



Primeira Lista de Exercícios - 2016

Circuitos magnéticos e transformadores

Bibliografia de referência

Falcone, Volume 1:

• Capítulo 2: Transformadores, exceto 2.17 (operação em frequência constante e variável), 2.18 (transitórios), 2.19 (polifásicos)

Fitzgerald, 6ª edição:

• Capítulo 2: Transformadores, exceto 2.6 (autotransformadores), 2.7 (transformadores em circuitos trifásicos), 2.9 (sistema por unidade)

Chapman, 4ª edição (em inglês):

• Chapter 2, exceto 2.6 (per-unit system), 2.9 (autotransformer), 2.10 (three-phase transformers), 2.11 (three-phase transformers using two transformers), 2.12 (transformer ratings), 2.13 (instrument transformers)

REVISÃO DE CIRCUITOS – INDUTÂNCIAS PRÓPRIA E MÚTUA

1)(*) Indutâncias próprias de indutores reais são sempre valores positivos, enquanto a indutância mútua pode ser negativa, nula ou positiva. Por quê? Qual o sentido físico de uma indutância mútua negativa ou nula?

2(**) Sobre bobinas e seus acoplamentos, pede-se responder:

a) Mostre que a indutância de um indutor de N espiras com núcleo de relutância \mathfrak{R} pode ser dada por $L = N^2/\mathfrak{R}$

b) De acordo com a teoria de circuitos, duas bobinas, de indutâncias L_1 e L_2 , ligadas em série, têm indutância equivalente dada por $L_{eq} = L_1 + L_2$. Suponha que essas bobinas tenham N_1 e N_2 espiras, respectivamente, e estejam ligadas por um núcleo de uma mesma relutância. A fórmula do item a) resulta em $L_{eq} = (N_1+N_2)^2/\mathfrak{R} = (N_1^2 + 2*N_1*N_2 + N_2^2)/\mathfrak{R}$, valor diferente de $L_1 + L_2$. Explique essa aparente contradição.

3¹(**) Duas bobinas, de indutâncias próprias L_1 e L_2 e indutância mútua M , de um transformador são enroladas sobre um núcleo magnético toroidal de alta permeabilidade. Sabe-se que a bobina L_1 contém 20 espiras. Aplicando-se uma tensão $v_1(t) = 10 \cos(200t)$ (V, s) ao circuito, obtêm-se as seguintes leituras dos instrumentos:

¹ Retirado de Orsini, Curso de Circuitos Elétricos, v2.

• Amperímetro no primário: 0,1 A (eficazes)

• Voltímetro no secundário: 100 V (eficazes)

Determine, se possível, os seguintes parâmetros do transformador: L_1 , L_2 , M e o número de espiras do secundário.

TRANSFORMADORES

4) Mostre que a eficiência de um transformador é máxima quando as perdas no ferro igualam-se às perdas no cobre e o fator de potência é unitário.

5)(P1 2010) Os transformadores de tensão utilizados na distribuição de energia consomem potência elétrica mesmo quando estão em vazio, ou seja, quando não há nenhuma impedância de carga conectada ao circuito secundário.

a) Admitindo que na corrente primária seja aplicada tensão nominal, quais são os valores estimados para corrente e potência ativa absorvidas em vazio, em porcentagem dos respectivos valores nominais?

b) Explique os fenômenos físicos que levam o transformador a ter esse comportamento em vazio. Mostre também a influência do valor eficaz da tensão aplicada e de sua frequência sobre a potência ativa absorvida.

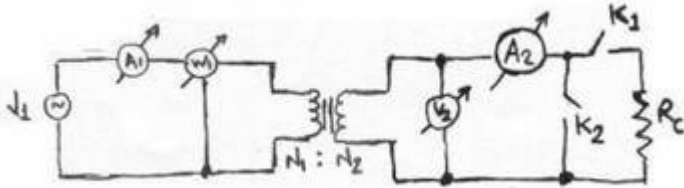
6)(P1 2010) Os transformadores são caracterizados por duas relações de ganho: a relação de espiras, N_1/N_2 , e a relação de transformação, V_1/V_2 . Esses valores, em geral, divergem. Essa divergência depende fortemente da corrente da carga, sendo caracterizada pelo índice de mérito: regulação de tensão.

a) Explique os fenômenos físicos que produzem essa divergência e apresente um valor percentual estimado da regulação de tensão em carga nominal indutiva.

b) Explique a influência da natureza da carga (fator de potência) sobre a regulação de tensão e que procedimentos podem ser adotados para melhorar a regulação de tensão do transformador.



7)(P1 2001) A carga resistiva de $1,152 \Omega$ é alimentada por meio de um transformador abaixador de tensão 13200/240 [V], 50 [kVA], 60 [Hz]. As chaves K1 e K2 são acionadas, nas condições aberta ou fechada, para se construir a tabela com valores de tensão, corrente e potência.



a) Adote o circuito equivalente simplificado para a condição de fluxo magnético constante. Complete a tabela e identifique as condições de operação que correspondem a cada uma de suas linhas.

K1	K2	A1	A2	W1	V1	V2
A	A	0,23		2000	13200	
A	F	208,33	1500	600		
F	A					240
F	F				13200	

b) Determine a regulação e o rendimento do transformador na condição carga nominal resistiva. Apresente o diagrama de fasores e comente a influência da impedância de curto-circuito nessas duas grandezas.

c) Considere um outro transformador que tenha as mesmas características construtivas de projeto, porém de menor potência nominal, 20 [kVA] e relação de tensão 1100/110 [V]. Que valores poderíamos estimar para a tabela (dados)? Justifique.

8)(P1 2007) Seja um transformador de núcleo de ferro com dois enrolamentos. Seus dados nominais são: 5 kVA, 100/500 Volts, 60 Hz. Sabe-se que ele opera com rendimento máximo com 105% da carga nominal com fator de potência unitário. No ensaio de curto circuito desse transformador, efetuado com corrente nominal, a potência absorvida é de 100 W e o fator de potência é de 0,707 indutivo. No ensaio em vazio, realizado a tensão nominal, o fator de potência foi 0,3 indutivo. Pede-se:

a) Calcule os parâmetros de circuito equivalente que caracterizam os enrolamentos da alta e da baixa. Explícite o lado a que eles estão referidos.

b) Calcule os parâmetros do circuito equivalente que caracterizam o núcleo do transformador. Explícite o lado a que eles estão referidos.

c) Desenhe um circuito equivalente referido ao lado da baixa tensão, indicando todos os valores dos parâmetros, tal que o transformador funcione a fluxo no núcleo constante.

d) Considerando o circuito do item anterior, calcule o rendimento máximo e a regulação do transformador nessa condição.

e) Calcule o rendimento e a regulação na condição de plena carga com fator de potência 0,85 indutivo.

9)(P1 2008) Um transformador de núcleo de aço de 5 kVA, 500/100 V e 60 Hz possui os seguintes dados de ensaio.

ENSAIO	Lado das medidas	V (V)	I (A)	P (W)
Vazio	BT	100	3	100
Curto-circuito	AT	50	10	(não medido)

Sabe-se que o rendimento máximo de um transformador ocorre quando as perdas Joule igualam as perdas no ferro. No transformador acima, essa condição se observa quando o mesmo opera com potência de 3 kVA, medida na carga alimentada em tensão nominal. Determine:

a) As perdas no cobre e as perdas no núcleo nessa condição de carga, ou seja, 3 kVA e 100 V.

b) O rendimento e a regulação desse transformador quando ele estiver operando com tensão nominal e carga nominal com fator de potência 0,8 indutivo.



c) Como se alterariam as medidas do ensaio em vazio caso ele fosse realizado em 50 Hz? Justifique.

GABARITO (1 a 9)

1) Sinal da mútua irá depender se os fluxos gerados pelos dois enrolamentos se somam ou subtraem – se mútua for negativa, os fluxos se subtraem. Se nula, os enrolamentos não estão magneticamente acoplados.

2) a) sugestão: parta de $N\phi = Li$ e $Ni = R\phi$ b) Quando se somam as indutâncias em série, assume-se que não haja mútuas. Isso não é verdade nesse caso.

3) $L1 = 0,354$ H, $L2 = 70,72$ H, $M = 5$ H, $N2 = 283$ esp.

4) sugestão: escreva a eficiência em função de a , $V2$, $I1$, Pfe , $I_1^2 R_{Cu}$. Diferencie em relação à corrente.

5) a) $0,05 < i_0 < 0,08$; $0,03 < p_0 < 0,05$ b) Aumentando-se a tensão ou a frequência, aumentam-se as perdas (aumenta o ϕ no núcleo).

6) a) Regulação deve-se às perdas do cobre e ao fluxo de dispersão (parâmetros do enrolamento). Estimativa b) Fatores indutivos pioram a regulação. Para melhorar regulação, pode-se mexer nos aspectos construtivos do item “a” ou corrigir o fator de potência da carga.

7)(completar tabela!)

a)

b) $\eta = 93,2\%$, $R = 3\%$

c)

8) a) ref. à alta: $r_{cc} = 1\Omega$, $x_{cc} = 1\Omega$ b) ref. à baixa: $R_{PB} = 90,7\Omega$, $X_{mag} = 28,6\Omega$ d) $\eta = 96\%$, $R = 2,1\%$ e) $\eta = 96\%$, $R = 0,7\%$

9) a) $P_{Fe} = P_{Cu} = 100$ W b) $\eta = 91\%$, $R = 9,5\%$ c) Perdas no ferro, potência absorvida em vazio e corrente absorvida em vazio aumentam.

10-O primário de um transformador tem 200 espiras e é alimentado por uma fonte de 60Hz, 220V. Qual o máximo valor de fluxo no núcleo? (resp: 4.13mWb)

11- Um transformador possui um primário com 480 espiras e consome em vazio 80 W e absorve corrente igual a 1.4 A, quando alimentado por uma tensão de 120V em 60Hz. Se a resistência do enrolamento primário é igual a 0.25Ω , determine:

- perda no núcleo (79.5W)
- fator de potência em vazio (0.476)
- o máximo fluxo no núcleo (0.94 mWb)
- a resistência associada às perdas magnéticas (R_p) e a reatância de magnetização (X_m)
($R_p = 180\Omega$ e $X_m = 97.5\Omega$)

Para os itens c) e d) não considere quedas na resistência primária e na reatância de dispersão primária.

12- Os parâmetros do circuito equivalente de um transformador de 150 kVA, 2400V/240V são os seguintes: $r_1 = r_2 = 0.2\Omega$; $x_1 = x_2 = 0.45\Omega$; $R_p = 10k\Omega$ e $X_m = 1.55k\Omega$ (valores já referidos ao lado de alta tensão). O secundário do transformador está conectado a uma carga nominal, cujo fator de potência é 0.8 indutivo. Determine nesta condição:

- a regulação da tensão (2.3%)
- o rendimento (98.2%)

13- Repita o problema anterior com o circuito equivalente simplificado (a fluxo constante).

- regulação da tensão (2.2%)
- o rendimento (98.2%)
- analise os dois resultados obtidos.
- altere o valor do fator de potência e a natureza do fator de potência (resistivo e capacitivo), mas mantenha a condição de carga nominal (tensão nominal e corrente nominal). Analise os resultados obtidos. Houve aumento/diminuição da perda no ferro? Houve aumento/diminuição da perda no cobre? A regulação se altera?

14- Os resultados dos ensaios de vazio e em curto de um transformador de 25 kVA, 440/220V, 60Hz são sintetizados na tabela abaixo:

Ensaio	Lado de Alimentação	Tensão(V)	Corrente (A)	Potência(W)
Vazio	Baixa	220	9.6	710
Curto-circuito	Alta	42	57	1030

Determine os parâmetros do circuito equivalente referido ao lado de 440V.



($r_1 = r'_2 = 0.158\Omega$; $x_1 = x_2 = 0.333\Omega$; $R_p = 270\Omega$ e $X_m = 97\Omega$)

(10 a 15: Exercícios retirados de Electric Machines and Drives;. Gordon R. Slemon; Editora Addison-Wesley)

15. Um transformador ideal tem 200 espiras no enrolamento primário e 500 espiras no secundário. Conectou-se o primário a uma fonte senoidal de 230 V (eficazes) e uma carga ligada ao secundário absorve 10 kVA.

- a- Determine os valores da tensão e da corrente no primário [575 V 17.39A 43.48 A]
- b- Determine o módulo da impedância conectada ao secundário [5.29 Ω]

16. Um Transformador ideal possui os seguintes dados nominais 5 kVA, 60Hz, 440:110V. Ao se conectar o lado de alta tensão a uma fonte de 460 V (eficazes), circula neste enrolamento uma corrente igual à 10 A, com fator de potência 0.9 (indutivo). Determine a impedância complexa conectada ao secundário. [2.88 | 25.84° Ω]

17. Um transformador de distribuição possui os seguintes dados nominais 20 kVA, 4600:230V, 60Hz. Em vazio suas perdas na tensão nominal são iguais a 280 W. A resistência do enrolamento de alta tensão é igual a 10.3 Ω e a resistência do enrolamento de baixa tensão é igual a 0.024 Ω . O transformador é imerso em óleo em um tanque. Pode-se retirar calor por convecção de ar sobre o tanque numa taxa de 25 W/m² de superfície e por °C de diferença entre a temperatura do tanque e do ar. Supondo que a temperatura do tanque não exceda 100°C e o que a máxima temperatura do ar é 40 °C, estime a área da superfície do tanque. Para isto admita correntes nominais em ambos os enrolamentos. [0.44 m²]

18. Um transformador monofásico possui os seguintes dados nominais: 1.5kVA, 220:110 V, 60Hz. Ele foi submetido aos seguintes ensaios:

Ensaio	Lado de Alimentação	Tensão	Corrente	Potência
Vazio	Baixa	110 V	0.4 A	25 W
Curto	Alta	16.5 V	6.8 A	40W

Desenhe um circuito equivalente referido à alta tensão e determine os parâmetros deste circuito. [0.4325 Ω 0.4325 Ω 1.135 Ω 1.135 Ω 1337 Ω 1936 Ω]

19. Uma instalação industrial consiste de uma carga puramente resistiva de 150 kW e um motor de indução que absorve 200 kVA sob fator de potência 0.85 (indutivo). Qual a mínima potência nominal (em kVA) que deve ser especificada para um transformador que vai suprir estas duas cargas? [337 kVA]

20. Um transformador monofásico possui os seguintes dados nominais: 20kVA, 4600:230 V, 60Hz. Ele foi submetido aos seguintes ensaios:

Ensaio	Lado de Alimentação	Tensão	Corrente	Potência
Vazio	Baixa	230 V	3.5 A	152 W
Curto	Alta	225 V	4.35A	360W

a- determine os parâmetros deste transformador referidos ao lado da baixa tensão.

[348 Ω 67 Ω 19.02 Ω 19.02 Ω 48.1 Ω 48.1 Ω]

b- Qual a regulação deste transformador, quando ele alimenta, através de seu enrolamento de baixa tensão, uma carga de potência nominal sob tensão nominal e fator de potência 0.85 (atrasado) [4.2 %]