

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

DJONATHAN LUIZ DE OLIVEIRA QUADRAS (15200695)

TRABALHO 1

FLORIANÓPOLIS
2020

Introdução

O presente trabalho as respostas das questões 1.3, 1.4, 1.5 e 1.6 presentes na versão 6s 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.

Questão 1.3

Enunciado

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

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

Pede-se:

- O circuito elétrico equivalente completo (modelo “T”) do transformador (desenhos e parâmetros), referido aos dois lados do transformador;
- A corrente de excitação, a tensão e o fator de potência na fonte e a potência aparente fornecida pela fonte, referidas ao primário (lado 1), se o transformador estiver alimentando carga nominal (potência e tensão nominais), fator de potência 0,6 indutivo, usando o circuito equivalente completo (modelo “T”);
- Repetir o item b, usando o modelo impedância série;
- Comentar os resultados obtidos nos itens b e c, comparando a precisão e o tempo de resolução, usando os resultados do modelo “T” como referência.

Resolução

De acordo com as informações fornecidas, o circuito inicial é conforme apresentado na Figura 1.

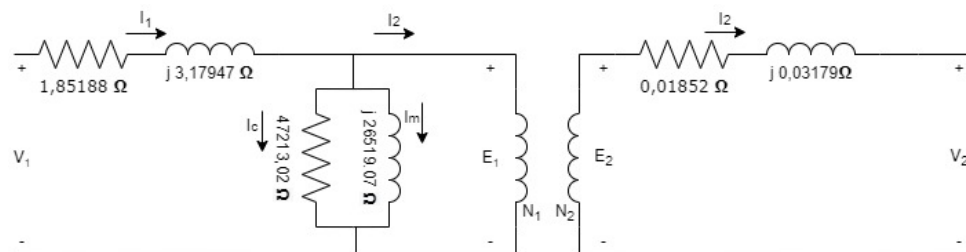


Figura 1: Circuito Inicial

Com isso, e sabendo-se que $a = \frac{V_1}{V_2} = 10$, temos o Circuito em T apresentado na Figura 2

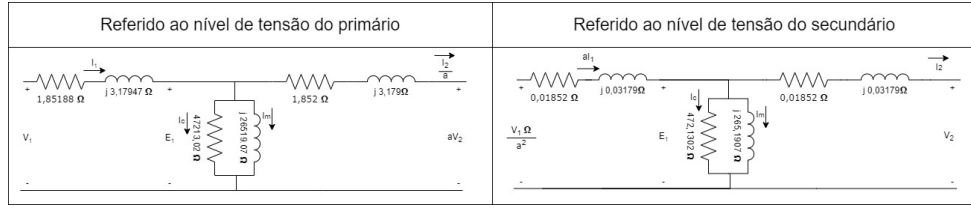


Figura 2: Circuito T

De acordo com o enunciado, temos que a potência na carga é de $S = 2 \times 10^4 VA$. Sabe-se que $S = I_L V_2$, então, como $V_2 = 240V$, temos que

$$S = I_L V_2 \implies I_L = \frac{2 \times 10^4}{240} \implies \boxed{I_L = 83.33A}.$$

Ademais, uma vez que o fator de potência é de 0.6 indutivo, temos que

$$\theta_i = -\arccos 0.6 \implies \boxed{\theta = -53.13}$$

E, como $I'_2 = \frac{I_L}{a}$, temos que

$$I_2 = \frac{83.33}{10} \implies \boxed{5 - 6.67iA}$$

Considerando-se $V'_2 = aV_2$, temos que

$$\boxed{V'_2 = 2400V}$$

Dessa forma, através da malha 2 conseguimos calcular a tensão sobre a carga em paralelo (E1). Portanto,

$$E_1 = V'_2 + (1.85188 + 3.17947i)I_2 \implies \boxed{E_1 = 2430.46 + 3.55iV}.$$

Com o valor de E_1 é possível calcular as correntes I_c e I_m por meio da lei de ohm.

$$\boxed{I_c = 0.05 + 0iA \quad I_m = 0 - 0.09iA}.$$

Com isso, temos o valor da corrente de excitação (I_ϕ) e de I_1 .

$$I_\phi = I_c + I_m \implies \boxed{I_\phi = 0.05 - 0.09iA}$$

$$I_1 = I_2 + I_\phi \implies \boxed{I_1 = 5.05 - 6.76iA}$$

Finalmente, aplicando uma análise de malhas na malha 1, temos que a tensão na fonte é

$$V_1 = E_1 + (1.85188 + 3.17947i)I_1 \implies \boxed{V_1 = 2461 + 7iV}.$$

Por fim, a potência aparente fornecida pela fonte é

$$S = |V_1||I_1| \implies \boxed{S = 2.0767467 \times 10^4 VA}.$$

O circuito equivalente para o modelo proposto da forma de impedância em série é apresentado na Figura 3

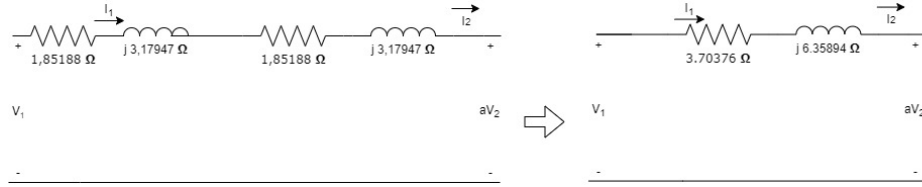


Figura 3: Circuito Impedância em Série

Dessa forma, semelhante ao modelo anterior, temos

$$\boxed{I_1 = I_2 = 5 - 6.67iA}, \quad \boxed{V'_2 = 2400V}.$$

Assim, aplicando uma análise de malhas, temos que

$$V_1 = (3.70388 + 6.35847i)I_1 + V_2 \implies \boxed{V_1 = 2460.91 + 7.1i}$$

E, finalmente, a potência aparente fornecida pela fonte é

$$\boxed{S = |V_1||I_1| \implies S = 2.0507662 \times 10^4 VA}.$$

Com base na Tabela 1 podemos perceber que os modelos tem resultados muito semelhantes (com uma diferença máxima de até 1,25). Isso comprova que utilizar o modelo de Impedância em Série (desconsiderando as perdas em g_m e b_m) não causam perdas significativas para a modelagem dos sistemas.

Tabela 1: Comparação entre os modelos

Variável	Modelo T	Modelo Impedância Série	Variação (%)
I_1 [A]	5.05-6.76i	5.00-6.67i	1.24 %
V_1 [V]	2461.30+7.10i	2460.91+7.10i	0.02 %
I_2 [A]	5.00-6.67i	5.00-6.67i	0 %
V'_2 [V]	2400.00+0.00i	2400.00+0.00i	0 %
S [VA]	20767.47+0.00i	20507.66+0.00i	1.25 %

Questão 1.4

Enunciado

Resolver individualmente, passo a passo e explicando com detalhes cada passo, conforme a sua versão definida pelo professor, tendo por base os resultados da questão 1.3:

- O rendimento e a regulação do transformador, usando o modelo completo “T”;
- O rendimento e a regulação do transformador, usando o modelo impedância série;
- Comparar e comentar os resultados obtidos, tomando como referências os resultados do modelo “T”!

Resolução

Para calcular o rendimento, será utilizada a equação

$$\eta = \frac{P_s}{P_e},$$

onde P_s é a potência ativa de saída e P_e é a potência ativa de entrada. Para tanto, usaremos

$$P_s = (S_s)(fp) \quad \text{e} \quad P_e = S_e \cos(\theta_v - \theta_i).$$

Para calcular a regulação foi utilizada a equação

$$\Re = \frac{V1 - V2}{V2}.$$

Dessa forma, para o Modelo T tem-se o rendimento

$$\eta_T = \frac{(2 \times 10^4)(0.6)}{(2.076747 \times 10^4)(\cos(0.17 - -53.22))} \implies \boxed{\eta_T = 96.89\%}$$

e a regulação

$$\Re_T = \frac{2461.31 - 2400}{2400} \implies \boxed{\Re_T = 2.55\%}$$

Por fim, para o Modelo de Impedância em Série tem-se o rendimento

$$\eta_{IS} = \frac{(2 \times 10^4)(0.6)}{(2.050766 \times 10^4)(\cos(0.17 - -53.13))} \Rightarrow \boxed{\eta_{IS} = 97.9\%}$$

e a regulação

$$\Re_{IS} = \frac{2460.92 - 2400}{2400} \Rightarrow \boxed{\Re_{IS} = 2.54\%}$$

A Tabela 2 mostra a comparação de rendimento e regulação dos modelos T e Impedância em Série. Pode-ser perceber que os resultados são bastante próximos, retornando uma variação de 1.05 % para os rendimentos e de 0.63 % para as regulações. Isso garante que a utilização de um modelo em recorrência de outro não gera perdas consideráveis para o resultado

Tabela 2: Comparação entre os modelos

Variável	Modelo T	Impedância em Série	Variação (%)
Rendimento	96.89 %	97.9 %	1.05 %
Regulação	2.55 %	2.54 %	0.63 %

Questão 1.5

Enunciado

Resolver individualmente, passo a passo e explicando com detalhes cada passo, conforme a sua versão definida pelo professor.

- Calcular a tensão e o fator de potência na fonte e a potência aparente fornecida pela fonte, referidas ao primário (lado 1), se o transformador estiver alimentando carga nominal (potência e tensão nominais), fator de potência 0,6 capacitivo, usando o circuito equivalente impedância série;
- Nas condições do item a, calcular o rendimento e a regulação do transformador;
- Comparar e comentar os resultados obtidos, tomando como referências os resultados obtidos no item b do Exemplo 1.4!

Resolução

Considerando um $fp = 0.6$ capacitivo, temos

$$\theta = \arccos 0.6 \implies \boxed{\theta = 53.13}.$$

De acordo com o apresentado nos problemas 1.3 e 1.4 tem-se que

$$\boxed{I_1 = I_2 = 5 + 6.67iA}, \quad \boxed{V_2' = 2400V}.$$

Assim, aplicando uma análise de malhas, tem-se que

$$V_1 = (3.70388 + 6.35847i)I_1 + V_2 \implies \boxed{V_1 = 2376.13 + 56.48i}$$

A potência aparente fornecida pela fonte é

$$\boxed{S = |V_1||I_1| \implies S = 1.980667 \times 10^4 VA}.$$

E, finalmente, o fator de potência aparente fornecido pela fonte é

$$fp = \cos(\theta_V - \theta_i) = \cos(0.0237673 - 0.9272952) \implies \boxed{fp = 0.62}$$

Dessa forma, para o modelo proposto tem-se o rendimento

$$\eta = \frac{(2 \times 10^4)(0.6)}{(1.980667 \times 10^4)(\cos(1.36 - 53.13))} \Rightarrow \boxed{\eta_T = 97.9\%}$$

e a regulação

$$\Re = \frac{2376.8 - 2400}{2400} \Rightarrow \boxed{\Re_T = -0.97\%}$$

A Tabela 3 mostra a comparação entre os resultados dos modelos tendo fatores de potência distintos (capacitivo e indutivo). Pode-se perceber que para fatores de potência com o mesmo valor (0.6) mas com propriedades diferentes (um capacitivo e outro indutivo), o modelo apresenta o mesmo rendimento (97.9015305), havendo variação apenas na regulação. Para ambos os casos a regulação apresenta um valor bem próximo de zero, tendo valor maior que zero para propriedades indutivas e menor que zero para propriedades capacitivas.

Tabela 3: Comparação entre os modelos

Variável	Indutivo	Capacitivo
Rendimento	97.9 %	97.9 %
Regulação	2.54 %	-0.97 %

Questão 1.6

Enunciado

Os seguintes resultados foram obtidos de ensaios realizados em um transformador de $2 \times 10^4 VA$, $2400/240V$, $60Hz$:

- Ensaio de curto-circuito: $P = 257W$; $I = 8.33A$; $V = 61.3V$ (medidas pelo lado 1);
- Ensaio de circuito aberto: $P = 122W$; $I = 1.04A$; $V = 240V$ (medidas pelo lado 2);

Pede-se:

- O circuito elétrico equivalente completo (modelo T) referido aos dois lados do transformador (dois circuitos). Colocar os valores diretamente nos circuitos elétricos equivalentes;
- A corrente de excitação, se for aplicada tensão nominal no lado de mais alta tensão, referida a este lado;
- Comparar e comentar os resultados obtidos nos itens anteriores, tomando como referência os resultados obtidos no item a e a corrente de excitação calculada no item b da questão 1.3, respectivamente;
- Refazer o cálculo do rendimento do item b da questão 1.4, incluindo as perdas no ferro em circuito aberto como perda do problema, desde que o ensaio tenha sido feito com tensão nominal;
- Comparar e comentar os resultados obtidos nos itens a e b da questão 1.4 e no item d deste exemplo.

Resolução

Inicialmente, será calculado as correntes nominais do lado primário e secundário.

$$I_{nominal_1} = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal_1}} = \frac{2 \times 10^4}{2400} \Rightarrow \boxed{I_{nominal_1} = 8.33A}$$

$$I_{nominal_2} = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal_2}} = \frac{2 \times 10^4}{240} \Rightarrow \boxed{I_{nominal_2} = 83.33A}$$

A Tabela 4 compara os valores obtidos com os valores medidos.

Concluí-se, assim, que o ensaio foi feito pelo lado de alta tensão (primário), uma vez que os valores medido e calculado são muito próximos. Por meio dos valores obtidos no ensaio de curto circuito é possível calcular r_1 , r_2 , x_1 e x_2 referentes ao lado primário (de alta tensão). Assim,

Tabela 4: Comparação entre os valores medidos e calculados

Lado	Ensaio	Calculado
Primário	8.33 A	8.33 A
Secundário	83.33 A	1.04 A

$$r_1 = r_2 = \frac{P_{cc}}{2I_{cc}^2} = \frac{257}{2(8.33)^2} \Rightarrow \boxed{r_1 = r_2 = 1.852\Omega}$$

$$x_1 = x_2 = \frac{\sqrt{(\frac{V_{cc}}{I_{cc}})^2 - (\frac{P_{cc}}{I_{cc}^2})^2}}{2} = \frac{\sqrt{(\frac{61.3}{8.33})^2 - (\frac{257}{69.3889})^2}}{2} \Rightarrow \boxed{x_1 = x_2 = 3.1795\Omega}$$

Por meio dos valores obtidos no ensaio de curto aberto é possível calcular g_m e b_m referentes ao lado secundário (de baixa tensão). Assim,

$$g_m = \frac{P_{ca}}{2V_{ca}^2} = \frac{122}{240^2} \Rightarrow \boxed{g_m = 0.2118056mS}$$

$$b_m = \sqrt{(\frac{I_{ca}}{V_{ca}})^2 - (\frac{P_{ca}}{V_{ca}^2})^2} = \sqrt{(\frac{1.04}{240})^2 - (\frac{122}{5.76 \times 10^4})^2} \Rightarrow \boxed{b_m = 0.3780426mS}$$

Com os valores, é possível realizar as conversões para determinar os circuitos T referentes ao lado primário e secundário. Os que já estavam do lado primário serão divididos pela taxa $a = 10$ para irem para o lado secundário, enquanto os que estavam no lado secundário serão multiplicados pela mesma taxa para irem ao lado primário. Assim, a Tabela 5 apresenta os valores para ambos os lados.

Tabela 5: Variáveis para Primário e Secundário

Variável	Primário	Secundário
$r_1 = r_2$	185.1880000	1.8520000
$x_1 = x_2$	317.9470000	3.1790000
g_m	0.0021181	0.2118056
b_m	0.0037804	0.3780426

Com todos os valores é possível determinar os circuitos T para as duas referências.

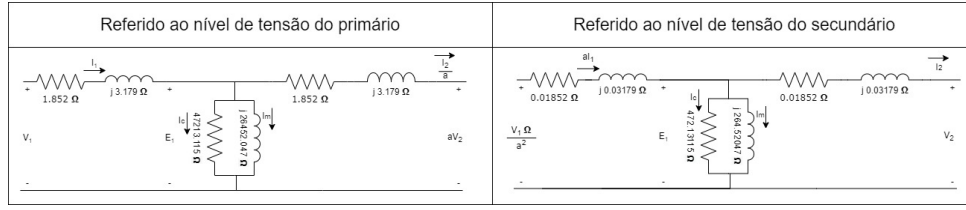


Figura 4: Circuito T

Como não há cargas no lado de baixa tensão, $I_2 = 0$ e $I_1 = I_\phi$. Assim, considerando o ramo em paralelo como sendo uma única impedância de valor $Z = g_m || b_m$ e aplicando uma análise de malhas, é possível encontrar o valor da corrente.

$$I_\phi = \frac{V_{cc}}{Z_{total}} = \frac{61.3}{297.98 + 519.27i} \Rightarrow \boxed{I_\phi = 0.05 - 0.09iA}.$$

E, como esperado, o módulo de $I_\phi = 0.102A$ é muito próximo da corrente medida em circuito aberto ($I_2 = 1.04A$). Ademais, os valores de I_ϕ foram iguais para as questões 1.3 e 1.6.

A potência perdida no metal é dada por

$$P_f = |Z||I_\phi|^2$$

Assim,

$$\boxed{P_f = 1.1824983W}$$

Resolução

Para calcular o rendimento, será utilizada a equação

$$\eta = \frac{P_s - P_f}{P_e},$$

Assim, de acordo com os valores encontrados nas questões 1.4 e 1.6,

$$\eta_{IS} = \frac{(2 \times 10^4)(0.6) - 1.1824983}{(2.050766 \times 10^4)(\cos(0.17 - -53.13))} \Rightarrow \boxed{\eta_{IS} = 97.89\%}$$

A Tabela 6 mostra a comparação de rendimentos entre os modelos propostas na

questão 1.4 e 1.6 (este considerando as perdas). Pode-se perceber que os resultados são bastante próximos, principalmente considerando as perdas no ferro. A consideração das perdas gerou um impacto mínimo, o que mostra que a sua utilização pouco impacta no resultado final.

Tabela 6: Comparação entre os modelos

Variável	Modelo T	Impedância em Série	Com as Perdas
Rendimento	96.89 %	97.9 %	97.89 %