

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Generalidades

Transformadores são máquinas elétricas muitíssimo importantes, que podem ser usadas para transformar valores de tensões ou correntes variáveis, para casar impedâncias e para isolar partes de um circuito elétrico.

Em Eletrotécnica os transformadores são projetados para operar com tensões e correntes senoidais relativamente grandes; em Eletrônica, os transformadores lidam com formas de onda complexas de frequências diversas, geralmente em potências baixas. Os transformadores são máquinas de grande eficiência, e os de grandes potências apresentam comumente 99% de rendimento.

Seu funcionamento é baseado no fenômeno da indução mútua. Um transformador é constituído no mínimo por duas bobinas, dispostas de tal modo que uma delas fica submetida a qualquer campo magnético produzido na outra. Estas bobinas geralmente estão enroladas em um mesmo núcleo de ferro, que é o **NÚCLEO DO TRANSFORMADOR**. As duas bobinas constituem os enrolamentos **PRIMÁRIO** e **SECUNDÁRIO** do transformador; o enrolamento primário é aquele no qual é produzido

um campo magnético variável, para que apareça uma força eletromotriz induzida na outra bobina ou enrolamento secundário.

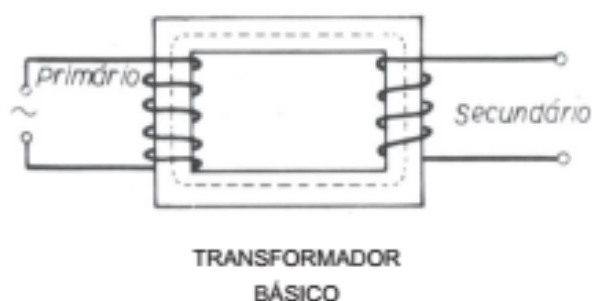


FIG. XXVI-1

O Transformador Ideal

De acordo com o que já estudamos, um transformador apresenta perdas resultantes da resistência oferecida pelos condutores de cobre (**PERDAS NO COBRE** ou **PERDAS POR EFEITO JOULE**) e também em virtude das correntes de Foucault e da histerese (**PERDAS NO NÚCLEO** ou **PERDAS NO FERRO**).

Além disto, deve ser considerado num transformador o fato de que nem todo o fluxo produzido no primário é aproveitado pelo secundário.

Entretanto, para facilitar a compreensão do funcionamento e do cálculo

de um transformador, consideraremos inicialmente um TRANSFORMADOR IDEAL, ou seja, um transformador sem perdas e com coeficiente de acoplamento 100%.

A tensão média de auto-indução no primário de um transformador é igual a

$$E_{\text{média}} = -N_p \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

Ora, num transformador ideal não haveria no primário outra dificuldade além da sua reatância indutiva, e, portanto, esta mesma equação exprime, numericamente, o valor da tensão aplicada ao primário (E_p). No transformador real há, evidentemente, outros parâmetros a serem considerados, mas tudo se faz para que a tensão aplicada ao primário seja praticamente igual à força contra-eletromotriz no mesmo.

Um transformador pode funcionar ligado a uma fonte de C.C. desde que a intensidade da corrente no primário seja variável. Como exemplo, pode-se citar a bobina de ignição do sistema elétrico de um automóvel.

Geralmente, porém, um transformador é calculado para trabalhar com C.A. Assim, podemos dizer que, para um quarto de ciclo da tensão senoidal aplicada ao primário, o valor médio da tensão de auto-indução no primário é

$$\begin{aligned} E_{\text{média}} &= E_p = N_p \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \\ &= N_p \frac{\phi_{\text{max}}}{\frac{1}{4f}} = 4fN_p \phi_{\text{max}} \end{aligned}$$

O valor máximo da tensão é:

$$\begin{aligned} E_{p(\text{máxima})} &= E_p = N_p \frac{\Delta \phi}{0,636} = \\ &= 6,28fN_p \phi_{\text{max}} \end{aligned}$$

O valor eficaz da tensão é:

$$E_p (\text{eficaz}) = 0,707 \times 6,28 N_p \phi_{\text{max}}$$

$$E_p (\text{eficaz}) = 4,44 f N_p \phi_{\text{max}}$$

Esta equação é conhecida como a EQUAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR ou a EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DE UM TRANSFORMADOR.

E_p = valor eficaz da tensão aplicada ao primário do transformador, em VOLTS (V)

f = frequência da tensão aplicada ao primário do transformador, em HERTZ (Hz)

N_p = número de espiras do primário do transformador.

ϕ_{max} = fluxo máximo produzido no primário do transformador, em WEBERS (Wb).

Da equação acima conclui-se que

$$N_p = \frac{E_p}{4,44f\phi_{\text{max}}}$$

O valor de E_p , como já sabemos, é o valor da tensão da rede na qual iremos ligar o transformador. Quanto ao valor de ϕ_{max} , só depende da qualidade magnética do material usado para constituir o núcleo do transformador. Os fabricantes de chapas para núcleos de transformadores prestam informações sobre o máximo de densidade de fluxo magnético que pode ser obtido com o material que produzem. Ora, quem conhece o valor da densidade de fluxo conhece o fluxo magnético. Mas, qual a seção do núcleo? Este é um elemento de cálculo que depende da potência para a qual o transformador é projetado, e seu valor obedece a recomendações de ordem prática, fruto da experiência ad-

quirida pelo homem. Outros caminhos poderiam ser sugeridos para o cálculo de um transformador, pois se trata de um circuito magnético, mas esta é uma orientação adotada na prática.

Como estamos raciocinando com um transformador ideal, é fácil concluir que o valor eficaz da tensão induzida no secundário é

$$E_s \text{ (eficaz)} = 4,44 f N_s \phi_{\max}$$

ϕ_{\max} = o fluxo produzido no primário, em WEBERS (Wb)

N_s = número de espiras do secundário do transformador.

f = frequência da tensão aplicada ao primário, em HERTZ (Hz)

E_s = valor eficaz da tensão induzida no secundário do transformador, em VOLTS (V).

A expressão em questão mostra-nos que é possível fazer TRANSFORMADORES REDUTORES e ELEVAADORES DE TENSÃO; tudo depende da relação entre o número de espiras do primário e o número de espiras do secundário. Com efeito, dividindo E_p por E_s temos:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{4,44f N_p \phi_{\max}}{4,44f N_s \phi_{\max}} = \frac{N_p}{N_s}$$

Como o nosso transformador é ideal, a potência do secundário é igual à do primário:

$$S_p = S_s$$

$$E_p I_p = E_s I_s$$

donde

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Concluimos então que

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = a$$

Estas razões são chamadas **RELAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO** e são designadas comumente pela letra a .

Impedância Refletida

Qualquer variação na impedância ligada ao secundário de um transformador implica na variação da corrente no seu enrolamento primário. Se a impedância do secundário aumenta, diminui a corrente que ele fornece, e é menor a energia solicitada do secundário em cada segundo. Mas, o secundário não cria energia, e toda energia que ele fornece é transferida do primário. Como a tensão no primário é constante, a corrente no primário cai na mesma razão que a do secundário, como se deduz da equação

$$S_p = S_s$$

Se fosse diminuída a impedância ligada ao secundário, a corrente neste enrolamento seria maior, o que implicaria em maior corrente no primário.

Vê-se, portanto, que qualquer alteração na impedância do secundário afeta a do primário, e, em face disto, fala-se de **IMPEDÂNCIA REFLETIDA**. Para estabelecermos uma relação entre as impedâncias em apreço, sigamos o seguinte raciocínio:

Sabemos que

$$Z_p = \frac{E_p}{I_p}$$

e que

$$E_p = \frac{N_p E_s}{N_s} = a E_s$$

Mas,

$$I_p = \frac{N_s I_s}{N_p} = \frac{I_s}{a}$$

donde

$$Z_p = a^2 \frac{E_s}{I_s}$$

ou

$$Z_p = a^2 Z_s$$

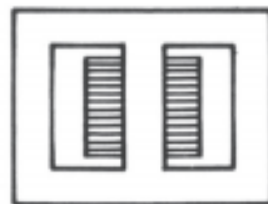
Em um bom transformador a impedância do secundário pode ser considerada igual à da carga ligada aos seus terminais. Da mesma forma, pode-se considerar, na prática, que só há corrente no primário quando há no secundário (a corrente no primário, com o secundário sem carga, é aproximadamente 5% da corrente que existe quando o secundário está com carga total), e assim Z_p seria a impedância do secundário, COMO É “VISTA” PELA FON-

TE QUE ALIMENTA O PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR. Com um transformador, uma impedância de um certo valor ligada ao secundário pode ser “VISTA” pela fonte que alimenta o primário com qualquer valor desejado (considerados apenas os termos da expressão).

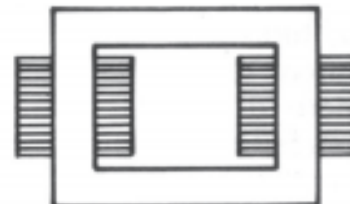
Graças a este conhecimento é possível fazer o que se chama de CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS, recurso muito usado em Eletrônica, como por exemplo no transformador de saída de um receptor de rádio, em que um alto-falante de 4 ohms de impedância ligado ao secundário pode ser “visto” pela válvula de saída ligada ao primário (a válvula funciona como fonte ligada ao primário) como uma impedância de 5.000 ohms!

Formas do Núcleo

Há dois tipos gerais de núcleos para transformadores: NÚCLEO ENVOLVENTE e NÚCLEO ENVOLVIDO:



NÚCLEO
ENVOLVENTE



NÚCLEO
ENVOLVIDO

FIG. XXVI-2

Os núcleos são constituídos por lâminas sobrepostas, isoladas umas das outras, com o objetivo de reduzir as perdas causadas pelas correntes de Foucault. As lâminas de “ferro para transformador” são vendidas geralmente em tamanhos e formas padronizadas.

Secundários de um Transformador

Um transformador pode ter um ou vários secundários. Como foi visto, o secundário de um transformador pode

proporcionar tensão maior (TRANSFORMADOR ELEVADOR) ou menor (TRANSFORMADOR ABAIXADOR) que a do primário. Pode também apresentar a mesma tensão do primário, transferindo apenas energia de um circuito para outro, sem ligação elétrica entre eles.

O mesmo transformador pode apresentar enrolamentos secundários abaixadores e elevadores, como, por exemplo, os transformadores utilizados

na fonte de alimentação de receptores de rádio.

Especificações dos Transformadores

Os transformadores são especificados geralmente em termos de tensões do primário e do secundário, frequência e potência aparente do secundário. Faz-se também referência à potência aparente e à corrente solicitada do primário. Essas especificações são estabelecidas

com base na elevação de temperatura interna, resultante das perdas no cobre e no núcleo, e não devem ser excedidas em funcionamento contínuo.

Circuito Equivalente de um Transformador

Um transformador com núcleo de ferro pode ser representado pelo circuito equivalente abaixo:

I_e = corrente de excitação que

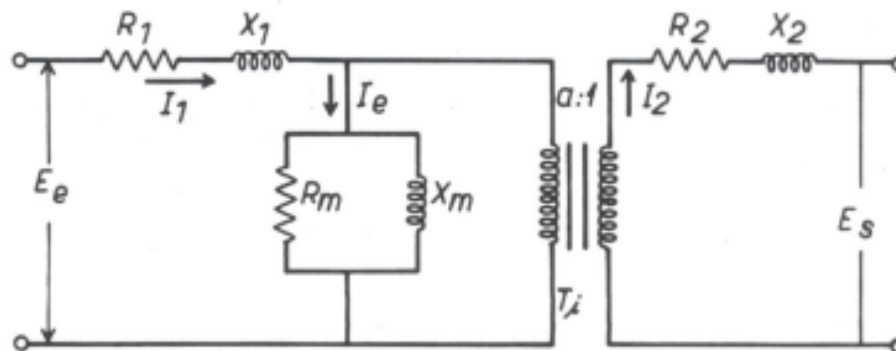


FIG. XXVI-3

depende da tensão aplicada e da frequência. É relativamente independente da corrente de carga e, com carga total, representa uma pequena fração de I_1 .

T_i = representa um transformador ideal, com relação de espiras.

$$\frac{N_1}{N_2} = a$$

R_m = simboliza as perdas no ferro (correntes de Foucault e histerese).

R_1 = representa a perda no cobre do enrolamento primário.

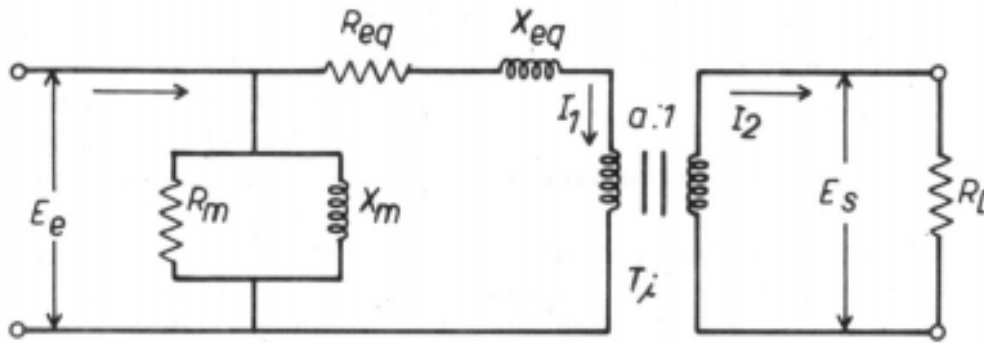
R_2 = perda no cobre do enrolamento secundário.

X_1 = reatância de perda do primário.

X_2 = reatância de perda do secundário. X_1 e X_2 representam as perdas de fluxo nos dois enrolamentos. Estas perdas não constituem um consumo de energia, mas reduzem a tensão de saída do transformador, e essa redução é proporcional à corrente no transformador.

X_m = reatância de magnetização do transformador; o fluxo é criado pela componente de corrente através de X_m .

Como os parâmetros em apreço têm valores que dependem de circunstâncias diversas, é geralmente possível representar o circuito equivalente de modo mais simples, com pequena margem de erro, com a vantagem de permitir a análise independente das perdas no ferro e no cobre:



Circuito Equivalente Simplificado

FIG. XXVI-4

R_{eq} = resistência equivalente (perdas no cobre)

X_{eq} = reatância de perda equivalente.

Partindo da relação

$$\begin{aligned} Z &= a^2 Z_s \\ R_{eq}^p &= R_1 + a^2 R_2 \\ X_{eq} &= X_1 + a^2 X_2 \end{aligned}$$

Eficiência de um Transformador

É a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. A eficiência (ou rendimento) de um transformador é normalmente determinada com carga total e fator de potência unitário, e dada em percentagem.

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_e - P_{perdas}}{P_e}$$

P_{perdas} = corresponde às perdas no ferro e no cobre. As perdas no ferro são constantes, para tensão de entrada e frequência constantes; as perdas no cobre variam de acordo com a carga.

Regulação de um Transformador

É dada pela relação

$$\frac{E_s \text{ (sem carga)} - E_s \text{ (com carga total)}}{E_s \text{ com carga total}}$$

E_s com carga total

E_s = tensão no secundário.

Na medição das tensões em apreço a tensão do primário deve ser mantida constante. A regulação é expressa em percentagem, e quanto menor o seu valor melhor a regulação de tensão do transformador

Testes em Circuito Aberto e em Curto-Circuito

Com estes testes ficamos habilitados a determinar a eficiência e a regulação de tensão de um transformador, com grande precisão.

No teste com circuito aberto (secundário aberto), o primário do transformador é ligado a uma fonte com a tensão e a frequência nominais do transformador. A razão

$$\frac{E_p}{E_s}$$

obtida com as indicações de dois voltímetros ligados respectivamente aos terminais do primário e do secundário, dá a razão entre o número de espiras do primário e do secundário.

Um amperímetro ligado no primário indica a corrente sem carga dando ao mesmo tempo uma idéia da qualidade magnética do núcleo. Esta corrente representa comumente menos de 5% da corrente com carga total, de modo que a perda $I^2 R$ sem carga é menor do que $1/400$ da perda $I^2 R$ no primário com carga total, e é desprezível, comparada com a perda no núcleo. Em face do exposto, um wattímetro colocado no primário indica a perda no núcleo do transformador.

No outro teste, o secundário é posto em curto por meio de um amperímetro adequado. Uma fonte de tensão ajustável é aplicada ao primário e seu valor, dentro das possibilidades, deve fazer circular nos enrolamentos primário e secundário correntes de valores correspondentes às que existem com carga completa. A tensão em apreço deve ser de valor BAIXO. Neste teste, a perda do cobre dos enrolamentos é a mesma do caso anterior, porém a perda no núcleo é muitíssimo menor, praticamente desprezível, pois a tensão aplicada é aproximadamente 25 vezes menor do que a tensão nominal. Um wattímetro ligado no primário indicará a potência perdida no cobre dos enrolamentos primário e secundário.

A soma das potências determinadas nos testes em questão é a PERDA TOTAL, com carga total aplicada ao transformador. Conhecido este valor é fácil determinar o rendimento utilizando-se a equação estudada em um dos parágrafos anteriores.

Autotransformador

O autotransformador é um transformador cujo funcionamento depende do fenômeno da auto-indução e sua característica principal, no que diz respeito à sua construção, é ser constituído por um único enrolamento.

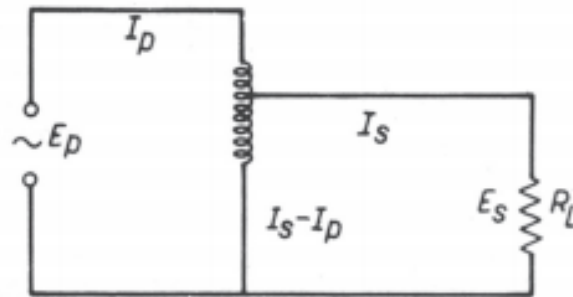


FIG. XXVI-5

Também pode ser usado para elevar ou reduzir a tensão. Sua desvantagem principal é, paradoxalmente o fato de ser constituído por um único enrolamento, pois este fator não permite diferenças muito grandes entre as tensões do primário e do secundário e exige que o isolamento da parte de baixa tensão seja igual ao da parte de alta tensão, porque estão ligadas eletricamente. Dissemos paradoxalmente porque com um enrolamento apenas gasta-se menos cobre e a parte comum do enrolamento pode ser de fio bem mais fino, pois a corrente nessa parte comum é, praticamente, a diferença entre a corrente do primário e a do secundário.

Quando o transformador é redutor de tensão os extremos do enrolamento são ligados à fonte, correspondendo ao primário; o secundário é parte do enrolamento. Quando o transformador é elevador de tensão, dá-se exatamente o contrário.

As relações de transformação estudadas para os transformadores são também aplicáveis aos autotransformadores.

EXEMPLOS:

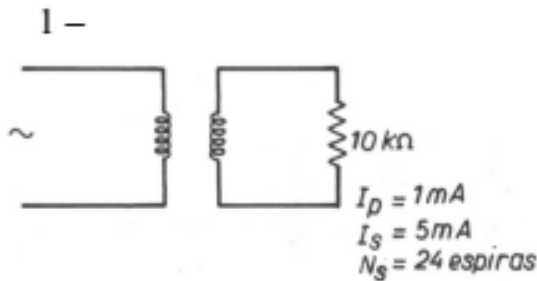


FIG. XXVI-6

Determinar o número de espiras do primário.

SOLUÇÃO:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \therefore N_p = \frac{N_s I_s}{I_p}$$

$$N_p = \frac{24 \times 5}{1} = 120 \text{ espiras}$$

2 - No transformador abaixo, determinar a impedância do circuito primário.

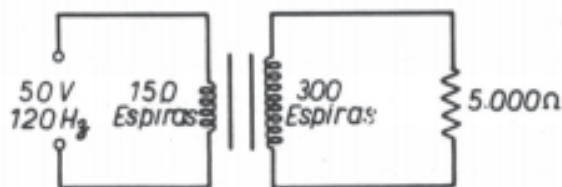


FIG. XXVI-7

SOLUÇÃO:

$$Z_p = a^2 Z_s$$

$$Z_p = \left(\frac{150}{300}\right)^2 \times 5.000 = 1.250 \Omega$$

3 - Se uma impedância de 3 ohms for ligada ao secundário de um transformador de 440/6 volts, qual será a corrente no primário?

SOLUÇÃO:

$$a = \frac{440}{6}$$

$$Z_p = a^2 Z_s = \left(\frac{440}{6}\right)^2 \times 3 = 16.133,3 \Omega \text{ aprox.}$$

$$I_p = \frac{E_p}{Z_p} = \frac{440}{16.133,3} = 0,02 \text{ A}$$

ou simplesmente,

$$I_s = \frac{6}{3} = 2 \text{ A}$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{I_s}{I_p} \therefore I_p = \frac{E_s I_s}{E_p}$$

$$I_p = \frac{6 \times 2}{440} = 0,02 \text{ A}$$

4 - Um autotransformador é usado para elevar a tensão de 13.200 para 23.000 volts. Sabendo que a potência entregue é de 46 kVA, determinar a corrente no primário, no secundário e na parte comum do enrolamento.

SOLUÇÃO:

$$I_p = \frac{46000}{13200} = 3,48 \text{ A}$$

$$I_s = \frac{46.000}{23.000} = 2 \text{ A}$$

$$\text{Na parte comum} = 3,48 - 2 = 1,48 \text{ A}$$

PROBLEMAS

TRANSFORMADORES

1 – Um transformador de áudio tem um primário com 1.200 espiras. Quantas espiras deverá ter seu secundário para que um alto-falante de 4 ohms seja “visto” como uma carga de 5.000 ohms, por uma válvula amplificadora ligada ao primário?

R.: 34 espiras

2 – O transformador de saída da Fig. XXVI-8 proporciona a impedância de carga correta a uma válvula amplificadora, quando uma carga de 8 ohms é ligada aos terminais “A” e “B” ou uma carga de 16 ohms é ligada aos terminais “A” e “C”. Qual a carga que pode ser aplicada aos terminais “B” e “C”, para apresentar a mesma impedância refletida?

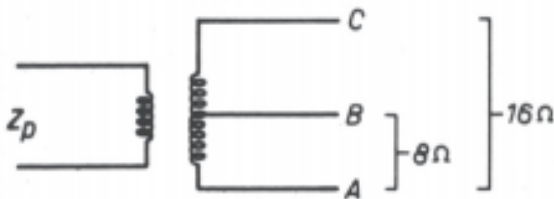
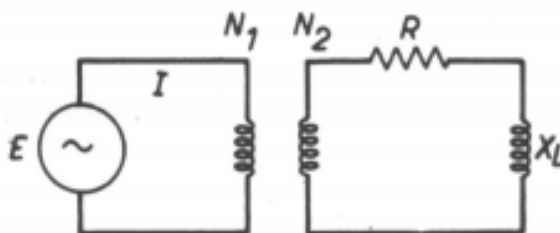


FIG. XXVI-8

R.: 1,38 ohm

3 –



$N_2 = 1000$ espiras
 $N_1 = 10000$ espiras
 $X_L = 1\Omega$
 $\epsilon = 100 \angle 0^\circ$ V
 $R = 1\Omega$

FIG. XXVI-9

Determinar as potências real, reativa e aparente fornecidas pelo gerador.

R.: 50 W; 50 Vars; 70,7 VA

4 – Escolher a razão N_1/N_2 e a reatância X_L de modo que a potência fornecida pelo gerador seja de 500W, com fator de potência unitário.

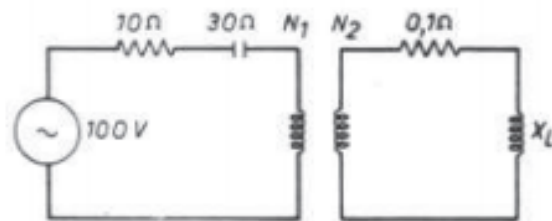


FIG. XXVI-10

R.: $a = 10$; $X_L = 0,3$ ohm

5 – Um transformador de 2.400/240 V, 500 kVA, é ligado a uma linha de 2.400 V. Considerando que o transformador é ideal, qual a grandeza da impedância de carga que fará o transformador operar em plena carga?

R.: 1,153 ohm

6 – Testes efetuados em um transformador de 880/220 V, 5 kVA, deram os resultados seguintes:

– Teste com circuito aberto (instrumentos no lado de baixa tensão):

$$P = 100 \text{ W}$$

$$E = 220 \text{ V}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

– Teste em curto-circuito (instrumentos no lado de alta tensão)

$$P = 90 \text{ W}$$

$$E = 24 \text{ V}$$

$$I = 5,68 \text{ A}$$

A fim de obter 220 V aplicados à carga, sob condições nominais, é necessário ajustar o gerador de modo que a tensão no secundário sem carga seja de 240 V.

- Calcular a resistência magnetizante (r_m), referida ao lado de maior tensão.
- Calcular a resistência total do enrolamento (r_1) referida ao lado de maior tensão.
- Sob condições normais, fator de potência unitário, determinar:
 - Eficiência.
 - Regulação de tensão.
- Qual o valor da corrente de excitação fornecida pelo gerador (gerador no lado de tensão maior)?
 R.: 7.750 ohms – 2,79 ohms – 96,4% – 9,09% – 0,25 A
 7 – Um transformador de 5 kVA, 440/220 V, é testado com os seguintes resultados:

– Teste em circuito aberto (instrumentos no lado de baixa tensão):

$$E = 220 \text{ V}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$P = 100 \text{ W}$$

– Teste em curto-circuito (instrumentos no lado de alta tensão):

$$E = 12 \text{ V}$$

$$I = 11,35 \text{ A}$$

$$P = 90 \text{ W}$$

Desenhar o circuito equivalente do transformador, com todas as quantidades referidas ao lado de alta tensão.

R.:

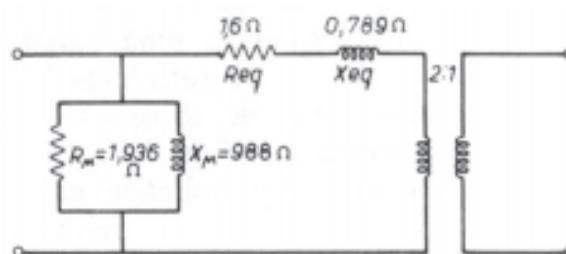


FIG. XXV-11