

Ensaaios em Vazio e de Curto-Circuito de Transformadores Monofásicos e Determinação da sua Curva Característica Normal de Magnetização

João Francisco Ferreira Lucindo, 71324, Hugo Henrique Rodrigues de Oliveira, 71327
ELT 341 – Máquinas Elétricas I
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG
E-mail: joao.lucindo@ufv.br , hugo.rodrigues@ufv.br

1. Introdução

O conhecimento dos parâmetros do circuito equivalente de um transformador, ou seja, a resistência do enrolamento primário (r_1) e a resistência do enrolamento secundário (r_2), representativas das perdas no cobre, a reatância de dispersão do primário (X_{L1}) e a reatância do enrolamento secundário (X_{L2}), devidas aos fluxos de dispersão nos enrolamentos, a reatância de magnetização (X_m), devida ao fluxo mútuo de magnetização no circuito magnético e a resistência representativa das perdas no núcleo (R_p), perdas por correntes parasitas e/ou correntes de Foucault e perdas por histerese, são fundamentais para analisar o desempenho do transformador sob todas as condições de carga. A reatância de magnetização depende das características magnéticas do núcleo, que sob condições de saturação distorce a forma de onda da corrente de magnetização, tornando a mesma não senoidal. A forma de onda da corrente de perdas no núcleo também é distorcida. Portanto, mesmo que um transformador esteja operando em vazio, o mesmo absorve uma corrente da rede de alimentação para gerar o fluxo magnético no

núcleo e suprir as perdas no ferro, denominada de corrente de excitação.

Quando se conhece os detalhes de projeto do transformador, as resistências podem ser determinadas a partir da resistividade do cobre, do comprimento total do enrolamento e da área da seção transversal do condutor e a reatância de magnetização a partir do número de espiras, da relutância do circuito magnético e da frequência de operação. O cálculo das reatâncias de dispersão é um pouco mais complicado, pois envolve a consideração dos enlaces parciais de fluxo. Entretanto existem fórmulas disponíveis para se fazer um cálculo confiável destas grandezas.

Uma forma mais direta e fácil de se determinar os parâmetros do transformador é por meio de ensaios que envolvem muito pouco consumo de energia, chamados de testes em vazio e de curto-circuito. [1]

2. Ensaio em Vazio

O teste em vazio é feito aplicando tensão nominal em um dos enrolamentos primário ou secundário e deixando o outro lado em aberto. Em qualquer um dos casos o resultado é o mesmo, pois, o fluxo mútuo, do qual depende as perdas no núcleo, é o mesmo de ambos os lados. Geralmente, a tensão é aplicada no lado do enrolamento de menor tensão por comodidade

de ensaio. Este ensaio é realizado conforme a Figura 1.

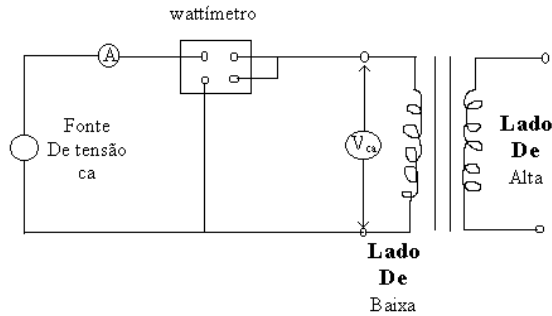


Figura 1 – Circuito para determinação das perdas no ferro

No teste em vazio, a corrente que circula pelo enrolamento da baixa tensão é pequena. Dessa forma a queda de tensão na impedância do enrolamento é considerada desprezível e a tensão aplicada é própria tensão sobre o circuito magnético. Por outro lado, como a corrente é baixa, as perdas Joule na resistência do enrolamento é desprezada e a potência medida pelo wattímetro corresponde às perdas no núcleo.

As leituras dos instrumentos de medidas são:

$$\text{leitura do wattímetro} = P_o$$

$$\text{leitura do voltímetro} = V_o$$

$$\text{leitura do amperímetro} = I_o$$

A partir desses dados calcula os parâmetros do circuito magnético, ou seja, a resistência e a reatância de magnetização, respectivamente, devidas às perdas no núcleo e o fluxo magnético como a seguir:

$$\theta_o = \arccos(P_o/V_o I_o) \quad (1)$$

$$I_\phi = I_o \cdot \sin(\theta_o) \quad (2)$$

$$I_P = I_o \cdot \cos(\theta_o) \quad (3)$$

$$R_P = P_o / (I_P)^2 \quad (4)$$

$$X_m = V_o / I_\phi \quad (5)$$

Onde,

I_ϕ - corrente no ramo de X_m ;

I_P - corrente no ramo de R_P ;

R_P - resistência devida às perdas no ferro do lado da baixa tensão;

X_m - reatância devida ao fluxo de magnetização do lado da baixa tensão;

Para o lado da alta tensão fica:

$$R_P(\text{alta tensão}) = \alpha^2 R_P;$$

$$X_m(\text{alta tensão}) = \alpha^2 X_m;$$

2.1. Objetivos do Ensaio em Vazio

- Determinar as perdas no ferro (núcleo), que são fixas para qualquer condição de carga do transformador;
- Obter a relação de transformação do transformador;
- Determinar o fator de potência em vazio do transformador;
- Deste ensaio também pode ser obtida a forma de onda da corrente em vazio do transformador e através da análise de Fourier determinar os harmônicos presentes;
- Obter os parâmetros do ramo magnetizante (R_m , X_m e Z_m);

3. Ensaio de Curto-Circuito

O ensaio de Curto Circuito é feito através da aplicação de uma tensão variável no enrolamento de maior tensão até circular a sua corrente nominal, deixando o outro enrolamento em curto-circuito. O lado de menor tensão é curto-circuitado porque a tensão é menor e a corrente é maior. Como o transformador está curto-circuitado, uma pequena tensão (em torno de 5% a 10% da tensão nominal do enrolamento) é suficiente para fazer circular a corrente

nominal no enrolamento, as perdas no núcleo (ferro) e a corrente de magnetização são consideradas desprezíveis. Neste caso, o circuito fica resumido apenas em relação à impedância representativa das bobinas agregadas. As perdas no ferro são proporcionais ao quadrado da densidade de fluxo (B), que é proporcional à tensão aplicada, podendo ser desprezada. O ensaio é realizado conforme a Figura 2.

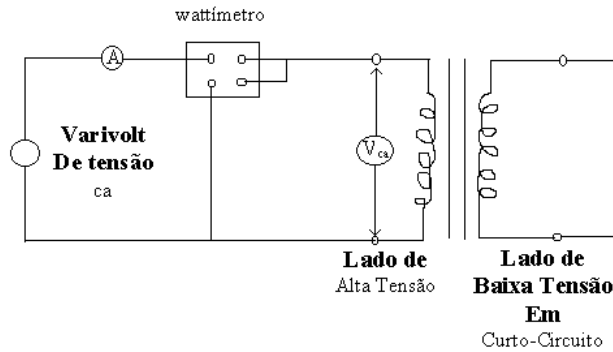


Figura 2 – Circuito para determinação das perdas Joule (perdas no cobre)

As leituras dos instrumentos de medidas são:

$$\text{leitura do wattímetro} = P_{cc}$$

$$\text{leitura do voltímetro} = V_{cc}$$

$$\text{leitura do amperímetro} = I_{cc}$$

A partir desses dados são calculados os parâmetros devidos aos fluxos de dispersão dos lados primário e secundário; reatância X_{L1} e X_{L2} , respectivamente., como a seguir.

$$R_{e1} = P_{cc} / (I_{cc})^2 \quad (6)$$

$$Z_{e1} = V_{cc} / I_{cc}; \quad (7)$$

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} \quad (8)$$

Onde,

R_{e1} – resistência equivalente do lado da alta tensão;

X_{e1} – reatância equivalente do lado da alta tensão;

Z_{e1} – impedância equivalente do lado da alta tensão;

Para o lado da baixa tensão, temos:

$$R_{e2}(\text{baixa tensão}) = R_{e1} / \alpha^2;$$

$$X_{e2}(\text{baixa tensão}) = X_{e1} / \alpha^2;$$

$$Z_{e2}(\text{baixa tensão}) = Z_{e1} / \alpha^2;$$

α - relação de transformação do transformador;

É importante observar que este cálculo fornece a soma da reatância de dispersão do primário e do secundário. Ele não fornece informação sobre os valores individuais de X_{L1} e X_{L2} . Sempre que o circuito equivalente aproximado for usado na análise, essa informação será desnecessária. Nas poucas ocasiões em que essa informação é necessária, é costume supor-se que $X_{L1} = X'_{L2} = X_{e1}/2$, referidos a um único lado do transformador, onde, X'_{L2} é a reatância do lado em curto circuito referida ao lado da tensão aplicada. Também, embora seja mais preciso o cálculo das resistências dos enrolamentos pela aplicação da tensão cc, como descrito anteriormente, do ensaio em curto-circuito, pode-se obter um valor aproximado dessas resistências, a semelhança das reatâncias de dispersão, sendo $r_1 = r'_2 = R_{e1}/2$.

3.1 Objetivos do Ensaio de Curto-Circuito

- Determinar os parâmetros r_1, r_2, X_{L1} , e X_{L2} ;
- Queda de tensão interna $\Delta V = Z_{e1} I_{cc}$ (9)
- Perdas no cobre P_{cc} ;

4. Material Utilizado

- 2 transformadores monofásicos, 1 KVA, 110/110 V, 60 Hz;
- 2 varivolts;
- 2 wattímetros monofásicos;
- 4 Multímetros;
- Duas fontes de corrente contínua;
- Fios de ligação;
- Um osciloscópio digital com dois canais para registrar a forma de onda da corrente e da tensão do ensaio em vazio do transformador;

5. Desenvolvimento

- Montar os protótipos dos testes, um de cada vez, conforme as figuras 01, 02 e 03;
- Energizar o circuito, após conferir bem as ligações;
- Fazer as leituras dos instrumentos;

a) Parâmetros Nominais

Leu-se na placa do transformado a potência nominal de 1KVA com a relação de tensão de 110V/110V, o que nos leva a concluir que a relação entre as espiras do transformador analisado $\alpha=1$. Ou seja, esse transformador apresenta o mesmo número de espiras em ambos os lados. Com esses dados, obteve-se a corrente nominal:

$$I_{nominal} = \frac{P_0}{V_0} = \frac{1000}{110} \cong 9,09 A$$

b) Ensaio em vazio.

Montou-se o circuito da Figura 2. Aplicou-se a tensão nominal em um dos lados do transformador, e com isso obteve-se as leituras conforme a Tabela 1:

Equipamento	Leitura	Unidade
<i>Wattímetro</i>	$P_o = 20$	W
<i>Amperímetro</i>	$I_o = 1,32$	A
<i>Voltímetro</i>	$V_o = 109,4$	V

Com esses dados pode-se calcular o ângulo da impedância que é dado pela Equação 1. Assim, $\theta_o=82,04^\circ$. Utilizando as Equações 2 e 3, pode-se calcular corrente no ramo de X_m e a corrente no ramo de R_p . Assim, $I_p=0,18 A$ e $I_\phi=1,31 A$. Com esses dados, utilizando as equações 4 e 5 foi possível determinar X_m e R_p . Os dados obtidos foram organizados na Tabela 2.

Parâmetro	Valor Calculado	Unidade
I_p	0,18	A
I_ϕ	1,31	A
X_m	83,51	Ω
R_p	598,54	Ω

Como a relação entre o número de espiras é unitária, os parâmetros calculados são iguais para ambos os lados do transformador. Nota-se também, como já foi explicado anteriormente, que as perdas no ferro é de 20W. Além disso percebe-se que o fator de potência para o ensaio em vazio é dado por $f.p=\cos(\theta_o)=\cos(82,04^\circ)=0.1384$ atrasado.

c) Ensaio em curto-circuito

Montou-se o circuito da Figura 3 e aplicou-se uma tensão de entrada até obter a corrente nominal. Com isso mediu-se os parâmetros pelos multímetros e

wattímetro, os dados obtidos foram organizados na Tabela 3.

Equipamento	Leitura	Unidade
Wattímetro	$P_{cc} = 60$ (Perda no cobre)	W
Amperímetro	$I_{cc} = 6,67$	A
Voltímetro	$V_{cc} = 14,3$	V

Com esses dados, e utilizando as relações apresentadas nas Equações 6,7 e 8 foi possível obter os parâmetros R_{el} , X_{el} e Z_{el} . X_{L1} , X_{L2} , R_{L1} , R_{L2} que foram obtidos conforme já foi explicado anteriormente. Os resultados calculados foram organizados na Tabela 4.

Parâmetro	Valor Calculado	Unidade
R_{el}	1,35	Ω
X_{el}	1,67	Ω
Z_{el}	2,14	Ω
X_{L1}	0,835	Ω
X_{L2}	0,835	Ω
R_{L1}	0,675	Ω
R_{L2}	0,675	Ω

Note que a queda de tensão, dada pela equação 9 é de 14,27 V. Assim, como o ensaio em curto circuito e circuito aberto obteve-se todos os parâmetros do circuito equivalente de um transformador monofásico.

Finalmente com o circuito equivalente completo, pode-se traçar a a curva normal de magnetização do transformador, isto é, $E_1 = f(I_m)$. Para tal,

variou-se a tensão de entrada gradativamente e monitorou-se a tensão e a corrente de entrada com multímetros e obteve-se os seguintes valores, apresentados na Tabela 5.

V_o (V)	I_o (A)
10,2	0,01
20,2	0,03
29,2	0,05
40,2	0,07
50,2	0,09
60,7	0,13
70	0,17
80	0,25
90,4	0,47
99,9	0,83
110,8	1,39
120,4	1,98
130,3	2,72
139,8	3,55

Tem-se que $I_m = I_\phi - E_1^2/R_p$, e $I_\phi = I_0$ e $E_1 = V_0 - z_1 I_0$ onde $z_1 = 0,675 - j0,835$. Então a curva $I_m \times E_1$ é apresentada na Figura 3.

6. Conclusão

Com o presente trabalho foi possível compreender como determinar todos os parâmetros do circuito equivalente de um transformador monofásico, bem como determinar as perdas no cobre o no ferro. Bem como notar a saturação da curva de magnetização

normal do transformador, evidenciando assim a sua limitação.

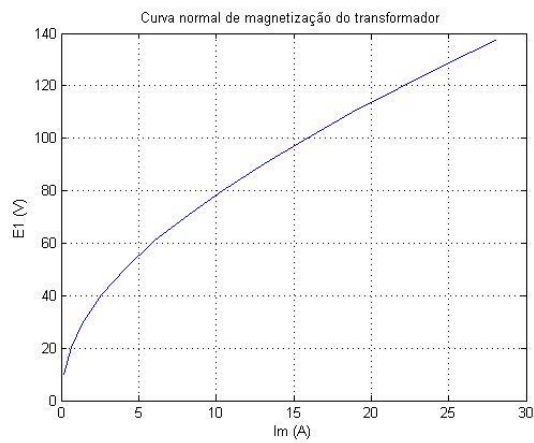


Figura 3. Curva de magnetização normal do transformador

7. Referencia Bibliográfica

[1] Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr, C.; Kusko, A. - Máquinas Elétricas- Mc Graw Hill do Brasil,. 1975.