

# Ensaio em Vazio e de Curto-Circuito de Transformadores Trifásicos de Três Enrolamentos

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

## I. INTRODUÇÃO

O transformador trifásico é o equipamento de transformação de níveis de energia mais utilizado nos sistemas elétricos de potência, uma vez que a maior parte da geração, transmissão e distribuição de energia é na forma trifásica. Existem para tal fim o transformador de dois enrolamentos ou dois circuitos e o transformador de três enrolamentos ou três circuitos. Os de dois enrolamentos possuem as prováveis conexões: Y - Y,  $\Delta$  -  $\Delta$ , Y -  $\Delta$  e  $\Delta$  - Y. As especialidades de cada uma já foram explicadas na parte teórica. O transformador de três circuitos, geralmente, possui as conexões, primário em estrela, secundário em estrela e terciário em triângulo, sendo utilizado quando há necessidade, para uma determinada tensão de entrada, duas saídas de tensão em níveis diferentes. Os ensaios realizados nestes transformadores são os mesmos feitos no transformador monofásico.

### 1.1 Circuito Equivalente do Transformador Trifásico de dois Enrolamentos

O circuito equivalente do transformador é obtido de forma semelhante ao do transformador monofásico, sendo que os parâmetros do circuito equivalente são determinados em valores por fase. Os parâmetros deste circuito são determinados pelos ensaios a vazio e em curto. Com o ensaio em vazio determinam-se as perdas no ferro e por histerese, podendo determinar  $R_p$  e  $X_m$ . A representação do transformador a vazio é indicada na figura 01, com o ensaio realizado no lado da baixa tensão, podendo o mesmo ser realizado do outro lado.

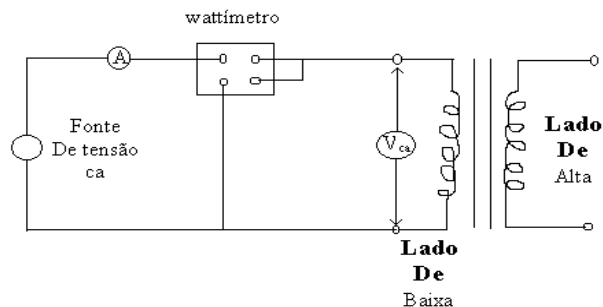


Figura 01 – Circuito Equivalente do Transformador a Vazio

Para se obter a impedância de dispersão, realiza-se o ensaio em curto-circuito. Como o caso do monofásico, o transformador introduz uma impedância série no circuito ao qual está ligado. O circuito equivalente, por fase, para este ensaio, é indicado na figura 02.

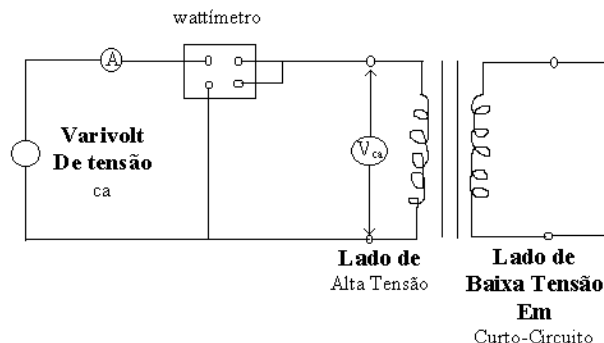


Figura 02 – Circuito Equivalente para o Transformador em Curto-Circuito

Tanto para o ensaio em vazio quanto para o ensaio de curto-circuito são utilizados os mesmos procedimentos do monofásico para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente, sendo que, neste caso, a potência medida é a trifásica, a tensão e a corrente são valores de linha, devendo ser referenciados para valores de fase. Para a ligação estrela

a tensão de fase deve ser dividida pela raiz de três da tensão de linha e na ligação em triângulo a corrente de fase que é dividida pela raiz de três, as potências para ambas as ligações devem ser divididas por três.

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 máximo, do qual depende as perdas no núcleo, é o mesmo de ambos os lados. O ensaio de Curto Circuito é feito aplicando-se gradativamente, através de um varivolt (autotransformador), uma tensão no enrolamento primário do transformador até circular a sua corrente nominal, deixando o enrolamento secundário em curto-circuito (lado da carga). Dado o curto-circuito no secundário e a baixa tensão de alimentação, 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.

No ensaio de curto – circuito a tensão aplicada, suficiente para circular a corrente nominal no enrolamento da alta tensão, é em torno de 5% da tensão nominal do transformador, podendo dessa forma desprezar as perdas no ferro

## 1.2 – Circuito Equivalente do Transformador Trifásico de Três Enrolamentos

O transformador de três circuitos normalmente tem o primário em estrela, o secundário em estrela e o terciário em triângulo, como: Y - Y - Δ. Normalmente é representado conforme indicado na figura 03.

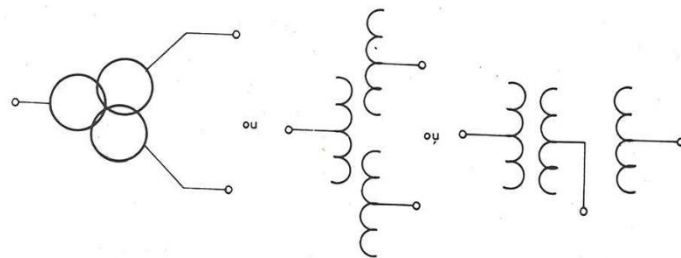


Figura 03 - Representação unifilar para Transformadores de Três Circuitos

O circuito equivalente resultante deste transformador pode ser representado conforme mostrado na figura 05, valores em percentagem ou p.u.

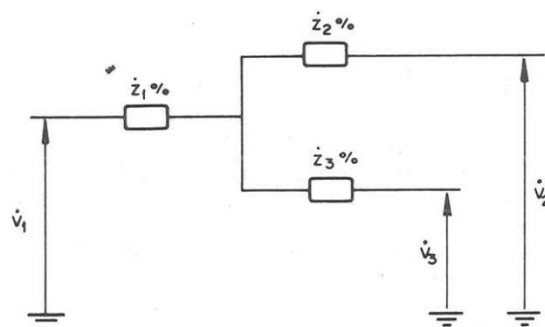


Figura 04 - Circuito Equivalente Unifilar para um Transformador de Três Circuitos

Para a determinação de  $z_1(\%)$ ,  $z_2(\%)$ , e  $z_3(\%)$ , são utilizadas as fórmulas a seguir:

$$z_1(\%) = \frac{Z_{12}(\%) + Z_{13}(\%) - Z_{23}(\%)}{2}$$

$$z_2(\%) = \frac{Z_{23}(\%) + Z_{12}(\%) - Z_{13}(\%)}{2}$$

$$z_3(\%) = \frac{Z_{13}(\%) + Z_{23}(\%) - Z_{12}(\%)}{2}$$

As impedâncias percentuais  $Z_{12}(\%)$ ,  $Z_{13}(\%)$ , e  $Z_{23}(\%)$ , são calculadas a partir do ensaio de curto-circuito como a seguir:  $Z_{12}(\%)$  – alimenta-se o primário na sua corrente nominal, curto-circuita o secundário e deixa o terciário em aberto, calculada como:

$$Z_{12} \% = \frac{Z_{12} I_{1n}}{V_{1n}} 100$$

$Z_{12}$  – impedância equivalente calculada do ensaio, referida ao primário, idêntica à calculada para o transformador de dois circuitos,  $I_{1n}$  – corrente nominal do enrolamento primário e  $V_{1n}$  – tensão nominal do enrolamento primário. Para transformadores de três circuitos as impedâncias percentuais dependem do enrolamento a que foram referidas, pois as potências dos enrolamentos são diferentes.

$Z_{13}(\%)$  – Alimenta-se o primário na sua corrente nominal, deixa o secundário em aberto e curto-circuita o terciário, o cálculo é igual a anterior.

$Z_{23}(\%)$  – Alimenta-se o secundário na sua corrente nominal, deixa o primário em aberto e curto-circuita o terciário, o cálculo é o seguinte:

$$Z_{23}(\%) = Z'_{23}(\%) \frac{S_1}{S_2}$$

$Z_{23}(\%)$  é a impedância entre os enrolamentos secundário e terciário, e referida ao primário;  $Z'_{23}(\%)$ , idem, referida ao secundário;  $S_1$  a potência aparente do primário e  $S_2$  a potência aparente do secundário;

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

- 1 autotransformador trifásico (varivolt) 220/260V, 20A;
- 1 transformador trifásico 1 KVA 110/110 V, 20 A;
- Dois transformadores monofásicos, 1 KVA, 110/110 V, 9,09 A, valores de fase;
- 1 wattímetro;
- 6 Multímetros;
- Fios de Ligação;

## 2.1 – Desenvolvimento

Ligou-se o transformador trifásico de três enrolamentos, primário em estrela, secundário em estrela e terciário em triângulo e realizou-se os ensaios.

Admitiu-se que as bobinas do transformador fossem equilibradas e realizou-se os ensaios utilizando apenas um wattímetro entre fase e neutro e então a leitura foi multiplicada por três, sendo possível medir a potência ativa, tensão de linha e a corrente de linha.

## III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro ensaio realizado foi com o primário alimentado, ligado em estrela, secundário em curto circuito, ligado em estrela e o terciário aberto. Os valores medidos de potência ativa, tensão de linha e a corrente de linha obtidos encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores medidos do ensaio 1.

Vf (v)	18,5
I (A)	3,03
P (W)	30

A partir desses valores obtém-se  $Z_{12}\%$ :

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P}{V \cdot I} = 57,64^\circ$$

$$Z_{12} = \frac{V}{I} \angle \theta = 6,11 \angle 57,64^\circ$$

$$Z_{12\%} = \frac{Z_{12} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100\% = 100,07 \angle 57,64^\circ\%$$

O segundo ensaio foi realizado ligando o transformador trifásico com o primário alimentado em estrela, o secundário aberto e o terciário ligado em estrela em curto circuito. Os valores medidos de potência ativa, tensão de linha e a corrente de linha obtidos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores medidos do ensaio 2.

Vf (v)	28,8
I (A)	3,03
P (W)	30

Utilizando o mesmo procedimento para o cálculo de  $Z_{12\%}$ , calcula-se  $Z_{13\%}$ .

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P}{V \cdot I} = 69,89^\circ$$

$$Z_{13} = \frac{V}{I} \angle \theta = 9,50 \angle 69,89^\circ$$

$$Z_{13\%} = \frac{Z_{13} \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100\% = 99,95 \angle 69,89^\circ\%$$

Finalmente, o terceiro ensaio foi realizado ligando-se a alimentação no secundário em estrela, o primário em circuito aberto e o terciário em curto circuito. Os valores medidos de potência ativa, tensão de linha e a corrente de linha obtidos encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores medidos do ensaio 3.

Vf (v)	19,8
I (A)	3,03
P (W)	30

A partir desses valores obtém-se  $Z_{23\%}$ :

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P}{V \cdot I} = 60^\circ$$

$$Z_{23} = \frac{V}{I} \angle \theta = 6,53 \angle 60^\circ$$

$$Z_{23\%} = \frac{Z_{23} \cdot I_{2N}}{V_{2N}} \cdot 100\% = 99,93 \angle 60^\circ\%$$

Deste modo, então calcula-se as impedâncias do circuito equivalente do transformador trifásico de três enrolamentos.

$$z_{1\%} = \frac{Z_{12\%} + Z_{13\%} - Z_{23\%}}{2} = 49,69 \angle 67,54^\circ$$

$$z_{2\%} = \frac{Z_{23\%} + Z_{12\%} - Z_{13\%}}{2} = 51,83 \angle 48,15^\circ$$

$$z_{3\%} = \frac{Z_{13\%} + Z_{23\%} - Z_{12\%}}{2} = 50,34 \angle 72,21^\circ$$

Como foi possível perceber que em todos os três ensaios os resultados obtidos para potência ativa, tensão de linha e a corrente de linha são muito próximos, observa-se também que os valores calculados para as impedâncias são próximos

#### IV. CONCLUSÃO

Através dos ensaios realizados na prática foi possível observar que o transformador trifásico a três enrolamentos apresenta um rendimento maior quando comparado ao transformador monofásico, devido ao compartilhamento do entreferro, o que diminui as perdas. É importante lembrar também que o transformador trifásico é cerca de 15% mais barato do que o monofásico devido a economia de material

na sua construção.

É evidente também que o transformador trifásico ocupa menos espaço e é mais leve, o que é de grande importância nos postos de transformação de baixa potência.

Também há desvantagens, pois caso um banco de transformador monofásico apresente problema em somente um transformador é possível fazer a manutenção sem que interrompa a distribuição de energia, agora com transformadores trifásicos, se houver falha é necessário interromper a distribuição para a devida manutenção.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. 6ª. ed. [S.l.]: [s.n.], v. I.