

MÉTODOS DE MEDIDA DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

JOSÉ JERÓNIMO HORTA DOS SANTOS

Engenheiro Electrotécnico (I. S. T.)

CHEFE DE DIVISÃO DA EMPRESA FABRIL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

De todos os ensaios finais de fabrico e de recepção a que se submete um transformador, um dos que mais directamente vão interessar o explorador duma rede é o que se refere à medida da relação de transformação.

Quando se pretende obter uma boa precisão, aliada a rapidez das determinações, alguns dos processos usuais têm de ser afastados por conduzirem a resultados incertos ou por demasiado morosos.

1. — CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS

Os métodos para a medida da razão de transformação e do ângulo de fase dum transformador podem ser classificados em 2 grupos: *directo* e *comparativo*. Dentro destes grupos poderão ainda distinguir-se, consoante a técnica de medidas utilizada, os métodos de «*deflexão*» ou desvio e os de «*zero*» ou leitura nula.

Enquanto nos métodos directos a razão e a relação de fase dos vectores de tensão primário e secundário são determinadas pela sua comparação directa ou pela comparação de duas grandezas que lhes estão ligadas por uma lei conhecida, nos métodos comparativos a tensão secundária é comparada em grandeza e fase com a de um transformador de referência sendo condição a igualdade dos vectores de tensão primários.

Vamos passar rapidamente em revista os métodos de medida mais correntes para analisarmos finalmente em mais pormenor o processo adoptado na maior fábrica nacional de transformadores.

2. — MÉTODO DOS DOIS VOLTÍMETROS

Um dos mais difundidos, em virtude da sua relativa simplicidade, consiste na aplicação de uma tensão ao enrolamento de alta tensão e na medida da tensão induzida no outro enrolamento, realizan-

do-se essas determinações por intermédio de transformadores de tensão e voltímetros apropriados. A precisão obtida é insuficiente pois se combinam os erros instrumentais e de leitura nos vários aparelhos de medida.

O erro pode atingir valores de 1 a 2%, excedendo assim a tolerância máxima de 0,5% adoptada pelas normas internacionais (B S I, V D E). Além disso não permite a determinação da defasagem entre tensões.

Pode classificar-se de método directo de deflexão.

3. — MÉTODO DOS DOIS WATTÍMETROS

É também, como o anterior, um método de deflexão, directo. Utiliza dois wattímetros electrodinâmicos ligados conforme o esquema da fig. 1. Per-

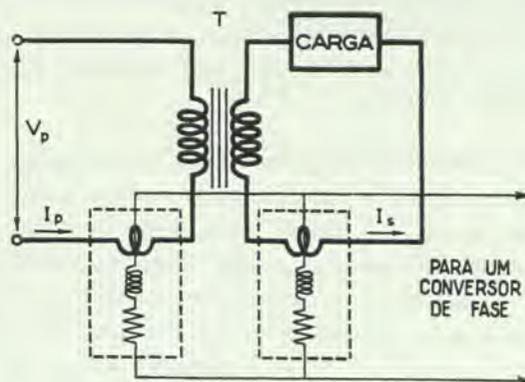


Fig. 1

mite medidas da razão de transformação e do ângulo de fase em condições próximas da carga nominal do transformador. Para correntes baixas a precisão cai rapidamente.

As medidas têm de ser feitas com o transformador em carga e com a bobina de corrente do wattímetro primário a suportar a intensidade total.

Estas duas condições limitam a valores baixos as potências dos transformadores ensaiados.

Mesmo nas condições óptimas a precisão é relativamente baixa.

4. — MÉTODOS DE COMPARAÇÃO DE DESVIO NULO

A superioridade dos processos de leitura nula sobre os métodos de desvio reside no facto de o resultado ser independente dos erros pessoais e da aferição dos instrumentos adoptados. Os métodos comparativos, de zero, são por isso mais precisos do que os anteriores. Comparam o transformador sujeito aos ensaios com um transformador padrão cuja razão de transformação é conhecida com elevada precisão.

Ambos os transformadores são ligados em paralelo e alimentados pelo lado dos enrolamentos de alta tensão. As tensões secundárias são comparadas através dum circuito potenciométrico, onde, no ramo do cursor, é introduzido um instrumento de «zero» de suficiente sensibilidade, o qual é levado a um desvio nulo pelo ajustamento das impedâncias da malha potenciométrica. A sensibilidade e precisão são tais que se podem facilmente conseguir erros de 0,01% na determinação da razão de transformação e de 0,3 min na medida do ângulo de fase.

Este processo requer transformadores especiais, aferidos com alta precisão e por isso resulta pouco económico e pouco expedito.

5. — MÉTODOS DIRECTOS DE DESVIO NULO

5.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

Nos processos incluídos nesta classificação recorre-se em geral a um dispositivo potenciométrico no qual se opõe à tensão secundária uma fracção conveniente da tensão primária. Muito esquemáticamente, e abstraindo a defasagem entre tensões, os circuitos usados podem reduzir-se em primeira aproximação ao que se representa na fig. 2. Os enrolamentos do transformador são conectados em série (como um auto-transformador).

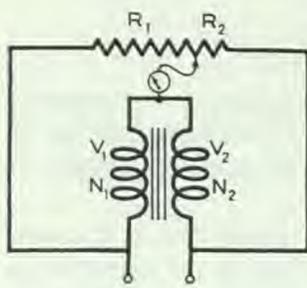


Fig. 2

Entre a junção dos 2 enrolamentos e o cursor da resistência potenciométrica é ligado um aparelho de

«zero». Para um desvio nulo a relação de transformação procurada será igual à razão das resistências.

Para muito altas tensões, o divisor de tensão costuma ser do tipo capacitivo em vez de ohmico.

Praticamente a malha potenciométrica incluirá uma combinação de resistências com indutância própria, indutâncias mútuas e capacitâncias de maneira que se obtenha a compensação da defasagem entre as grandezas vectoriais em jogo.

5.2. APARELHO «ALLOCHIO E BACCHINI»

O princípio em que se baseia este aparelho corresponde ao grupo 5). A sua concepção é da autoria do Prof. Barbagelata.

Trata-se de um aparelho portátil, de pequenas dimensões e de operação extremamente simples. Os valores da relação de transformação são dados por leitura directa sobre as escalas dos comutadores do potenciómetro.

Na fábrica de transformadores onde prestamos os nossos serviços existem alguns aparelhos deste tipo. Dada a insuficiência dos elementos fornecidos pelo fabricante no que se refere à teoria do circuito utilizado tivemos de proceder à análise desse circuito de modo que se consiga completa compreensão da sua actuação. Apresentamos nas alíneas seguintes alguns dos passos e conclusões desse estudo.

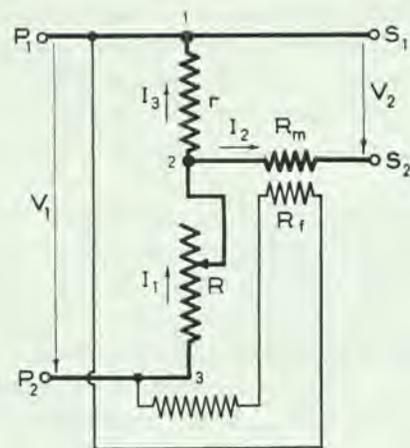


Fig. 3

5.2.1. — Na fig. 3 ilustra-se o esquema de princípio do método. O instrumento de medida é do tipo electrodinâmico, com duas bobinas, sendo uma delas fixa e a outra móvel.

Entre P_1 e P_2 , ligados aos terminais do enrolamento de alta-tensão, é aplicada uma tensão V_1 (a qual poderá ser da ordem dos 100 Volts). Os pontos S_1 e S_2 são ligados ao enrolamento de baixa-tensão do transformador sob prova. V_2 é a f.e.m. induzida neste enrolamento.

O instrumento apresentará um desvio nulo quando as correntes nas bobinas fixa e móvel estiverem em quadratura. Essa condição obtém-se por regulação da resistência variável R , como vamos ver.

5.2.2. DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

— Considere-se o esquema da fig. 3. Marcando arbitrariamente os sentidos positivos das correntes e f.e.m.^s, podemos aplicar as leis de Kirchoff às malhas e nós formados.

— Pretendemos determinar a tensão aplicada a R_m ($I_2 R_m$) em função das constantes do circuito e das f.e.m.^s (num caso genérico).

— Determinado $I_2 R_m$, teremos de exprimir a condição para que I_2 na bobina móvel esteja em quadratura com a corrente na bobina fixa (corrente esta em fase com V_1), isto é, teremos de procurar em que condições $I_2 R_m$ está desfasada de 90° em relação a V_1 . Só nestas condições o aparelho apresenta um desvio nulo.

— Aplicando então as leis de Kirchoff às malhas 1, 2, 3, V_1 , 1 e 1, 2, V_2 , 1 e ao nó 2 obtemos o seguinte sistema:

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = I_1 R + I_3 r & (1) \\ \vec{V}_2 = I_3 r - I_2 R_m & (2) \\ I_1 = I_2 + I_3 & (3) \end{cases}$$

Substituindo (3) em (1), obtemos:

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = I_2 R + I_3 R + I_3 r & (1) \\ \vec{V}_2 = I_3 r - I_2 R_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_3 = \frac{\vec{V}_2 + I_2 R_m}{r} & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{V}_1 r = I_2 R r + \vec{V}_2 R + I_2 R_m R + \vec{V}_2 r + I_2 R_m r & (1) \\ & (2) \end{cases}$$

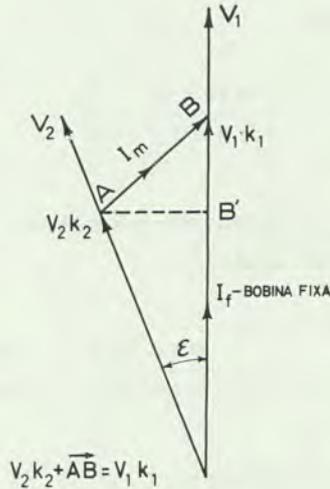


Fig. 4

Da primeira equação tira-se o valor de I_2 :

$$I_2 = \frac{\vec{V}_1 r - \vec{V}_2 R - \vec{V}_2 r}{R r + R_m R + R_m r}$$

A tensão aplicada na bobina móvel será portanto:

$$\vec{A B} = I_2 R_m = \frac{\vec{V}_1 r - \vec{V}_2 R - \vec{V}_2 r}{\frac{R r}{R_m} + R + r}$$

Designemos por k o termo variável $\frac{R r}{R_m} + R + r$.

Ficará:

$$\vec{A B} = I_2 R_m = \frac{\vec{V}_1 r - \vec{V}_2 (R + r)}{k} = \frac{\vec{V}_1 r}{k} - \vec{V}_2 \frac{(R + r)}{k}$$

Podemos ainda representar $\frac{r}{k}$ por k_1 e $\frac{R + r}{k}$ por k_2 sendo $k_1 < 1$ e $k_2 < 1$

Temos finalmente:

$$\vec{I}_2 R_m = \vec{V}_1 k_1 - \vec{V}_2 k_2$$

Isto quer dizer que $I_2 R_m$ é representado pela diferença vectorial de duas tensões respectivamente em fase com V_1 e V_2 visto k_1 e k_2 representarem 2 números escalares (cocientes de duas resistências).

— Representemos vectorialmente e notemos que as tensões V_1 e V_2 estão desfasadas do ângulo (ϵ).

— A condição para que $A B$ seja normal a V_1 é:

$$\vec{V}_2 k_2 \cos \epsilon = \vec{V}_1 k_1$$

ou

$$\frac{\vec{V}_1}{\vec{V}_2 \cos \epsilon} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\frac{R + r}{k}}{\frac{r}{k}} = \frac{R + r}{r}$$

Designando a constante $\frac{R + r}{r}$ por K_1

podemos escrever:

$$\boxed{\frac{\vec{V}_1}{\vec{V}_2 \cos \epsilon} = \frac{R + r}{r} = K_1} \quad (4)$$

e notando que podemos, com um erro desprezível, considerar $\cos \varepsilon \approx 1$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R+r}{r} = K_1 \quad (5)$$

A relação $\frac{R+r}{r}$, para um desvio nulo do instrumento, é pois igual à razão de transformação. É lida directamente no aparelho.

5.2.3. DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO ε DE DESFASAGEM

Intercalando em série com a bobina fixa (fig. 5) uma auto-indução L , a corrente nessa bobina vai desfasar-se de um ângulo φ em atraso sobre V_1

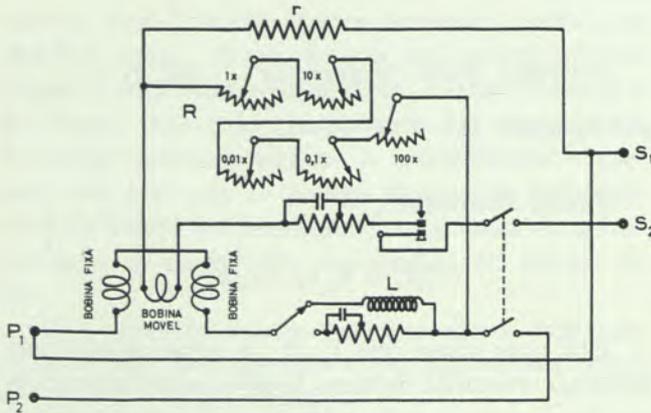


Fig. 5

(diagrama vectorial da fig. 6). Como se vê imediatamente, a condição de quadratura entre I'_m e I'_f é agora:

$$\vec{V}_1 k_1 \cos \varphi = \vec{V}_2 k_2 \cos (\varphi + \varepsilon)$$

donde:

$$\frac{\vec{V}_1 \cos \varphi}{\vec{V}_2 \cos (\varphi + \varepsilon)} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{R+r}{r} = \frac{R+r}{r} = K_2 \quad (6)$$

Onde R tem agora, evidentemente, um valor diferente daquele que apresenta na expressão (5).

Substituindo em (6) o valor de \vec{V}_1 tirado de (4) obtemos:

$$\frac{\vec{V}_2 \cos \varepsilon K_1 \cos \varphi}{\vec{V}_2 \cos (\varphi + \varepsilon)} = K_2$$

ou

$$\frac{\cos (\varphi + \varepsilon)}{\cos \varepsilon \cos \varphi} = \frac{K_1}{K_2}$$

Desenvolvendo obtém-se ainda:

$$\frac{\cos \varphi \cos \varepsilon}{\cos \varepsilon \cos \varphi} = \frac{\sin \varphi \sin \varepsilon}{\cos \varepsilon \cos \varphi} = \frac{K_1}{K_2}$$

e finalmente:

$$1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{K_1}{K_2}$$

Será pois:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{K_2 - K_1}{K_1} \times \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi}$$

Como ε é um ângulo muito pequeno podemos, com um erro desprezível, considerar $\operatorname{tg} \varepsilon \approx \varepsilon$. O valor de $\operatorname{tg} \varphi$, função da auto-indução L , é uma constante do aparelho (indicada pelo fabricante).

A expressão que nos permite determinar o ângulo de desfasagem será finalmente:

$$\varepsilon = \frac{K_2 - K_1}{K_1} \times \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (7)$$

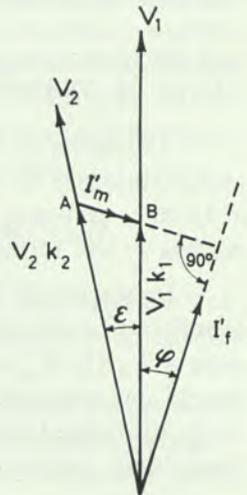


Fig. 6