

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA A - TURMA 06213

DJONATHAN LUIZ DE OLIVEIRA QUADRAS (15200695)

AVALIAÇÃO 1

FLORIANÓPOLIS
15/03/2021

Introdução

O presente trabalho as respostas da avaliação 1 desenvolvida pelo Professor Doutor Renato Lucas Pacheco como requisito para a aprovação na disciplina Conversão Eletromecânica de Energia A. O trabalho foi inteiramente desenvolvido em linguagem RMarkdown. Os códigos fonte para a sua elaboração contam em anexo.

Questão 1

Questão dissertativa da lista 1 (Exemplos 1.3, 1.4, 1.5, e 1.6): explicar como o problema foi resolvido, suas dificuldades, pontos interessantes, comentar os resultados, outras informações que julgarem interessantes). A questão vale até oito (8) pontos, desde que o exercício esteja resolvido no trabalho. A entrega do trabalho vale outros dois (2) pontos (exercício completo, apresentação, clareza, ineditismo - não ser “cola” e aspectos assim).

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:

- a. O circuito elétrico equivalente completo (modelo T) referido aos dois lados do transformador (dois circuitos). Colocar os valores diretamente nos circuitos elétricos equivalentes;
- b. A corrente de excitação, se for aplicada tensão nominal no lado de mais alta tensão, referida a este lado;
- c. 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;
- d. 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;
- e. Comparar e comentar os resultados obtidos nos itens a e b da questão 1.4 e no item d deste exemplo.

Comentários sobre a questão

Toda a resolução, bem como a lógica utilizada para resolver estão descritas abaixo. É importante ressaltar que a resolução é exatamente a mesma utilizada no trabalho 1.

Essa questão foi uma questão muito interessante por englobar diversos conceitos referentes a máquinas e circuitos elétricos. As principais dificuldades encontradas foram

de compreender a qual lado os valores calculados pertenciam (como por exemplo, se os valores de r_1, r_2, x_1, x_2, g_m e b_m eram referentes ao lado primário ou secundário).

Outra dúvida que apareceu durante a realização foi de como seria incluída a perda de potência no ferro. Por tanto, foi decidido remover a potência perdida da potência de saída.

Os valores encontrados nessa questão (para I_ϕ e \Re) apontam que os resultados estão de acordo com o esperado e já calculado nos exemplos 1.3, 1.4 e 1.5, o que mostra que é possível utilizar qualquer um dos modelos e qualquer uma das abordagens sem perdas consideráveis no resultado final.

Resolução

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

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

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

A Tabela 1 compara os valores obtidos com os valores medidos.

Tabela 1: Comparaçāo entre os valores medidos e calculados

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

Conclui-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,

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

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

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,

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

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

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 2 apresenta os valores para ambos os lados.

Tabela 2: 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.

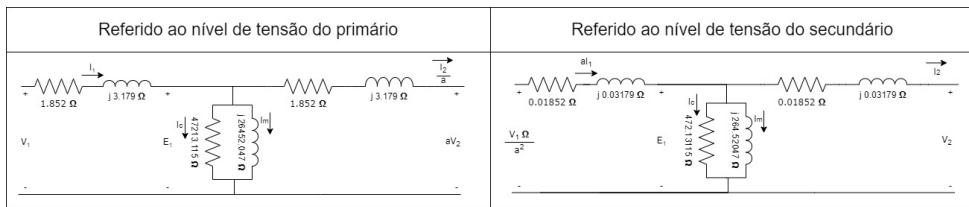


Figura 1: Circuito T

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.

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

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,

$$P_f = 1.1824983W$$

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,

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

A Tabela 3 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 3: Comparaçāo entre os modelos

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

Questão 2

A ser feita posteriormente, nos mesmos moldes da questão 1.

Questão 3

Escolher duas questões do GRUPO I e duas questões do GRUPO II, de temas diferentes. Justificar todas as respostas. O professor não “lerá” o subentendido. Expliquem como se estivessem explanando para um colega que não foi às aulas e não está sabendo o assunto.

Questões Grupo 1

- (4) Em relação aos ensaios de curto-círcuito (CC) e de circuito aberto (CA) em transformadores é correto afirmar (Falso ou Verdadeiro):
- () O ensaio de curto-círcuito é necessário para se obter o rendimento do transformador no caso de se trabalhar com o modelo impedância série do transformador de potência, pois, fornece o valor das perdas no núcleo, necessário para o cálculo do rendimento do dispositivo.
 - () Vários ensaios são necessários para se obter as características de funcionamento e os parâmetros de um transformador de potência, como os ensaios de curto-círcuito e de circuito aberto. Se o transformador for usado em corrente contínua como, por exemplo, promovendo o isolamento para corrente contínua entre circuitos, mas, se mantendo a continuidade para corrente alternada, o ensaio de polaridade também passa a ser importante.
 - () O que se espera no ensaio de circuito aberto é uma alta impedância do transformador. Ao contrário, no ensaio de curto-círcuito, uma baixa impedância é procurada, sendo que “alta” e “baixa” são consideradas em relação ao valor da impedância da carga.
 - () As normas recomendam que o ensaio de CC seja realizado pelo lado de alta tensão e o de CA pelo lado de baixa tensão.
 - () Se os dois ensaios forem feitos, respectivamente, com corrente nominal e com tensão nominal, as perdas serão obtidas estarão com valores muito próximos aos seus valores reais em operação normal do equipamento, de forma que, no cálculo do rendimento, podem ser utilizadas diretamente, dispensando a obtenção individual de cada perda.
- (5) Em relação a transformador, de um modo geral, verificar se são verdadeiras (V) ou falsas (F) as seguintes afirmações:
- () As harmônicas de corrente surgem da deformação da corrente de excitação, devido ao laço de histerese e à saturação do núcleo, possuindo frequências múltiplas da fundamental, com destaque para a terceira harmônica.

- b. () A corrente de excitação produz, além do fluxo magnético no núcleo, perdas Joule nesse mesmo núcleo, provocando seu aquecimento.
- c. () A corrente de excitação, ou de magnetização, é a responsável pela magnetização do núcleo do transformador e pelas perdas histeréticas e por correntes de Foucault.
- d. () Os valores de base de linha e de fase em um sistema trifásico devem manter entre si a mesma relação que as grandezas respectivas em seus valores reais. Após se transformar o sistema trifásico equilibrado em por unidade, obtém-se um sistema monofásico em por unidade, que pode ser resolvido pelas técnicas usuais de circuitos elétricos.
- e. () O sistema por unidade (pu) apresenta uma série de vantagens como, por exemplo, deixar os valores da corrente de excitação e da resistência e da reatância de excitação, respectivamente, dentro de faixas relativamente estreitas de valores, independentemente dos valores tomados como base. Outra vantagem é que, apesar de mudar os módulos ou valores eficazes das grandezas, inclusive potências, não altera os ângulos envolvidos entre as grandezas, o que permite a aplicação direta das técnicas de circuitos elétricos para a resolução dos problemas.

Respostas - Questões Grupo 1

- (4) Em relação aos ensaios de curto-circuito (CC) e de circuito aberto (CA) em transformadores é correto afirmar (Falso ou Verdadeiro):
- a. (F) Como as resistências características de g_m e b_m são baixos para o ensaio de curto-circuito, a tensão sobre essas resistências também será muito baixa, tornando o valor de perdas no núcleo (para o ensaio de curto-circuito) praticamente desprezível.
 - b. (F) Não é possível realizar os testes aplicando uma corrente contínua. Um indutor (componente chave para um transformador) se comporta como um circuito aberto diante de uma corrente contínua. Dessa forma, se for aplicada uma cc, os ensaios não irão retornar valores úteis.
 - c. (V) de fato, o que se espera no ensaio de circuito aberto é uma alta impedância do transformador, ao contrário do ensaio de curto-circuito.
 - d. (V) De fato, para que haja maior segurança nas medições, as normas recomendam que o ensaio de CC seja realizado pelo lado de alta tensão e o de CA pelo lado de baixa tensão.
 - e. (F) As perdas encontradas são as perdas no ferro. Entretanto, não é dispensável a obtenção individual de cada perda.
- (5) Em relação a transformador, de um modo geral, verificar se são verdadeiras (V) ou falsas (F) as seguintes afirmações:

- a. (V) De fato, as harmônicas de corrente surgem da deformação de sua corrente de excitação, em decorrência do laço de histerese e à saturação do núcleo. Também é notório que a terceira harmônica aparece com destaque neste cenário.
- b. (F) A corrente de excitação, além do fluxo magnético no núcleo, gera perdas Ôhmicas.
- c. (F) A corrente de excitação não é responsável pelas perdas por histerese e corrente de Foucault. Essas perdas são referentes ao núcleo que possui baixa resistividade elétrica.
- d. (V) De fato, os valores de base de linha e de fase em um sistema trifásico devem manter entre si a mesma relação que as grandezas respectivas em seus valores reais. Dessa forma, é possível se obter um sistema monofásico em p.u. após se transformar o sistema trifásico equilibrado em p.u.
- e. (F) A representação de um sistema trifásico em p.u. altera sim os ângulos, pois é feito para uma única fase do sistema em Y ou $Y_{equivalente}$

Questões Grupo 2

- (11) Em relação a um transformador de potência é correto afirmar (Falso ou Verdadeiro):
- a. () Para melhorar o seu rendimento, deve ser projetado para que haja uma compatibilidade entre densidade de corrente e a indução no ferro e o custo do equipamento. No caso do ferro, usar ligas ferromagnéticas de alta resistividade e com laço de histerese bastante estreito.
 - b. () A frase “Para cada 1 MVA de potência gerada por uma usina, são necessários de 6 a 10 MVA de potência em transformadores para que esta energia chegue ao consumidor final” mostra uma interessante constatação prática.
 - c. () Deseja-se que possuam custo aceitável, com boa regulação de tensão, alto rendimento, baixa corrente de excitação e baixas perdas quando operando em vazio. Baixas correntes em vazio são obtidas com altas indutâncias (reatâncias) de magnetização, característica de núcleos altamente permeáveis. Menores perdas em vazio significam, principalmente, menores perdas no ferro.
 - d. () Para que se obtenha uma regulação de tensão adequada, deve-se reduzir a queda de tensão no equipamento. Assim, no projeto do transformador, deve-se intensificar o acoplamento magnético entre os enrolamentos, visando-se a redução dos fluxos dispersos, com aproximação entre as bobinas e uso de núcleos ferromagnéticos altamente permeáveis.
 - e. () O transformador pode ser considerado um grande impulsor da transmissão econômica de energia elétrica a grandes distâncias, já que propiciou a transmissão em altas tensões, com menores correntes (menores perdas e economia nos condutores).

- (19) São falsas ou verdadeiras as proposições a seguir, a respeito da técnica por unidade (pu)?
- () Se, por exemplo, a queda de tensão na resistência no enrolamento de baixa tensão de um transformador for 0,01pu (por unidade), isso significa que essa queda é 1% da tensão tomada como base para esse circuito. Se essa resistência for transferida para o enrolamento de alta, o valor da queda de tensão continuará sendo 0,01pu, mas, agora, em relação à tensão tomada como base para o enrolamento de alta.
 - () Uma das vantagens do sistema pu (por unidade) é que os parâmetros elétricos de um dado transformador têm valores típicos, não apresentando, portanto, variações significativas em relação a outros transformadores, ainda que as potências nominais dos transformadores comparados variem, desde que os valores de base de cada equipamento sejam os seus valores nominais.
 - () Para o cálculo do rendimento sempre podem ser utilizadas diretamente as grandezas em pu. Embora os valores das potências em pu não sejam os verdadeiros (aqueles em W), os valores do numerador e do denominador da expressão usada para o cálculo do rendimento são proporcionais entre si, de modo que o valor do quociente não se altera.
 - () Dependendo da base escolhida, os valores (numéricos) em pu para o mesmo circuito elétrico serão diferentes entre si, podendo ser maiores ou menores que os valores reais das grandezas envolvidas.
 - () Os valores em pu (por unidade) em um ponto do circuito (lado do transformador) têm os mesmos valores quando transferidos para o outro lado. Isso ocorre porque tanto os valores reais das grandezas, bem como, os valores de base estão relacionados pela mesma relação de transformação.

Respostas - Questões Grupo 2

- (11) Em relação a um transformador de potência é correto afirmar (Falso ou Verdadeiro):
- (V) De fato, para melhorar o seu rendimento, deve ser projetado para que haja uma compatibilidade entre densidade de corrente e a indução no ferro e o custo do equipamento. Usar ligas ferromagnéticas de alta resistividade e com laço de histerese bastante estreito reduz as perdas por histerese e correntes de faucault referentes ao núcleo.
 - (V) De fato é uma interessante constatação prática, uma vez que apresenta uma margem de 4MVA de potência para atingir o objetivo.
 - (V) De fato, todas as características apresentadas são relacionadas a um bom transformador. Também é fato que menores perdas em vazio são características de

- um núcleo de ferro com alta indutância, o que minimiza as perdas por histerese.
- d. (V) De fato, para que haja uma boa regulação é necessário minimizar as perdas magnéticas. Isso é possível aproximando as bobinas e aplicando-as em um núcleo permeável (como citado, um núcleo ferromagnético).
 - e. (V) As transmissões de energia elétrica apresentaram um ganho considerável com a aplicação de transformadores, uma vez que se bem dimensionados e utilizando bons componentes, eles minimizam as perdas de distribuição.
- (19) São falsas ou verdadeiras as proposições a seguir, a respeito da técnica por unidade (pu)?
- a. (V) De fato, considerando a tensão tomada como base igual a 1, uma queda de 0.01pu apresenta uma queda de 1%. E também é fato que as proporções são as mesmas para ambos os lados do circuito.
 - b. (V) De fato, a principal vantagem da utilização da técnica pu é a sua proporcionalidade. Dessa forma, contanto que as proporcionalidades se mantenham as mesmas, as potências nominais dos transformadores podem variar.
 - c. (V) Novamente, a principal vantagem da técnica pu é a proporcionalidade. Dessa forma, mesmo que os valores aplicados não sejam “reais”, a proporcionalidade garante que o rendimento gerará o mesmo valor para ambas as situações.
 - d. (V) De fato, os valores numéricos serão alterados de acordo com a base escolhida. Entretanto, não será alterada a proporcionalidade entre eles.
 - e. (V) De fato, a proporcionalidade gerada pela técnica pu garante que de ambos os lados do transformador os valores serão iguais.