valores é possível encontrar as potências. Iniciando pela potência transformada, tem-se

$$S_{transformada} = I_2 V_{nominal_2} = (62.5)(440) \implies \boxed{S_{transformada} = 2.75 \times 10^4 VA}$$

Para a potência nominal, tem-se

$$S_{nominal} = I_1 V_{primário} = (56.25)(4400) \implies \boxed{S_{nominal} = 2.475 \times 10^5 VA}$$

Por fim, para a potência passante tem-se

$$S_{passante} = S_{nominal} - S_{transformada} = 2.475 \times 10^5 - 2.75 \times 10^4 \implies \boxed{S_{passante} = 2.2 \times 10^5 VA}$$

Para calcular o rendimento a plena carga é feito

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \sum Perdas}$$

Onde

$$\sum Perdas = (\frac{1}{\eta} - 1)(S_{saída})(\cos\phi)$$

Calcula-se inicialmente $\sum Perdas$ para cada um dos fatores de potência. Assim,

$$\sum Perdas_{0.6} = (\frac{1}{0.945})(2.75 \times 10^4)(0.6) = 960.32W$$

E

$$\sum Perdas_{0.8} = (\frac{1}{0.945})(2.75 \times 10^4)(0.8) = 1280.42W$$

Por fim, pode-se calcular os rendimentos fazendo-se

$$\eta_{0.6} = \frac{(2.75 \times 10^4)(0.6)}{(2.75 \times 10^4)(0.6) + 960.32} \implies \boxed{\eta_{0.6} = 99.53\%}$$

e

$$\eta_{0.8} = \frac{(2.75 \times 10^4)(0.8)}{(2.75 \times 10^4)(0.8) + 1280.42} \implies \boxed{\eta_{0.8} = 99.26\%}$$

Questão 1.16

Um transformador de três enrolamentos foi ensaiado para a obtenção de suas impedâncias de curto-circuito (parâmetros longitudinais). Percebeu-se que as componentes reativas em cada impedância, em módulo, foram maiores que dez vezes as respectivas componentes resistivas. As características nominais de cada enrolamento são:

- Primário: 2.97×10^4V, 3×10^7VA;
- Secundário: 1.32×10^5V, 3×10^7VA;
- Terciário: 9600V, 1.05×10^7VA;

Após os ensaios em laboratório, os dados foram trabalhados e transformados em valores percentuais, como segue:

- Ensaio 1: $Z_{ps} = 6.9\%$, na base 2.97×10^4V e 3×10^7VA;
- Ensaio 2: $Z_{pt} = 5.6\%$, na base 2.97×10^4V e 1.05×10^7VA;
- Ensaio 3: $Z_{st} = 3.8\%$, na base 1.32×10^5V e 1.05×10^7VA;

Pede-se:

a. Desenhar o circuito elétrico equivalente completo em por unidade (pu) com os cálculos e as indicações numéricas de cada parâmetro, usando como base potência nominal do enrolamento primário e as tensões nominais;
b. Desenhar o circuito elétrico equivalente completo em Ohms (Ω) com os cálculos e as indicações numéricas de cada parâmetro, referido ao terciário.

Resolução

Olhando os resultados dos ensaios há duas observações:

1. Os valores das impedâncias (no caso, de reatânncias) estão expressos em porcentagem e não em **p.u.**. Isto é fácil de resolver, basta dividir os valores fornecidos por 100. Assim,

- $Z_{ps} = 0.069$, na base 29.70kV e 30MVA;
- $Z_{pt} = 0.056$, na base 29.70kV e 10.50 MVA;
- $Z_{st} = 0.038$, na base 132.0kV e 10.59MVA;

2. Os valores de base são diferentes entre si. Para poder compará-los, ou realizar operações, eles devem estar na mesma base. No caso deste problema, a base fornecida é 30MVA com as tensões normais nos pontos considerados. Assim, basta aplicar sucessivamente a seguinte equação:

$$Z_{pu_{base2}} = Z_{pu_{base1}} (\frac{V_{base1}}{V_{base2}})^2 \frac{S_{base2}}{S_{base1}}$$

Então:

$$Z_{ps2} = 0.069(\frac{29.70}{29.70})^2\frac{30}{30} \implies Z_{ps2} = 0.069pu$$

$$Z_{pt2} = 0.056(\frac{29.70}{29.70})^2\frac{30}{10.50} \implies Z_{pt2} = 0.160pu$$

$$Z_{st2} = 0.038(\frac{132}{132})^2\frac{30}{10.50} \implies Z_{st2} = 0.109pu$$

Para se desenhar o modelo que é considerado a melhor representação por fase faltam calcular as impedâncias (reatâncias) em cada fase (não entre as fases, como as fornecidas). Então:

$$Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps2} + Z_{pt2} - Z_{st2}) = \frac{1}{2}(0.069 + 0.160 - 0.109) = 0.06pu$$

$$Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps2} + Z_{st2} - Z_{pt2}) = \frac{1}{2}(0.069 + 0.109 - 0.160) = 0.009pu$$

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt2} + Z_{st2} - Z_{ps2}) = \frac{1}{2}(0.160 + 0.109 - 0.069) = 0.1pu$$

Agora, traçando o diagrama:

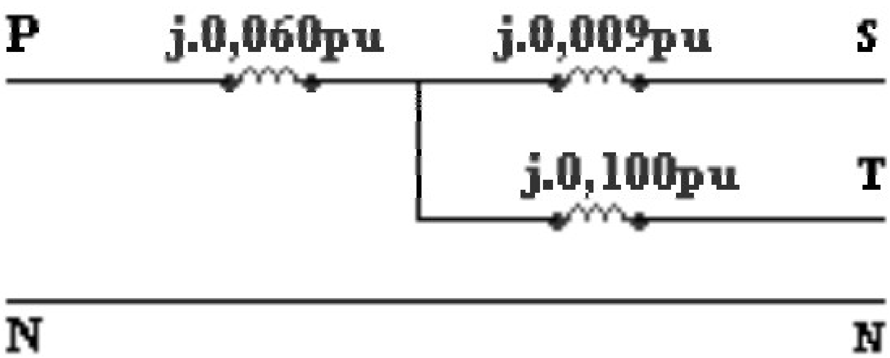

Figura 3: diagrama

Para calcular o circuito elétrico equivalente completo em Ohms referido ao terciário basta multiplicar os valores em pu indicados no diagrama anterior pelo valor de base de impedância do terciário, calculado a partir dos valores 30MVA e 9,60kV. Por que estes valores? Oras, todos os valores das impedâncias (reatâncias) agora estão na mesma base (30MVA e tensões nominais) e, dependendo para o lado que se deseja os valores em ohms, deve-se multiplicar pelo valor de base daquele lado (no caso, o terciário). Assim:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(9.6 \times 10^3)^2}{30 \times 10^6} = 3.072\Omega$$

Então:

$$Z_{P_{referido}} = Z_P Z_{base} = 0.060 \times 1.536 = 0.184320\Omega$$

$$Z_{S_{referido}} = Z_S Z_{base} = 0.009 \times 3.072 = 0.027648\Omega$$

$$Z_{T_{referido}} = Z_P Z_{base} = 0.1 \times 3.072 - 0.3072\Omega$$

Finalmente, o circuito elétrico equivalente passa a ser:

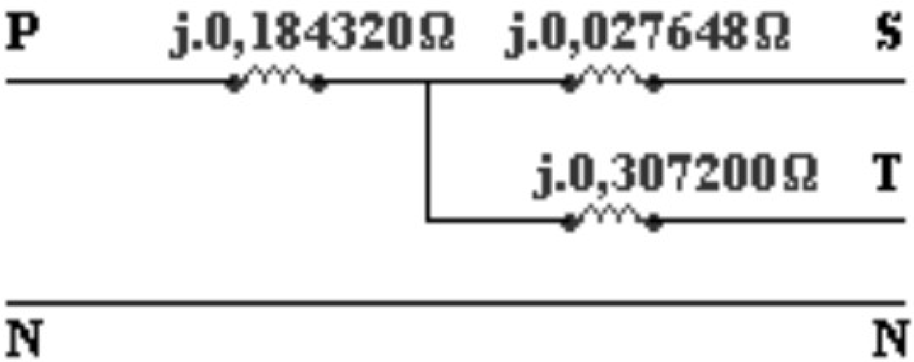

Figura 4: circuito equivalente