

CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

Luiz Roberto Lisita

Capítulo I

TRANSFORMADOR

1.1	INTRODUÇÃO	3
1.2	PARTES COMPONENTES	3
1.3	TERMINOLOGIA USUAL	Apostila_Cap1_A23
1.4	TRANSFORMADOR MONOFÁSICO	3
1.4.0	INTRODUÇÃO	3
1.4.1	RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO	4
1.4.1	PARÂMETROS REFERIDOS	5
1.4.2	CIRCUITO EQUIVALENTE	6
1.4.3	CORRENTE EM VAZIO (I_0)	8
1.4.4	FORMA DE ONDA DA CORRENTE A VAZIO	9
1.4.5	CORRENTE TRANSITÓRIA DE MAGNETIZAÇÃO OU CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO (INRUSH).	10
1.4.6	SISTEMA POR UNIDADE	15
1.4.7	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR A PARTIR DE ENSAIOS	16
1.4.8	IMPEDÂNCIA Z% E RESISTÊNCIA R% PERCENTUAIS	18
1.5	ADAPTAÇÃO PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	20
1.6	REGULAÇÃO DE TRANSFORMADOR	22
1.7	RENDIMENTO DE TRANSFORMADOR	23
1.8	POLARIDADE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	30
1.8.1	OBJETIVO:	30
1.8.2	APLICAÇÕES:	30
1.8.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	30
1.8.4	MARCAÇÃO DOS TERMINAIS	30
1.8.5	MÉTODOS DE ENSAIO	31
1.9	DESLOCAMENTO ANGULAR PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	33
1.9.1	APLICAÇÕES	33
1.9.2	DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR	33
1.9.3	MARCAÇÃO DOS TERMINAIS	36
1.9.4	DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR	37
1.9.5	MÉTODOS DE ENSAIOS (D.A)	38
1.9.6	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GOLPE INDUTIVO PARA DETERMINAÇÃO DO D.A.	40
1.10	RIGIDEZ DIELÉTRICA DE ÓLEOS ISOLANTES	42
1.10.1	Introdução.	42
1.10.2	ENSAIO DE RIGIDEZ DIELÉTRICA	43
1.11	AUTOTRANSFORMADORES	44
1.11.1	INTRODUÇÃO	44
1.11.2	REPRESENTAÇÃO	44
1.11.3	RELAÇÕES DE TENSÕES E CORRENTES	45
1.11.4	POTÊNCIA NOMINAL E RENDIMENTO DO AUTOTRANSFORMADOR	46
1.11.5	CIRCUITO EQUIVALENTE DO AUTOTRANSFORMADOR	48
1.11.6	AUTOTRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	49
1.12	OPERAÇÕES EM PARALELO	52
1.12.1	INTRODUÇÃO	52
1.12.2	CONDIÇÕES PARA OPERAÇÃO EM PARALELO	53
	EXERCÍCIOS PROPOSTOS	66

1.1 **INTRODUÇÃO**

Chama-se transformador a uma máquina elétrica, com partes necessariamente estáticas, que por meio da indução eletromagnética, transfere energia elétrica de um circuito para outro ou outros circuitos, mantendo a mesma frequência, podendo haver alterações nos valores de tensões correntes e impedâncias:

Algumas aplicações dos transformadores:

- Elevação e abaixamento dos níveis de tensão e corrente em sistemas de transmissão e distribuição.
- Isolação de circuitos com altas tensões e/ou correntes para que se possa medi-las, bem como, para a proteção de sistemas (TP's e TC's).
- Alimentação de diversos equipamentos com tensões diferentes, a partir de uma única (Telecomunicações e serviços auxiliares em SE's).
- Controle e sinalização.
- Alimentação de lâmpadas de descargas (fluorescentes e/ou vapor de mercúrio).
- Operação de campainhas e alarmes.
- Alimentação de pontes conversoras.

1.2 **PARTES COMPONENTES**

Os componentes fundamentais do transformador localizam-se na chamada "parte ativa", ou seja, núcleo e enrolamentos.

O núcleo é constituído de chapas de aço silício laminado e é utilizado como circuito magnético para circulação do fluxo criado pelos enrolamentos.

Os enrolamentos são constituídos por bons condutores, normalmente cobre ou alumínio, isolados com esmalte sintético, algodão ou papel.

Existem diversos acessórios, tais como: radiadores, conservadores, comutador de taps, termostatos e, muitos outros, os quais dependem da potência do transformador para serem utilizados.

1.3 **TERMINOLOGIA USUAL Apostila_Cap1_A2**

- a) Os transformadores são abaixadores se alimentados pelo lado de maior tensão e, caso contrário são elevadores.
- b) O circuito ou enrolamento primário sempre é o que recebe energia da rede. O secundário, terciário, etc, são aqueles que fornecem energia à carga do transformador.
- c) Chama-se AT ou TS o lado de maior tensão e, BT ou TI o lado de menor tensão. Na existência de um terceiro enrolamento, tem-se TM ou MT (Tensão média ou média tensão).
- d) A carga de um transformador é um conjunto de valores das grandezas elétricas que caracterizam as solicitações a ele impostas em cada instante.
- e) A característica nominal é um conjunto de valores nominais atribuídos às grandezas que definem o funcionamento de um transformador, em condições especificada por normas, e que servem de base à garantia de fabricante e aos ensaios. Elas sempre se referem à derivação principal.
- f) Derivação é a ligação feita em qualquer ponto de um enrolamento, de modo a permitir a mudança de tensões e de correntes através da mudança da relação de espiras.

1.4 **TRANSFORMADOR MONOFÁSICO**

1.4.0 **INTRODUÇÃO**

O transformador monofásico, em sua forma mais elementar, constitui-se de um núcleo de material magnético e enrolamentos, como mostra a fig. 1.4.1.

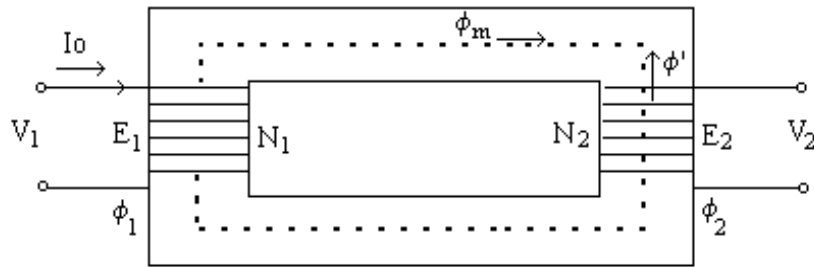


fig. 1.4.1

Aplicando-se uma tensão V_1 no primário do transformador, circulará uma pequena corrente denominada corrente a vazio, representada por I_0 .

De acordo com a Lei de Ampère, tem-se:

$$\oint H \cdot dl = N_1 \cdot I_0 \quad 1.4.1$$

ou

$$\mathfrak{R} \cdot \phi = N_1 \cdot I_0 \quad 1.4.2$$

A força magneto-motriz impulsiona o fluxo magnético pelo núcleo, sendo limitado pela relutância.

Pela Lei de Faraday, que diz: "sempre que houver movimento relativo entre o fluxo magnético e um circuito por ele cortado, serão induzidas tensões neste circuito" e, pela Lei de Lenz, "o sentido dessa tensão é tal que possa produzir uma corrente que crie um fluxo $[\phi']$ se opondo à variação do fluxo original.

Pelo exposto, existirão tensões induzidas no primário $[E_1]$ e no secundário $[E_2]$, devido à variação de fluxo em relação às espiras.

Os valores eficazes das tensões induzidas são dadas por:

$$E_1 = 4,4 \cdot N_1 \cdot f \cdot S \cdot B_{m\acute{a}x} \text{ (V)} \quad 1.4.3$$

$$E_2 = 4,4 \cdot N_2 \cdot f \cdot S \cdot B_{m\acute{a}x} \text{ (V)} \quad 1.4.4$$

Onde E_1 e E_2 são valores eficazes das tensões induzidas no primário e secundário.

Deve-se observar que o transformador não é ideal e, sendo assim, os enrolamentos possuem também resistências, capacitâncias e fluxos de dispersão.

Por outro lado, de uma forma geral, as bobinas são montadas concêntricas, para aproveitamento de uma parcela do fluxo de dispersão; como dado prático, normalmente realiza-se esta montagem com as bobinas de maior tensão envolvendo as de menor.

1.4.1 RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

A Relação de Transformação das tensões de um transformador é definida de duas formas:

a) Relação de transformação teórica ou relação de espiras.

$$K_N = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 1.4.5$$

b) Relação de Transformação real.

Ao conectar-se uma carga Z_L ao secundário de um transformador, a corrente I_2 provocará quedas de tensões no primário e secundário e, portanto V_2 é diferente de E_2 , onde:

V_2 - Tensão de saída do transformador (V).

Nestas condições, define-se a relação de transformação real ou a relação entre as tensões primária e secundária quando do transformador em carga, da seguinte forma:

$$K = \frac{V_1}{V_2} \quad 1.4.6$$

onde,

V_1 - Tensão de entrada do transformador (V)

Se $K > 1$, o transformador é abaixador e,

Se $K < 1$, o transformador é elevador.

1.4.1 **PARÂMETROS REFERIDOS**

Em sistemas elétricos com várias tensões de serviço, normalmente se emprega a redução de todas elas a uma mesma base, desta maneira todos os cálculos podem ser realizados como se houvesse apenas um circuito (é o caso de representação p.u.).

Na teoria dos transformadores reduz-se (ou refere-se) os valores de correntes e tensões do secundário para o primário (ou vice-versa).

Observa-se que, referindo-se um dos lados ao outro, constrói-se um circuito elétrico equivalente ao transformador, sem a presença de enrolamentos e núcleo. Este circuito pode ser aplicado diretamente em sistemas de potência, facilitando quaisquer tipos de cálculos.

Aqui neste texto, as grandezas secundárias serão referidas ao primário.

a) Tensões:

$$E_2' = \frac{N_1}{N_2} E_2 = K_N \cdot E_2 \quad 1.4.7$$

$$V_2' = \frac{N_1}{N_2} V_2 = K_N \cdot V_2 \quad 1.4.8$$

b) Corrente

$$I_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2' = \frac{I_2'}{K_N} \quad 1.4.9$$

c) Impedância

$$Z_L' = \frac{V_2'}{I_2'} = \frac{V_2 \cdot K_N}{I_2 \cdot K_N} = \frac{V_2}{I_2} K_N^2$$

$$Z_L' = Z_L \cdot K^2 \quad 1.4.10$$

Naturalmente que:

$$R_L' = R_L \cdot K^2 \quad 1.4.11$$

e

$$X'_L = X_L \cdot K_N^2 \quad 1.4.12$$

Obs: O fato de referir-se grandezas secundárias ao primário, não altera o ângulo de fase e potência fornecida à carga.

1.4.2 CIRCUITO EQUIVALENTE

Considerações a fazer:

- Os fluxos dispersos ϕ_1 e ϕ_2 , produzem reatâncias X_1 e X_2 nos lados primário e secundário.
- Os enrolamentos primário e secundário apresentam resistência r_1 e r_2 (cobre ou alumínio).

Dessa forma obtém-se o 1º modelo para o transformador, conforme fig. 1.4.2.

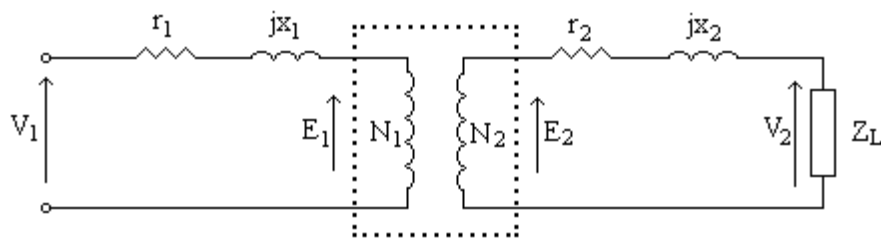


fig. 1.4.2

Com as grandezas secundária referidas ao primário, tem-se o diagrama da fig. 1.4.3.

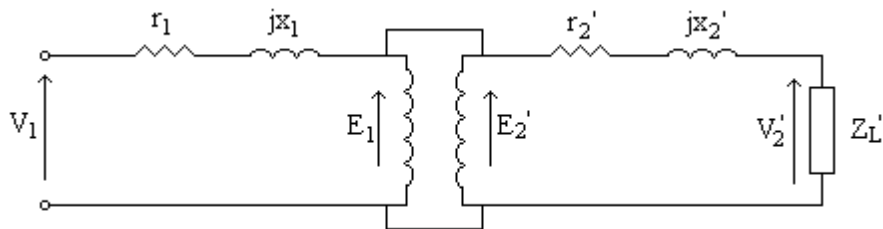


fig. 1.4.3

A f.c.e.m. E_1 e a f.e.m. E_2' são induzidas por um fluxo principal (ϕ_m). Para a produção desse fluxo considera-se a existência de uma bobina representada pela reatância X_m , a qual será parte do denominado ramo magnetizante do circuito equivalente. Por outro lado, o núcleo apresenta perdas (Histerese e Foucault). Para solucionar este inconveniente, introduz-se no ramo magnetizante uma resistência r_m , que sendo percorrida por uma corrente, dissipa as perdas no núcleo (P_0), onde:

$$P_0 = P_H + P_F \quad 1.4.13$$

Onde:

P_H - Perdas por Histerese

P_F - Perdas por Foucault

A determinação prática das perdas P_H é feita a partir de:

$$P_H = K_s \cdot B_m^{1,6} \cdot f \text{ [watts/kg de núcleo]} \quad 1.4.14$$

K_s é o coeficiente de Steimmetz que depende do tipo de material usado no núcleo; B_m é a indução máxima no núcleo e, f a frequência em Hz.

A tabela 1.4.1 mostra a influência da escolha do material do núcleo nas perdas por histeres.

MATERIAL	K_s
Ferro doce	2,50
Aço doce	2,70
Aço doce para máquinas	10,00
Aço fundido	15,00
Fundição	17,00
Aço doce 2% silício	1,50
Aço doce 3% silício	1,25
Aço doce 4% silício	1,00
Laminação doce	3,10
Laminação delgada	3,80
Laminação ordinária	4,20

tab. 1.4.1

O aparecimento das correntes de Foucault é explicado pela Lei de Faraday, a qual para este caso seria interpretada como "estando o núcleo sujeito a um fluxo alternado, nele serão induzidos f.e.m.s". Considerando um circuito elétrico formado no próprio núcleo, serão estabelecidas correntes obedecendo a sentidos tais como mostra a fig. 1.4.4.

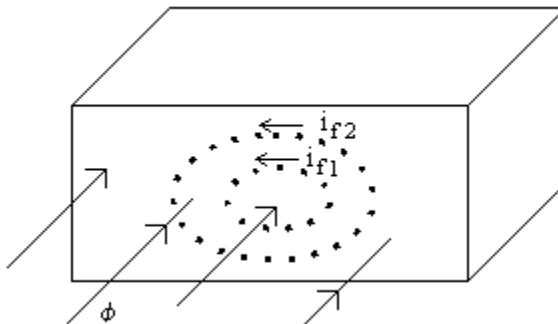


fig. 1.4.4

O produto da resistência do circuito correspondente pelo quadrado da corrente significa um consumo de potência. As perdas devido ao efeito das correntes parasitas podem ser calculadas pela eq. 1.4.15.

$$P_F = 2.2.f^2.Bm^2.d^2.10^{-3} \text{ [W/Kg]} \quad 4.15$$

d - espessura da chapa em [mm]

Dessa forma o circuito equivalente completo pode ser representado pela fig. 1.4.5.

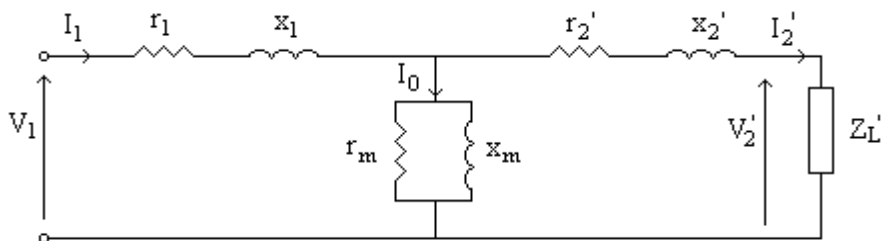


fig. 1.4.5

Estando o transformador em operação a corrente de magnetização é baixa em relação à corrente nominal, desta forma, pode-se aproximar o circuito T anterior para o circuito L, conforme fig. 1.4.6.

Uma outra aproximação é desconsiderar o ramo magnetizante, conforme fig. 1.4.7.

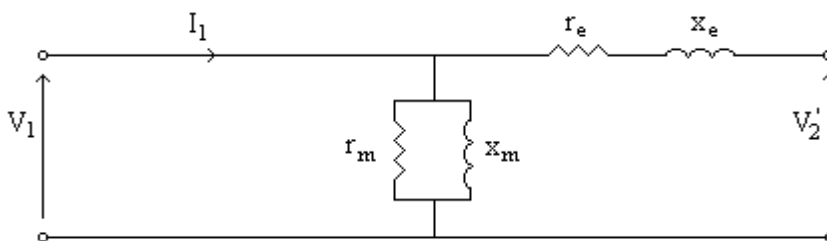


fig. 1.4.6

$$r_e = r_1 + r_2' \quad 1.4.16$$

$$x_e = x_1 + x_2' \quad 1.4.17$$

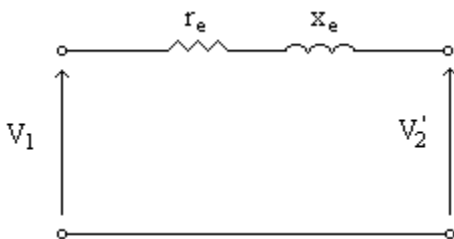


fig. 1.4.7

1.4.3 CORRENTE EM VAZIO (I_0)

A função da corrente em vazio é suprir as perdas a vazio (núcleo) e produzir o fluxo magnético (mútuo).

Considerando-se estes aspectos, esta corrente pode ser subdividida em duas parcelas, a saber:

a) I_p - Corrente ativa ou de perdas, responsável pelas perdas no núcleo e, esta em fase com a tensão aplicada ao primário V_1 .

b) I_m - Corrente magnetizante ou reativa, responsável pela criação do fluxo magnético (ϕ_m) e está atrasada de 90° em relação a V_1 .

O gráfico da fig. 1.4.8 representa a corrente de magnetização em relação à tensão aplicada ao transformador, onde:

$$I_0 = \sqrt{I_p^2 + I_m^2} \quad 1.4.18$$

De acordo com o gráfico da fig. 1.4.8, tem-se:

$$I_p = I_0 \cdot \cos \phi_0 \quad 1.4.19$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \phi_0 \quad 1.4.20$$

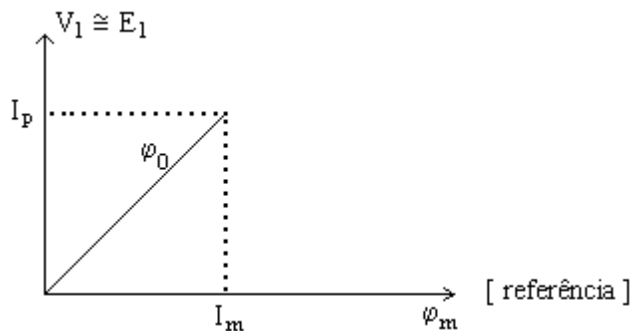


fig. 1.4.8

A perda em vazio pode ser calculada por:

$$P_0 = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos \phi_0 = V_1 \cdot P_1 \quad 1.4.21$$

ϕ_0 - defasagem entre V_1 e I_0

É de interesse prático que as perdas sejam as menores possíveis. Para que tal ocorra, a corrente a vazio deve ser, em quase sua totalidade, utilizada para a magnetização do núcleo, ou seja:

$$I_m \gg I_p$$

Assim o valor de ϕ_0 deve ser o maior possível e $\cos \phi_0$ (Fator de Potência em vazio) possuirá baixos valores.

É comum considerar-se que a corrente em vazio é igual a de magnetização, pois, $I_m \gg I_p$ em transformadores bem projetados.

1.4.4 FORMA DE ONDA DA CORRENTE A VAZIO

A corrente em vazio assume valor bastante baixo, situando-se na faixa de 1 a 7% da corrente nominal do circuito primário. Dessa forma, a queda de tensão no primário é pequena, ou seja:

$$V_1 \sim E_1$$

Se a tensão aplicada ao primário V_1 possuir forma de onda senoidal, E_1 também o será. Por outro lado, considerando-se as expressões de E_1 e E_2 (equações 1.4.22 e 1.4.23), tem-se que o fluxo possui a mesma forma de onda de E_1 , porém com defasagem de 90° elétricos.

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot d\phi_m}{dt} \quad 1.4.22$$

$$E_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad 1.4.23$$

Da Lei de Ampère e utilizando-se a expressão da relutância, conforme equações 1.4.24 e 1.4.25, observa-se que o fluxo magnético é senoidal, N_1 é constante, porém a relutância varia devido aos diferentes estados de saturação que ocorrem no núcleo.

$$i_m = \frac{\mathfrak{R} \cdot \phi_m}{N_1} \quad 1.4.24$$

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{S \cdot \mu_\Delta} \quad 1.4.25$$

Com tais considerações, conclui-se que a corrente em vazio, obrigatoriamente, não é senoidal, devido à corrente de magnetização (i_m) não o ser.

O processo gráfico para obtenção da forma de onda da corrente de magnetização é mostrado nas figuras 1.4.9 (a) e (b).

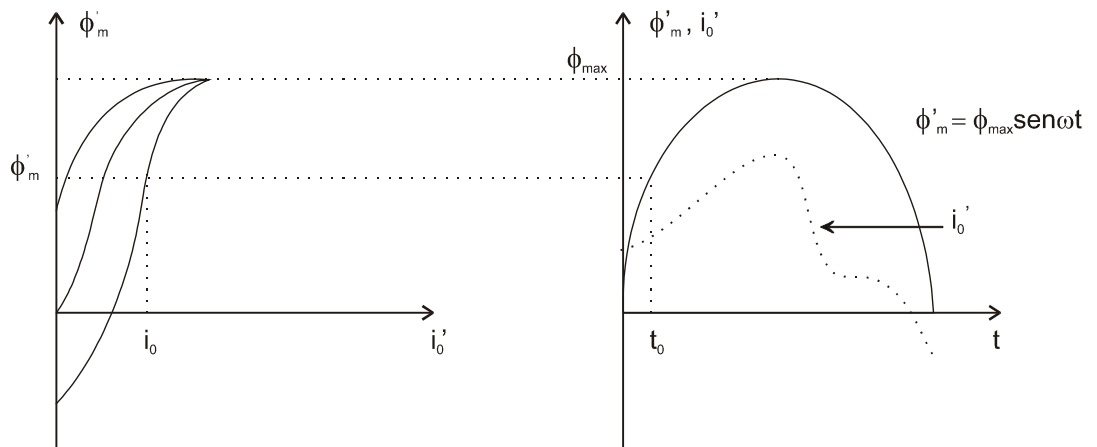


fig. 1.4.9

Para a construção da forma de onda, adota-se o seguinte procedimento:

- a) Para um determinado instante (t_0), determina-se o valor de ϕ_m' .
- b) Para este valor de ϕ_m' (crescente ou decrescente); verifica-se na curva de histerese o valor de i_0' ;

- c) Transporta-se para o dado t_0 , o valor de i_0' correspondente e, assim, tem-se um ponto da curva de i_0 ;
- d) Repetir o processo para outros pontos e traçar a forma de onda da corrente.

Obs: Como conseqüência do formato não senoidal da corrente em vazio, há a produção de harmônicos, principalmente os de terceira ordem.

1.4.5 CORRENTE TRANSITÓRIA DE MAGNETIZAÇÃO OU CORRENTE DE ENERGIZAÇÃO (INRUSH).

Seja o transformador a vazio, conforme mostra a fig. 1.4.10. Aplicando-se LKT na malha I, tem-se:

$$v_1 = r_1 \cdot i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt} + N_1 \frac{d\phi'}{dt} \quad 1.4.26$$

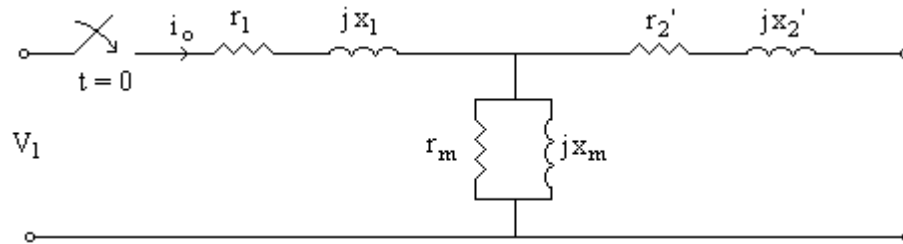


fig. 1.4.10

Existe uma relação não linear entre i_0 e ϕ dado pela curva de histerese.

Devido a essa não linearidade, torna-se necessário algumas aproximações para obtenção de i_0 . A solução desejada consistirá de duas partes fundamentais: solução particular e solução complementar. O primeiro representa o regime permanente e o segundo é o termo transitório. Devido ao termo transitório pode-se observar um fenômeno constatado por Fleming em 1892.

O fenômeno observado mostrou que quando um transformador é conectado à rede, por vezes há o aparecimento de uma grande corrente transitória de magnetização. O efeito da referida corrente é causar momentaneamente uma queda de tensão alimentadora e uma provável atuação de relês instantâneos. O valor atingido nesse regime transitório depende de dois fatores:

- Ponto do ciclo da tensão, no qual a chave para o energizamento seria fechada;
- Condições magnéticas do núcleo, incluindo a intensidade e polaridade do fluxo residual.

Considerando-se como primeira aproximação que os dois primeiros termos da expressão anterior podem ser desprezados e, admitindo-se que, no instante inicial do processo de energização, a tensão da fonte passa por um valor $V_{1m} \cdot \text{sen}\alpha$, em que α é um ângulo qualquer cujo propósito é definir o valor da tensão da fonte no instante $t = 0$, tem-se:

$$e1 \cong v_1 = V_{1m\acute{a}s} \cdot \text{sen}(wt + \alpha) = N_1 \frac{d\phi'}{dt'} \quad 1.4.27$$

Integrando-se a expressão 1.4.27, obtém-se:

$$\int_b^{\phi} V_{1m\acute{a}s} \cdot \text{sen} \cdot (wt'+\alpha) dt' = \int_{\phi_0}^{\phi} N_1 d\phi'$$

$$-\frac{V_{1m}}{N_1 \cdot W} \cos(wt'+\alpha) \cdot \int_b^{\phi} = \phi' \int_{\phi_0}^{\phi}$$

$$E_1 \sim V_1$$

$$V_{1m} = \left[\frac{2 \times 4,44}{\sqrt{2}} f \right] \cdot \phi_m \cdot N_1$$

Sabe-se que:

$$\frac{V_{1m}}{N_1 \cdot W} = \phi_m, \text{ logo:}$$

$$\phi = \phi_0 + \phi_m \cdot \cos \alpha - \phi_m \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad 1.4.28$$

Os termos da equação 1.4.28.

$\phi_0 + \phi_m \cdot \cos \alpha$ (apresenta amortecimento para os casos reais) e;

$\phi_m \cdot \cos(\omega t + \alpha)$ (regime permanente).

Fazendo-se algumas suposições, tais como:

$$\phi_0 = 0,27 \cdot \phi_m$$

$$\alpha = 64^\circ$$

A expressão 1.4.28, fica:

$$\phi = (0,27 + 0,438)\phi_m + [-\phi_m \cdot \cos(\omega t + 64^\circ)]$$

ou,

$$\phi = [0,71 - \cos(\omega t + 64^\circ)]\phi_m$$

$$\phi_{\text{pico}} = 1,71 \cdot \phi_m$$

A fig. 1.4.11 ilustra o fluxo em função do tempo.

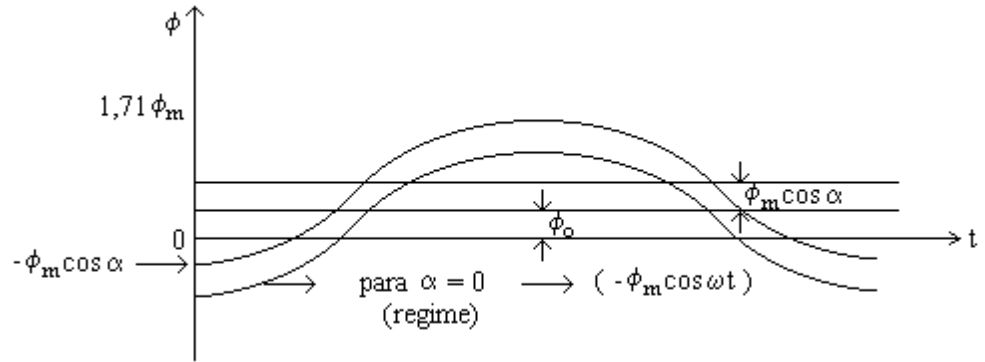


fig. 1.4.11

Como o valor de pico é relativamente alto e, lembrando-se que o fluxo deve ser produzido por i_0 , tem-se que a relação $\phi = f(i_0)$ necessita-se de uma grande corrente nos primeiros instantes.

Um oscilograma típico da corrente de magnetização, incluindo o regime transitório terá o aspecto ilustrado na fig. 1.4.12.

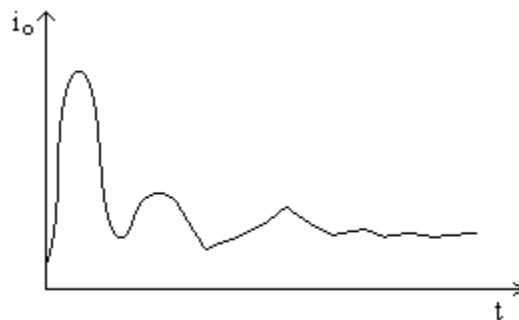


fig. 1.4.12

É comum encontrar um valor de pico inicial de corrente várias vezes superior ao da corrente nominal do transformador.

Para um pequeno aumento de fluxo no núcleo, necessita-se uma grande corrente (devido ao fenômeno da saturação, conforme fig. 1.4.13), denominada de inrush ou corrente de avalanche.

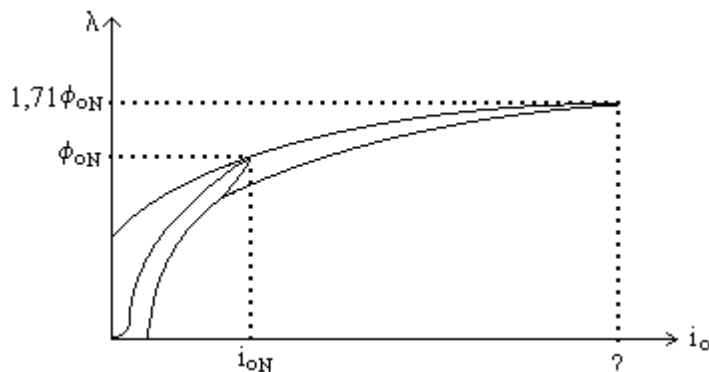


fig. 1.4.13

Exemplo 1

Um transformador de 1 kVA, 220/110V, 400 Hz, deverá ser usado em 60 Hz, calcule:

a) O máximo valor eficaz da tensão que pode ser aplicada ao transformador, tendo do lado de alta como o lado de baixa tensão.

b) Os kva's nominais do transformador sob as condições de frequência reduzida.

c) As perdas relativas do transformador nas frequências de 60 e 400 Hz, sabendo-se que a constante de Steimmetz vale 1,25 (aço doce 3% de silício), e que, a perda por histerese varia com o quadrado da densidade de fluxo e não com o valor de $B^{1,6}$. Sabe-se que: $d = 0,35$ [mm].

Solução:

a) Manter a mesma densidade de fluxo "B" permissível no material ferromagnético. Da eq. 1.4.3, tem-se:

$$E_{1_{400}} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f_{400} \cdot S \cdot B_m$$

$$E_{1_{60}} = 4,44 \cdot N_1 \cdot f_{60} \cdot S \cdot B_m$$

Dividindo-se $E_{1_{60}}$ por $E_{1_{400}}$, obtém-se:

$$\frac{E_{1_{60}}}{E_{1_{400}}} = \frac{f_{60}}{f_{400}}$$

Sabe-se que $E_{1_{400}} = 220$ [V], logo:

$$E_{1_{60}} = 220 \cdot \frac{60}{400} \rightarrow E_{1_{60}} = 33 \text{ [V]}$$

Para o secundário, tem-se:

$$E_{2_{60}} = E_{2_{400}} \cdot \frac{f_{60}}{f_{400}} = 110 \cdot \frac{60}{400}$$

$$E_2 = 16,5 \text{ [V]}$$

b) Os valores nominais das correntes do transformador deverão ser inalterados, já que os condutores têm a mesma capacidade de condução. Da expressão da potência, tira-se:

$$I_1 = \frac{N}{V_1} = \frac{10^3}{220} = 4,54 \text{ [A]}$$

$$N_{60} = E_{1_{60}} \cdot I_1 = 33 \cdot 4,54$$

$$N_{60} = 0,15 \text{ [kVA]}$$

c) Sabe-se que:

$$P_0 = 2,2 \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot 10^{-3} + K \cdot B^2 \cdot f$$

$$P_{0_{60}} = [2,2 \cdot 60^2 \cdot (0,35)^2 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 60] B^2$$

$$P_{0_{400}} = [2,2 \cdot 400^2 \cdot (0,35)^2 \cdot 10^{-3} + 1,25 \cdot 400] B^2$$

$$\frac{P_{0_{400}}}{P_{0_{60}}} = \frac{543,12}{75,97}$$

$$P_{0_{400}} = 7,15 P_{0_{60}}$$

As perdas na freqüência de 400 Hz são em torno de 700% maior que na freqüência de 60 Hz.

Obs: Isso para um mesmo dispositivo operando nas duas freqüências.
Conclusões:

$$\text{Transf.} \begin{cases} N_{400} = 1 \text{ kVA} \\ N_{60} = 0,15 \text{ kVA} \\ P_{0_{400}} = 7,15 P_{0_{60}} \end{cases}$$

1.4.6 SISTEMA POR UNIDADE

Um procedimento muito comum encontrado na prática consiste em expressar as grandezas características dos equipamentos de potência não em seus valores reais, porém em valores normalizados ou percentuais do nominal correspondente.

Fixa-se arbitrariamente o valor de duas das grandezas fundamentais, que passam a ser denominadas valores de base, que são a tensão e potência aparente.

Na verdade, quando se expressa as quedas e elevações de tensão em valores percentuais, estes adquirem maior significado.

$$V_{\text{BASE}} = V_B$$

Tensão nominal

$$N_{\text{BASE}} = N_B$$

Potência forte do sistema

Por definição, um valor p.u. é dado por:

$$\text{Valor p.u.} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}}$$

- Tensão p.u.

$$V_{i \text{ p.u.}} = \frac{V_i}{V_B}$$

- Potência p.u.

$$N_{p.u.} = \frac{N_{REAL}}{N_{BASE}}$$

$$P_{p.u.} = \frac{P}{N_B}$$

$$Q_{p.u.} = \frac{Q}{N_B}$$

- Impedância p.u.

$$Z_{p.u.} = \frac{Z_{REAL}}{Z_B}$$

$$Z_B = \frac{V_B^2}{N_B}$$

* Mudança de base:

- Tensão p.u.

$$V_{p.u.N} = \frac{V_1}{V_{BN}} = \frac{V_{p.u.V} \cdot V_{BV}}{V_{BN}}$$

- Potência p.u.

$$N_{p.u.N} = \frac{N_1}{N_{BN}} = \frac{N_{p.u.V} \cdot N_{BV}}{N_{BN}}$$

$$P_{p.u.N} = \frac{P_1}{N_{BN}} = \frac{P_{p.u.V} \cdot N_{BV}}{N_{BN}}$$

$$Q_{p.u.N} = \frac{Q_1}{N_{BN}} = \frac{Q_{p.u.V} \cdot N_{BV}}{N_{BN}}$$

- Impedância p.u.

$$Z_{p.u.N} = \frac{Z}{Z_{BN}} = \frac{V_{BN}^2}{N_{BN}} = Z_{p.u.V} \left(\frac{V_{BV}}{V_{BN}} \right)^2 \left(\frac{N_{BN}}{N_{BV}} \right)$$

1.4.7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR A PARTIR DE ENSAIOS

a) Ensaio a vazio:

Tem como finalidades às determinações das perdas a vazio e calcular os parâmetros x_m e r_m .

Procedimento:

Aplica-se a tensão nominal aos terminais de baixa tensão, estando os terminais de alta tensão em aberto (vazio) e fazem-se as leituras da potência de entrada (real), tensão e corrente a vazio. Normalmente utiliza-se para este ensaio o circuito L equivalente conforme fig. 1.4.14.

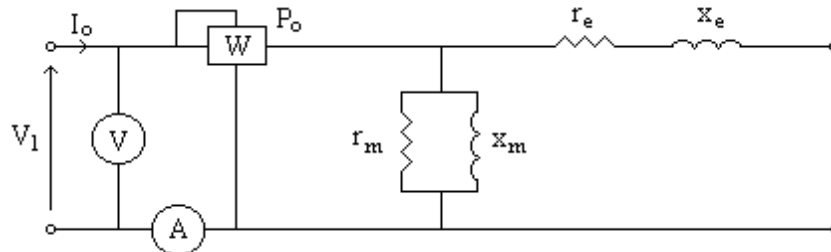


fig. 1.4.14

Fazem-se as leituras P_0 , I_0 e V_1 e, em seguida calcula-se:

$$r_m = \frac{V_1^2}{P_0} \quad 1.4.29$$

$$Z_m = \frac{V_1}{I_0} \quad 1.4.30$$

$$\frac{1}{x_m} = B_m = \sqrt{Y_m^2 - g_m^2} \quad (\Omega) \quad 1.4.31$$

onde, $Y_m = \frac{1}{Z_m}$ e $g_m = \frac{1}{r_m}$

b) Ensaio em curto-circuito.

Finalidades:

- Obtenção das perdas no cobre.
- Determinação dos parâmetros r_e e x_e em relação ao circuito "L" equivalente.
- Queda de tensão no transformador (regulação).

Procedimento:

No ensaio em curto-circuito, aplica-se uma tensão reduzida aos terminais de alta tensão do transformador, curto-circuitando-se a baixa tensão. O nível da tensão aplicada ao transformador deve ser tal que proporcionará a circulação da corrente nominal.

Como a tensão aplicada é reduzida, a corrente no ramo magnetizante também o será. As perdas a vazio dependem do fluxo, ou seja, da densidade de fluxo ($a.B_m^2 + b.B_m^{1,6}$) e, esta por sua vez, depende da tensão aplicada. Desta forma pode-se desprezar o ramo central do modelo em "L" do transformador, pois estando ele curto-circuitado, bastará uma pequena tensão para fazer circular a corrente nominal, logo, pode-se desprezar o ramo magnetizante.

Desta forma o modelo para o ensaio em curto-circuito é mostrado na fig. 1.4.15.

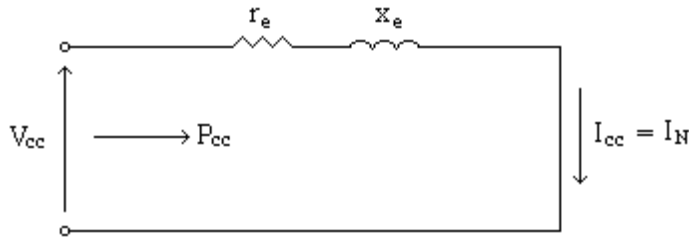


fig. 1.4.15

* Faz-se as leituras V_{cc} , P_{cc} e $I_N = I_{cc}$.

* Calcula-se:

$$r_e = \frac{P_{cc}}{I_N^2} (\Omega) \quad 1.4.32$$

$$Z_e = \frac{V_{cc}}{I_N} (\Omega) \quad 1.4.33$$

$$x_e = \sqrt{Z_e^2 - r_e^2} (\Omega) \quad 1.4.34$$

Exemplo 2

Calcule a fração das perdas no núcleo, à tensão nominal, conhecendo-se as perdas à tensão reduzida. Supor que as perdas sejam proporcionais à densidade de fluxo ao quadrado, ou seja, que as perdas à tensão reduzida depende da tensão aplicada ao quadrado:

$$P_{0R} = K_0 \cdot V_R^2 \quad (\text{a) Perdas à tensão reduzida.}$$

Sabe-se que:

$$V_{1N} = 13,8 \text{ [kV]} \quad \text{Tensão nominal}$$

$$V_{1cc} = 280 \text{ [V]} \quad \text{Tensão reduzida.}$$

Solução:

$$P_{0N} = K_0 \cdot V_N^2 \quad (\text{b) Perdas à tensão nominal}$$

a ÷ b

$$P_{0N} = \left[\frac{V_N}{V_R} \right]^2 \cdot P_{0R} = \left[\frac{13,8}{0,28} \right]^2 \cdot P_{0R}$$

$$P_{0N} = 2429 P_{0R}$$

Nota: Para grandes transformadores V_{1cc} é muito pequeno em relação a

V_{1N}

1.4.8 IMPEDÂNCIA Z% E RESISTÊNCIA R% PERCENTUAIS

Do ensaio em curto, equação 1.4.32, tem-se:

$$r_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_N^2}$$

Dividindo-a pela impedância base e multiplicando-a por 100%, obtém-se a resistência percentual da seguinte forma:

$$r_{eq} \% = \frac{r_{eq}}{Z_B} \cdot 100\% = \frac{P_{cc}}{I_N^2} \cdot \frac{N_B}{V_B^2} \cdot 100\%$$

Sabe-se que:

$$V_N = V_B \quad \text{e} \quad N_B = I_N \cdot V_B$$

$$r_{eq} \% = 100\% \cdot \frac{P_{cc}}{N_B^2} \cdot N_B \Rightarrow$$

$$r_{eq} \% = \frac{P_{cc}}{N_B} \cdot 100\% \tag{1.4.35}$$

Da equação da Lei de Ohm referente ao ensaio em curto-circuito e, realizando-se o mesmo procedimento como na resistência percentual, obtém-se:

$$Z_{eq} = \frac{V_{cc}}{I_N}$$

$$Z_{eq} \% = \frac{Z_{eq}}{Z_B} \cdot 100\% = \frac{V_{cc}}{I_N} \cdot \frac{N_B}{V_N^2} \cdot 100\%$$

$$Z_{eq} \% = \frac{V_{cc}}{V_N} \cdot 100\% \tag{1.4.36}$$

O valor da resistência percentual R% apresenta variações com a temperatura. Na realização do ensaio não há tempo suficiente para o aquecimento do transformador, justifica-se então sua correção para a temperatura usual de trabalho, da seguinte forma:

$$R_2 \% = K_\theta \cdot R_1 \% \tag{1.4.37}$$

onde,

R₁% - resistência percentual na temperatura inicial
R₂% - resistência percentual na temperatura final
K_θ - coeficiente de correção de resistência, dado pela

fig. 1.4.16

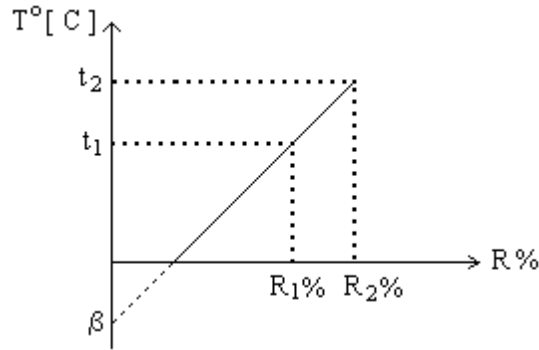


fig. 1.4.16

Da fig. 1.4.16 tira-se a seguinte relação:

$$\frac{R_2 \%}{R_1 \%} = \frac{t_2 + \beta}{t_1 + \beta}$$

t_1 - temperatura inicial

t_2 - temperatura final

$$R_2 \% = R_1 \% \left[\frac{t_2 + \beta}{t_1 + \beta} \right] \quad 1.4.38$$

$$K_0 = \frac{\beta + t_2}{\beta + t_1} \quad 1.4.39$$

O valor de β é uma constante determinada a partir do gráfico.

$\beta = 234,5$ para o cobre,
 225 para o alumínio.

1.5 ADAPTAÇÃO PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Um transformador trifásico é um agrupamento de três enrolamentos monofásicos.

a) Corrente a vazio.

As correntes a vazio das três fases poderão apresentar valores iguais para as fases laterais e um valor diferente para a central. Para este caso, adota-se uma única corrente a vazio, dada por:

$$I_0 = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3} \quad 1.5.1$$

b) Relação de transformação.

Para o caso de transformadores monofásicos a relação de transformação teórica é sempre igual à relação de espiras. Para os transformadores trifásicos, o problema já não é tão simples, exigindo-se certos cuidados, conforme o tipo de conexão, a saber:

estrela, triângulo ou zigue-zague. Entretanto para todos os caso, basta raciocinar do seguinte modo: "a relação de transformação real é definida como sendo a relação entre as tensões primária e secundária medidas entre fases ou tensões de linha".

A relação do número de espiras é definida como sendo a relação do número de espiras por fase (enrolamentos situados em uma mesma coluna).

Exemplo 3

Seja K_T e K_N a relação de transformação real e relação de espiras respectivamente. Determine K_T e K_N para um transformador Y - Δ .

Solução

Seja a fig. Ex. 3.

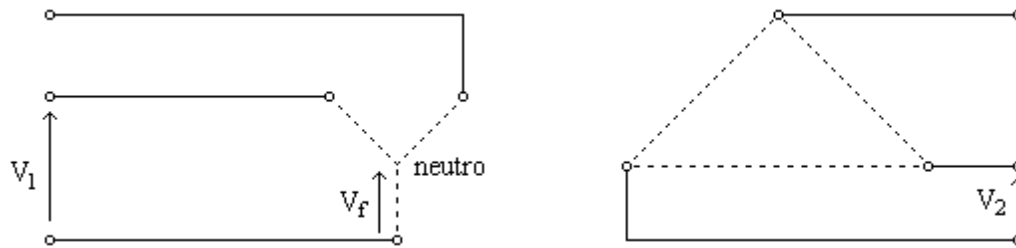


fig. Ex. 3

Por definição, tem-se;

$$K_T = \frac{V_1}{V_2}$$

e,

K_N - definida por fase.

$$K_N = \frac{V_f}{V_{f2}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad V_f = \frac{\sqrt{3}V_1}{3} = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$$

[conforme o tipo de ligação]

Logo: $K_N = \frac{V_{f1}}{V_{f2}} = \frac{V_1}{V_2 \sqrt{3}}$ [relação de espiras em função da tensão]

c) Determinação de X_m e R_m , cuidados:

- Quando da determinação de X_m e R_m , as mesmas são feitas por fase.

- Assim, se foi determinada a potência total fornecida ao transformador, deve-se dividi-la por três.

$$P_{0f} = \frac{P_T}{3} \quad (\text{por fase}) \quad 1.5.2$$

- Nas expressões, têm-se tensões e correntes, portanto, conforme o tipo de conexão, observar as grandezas por fase.

$$\text{Ex.: Y} \quad V_{0f} = \frac{V_N}{\sqrt{3}} \quad \text{e} \quad I_{0f} = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3}$$

$$\Delta \quad V_{0f} = V_N \quad \text{e} \quad I_{0f} = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3\sqrt{3}}$$

d) Cálculo de X_{ef} % e R_{ef} % :

A definição de um valor percentual por fase é dada por:

$$\text{Valor \% por fase} = \frac{\text{Valor real por fase}}{\text{Valor de base por fase}} 100\%$$

$$R_{ef} \% = \frac{R_{ef}}{Z_{Bf}} 100\% = R_{ef} \frac{N_{Bf}}{V_{Bf}^2} 100\%$$

$$R_{ef} = \frac{P_{ccf}}{I_{Nf}^2} = \frac{P_{ccf}}{3I_{Nf}^2}$$

$$R_{ef} \% = \frac{P_{cct}}{3I_{Nf}^2 \cdot V_{Bf}^2} N_{Bf} \cdot 100\% ,$$

$$R_{ef} \% = \frac{P_{cct}}{3^2 \cdot I_{Nf}^2 \cdot V_{Bf}^2} N_B \cdot 100\%$$

$$R_{ef} \% = \frac{P_{cct}}{N_B} 100\% \quad 1.5.3$$

Obs: Não interessa a ligação (tipo de conexão do transformador).

Reatância e impedância:

$$Z_{ef} \% = \frac{Z_{ef}}{Z_{Bf}} 100\% = \frac{V_{ccf}}{I_{Nf}} \cdot \frac{N_{Bf}}{V_{bf}^2} 100\%$$

$$Z_{ef} = \frac{V_{ccf}}{V_{Bf}} \cdot \frac{N_B}{3I_{Nf} \cdot V_{Nf}} 100\%$$

Para uma ligação Y $\rightarrow V_{ccf} = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}}$ e $V_{Bf} = \frac{V_B}{\sqrt{3}}$

$$Z_{ef} \% = \frac{V_{cc}}{V_B} 100\% \quad 1.5.4$$

Para uma ligação $\Delta \rightarrow V_{ccf} = V_{cc}$ e $V_{Bf} = V_B$

$$Z_{ef} \% = \frac{V_{cc}}{V_B} 100\% \quad 1.5.4$$

Obs: Não interessa a ligação.

$$X_{ef} = \sqrt{Z_e^2 \% - R_e^2 \%}$$

1.6 REGULAÇÃO DE TRANSFORMADOR

Definição:

$$RG\% = \frac{|V_{vazio}| - |V_{carga}|}{|V_{carga}|} 100\% \quad 1.6.1$$

Onde:

V_{carga} - Representa a tensão nos terminais do transformador quando este estiver em carga (V_N).

V_{vazio} - Representa a f.e.m do transformador quando este estiver em carga.

Na verdade a regulação mede a queda de tensão no transformador em valores percentuais do nominal.

A tensão a vazio é calculada aplicando-se L.K.T. à malha II da figura 1.6.1.

$$V_{vazio} = E_2 = V_2 + (R_{eq} + jX_{eq}) I_{N2} \cdot K_2 \quad 1.6.2$$

K_2 - representa o percentual de carga.

Trabalhando-se em p.u., tem-se:

$$V_{vazio\ pu} = 1 + (R_{e\ pu} + jX_{e\ pu}) K_2 \quad \varphi \quad 1.6.3$$

onde: φ - ângulo da corrente:

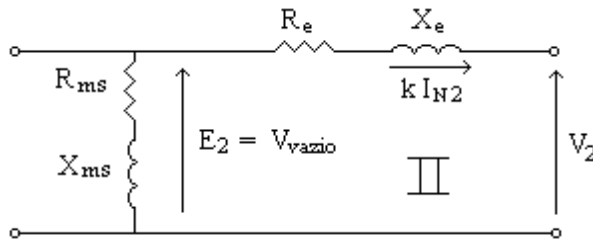


fig. 1.6.1

$$V_{vazio} = (1 + K \cdot R_e \cos \varphi) + jK_2(R_e \sin \varphi + X_e \cos \varphi)$$

Em condições normais, $\cos \varphi \cong 0,92$ indutivo.

1.7 RENDIMENTO DE TRANSFORMADOR

Definição:

$$\eta\% = \frac{Pot.saída}{Pot.entrada} 100\% = \frac{Ps}{Ps + Perdas} 100\% \quad 1.7.1$$

Considerando-se o modelo para o transformador, cujo ramo magnetizante é paralelo, obtém-se: (Ligação $\Delta - Y$)

$$\eta\% = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{N2} \cdot I_{N2} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot V_{N2} \cdot I_{N2} \cdot \cos \varphi + 3 \cdot V_{N1}^2 \cdot g_m + 3 \cdot R_e \cdot I_{N2}^2} 100\% \quad 1.7.2$$

O rendimento é usualmente calculado para vários valores da carga nominal (25 a 100%), ou seja, ($K_2 \cdot I_N$).

Substituindo-se $K_2 \cdot I_N$ em 1.7.2, resulta:

$$\eta\% = \frac{\sqrt{3} K_2 \cdot I_{N2} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} K_2 \cdot I_{N2} \cdot V_{N2} \cdot \cos \varphi + 3 \cdot V_{N1}^2 \cdot g_m + 3 R_e (K_2 \cdot I_{N2})^2} 100\% \quad 1.7.3$$

Dividindo-se e multiplicando-se a expressão 1.7.3 por N_B , tem-se:

$$\eta\% = \frac{K_2 \cdot \cos \varphi}{K_2 \cdot \cos \varphi + g_{m \text{ pu}} + R_{e \text{ pu}} \cdot K_2^2} 100\%$$

ou

$$\eta\% = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + \frac{g_{m \text{ pu}}}{K_2} + K_2 \cdot R_{e \text{ pu}}} 100\% \quad 1.7.4$$

Obs: Apesar da consideração que a demonstração foi para um transformador $\Delta - Y$, a expressão final é geral, ou seja, vale para qualquer ligação de transformador.

Observa-se que o rendimento depende da carga, do fator de potência e dos parâmetros do transformador:

De acordo com a eq. 1.7.4, pergunta-se: para que fator de carga (K_2) o rendimento será máximo?

Derivando-se a eq. 1.7.4 em relação a K_2 e, igualando-se a zero, obtém-se o valor de K_2 da seguinte forma:

$$\frac{d\eta_{pu}}{dK_2} = 0 \quad \text{Tomando-se} \quad \eta = \frac{\cos \phi}{D} = \cos \phi \cdot \frac{1}{D}$$

obtém-se:

$$\frac{d\left(\frac{1}{D}\right)}{dK_2} = 0 \rightarrow -1 \cdot \frac{dD}{dK_2} = 0$$

$$\frac{dD}{dK_2} = 0 \rightarrow \text{Re}_{pu} + \frac{d\left[\frac{gm_{pu}}{K_2}\right]}{dK_2} = 0$$

$$\text{Re}_{pu} - \left(\frac{gm_{pu}}{K_2^2}\right) = 0$$

$$\text{Re}_{pu} \cdot K_2^2 = gm_{pu}$$

$$K_2 = \sqrt{\frac{gm_{pu}}{\text{Re}_{pu}}}$$

Logo o rendimento máximo será:

$$\eta_{\max} = \frac{\cos \phi}{\cos \phi + 2\sqrt{gm_{pu} \cdot \text{Re}_{pu}}} \quad 7.6$$

Exemplo 4

Medidas feitas num transformador monofásico de 500[KVA], 2.300/230 [V], conduziram aos seguintes valores.

Ensaio a vazio
 $V_{02} = 230$ [V]
 $I_{02} = 108$ [A]
 $P_0 = 5.000$ [W]

Ensaio em curto
 $V_{cc1} = 13,75$ [V]
 $I_{cc1} = 217,39$ [A]
 $P_{cc} = 945,2$ [W]

Calcule:

- Os parâmetros do transformador em p.u. (na base do transformador).
- A regulação do transformador para a corrente nominal e f.p. unitário.

- c) Repita o item b com f.p. 0,8 em atraso.
d) Repita o item b com f.p. 0,8 em avanço.
e) Os rendimentos para os itens b, c e d, considerando também uma carga de 50%.

Obs: Para os itens b, c e d, traçar gráficos.

Solução:

a) Parâmetros de dispersão

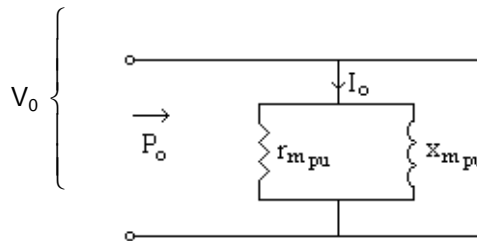
$$R_{e\ pu} = \frac{P_{cc}}{N_B} = \frac{945,2}{500 \cdot 10^3} \quad R_{e\ pu} = 0,0019\ pu$$

$$R_{e\ pu} \cong 0,002\ pu$$

$$Z_{e\ pu} = \frac{V_{1cc}}{V_1} = \frac{13,75}{2.300} \quad X_{e\ pu} = 0,0057\ pu$$

$$Z_{e\ pu} = 0,006\ pu$$

Parâmetros do ramo magnetizante para o modelo paralelo.



$$gm = \frac{1}{rm} = \frac{P_0}{V_0^2}$$

$$g_{m\ pu} = \left(\frac{P_0}{V_0^2} \right) \div YB \Rightarrow$$

$$\frac{P_0}{V_0^2} \div \frac{N_B}{V_0^2}$$

$$g_{m\ pu} = \frac{P_0}{N_B} = \frac{5.000}{500.000} = 0,01$$

$$r_{m\ pu} = 100\ pu$$

$$Z_{m\ pu} = \frac{V_0}{I_0} \div \frac{V_0^2}{N_B} = \frac{N_B}{V_0 \cdot I_0}$$

$$Z_{m\ pu} = \frac{500.000}{230 \times 108} \Rightarrow Z_{m\ pu} = 20,13\ pu$$

$$B_{m\ pu} = \frac{1}{X_{m\ pu}} = \sqrt{Y_{m\ pu}^2 - g_{m\ pu}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{20,13} \right)^2 - \left(\frac{1}{100} \right)^2}$$

$$X_{m\ pu} = 20,55\ pu$$

b) F.p. = 1,0 e, $I = I_N$

$$RG\% = \frac{|V_{vazio}| - |V_{carga}|}{|V_{carga}|} 100\%$$

Trabalhando-se em p.u., tem-se:

$$V_{carga\ pu} = \frac{|V_{carga}|}{V_N} \quad 0^\circ = 1\ pu$$

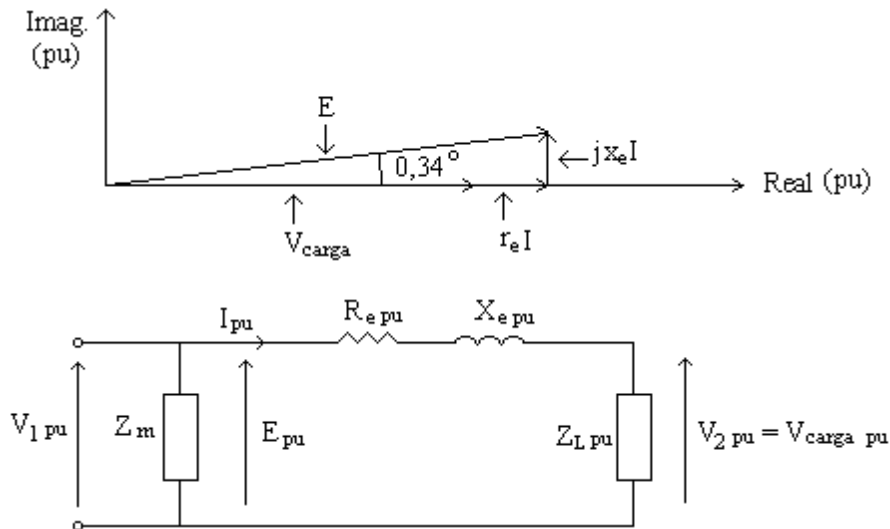
$$V_{vazio\ pu} = E_{pu} = V_{carga\ pu} + Z_{e\ pu} \cdot I_{N\ pu}$$

$$E_{pu} = 1 + (0,002 + j0,0057) \cdot 1 \quad 0^\circ$$

$$E_{pu} = 1,002 + j0,0057 = 1,00202 \quad 0,32^\circ \text{ pu}$$

Logo:

$$RG\% = (1,00202 - 1) \cdot 100\% \quad \Rightarrow \quad RG\% = 0,202\%$$



c) F.p. = 0,8 indutivo.

$$V_{carga\ pu} = 1,0 \quad 0^\circ$$

$I_{N\ pu} = |1| \quad -\varphi$, onde $\varphi = \cos^{-1}(0,8)$ corrente está atrasada em relação à tensão terminal.

$$\varphi = 36,87^\circ$$

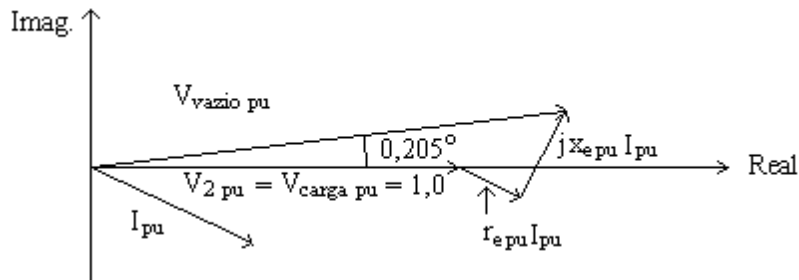
$$E_{pu} = V_{vazio\ pu} = 1 + (0,002 + j0,0057) \cdot 1 \quad -36,87^\circ$$

$$E_{pu} = 1 + 0,0016 + j0,0048 - j0,0012 + 0,0036$$

$$E_{pu} = 1,0052 + j0,0036 = 1,005206 \quad 0,205^\circ$$

$$RG\% = (1,005206 - 1) \cdot 100\%$$

$$RG\% = 0,52\%$$



d) F.p. = 0,8 capacitivo.

$$V_{carga pu} = 1,0 \quad 0^\circ \Rightarrow \text{referência}$$

$I_{pu} = |I_{N pu}| \quad \varphi \Rightarrow \varphi = \cos^{-1}(0,8)$ (corrente em avanço em relação à tensão)

$$\varphi = 36,87^\circ$$

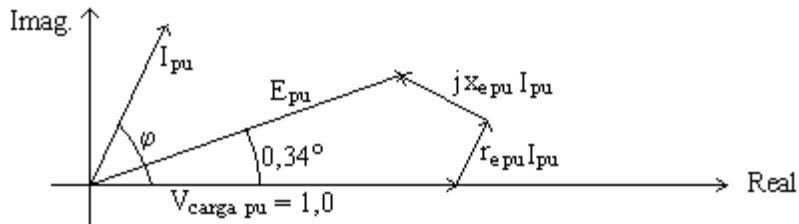
$$E_{pu} = V_{vazio pu} = 1 + (0,002 + j0,0057) \quad 36,87^\circ$$

$$E_{pu} = 1 + 0,0016 + j0,0048 + j0,0012 - 0,0036$$

$$E_{pu} = 0,998 + j0,006 = 0,99802 \quad 0,34^\circ$$

$$RG\% = (0,99802 - 1)100\%$$

$$RG\% = -0,198\% \Rightarrow \text{Regulação negativa.}$$



e) Rendimento.

$$\eta\% = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi + \frac{g_{m pu}}{K} + K \cdot r_{e pu}} 100\%$$

** F.p. = 1

K = 1

$$\eta\% = \frac{1}{1 + \frac{0,01}{1} + 1 \cdot 0,002} 100\% \quad \eta\% = 98,8\%$$

K = 0,5

$$\eta\% = \frac{1}{1 + \frac{0,01}{0,5} + 0,5 \cdot 0,002} 100\% \quad \eta\% = 97,94\%$$

** F.p. = 0,8 atrasado

K = 1

$$\eta\% = \frac{0,8}{0,8 + \frac{0,01}{1} + 1 \cdot 0,002} 100\% \quad \eta\% = 98,52\%$$

K = 0,5

$$\eta\% = \frac{0,8}{0,8 + \frac{0,01}{0,5} + 0,5 \cdot 0,002} 100\% \quad \eta\% = 97,44\%$$

** F.p. = 0,8 avançado.

K = 1

$$\eta\% = \frac{0,8}{0,8 + \frac{0,01}{1} + 1 \cdot 0,002} 100\% \quad \eta\% = 98,52\%$$

K = 0,5

$$\eta\% = \frac{0,8}{0,8 + \frac{0,01}{1} + 0,5 \cdot 0,002} 100\% \quad \eta\% = 97,44\%$$

Exemplo 5

Uma fábrica drena (consome) do secundário de uma bancada transformadora de distribuição de 60 [kVA], 2300/230 [V], ligada em Y-Δ uma corrente de 100 [A] com f.p. = 0,7 em atraso.

- a) A potência real consumida em [kW] (P_c) e a aparente em [kVA] (N_c).
 b) As correntes primária e secundária nominais de linha (I_{L1} e I_{L2}) e fase (I_{f1} e I_{f2}).

c) O percentual de carga para cada unidade transformadora (K%).

Solução:

a) P_c , N_c = ?

$$P_c = N_c \cdot \cos \phi = \sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi$$

$$P_c = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 100 \cdot 0,7 \quad \Rightarrow$$

$$P_c = 27,89 \text{ [kW]}$$

$$N_c = \frac{P_c}{\cos \phi} = \frac{27,89}{0,7} \quad \Rightarrow \quad N_c = 39,84 \text{ [kVA]}$$

b) I_{f2}, I_{L2}, I_{f1} e $I_{L1} = ?$

$$I_{L2} = 100 \text{ [A]}$$

$$I_{f2} = \frac{I_{L2}}{\sqrt{3}} \quad \Rightarrow \quad I_{f2} = 57,73 \text{ [A]}$$

$$I_{L1} = I_{f1} = \frac{N_c}{\sqrt{3} \cdot V_{L1}} = \frac{39,84 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2300} = 10 \text{ [A]}$$

c) $K\% = \frac{\text{Potência consumida / unidade}}{\text{Potência nominal / unidade}} 100\% \quad \Rightarrow$

$$K\% = 100\% \left[\frac{39,84}{3} \right] \div \left[\frac{60}{3} \right]$$

$$K\% = 66,4\%$$

1.8 POLARIDADE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

1.8.1 OBJETIVO:

a) Indicar quais são os terminais positivos e negativos em um determinado instante.

b) Verificar o ângulo de defasamento entre tensões primária e secundária.

1.8.2 APLICAÇÕES:

a) Ligação paralela de transformadores.

b) Ligações de transformadores de potencial (TP) e corrente (TC) nos circuitos de proteção e medição.

1.8.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A polaridade dos transformadores, depende fundamentalmente de como são enrolados as espiras do primário e secundário, que podem ter sentidos concordantes ou discordantes, conforme figura 1.8.1a e b.

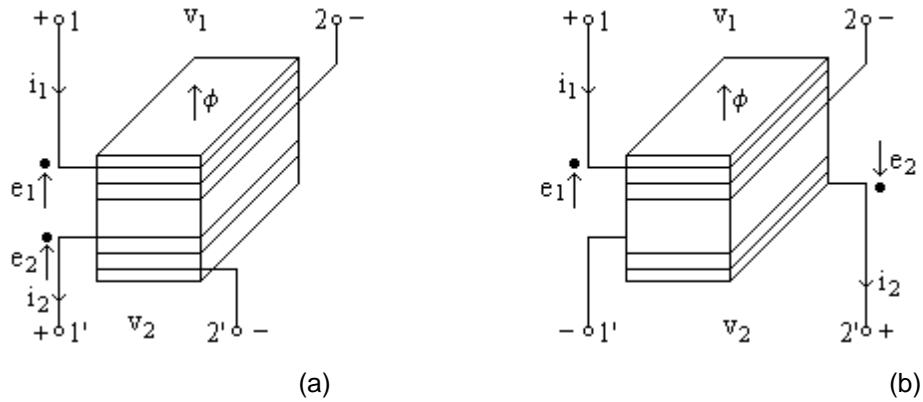


fig. 1.8.1

Curto-circuitando-se os terminais 1 e 1' e, colocando-se um voltímetro entre 2 e 2', verifica-se que as tensões induzidas (e_1 e e_2), irão subtrair-se (caso a) ou somar-se (caso b), originando-se daí a designação para os transformadores:

Caso a: Polaridade subtrativa (mesmo sentido dos enrolamentos).

Caso b: Polaridade aditiva (sentidos contrários dos enrolamentos).

1.8.4 MARCAÇÃO DOS TERMINAIS

A ABNT recomenda que os terminais de tensão superior sejam marcados com H_1 e H_2 e os de baixa tensão com X_1 e X_2 , de tal modo que os sentidos das f.e.m. momentâneas sejam sempre concordantes com respeito aos índices, conforme figuras 1.8.2 e 1.8.3.

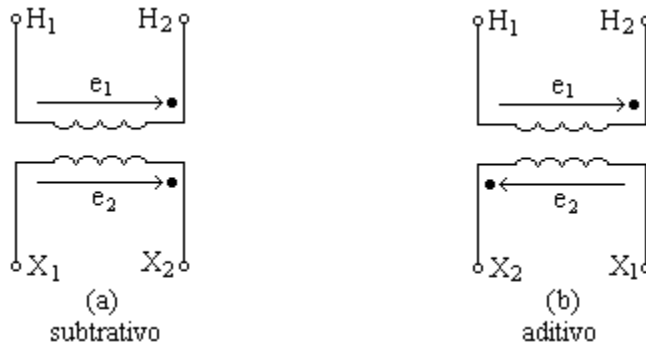


fig. 1.8.2

Outro modo para a marcação da polaridade.

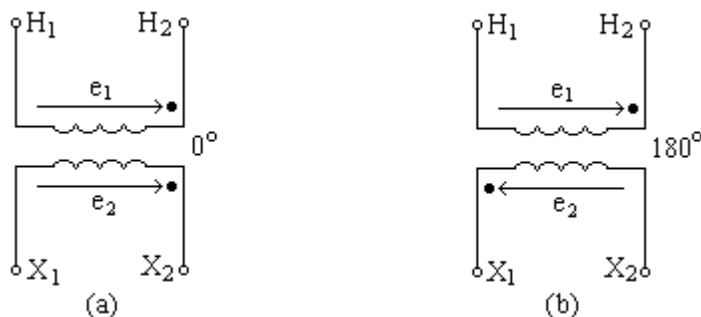


fig. 1.8.3

1.8.5 MÉTODOS DE ENSAIO

Segundo a ABNT, os métodos usados para a determinação da polaridade de transformadores monofásicos são:

- a) Golpe indutivo.
- b) Corrente alternada.
- c) Transformador padrão.

a) Golpe Indutivo.

Liga-se os terminais de tensão superior a uma fonte de corrente contínua. Instala-se um voltímetro entre esses terminais, de modo a obter-se uma deflexão positiva ao se ligar à fonte cc, estando a chave comutadora na posição 1. Em seguida, colocando-se a chave na posição 2, transfere-se cada terminal do voltímetro para a baixa tensão do transformador, conforme fig. 1.8.4.

Desliga-se, em seguida, a corrente de alimentação, observando-se o sentido de deflexão do voltímetro.

Quando as duas deflexões são em sentidos opostos, a polaridade é subtrativa; quando no mesmo sentido é aditiva.

Para TP's e TC's o método recomendado é o do golpe indutivo.

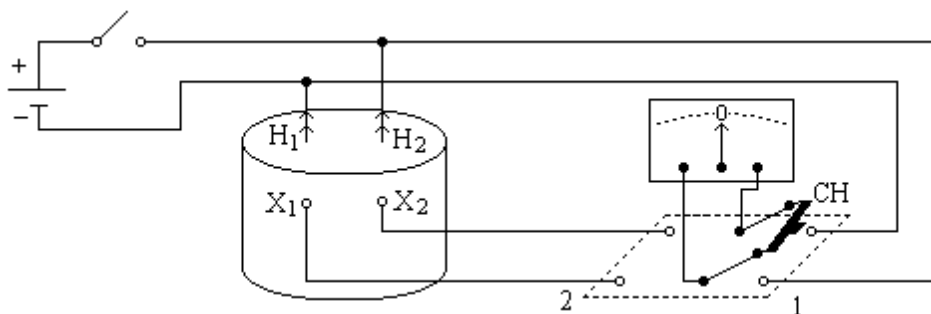


fig. 1.8.4

b) Método da corrente alternada.

Procedimento:

Aplica-se uma tensão alternada conveniente aos terminais de tensão superior. Lê-se as indicações de um voltímetro, ligado inicialmente entre os

terminais de tensão superior (chave na posição 1) e depois entre os terminais adjacentes (chave na posição 2), com terminais adjacentes curto-circuitados em H_1 conforme fig. 1.8.5.

Se a primeira leitura for maior que a segunda, a polaridade será subtrativa, caso contrário será aditiva.

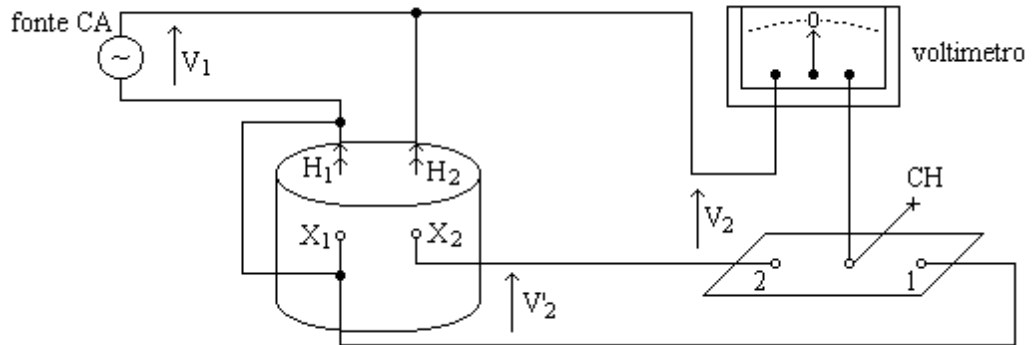


fig. 1.8.5

- a) $V_1 > V_2 \Rightarrow V_1 - V_2 > 0$ subtrativo.
 b) $V_1 < V_2 \Rightarrow V_1 - V_2 < 0$ aditivo.

c) Método do transformador padrão.

Este método consiste em comparar o transformador a ensaiar com um transformador padrão de polaridade conhecida, que tenha a mesma relação de espiras.

Procedimento:

Liga-se entre si na tensão inferior os terminais da esquerda de quem olha pelo lado da tensão inferior, ficando livre os da direita.

Aplica-se uma tensão reduzida aos terminais de maior tensão, que devem estar ligados em paralelo. Com isso definem-se H_1 e H_2 do segundo transformador e, mede-se a tensão no voltímetro conforme fig. 1.8.6. Se este valor for nulo, os transformadores terão a mesma polaridade.

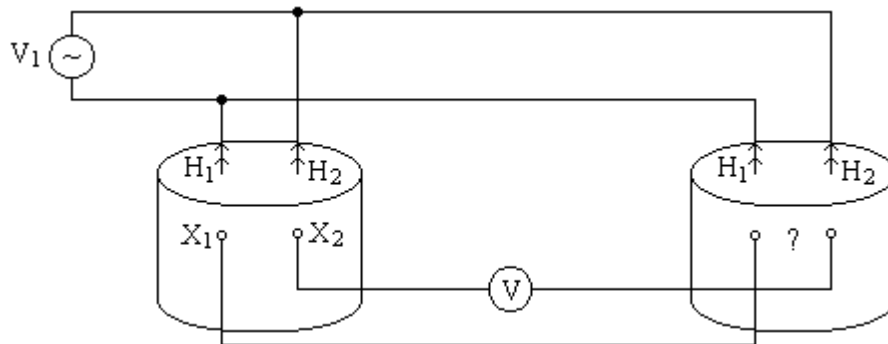


fig. 1.8.6

1.9 DESLOCAMENTO ANGULAR PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

É o ângulo medido de um sinal da baixa tensão para a um sinal da alta tensão no sentido anti-horário em um diagrama de tensões (tensões de linha).

Notação. D.A.Y.d. - Ângulo ou D.A.Y.d Hora

D. A. - Defasamento Angular

1.9.1 APLICAÇÕES

- Ligação paralela de transformadores.
- Alimentação de Pontos Conversores controlados, etc.

1.9.2 DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR

Quando se deseja ligar um transformador com outro em paralelo (trifásico ou monofásico), isso é feito ligando-se as fases 1, 2 e 3 de ambos respectivamente (tanto do lado de alta como no lado de baixa tensão).

Para transformadores monofásicos, conforme fig. 1.9.1 tem-se:

fig. 9.1

Se o segundo transformador apresentar polaridade invertida em relação ao primeiro, ocorrerá um curto-circuito na malha interna entre os dois transformadores do lado de baixa tensão (refletindo-se para o primário).

Para transformadores trifásicos não se pode afirmar que os ângulos entre os fasores das tensões de linha sejam 0° (subtrativo) ou 180° (aditivo) que é o caso para transformadores monofásicos, pois, além da polaridade propriamente dita, deverão ser levados em consideração os seguintes aspectos:

- a) Conexão $\Rightarrow \Delta, Y$, ou seja, zigue-zague (Z).
- b) Seqüência de fases $\Rightarrow ABC$ ou ACB .
- c) Número de espiras \Rightarrow transformador Z.

Os diagramas das fig. 1.9.2 a e b representam a seqüência positiva (direta) que será referência para as tensões em relação a todas as análises a posteriori.

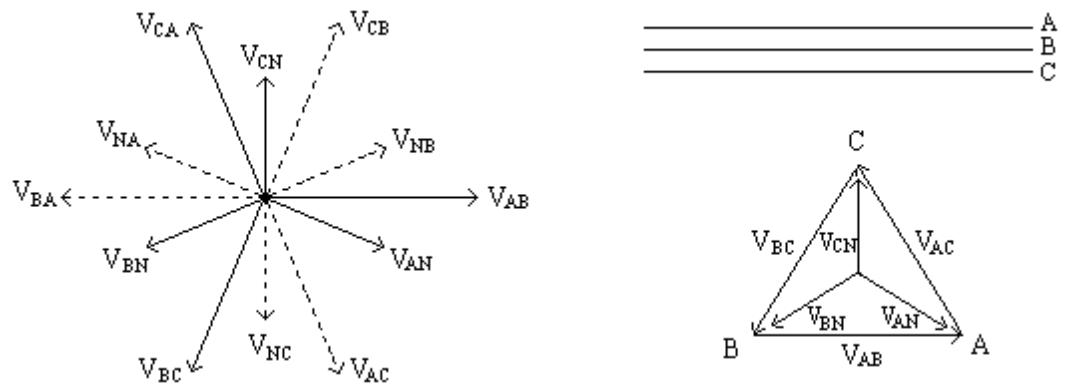


fig. 1.9.2

a) Influência da conexão no defasamento angular.

a.1. Conexão Δ .

Seja a fig. 1.9.3, onde se pode ver a mudança da conexão no primário do 2º transformador.

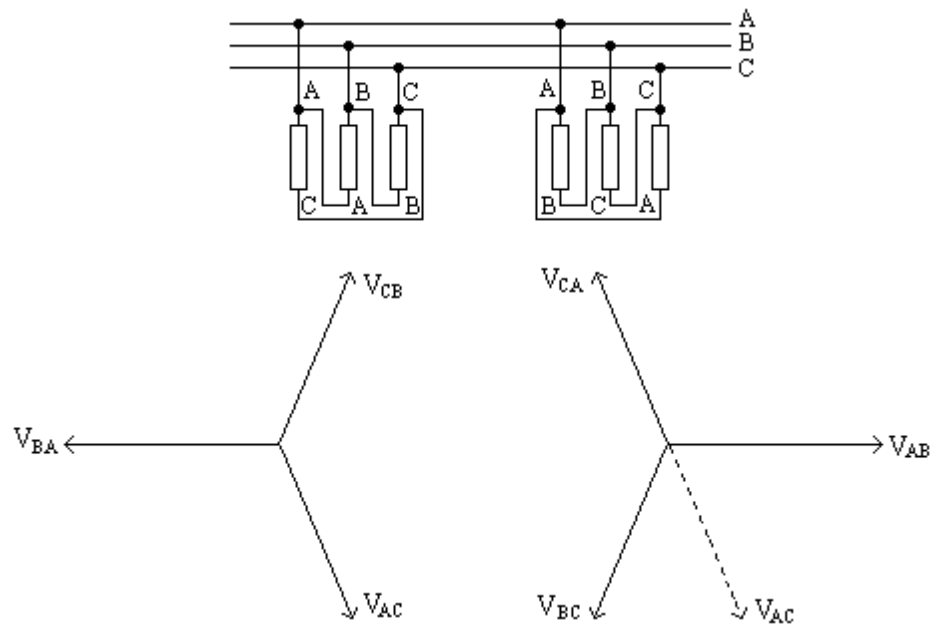


fig. 1.9.3

Observa-se que para esta mudança de conexão o defasamento angular das bobinas de um dos transformadores defasou-se de 60° em relação ao outro, como conseqüência, o secundário também defasará de 60° .

a.2. Conexão Y.

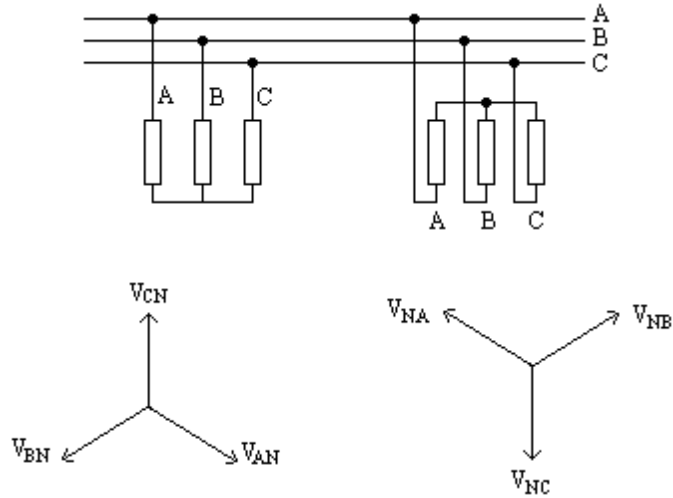


fig. 9.4

Neste caso observa-se que o defasamento foi de 180°.

a.3. Conexão zigue-zague (z).

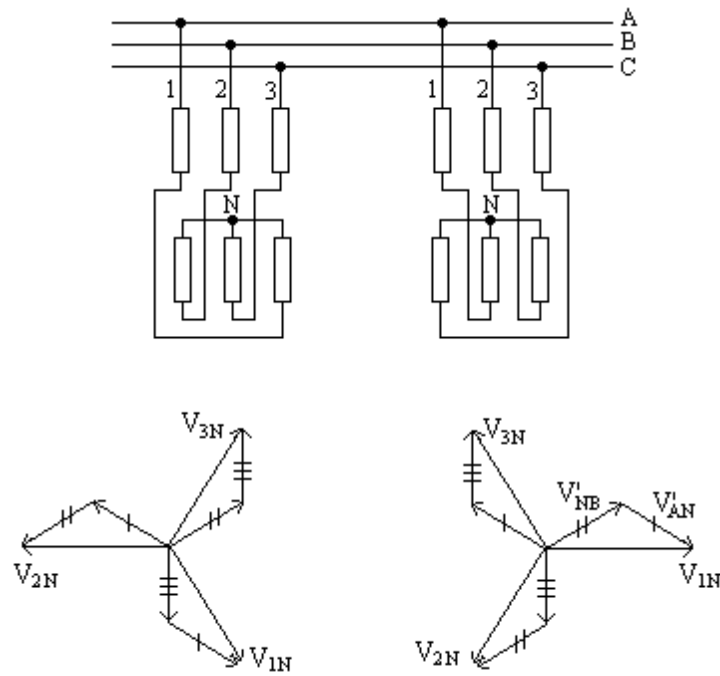


fig. 9.5

Houve um D.A. de 60°.

b) Influência da seqüência de fases no deslocamento angular.

b.1. Ligação "Δ".

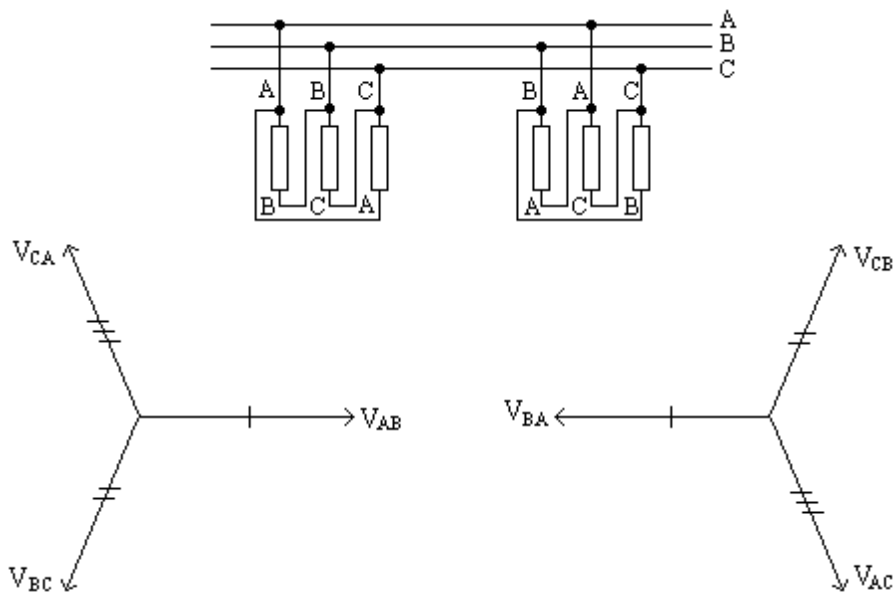


fig. 9.6

Observa-se que houve um defasamento de 180°.

1.9.3 MARCAÇÃO DOS TERMINAIS

Ficando-se um observador do lado de alta tensão, o primeiro isolador correspondente a uma fase à sua direita fica convencionado como sendo H1 e, sucessivamente tem-se H2 e H3. Do lado de baixa tensão o isolador adjacente a H1 fica denominado como sendo X1, e na seqüência, tem-se sucessivamente X2 e X3, conforme fig.9.7.

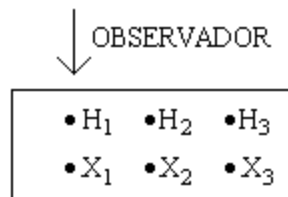


fig. 9.7

1.9.4 DETERMINAÇÃO DO DEFASAMENTO ANGULAR

a) Transformador Δ -y (subtrativo)

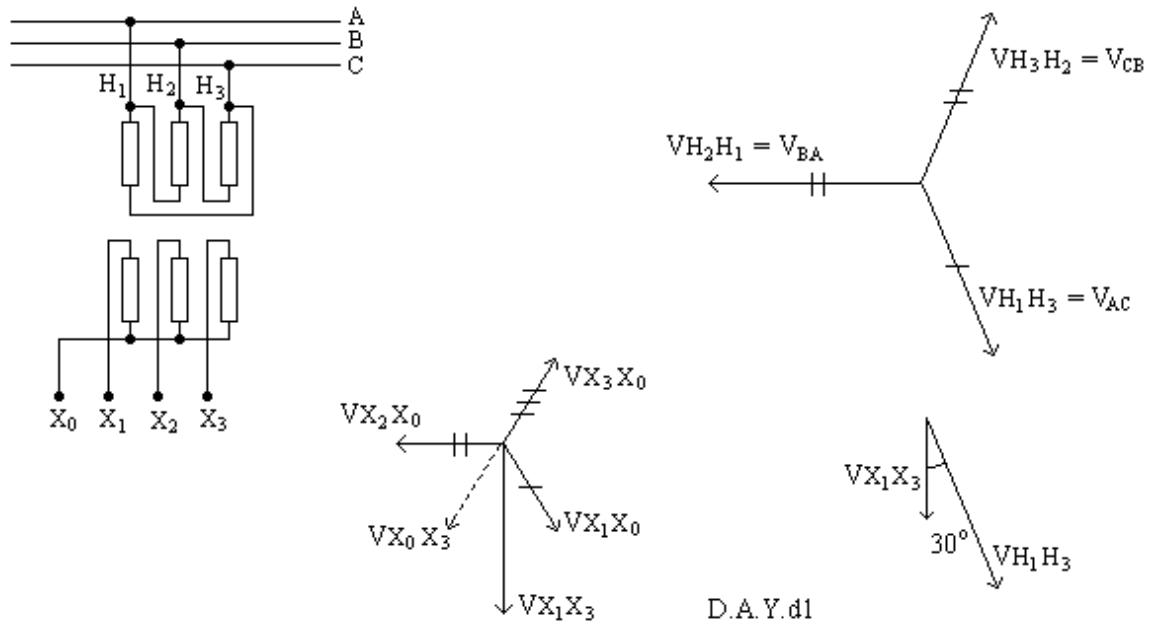


fig. 9.8

b) Transformador "Δ-z" (subtrativo)
com $N_1 > N_2 = N_3$

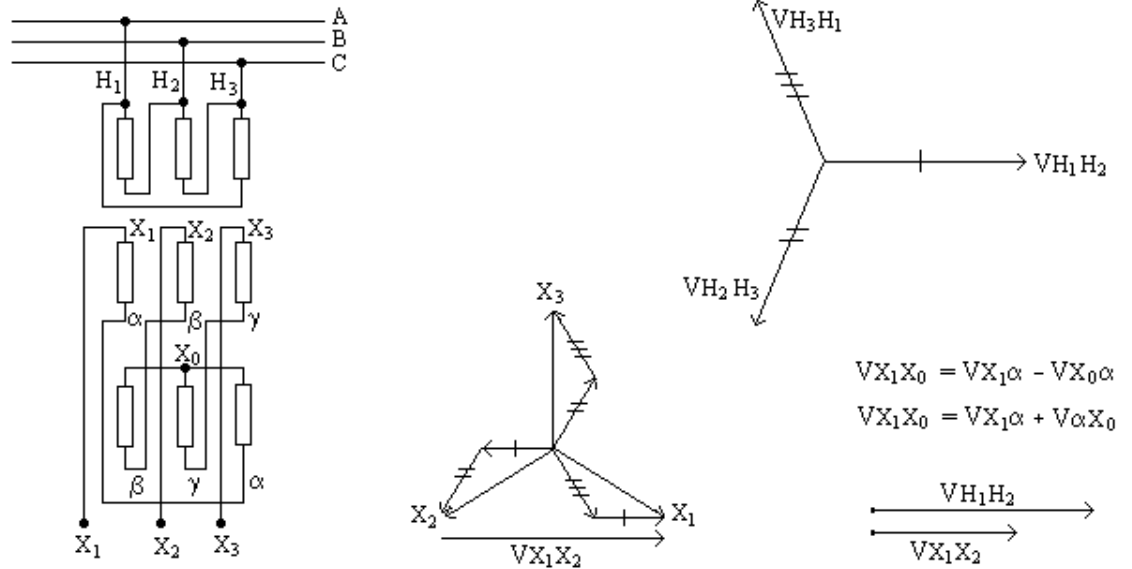


fig. 9.9

c) Transformador Y-z (subtrativo)
com $N_1 > N_2 = N_3$

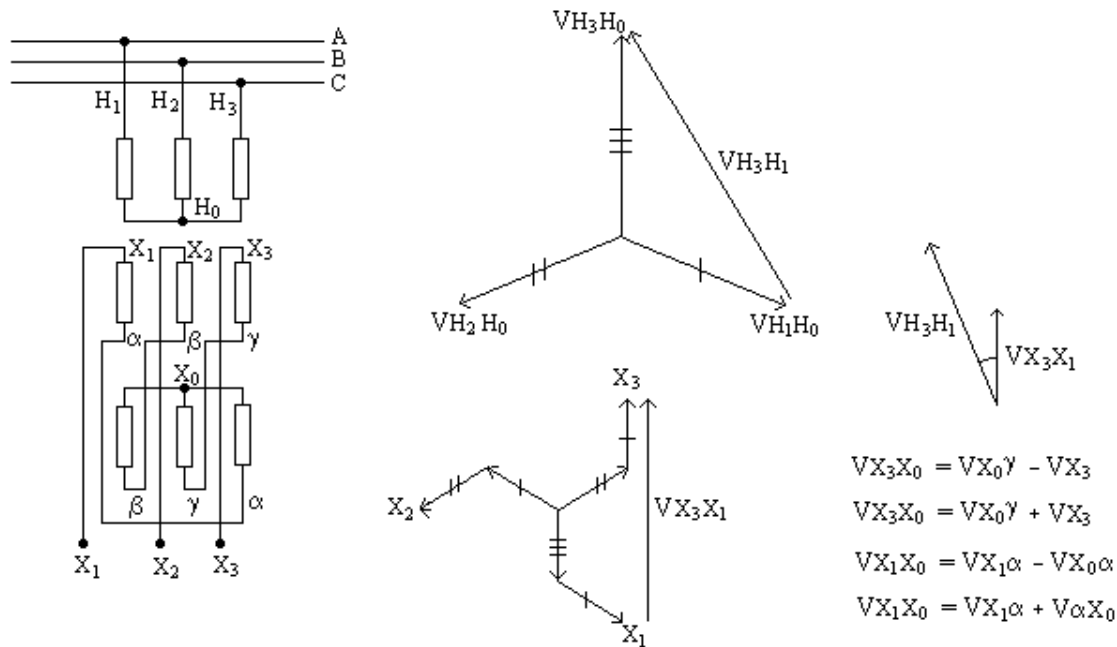


fig. 9.10

D.A.Y.Z 1
ou
D.A.Y.Z 30°

1.9.5 MÉTODOS DE ENSAIOS (D.A)

- Corrente Alternada
- Golpe Indutivo
- a) Corrente Alternada.

Procedimento

Ligam-se entre si os terminais H1 e X1 e alimentam-se através de uma tensão 3φ reduzida os terminais H1, H2 e H3. Medem-se as tensões de vários pares de terminais, tais como:

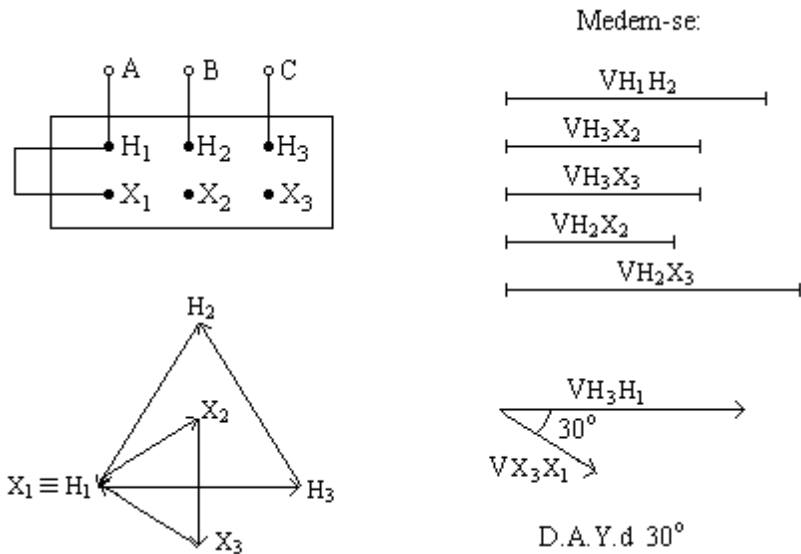
$V_{H_1 H_2}$, $V_{H_2 X_2}$, $V_{H_3 X_2}$, $V_{H_2 X_3}$ e $V_{H_3 X_3}$.

Em seguida traçam-se os diagramas das tensões superior e inferior de modo a obter o defasamento.

Exemplo 7

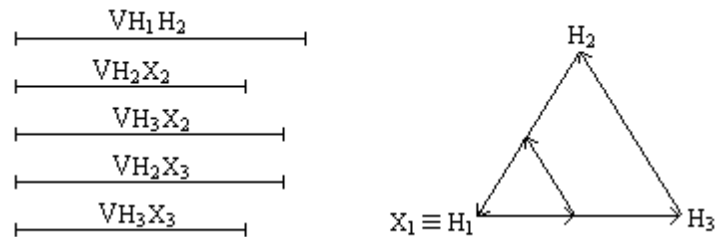
Seja um transformador Y-d subtrativo, determine o D.A.

Traça-se o Diagrama de acordo com os módulos das tensões em escala conveniente.



Exemplo 8

Seja um transformador Y-y subtrativo, determine o D.A.
Medem-se:



$$X_1 \equiv H_1 \xrightarrow{V_{X_3X_1}} \xrightarrow{V_{H_3H_1}} H_3$$

b) Golpe Indutivo

Equipamentos: Pilha e amperímetro para c.c. com zero central.
Preparação: Verificam-se as polaridades do amperímetro e

fonte.

Procedimento:

Liga-se a pilha na T.S., conforme fig. 9.11 e, liga-se também o amperímetro em três posições aos terminais de T.I., conforme figs. 9.12 (a) (b) e (c)

- 1a. posição: X1X2 (+ do instrumento em X1)
- 2a. posição: X1X3 (+ do instrumento em X1)
- 3a. posição: X2X3 (+ do instrumento em X2)

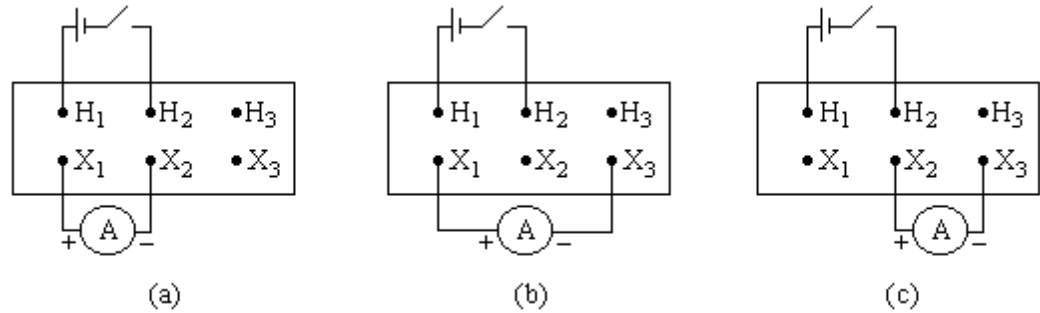


fig. 9.12

Fecha-se o interruptor na T.S., fazendo dessa forma H1(+) e H2(-) e, verificam-se para as três ligações da T.I. a polaridade dos terminais X1X2, X1X3 e X2X3.

Com este procedimento, ter-se-á respostas, conforme tabela 9.1.

X1	X2	X1	X3	X2	X3	D.A
+	-	+	-	-	+	0°
+	-	0	0	-	+	30°
-	+	-	+	+	-	180°
-	+	0	0	+	-	210°

tab. 9.1

1.9.6 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GOLPE INDUTIVO PARA DETERMINAÇÃO DO D.A.

a) Transformador "Δ-y" subtrativo.

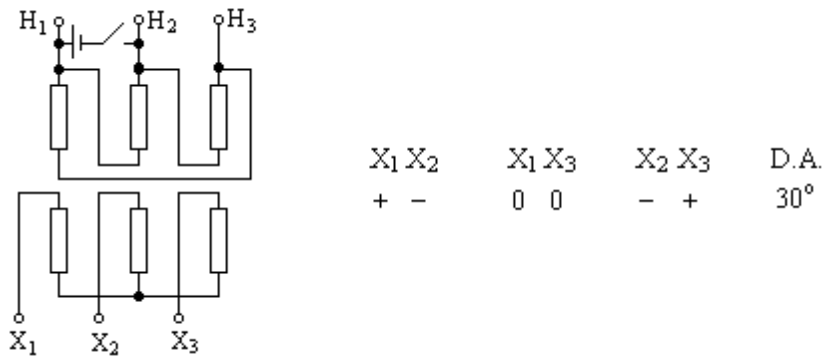


fig. 9.13

b) Transformador Y-Y subtrativo.

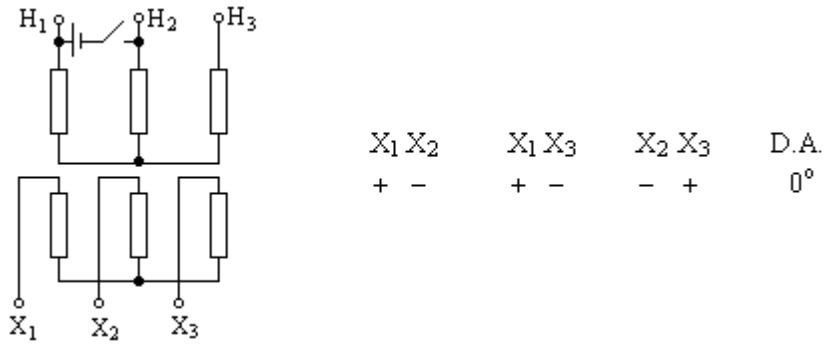


fig. 9.14

c) Inversão da conexão Y-Y subtrativo.

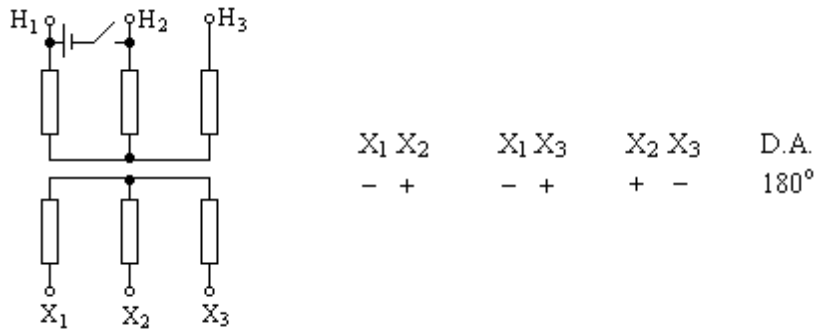


fig. 9.15

d) Transformador Y-z subtrativo.

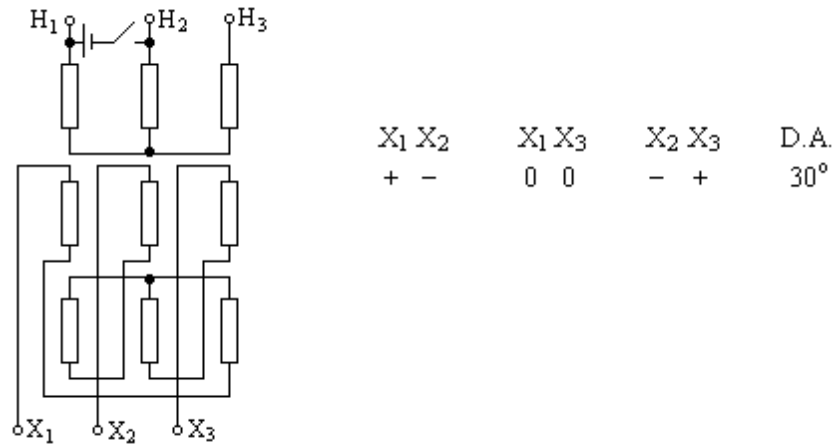


fig. 9.16

1.10 RIGIDEZ DIELETRICA DE ÓLEOS ISOLANTES

1.10.1 Introdução.

Todos transformadores de potência acima de 20 KVA e tensão acima de 6 KV, são construídos de maneira a trabalhar imersos em óleos isolantes.

Objetivos:

- Garantir um perfeito isolamento entre os componentes.
- Dissipar para o exterior o calor proveniente do efeito Joule nos enrolamentos e núcleo.

Classificação dos óleos:

* Animal e Vegetal - Mudam facilmente suas composições químicas e alteram suas propriedades físicas.

* Mineral.

* Sintético - Tendência em se polimerizar, alterando suas propriedades físicas.

Assim, os óleos usados em transformadores correspondem aos minerais, que são obtidos da refinação do petróleo.

Para que esse óleo apresente as propriedades de isolamento e transporte de calor, deverá ser testado segundo os seguintes aspectos.

a) Comportamento químico:

O óleo deve ser analisado em situações as mais parecidas possíveis com as de trabalho, nestas condições deve-se analisar o comportamento químico em relação às condições externas tais como:

- Aquecimento
- Oxidação
- Envelhecimento

} fatores que afetam suas
propriedades isolantes

b) Ponto de Inflamação e ponto de Combustão.

Aquecendo-se o óleo até uma determinada temperatura, ele se inflama em presença de uma chama. Este é o ponto de inflamação. Se a temperatura for elevada até outro valor determinado, o óleo se inflamará espontaneamente em presença do ar. Este é o ponto de combustão.

c) Viscosidade

É um teste importante, pois da viscosidade depende a capacidade de circulação do óleo, dentro do transformador, para seu resfriamento.

d) Perdas por evaporação:

Visa determinar o quanto de óleo escapará do transformador em forma de gás, devido a seu aquecimento. A quantidade perdida deve ser nula ou a menor possível.

e) Rigidez dielétrica:

É o ensaio mais importante a se realizar e será analisado detalhadamente nos desenvolvimentos que se seguirão.

Os testes referidos anteriormente devem ser feitos periodicamente nos transformadores em uso.

Vale dizer que, sob efeito de oxidação, retenção de umidade, elevadas temperaturas, etc., o óleo vai perdendo suas qualidades isolantes.

Geralmente, formam-se produtos lamacentos escuros, conhecidos por lama, que alteram as propriedades do óleo. Neste estado o óleo já está deteriorado e, deve ser recuperado ou substituído.

A retenção da umidade é evitada usando-se sílica-gel nos respiradouros (válvulas destinadas a avaliar a pressão interna devido ao aquecimento do óleo). A sílica-gel é uma substância higroscópica, que retira umidade do ar. Quando em estado normal, apresenta uma coloração azul claro, no entanto, quando se satura, sua coloração sofre mudança, passando então a rosa.

f) Controle de acidez:

Para os óleos isolantes introduz-se uma nova grandeza com o objetivo de expressar sua acidez. Esta será a cifra de neutralização, cujo valor variará de zero a 1. Considera-se um índice normal de acidez o que apresenta com valor igual a 0,4.

A cifra de neutralização pode ser reduzida por filtros que empreguem a terra fúler, argila ativada ou alumina ativada (tratamento a quente).

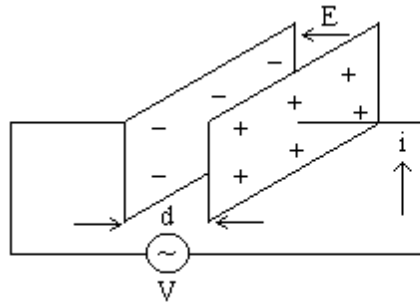
A tabela 10.1 fornece alguns elementos relacionados ao controle de acidez

Código	CIFRA DE NEUTRALIZAÇÃO	INTERPRETAÇÃO	OBSERVAÇÃO
4	Até 0,05	Novo	Óleo sem uso.
5	De 0,05 a 0,25	Bom	Óleo usado, não necessita tratar.
6	De 0,25 a 0,40	Duvidoso	Improvável formação de lama.
7	De 0,40 a 0,70	Precário	Início de formação de lama. Tratar ou trocar.
8	Acima de 0,7	Perigoso	Trocar.

tab. 10.1

1.10.2 ENSAIO DE RIGIDEZ DIELETRICA

Conhecendo-se a tensão entre duas placas e também a distância entre elas (que deve ser pequena), o campo elétrico pode ser suposto uniforme e dado por.



$$E = \frac{V}{d} \rightarrow \text{cte}$$

$$\downarrow$$

$$V \uparrow \Rightarrow E \uparrow$$

fig. 10.1

Conservando-se a distância d constante e aumentando-se o valor de V , o campo cresce. Para um determinado valor de tensão, se o campo elétrico for suficientemente grande para romper o dielétrico entre as placas, então uma descarga no dielétrico se manifestará. Esse valor do campo elétrico é denominado rigidez dielétrica.

O valor de V , que proporciona rompimento do dielétrico, é chamado de tensão de ruptura. O valor do campo necessário para a ruptura é tabelado de acordo com o dielétrico entre as placas, com uma máxima tensão entre as placas por unidade de comprimento. Na verdade este valor nunca deve ser

atingido na prática, trabalhando-se sempre, para segurança, numa faixa bem menor.

Efetuando-se o teste, usando-se óleo entre as placas, pode-se determinar o quanto de tensão o mesmo suporta por unidade de comprimento. O resultado obtido é comparado com os valores tabelados por norma e, determina-se, então, se o óleo servirá ou não para uso em transformadores.

Os valores tabelados a seguir são válidos para temperatura do óleo situadas entre 25°C e 35°C. A tabela foi também elaborada para óleos minerais.

Os valores constantes na tabela 10.2, são referidos a uma distância de 2,54 mm ou 0,1 pol entre os eletrodos.

Acima de 30 KV	Excelente
Abaixo de 30 KV	Rejeitado (necessita ser filtrado ou tratado urgentemente)

tab. 10.2

1.11 AUTOTRANSFORMADORES

1.11.1 INTRODUÇÃO

Denomina-se autotransformador um transformador cujos enrolamentos primário e secundário estão conectados em série. Dentro deste princípio, a ABNT define o autotransformador como sendo o transformador no qual parte do enrolamento é comum a ambos os circuitos (primário e secundário) a ele ligados.

Vantagens:

- 1) Corrente de excitação menor;
- 2) Melhor regulação;
- 3) Menor custo;
- 4) Maior rendimento;
- 5) Menores dimensões.

Desvantagens:

- 1) Corrente de curto-circuito mais elevada;
- 2) Existência de conexão elétrica entre os enrolamentos de maior e menor tensão.

Obs.: Os ensaios realizados nos autotransformadores são os mesmos executados nos transformadores normais.

1.11.2 REPRESENTAÇÃO

A figura 11.1 mostra esquematicamente, um transformador monofásico convencional no qual é aplicada uma tensão V1. A tensão V2 relaciona-se a V1 pela expressão aproximada.

$$\frac{V1}{V2} \cong \frac{N1}{N2}$$

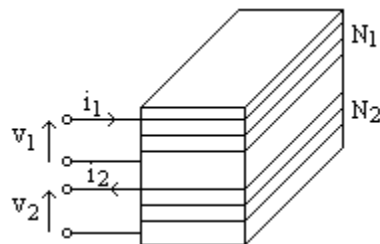
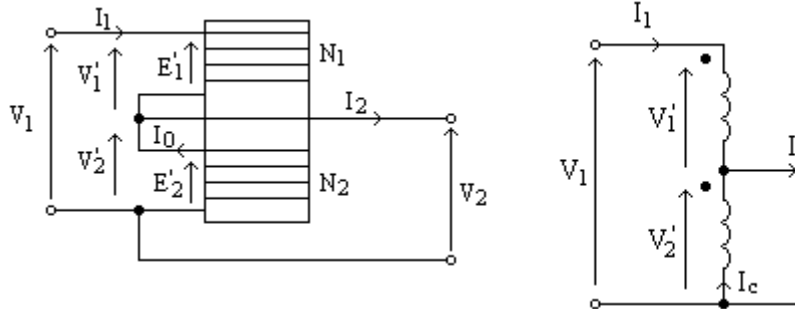


fig. 11.1

A fig. 11.2 ilustra o arranjo de um autotransformador, onde é admitido que o mesmo apresenta enrolamentos subtrativos.

Define-se: $N'1 = N1 + N2$

11.1



1.11.3 RELAÇÕES DE TENSÕES E CORRENTES

As tensões $E'1$ (f.c.e.m.) e $E'2$ (f.e.m.) induzidas nos enrolamentos ($4,44.f.N\phi_{max}$), estão em fase. Da mesma forma $V'1$ e $V'2$, estão em fase (para fins práticos).

Pode-se dizer que a expressão:

$$V1 = V'1 + V'2, \quad 11.2$$

pode ser tomada como uma expressão algébrica, ou seja:

$$\frac{V'1}{V'2} \cong \frac{N1}{N2} \quad 11.3$$

Substituindo-se 11.3 em 11.2, obtém-se:

$$V1 = V'2 \cdot \frac{N1}{N2} + V'2$$

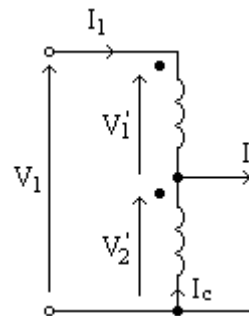
$$V1 = V'2 \left[1 + \frac{N1}{N2} \right]$$

$$V'2 = V2$$

$$V1 = \left(\frac{N1 + N2}{N2} \right) V2$$

$$\frac{V1}{V2} = \frac{N1 + N2}{N2}$$

11.4



A relação entre correntes, pode ser obtida de forma análoga (despreza-se a corrente de magnetização).

$$I_2 = I_1 + I_c \quad 11.5$$

$$\frac{I_c}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad 11.6$$

Substituindo-se 11.6 em 11.5, obtém-se:

$$I_2 = I_1 + I_1 \frac{N_1}{N_2} = I_1 \left[1 + \frac{N_1}{N_2} \right]$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} \quad \text{ou} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} \quad 11.7$$

1.11.4 POTÊNCIA NOMINAL E RENDIMENTO DO AUTOTRANSFORMADOR

a) Potência.

Os módulos das potências aparente de entrada (S_1) e saída (S_2) do autotransformador são dadas por:

$$S_1 = V_1 \cdot I_1$$

$$S_2 = V_2 \cdot I_2$$

No transformador convencional a potência é transmitida do primário para o secundário de forma eletromagnética (transformada). No autotransformador parte da potência é transmitida condutivamente e, o restante de forma eletromagnética (transformada).

Para demonstrar as duas potências transferidas pelo transformador, seja a configuração 11.4

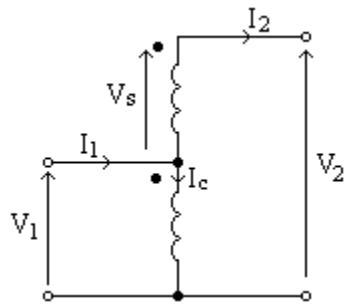


fig. 11.4

P_{TR} - Potência transformada,

Onde: P_C - Potência transmitida condutivamente.

P_T - Potência total.

$$P_{TR} = V_1 \cdot I_0 = I_2 \cdot V_s \quad 11.8$$

$$P_T = V_1 \cdot I_1 = V_1 [I_2 + I_c] \quad 11.9$$

$$P_T = P_C + P_{TR} \quad 11.10$$

Comparando-se as equações 11.8, 11.9 e 11.10, conclui-se que para o circuito da fig. 11.4, tem-se:

$$P_{TR} =$$

b) Rendimento.

Para fins de comparação, seja um transformador monofásico, que tenha a potência nominal dada por:

$$S_{TM} = V_1 \cdot I_1, \text{ conforme fig. 11.5.}$$

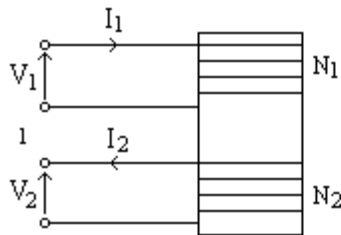


fig. 11.5

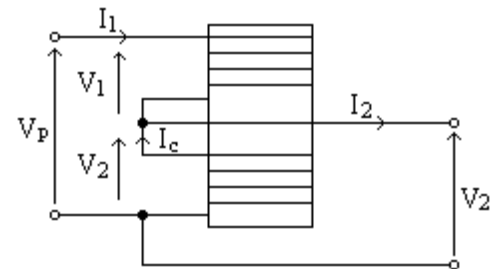


fig. 11.6

A potência total do autotransformador é dada por:

$$S_{TA} = V_P \cdot I_1, \text{ conforme fig. 11.6, ou ainda:}$$

$$S_{TA} = (V_1 + V_2) I_1 = V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_1$$

Comparando-se as duas potências, tem-se:

$$\frac{S_{TA}}{S_{TM}} = \frac{V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_1}{V_1 \cdot I_1} = \frac{V_1 + V_2}{V_1}$$

$$\frac{S_{TA}}{S_{TM}} = \left[1 + \frac{N_2}{N_1} \right] \quad 11.11$$

A equação 11.11 mostra que, qualquer que seja a relação de espiras de um transformador normal, sendo ele convertido em um autotransformador, a potência disponível neste último é maior, levando-o a ter um tamanho menor que um transformador normal de potência equivalente. Isso vale dizer que, em princípio, o custo por KVA de um autotransformador é menor que o do transformador normal.

Cabe notar ainda, com base na fig. 11.6, que o circuito série do autotransformador (primário do transformador convencional) deve ter um isolamento previsto para uma tensão $V_1 + V_2$. Por outro lado, a corrente no enrolamento comum do autotransformador é dada por $I_1 - I_2$, o que permite a

possibilidade de ter neste enrolamento condutores de bitola menor que a do transformador normal.

Assim um balanço entre dimensões, isolamento e cobre, permite concluir que um autotransformador tem seu preço inferior a um transformador normal com potência equivalente.

O rendimento do autotransformador é definido de maneira semelhante ao transformador normal.

$$\eta = \frac{P_{\text{Saída}}}{P_{\text{Entrada}}}$$

Com base nos desenvolvimentos anteriores, pode-se concluir que o autotransformador apresenta rendimento maior que o transformador normal.

1.11.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DO AUTOTRANSFORMADOR

O circuito equivalente do autotransformador é obtido de forma semelhante ao transformador convencional. Os parâmetros deste circuito são determinados pelos ensaios a vazio e em curto-circuito.

Com o ensaio a vazio determina-se as perdas no núcleo e, desse ensaio pode-se calcular os parâmetros r_m e X_m .

A representação do autotransformador é indicada na fig. 11.7. Notar que o ensaio é realizado pelo lado da tensão inferior.

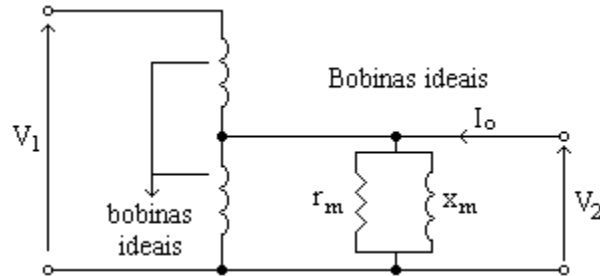


fig. 11.7

Para se obter a impedância de dispersão, realiza-se o ensaio em curto-circuito.

Na fig. 11.8 as impedâncias de dispersão dos circuitos série e comum são conectadas em série com as respectivas bobinas ideais e, assim, as bobinas representadas naquela figura serão responsáveis pela relação de transformação.

Por outro lado, é interessante referir as impedâncias ao primário ou secundário. Por conveniência, referir-se-à, como é costume, ao lado 1.

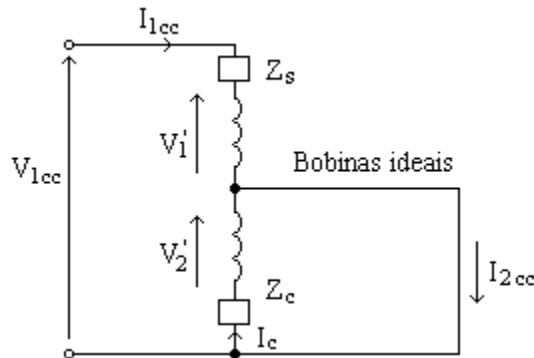


fig. 11.8

Da fig. 11.8 pode-se escrever:

$$\frac{V_1'}{V_2'} = \frac{N_1}{N_2} \quad 11.12$$

$$V_2' = Z_c \cdot I_c \quad 11.13$$

e

$$I_c + I_{1cc} = I_{2cc} \quad 11.13$$

Substituindo-se 11.14 em 11.13, tem-se:

$$V_2' = Z_c [I_{2cc} - I_{1cc}] = Z_c \left[\frac{I_{2cc}}{I_{1cc}} - 1 \right] I_{1cc},$$

mas, $\frac{I_{2cc}}{I_{1cc}} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$, logo:

$$V_2' = Z_c \left[\frac{N_1 + N_2}{N_2} - 1 \right] I_{1cc} = \frac{Z_c}{N_2} [N_1 + N_2 - N_2] I_{1cc}$$

$$V_2' = Z_c \frac{N_1}{N_2} I_{1cc} \quad 11.15$$

Por outro lado, pode-se escrever ainda que:

$$V_{1cc} = V_1' + Z_c I_{1cc} \quad 11.16$$

fica:

Com o auxílio das equações 11.12 e 11.15, a equação 11.16

$$V_{1cc} = Z_c \frac{N_1}{N_2} \cdot I_{1cc} \frac{N_1}{N_2} + Z_c \cdot I_{1cc}$$

$$\frac{V_{1cc}}{I_{1cc}} = Z_e + Z_c \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = Z_{l2} \quad 11.17$$

$Z_{l2} \rightarrow$ Impedância referida ao lado 1.

O circuito equivalente completo do autotransformador será o indicado na fig. 11.9.

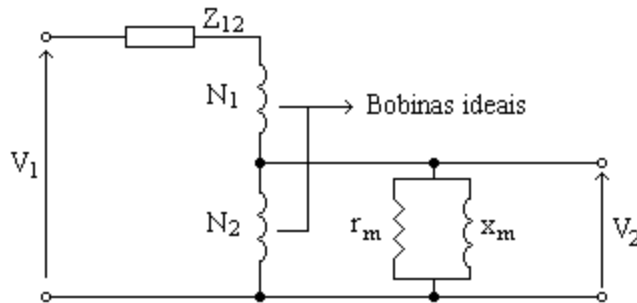


fig. 11.9

1.11.6 AUTOTRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Os autotransformadores trifásicos são geralmente conectados em estrela-estrela, porém existem outros tipos de conexões, como mostram as figuras 11.10, 11.11, 11.12 e 11.13. Por vezes, o autotransformador pode apresentar um enrolamento terciário com uma potência da ordem de 35% da

maior das potências entre a dos enrolamentos série ou comum. O enrolamento terciário é inoperante sob condições equilibradas e serve para reduzir o nível de harmônicos produzidos pelo transformador.

a) Autotransformador "Y-Y".

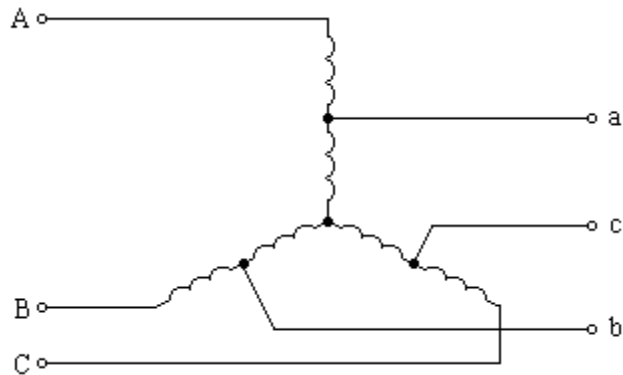


fig. 11.10

b) Autotransformador "Δ".

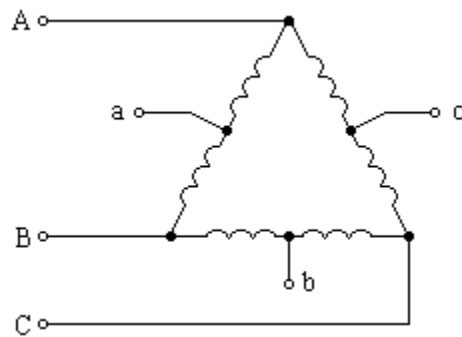


fig. 11.11

c) Autotransformador zigue-zague-estrela.

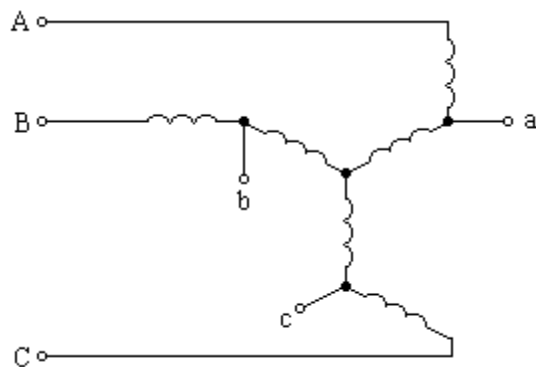


fig. 11.12

d) Autotransformador estrela-estrela com terciário em triângulo.

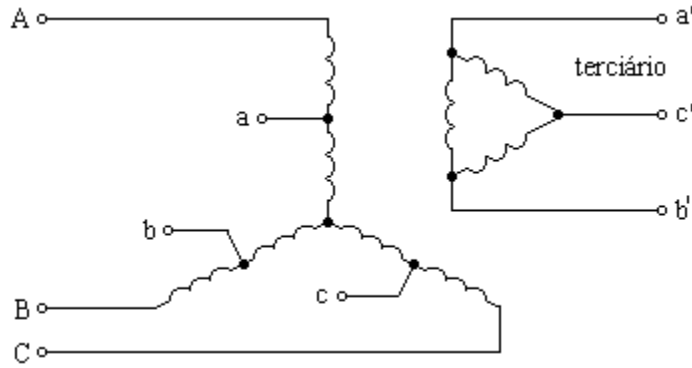
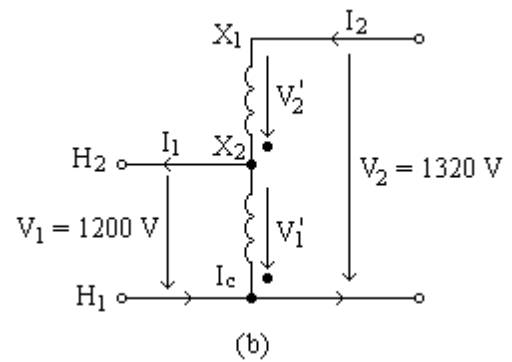
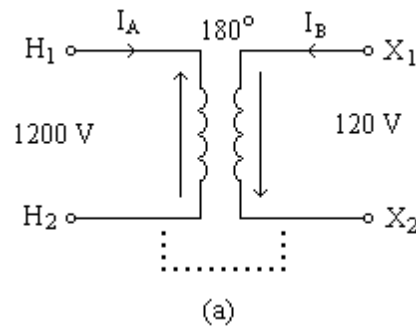


fig. 11.13

Exemplo 8

Para um transformador isolado de 10 KVA 1200/120 V, mostrado na fig. (a), ligado como autotransformador, com polaridade aditiva, conforme fig. (b). Calcule:

- A capacidade original dos enrolamentos de alta e baixa tensão;
- A capacidade do autotransformador, usando a capacidade do enrolamento de 120 V;
- O acréscimo percentual da capacidade do autotransformador em relação ao transformador isolado;
- I_1 e I_c na fig. (b), a partir de I_2 ;
- Os KVA's transferidos condutivamente e os transformados.



Solução:

a) I_A e I_B ?

$$I_A = \frac{N_2}{N_1} 83,3 = \frac{83,3}{10} \Rightarrow$$

$$I_B =$$

$$I_B = \frac{KVA}{V_B}$$

$$I_A = 8$$

b) O enrolamento de 120 é capaz de conduzir 83,3[A]

$$S_{TA} = \text{capacidade} = V_2 \cdot I_2 = 1320 \cdot 83,3$$

$$S_{TA} = \text{capacidade} = V_2 \cdot I_2 = 1320 \cdot 83,3$$

c) Acréscimo percentual (AP%).

$$AP\% = \frac{S_{TA}}{S_T} 100\% = \frac{110}{10} 100\%$$

$$AP\%$$

d) I_1 e I_c ?

$$I_c = I_1 - I_2 \Rightarrow I_1 = \frac{S_{TA}}{V_1} = \frac{110 \cdot 10^3}{1200}$$

$$I_1 = 91,66$$

$$I_c = 8$$

$$I_c = 91,66 - 83,3 = 8,36$$

e) S_{TR} e S_C ?

$$S_{TR} = I_2 \cdot V_2' = I_c V_1' = 83,3 \times 120 = 10 \text{KVA}$$

$$S_C = S_T - S_{TR} = 110 - 10 = 100 \text{KVA}$$

Pode-se calcular S_C , também através de:

$$S_C = V_1 \cdot I_1 - I_2 \cdot V_2' = V_1 I_1 - I_2 \frac{N_2}{N_1} V_1$$

$$S_C = V_1 \left[I_1 - \frac{I_2 \cdot N_2}{N_1} \right] \Rightarrow$$

$$S_C = V_1 I_1 - I_c V_1' = V_1 [I_1 - I_c] = V_1 I_2$$

$$S_C = 1200 \times 83,3 = 100 \text{kVA}$$

1.12 OPERAÇÕES EM PARALELO

1.12.1 INTRODUÇÃO

A operação em paralelo de transformadores é de grande importância quer seja para aumento da potência transmitida, quer seja para melhoria da confiabilidade de sistemas.

Para adequada operação em paralelo os transformadores devem atender certos requisitos básicos, listados a seguir.

1.12.2 CONDIÇÕES PARA OPERAÇÃO EM PARALELO

a) Condições Fundamentais:

1. Mesma relação de transformação;
2. Polaridade ou defasamento angular conveniente.

b) Condições de otimização:

1. Mesma impedância percentual;
2. Mesma relação entre resistência e reatância

a) Condições Fundamentais:

1. Mesma relação de transformação.

Sendo a tensão de alimentação a mesma, deve-se impor a condição de que os transformadores tenham a mesma relação de transformação, para que as tensões secundárias sejam as mesmas, conforme fig. . 12.1.

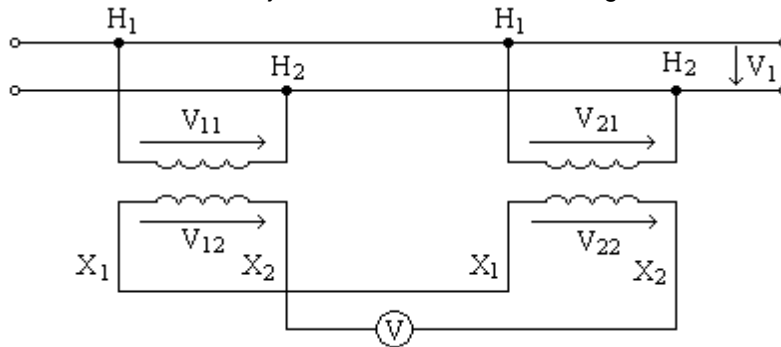


fig. 12.1

Admita-se que:

$$\frac{V_{11}}{V_{12}} \neq \frac{V_{21}}{V_{22}}$$

como:

$$V_{11} = V_{21} = V_1, \text{ vem}$$

$$V_{12} \neq V_{22}$$

Admita-se ainda que $V_{12} > V_{22}$, então o voltímetro indicará uma tensão resultante dada por:

$$V_R = V_{12} - V_{22} \tag{12.1}$$

Essa tensão resultante fará fluir pelos transformadores uma corrente, chamada de circulação (I_c). Essa corrente indesejável, provoca aquecimento adicional, que é prejudicial aos transformadores.

O valor de I_c pode ser obtido do circuito da fig. 12.2

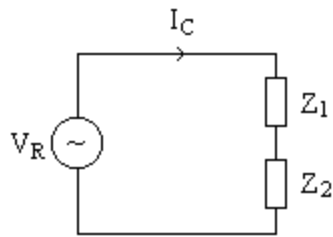


fig. 12.2

$$I_C = \frac{V_R}{Z_1 + Z_2} \quad 12.2$$

Exemplo 9

Para $Z_1\% = Z_2\% = 5\%$; $V_{12} = V_{2N}$ e $V_{22} = 0,9.V_{2N}$

Calcule a corrente de circulação

- Cálculo de V_R .

Da eq. 3.21.1, tem-se:

$$V_R = V_{12} - V_{22} = V_{2N} - 0,9 V_{2N}$$

$$V_R = 0,1 V_{2N}$$

- Cálculo de I_C .

Da eq. 3.12.2, tem-se:

$$I_C = \frac{V_R}{|Z_1| + |Z_2|} \quad (\text{Supondo-se que } Z_1 \text{ e } Z_2 \text{ estivessem}$$

em concordância)

$$I_C = \frac{0,1}{0,05 + 0,05} \rightarrow I_C = 1 \text{ pu}$$

Esse resultado mostra que para uma diferença de 10% entre as tensões, com impedâncias de 5%, circulará a corrente nominal entre os transformadores, estando os mesmos a vazio.

Portanto o ideal é que I_C seja nula, para tanto V_R deve ser nula.

Logo a relação:

$$\frac{V_{11}}{V_{12}} = \frac{V_{21}}{V_{22}} \quad \text{deverá ser verdadeira.}$$

Obs.: Admite-se na prática uma diferença de até 0,5% entre V_{12} e V_{22} .

2. Polaridade ou defasamento angular conveniente.

Pelo exposto anteriormente é importante que I_C seja nula, porém somente $V_{12} = V_{22}$ não assegura que $V_R = 0$. Seja a fig. 12.3.

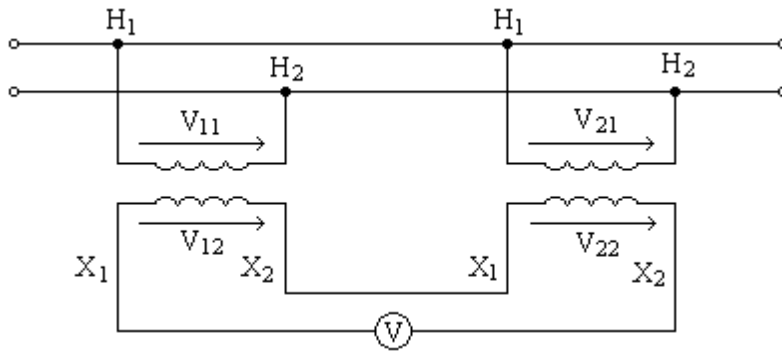


fig. 12.3

No caso mostrado, a tensão no voltmetro será:

$$V_R = V_{12} + V_{22}$$

Para resolver este problema, basta que se ligue os terminais secundárias de forma adequada, o que implica no conhecimento da polaridade dos transformadores monofásicos, ou no deslocamento angular (no caso de serem trifásicos).

b) Condições de otimização.

As condições que vem a seguir não são condições imprescindíveis para a operação em paralelo, entretanto asseguram que se obtenha o máximo proveito (otimização) da operação em paralelo.

1. Mesma Impedância percentual.

Estando dois transformadores em paralelo, e tendo sido obedecido as duas condições fundamentais, a distribuição de potência entre os mesmos é dada conforme a fig. 12.4 (b).

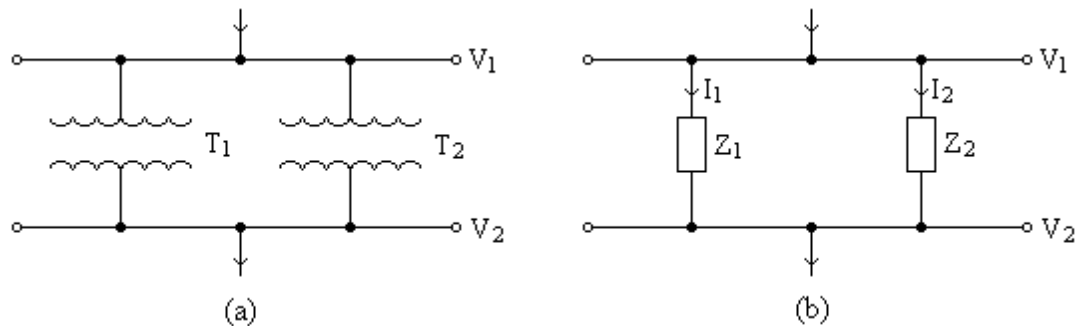


fig. 12.4

Da fig. 12.4 (b), tem-se:

$$Z_{1I1} = Z_{2I2}$$

Trabalhando-se em p.u., obtém-se:

$$\frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{Z_2}{Z_1} \times \frac{I_{2N}}{I_{1N}}$$

Multiplicando-se e dividindo-se por V_{1N} e V_{2N} , fica:

$$\frac{V_{1N}}{V_{1N}} \times \frac{I_1}{I_{1N}} \times \frac{V_{2N}}{V_{2N}} \times \frac{I_{2N}}{I_2} = \frac{Z_2 \cdot I_{2N}}{V_{2N}} \times \frac{V_{2N}}{Z_1 I_{1N}}$$

Sabe-se que:

$$V_{1N} I_{1N} = S_1; \quad V_{2N} I_{2N} = S_2;$$

$$Z_2 \frac{I_{2N}}{V_{2N}} = Z_{2pu};$$

$$V_{1N} I_{1N} = S_{1N}; \quad V_{2N} I_{2N} = S_{2N} \quad \text{e} \quad \frac{V_{2N}}{Z_1 I_{1N}} = \frac{1}{Z_{1pu}}$$

Logo:

$$\frac{S_1}{S_{1N}} \cdot \frac{S_{2N}}{S_2} = \frac{Z_{2pu}}{Z_{1pu}}$$

$$\frac{S_{1pu}}{S_{2pu}} = \frac{Z_{2pu}}{Z_{1pu}} \quad 12.3$$

Da expressão 12.3 verifica-se que a condição ideal (ótima) é quando $Z_{1pu} = Z_{2pu}$, pois nesse caso $S_{1pu} = S_{2pu}$, ou seja, ambos terão o mesmo carregamento em KVA, proporcionais às suas capacidades.

Exemplo 10

Estejam T1 e T2, dados a seguir, operando em paralelo e alimentando uma carga de 720 KVA. Qual a contribuição de cada um deles ?

	T1	T2
	SN = 500 [KVA]	SN = 300 [KVA]
	VN = 13800/380 [V]	VN = 13800/380
[V]	Z% = 4,5%	Z% = 4,5%

Solução:

Da equação 12.3, tem-se:

$$\frac{S_{1pu}}{S_{2pu}} = \frac{Z_{2pu}}{Z_{1pu}} \quad \rightarrow Z_{1pu} = Z_{2pu} = 0,045$$

$$S_{1pu} = S_{2pu} \quad \rightarrow \quad \frac{S_1}{S_{1N}} = \frac{S_2}{S_{2N}}$$

Substituindo-se os valores de S_{1N} e S_{2N} , fica:

$$S_1 = 1,667 \cdot S_2 \quad 12.4$$

Por outro lado,

$$S_1 + S_2 = 720 \quad 12.5$$

Substituindo-se 12.4 em 12.5, obtém-se:

$$2,667 \cdot S_2 = 720$$

$$S_2 = 270 \text{ [KVA]}$$

$$e$$

$$S_1 = 450 \text{ [KVA]}$$

O que está perfeitamente de acordo com a expressão:

$$\frac{S_{1pu}}{S_{2pu}} = \frac{Z_{2pu}}{Z_{1pu}}, \text{ pois:}$$

720 KVA \rightarrow solicita 90% da potência disponível de 800 KVA.

Sendo as impedâncias iguais, os transformadores estão igualmente carregados.

T2 - 270 KVA é de 90% de 300 KVA,

T1 - 450 KVA é de 90% de 500 KVA.

Exemplo 11

Estejam T1 e T2 dados a seguir, operando em paralelo e alimentando:

- a) Carga de 11250 KVA
- b) Carga de 12500 KVA

	T1
T2	SN = 7500 [KVA]
	SN = 5000 [KVA]
	Z% = 5,84%
	Z% = 5,62%

Calcule seus carregamentos nestas situações:

Solução:

Caso (a).

Da expressão 12.3, tira-se:

$$\frac{S_{1pu}}{S_{2pu}} = \frac{Z_{2pu}}{Z_{1pu}} = \frac{0,0562}{0,0584}$$

$$\frac{S_1}{S_{1N}} = \frac{S_2}{S_{2N}} \times 0,9623$$

$$S_1 = \frac{7500}{5000} \times 0,9623 \cdot S_2$$

$$S_1 = 1,4435 S_2 \quad 12.6$$

Por outro lado:

$$S_1 + S_2 = 11250 \quad 12.7$$

Substituindo-se 12.6 em 12.7, obtém-se:

$$S_2 \times 2,4435 = 11250$$

$$S_2 = 4604 \text{ [KVA]}$$

$$S_1 = 6646 \text{ [KVA]}$$

$$S_1 = \frac{6646}{7500} \times 100 \rightarrow S_1\% = 88,6\%$$

$$S_2 = \frac{4604}{5000} \times 100 \rightarrow S_2\% = 92,1\%$$

Caso (b)

$$S_1 + S_2 = 12500 \quad 12.8$$

Substituindo-se 12.6 em 12.8, obtém-se:

$$2,4435 S_2 = 12500 \rightarrow S_2 = 5116 \text{ KVA}$$

$$S_1 = 7384 \text{ KVA}$$

$$S_1\% = \frac{7384}{7500} \times 100\% \rightarrow S_1\% = 98,45\%$$

$$S_2\% = \frac{5116}{5000} \times 100\% \rightarrow S_2\% = 102,32\%$$

Os casos a e b mostram que, devido à diferença de impedâncias, não houve distribuição equânime entre as potências. Podendo em algumas situações (caso b), um dos transformadores entrar em sobrecarga.

Mesma relação entre resistência e reatância

Embora as impedâncias possam ter o mesmo módulo ($Z1\% = Z2\%$) seus ângulos podem ser distintos, portanto as correntes terão defasamentos diferentes, com relação à tensão $V1$.

Seja a fig. 12.5

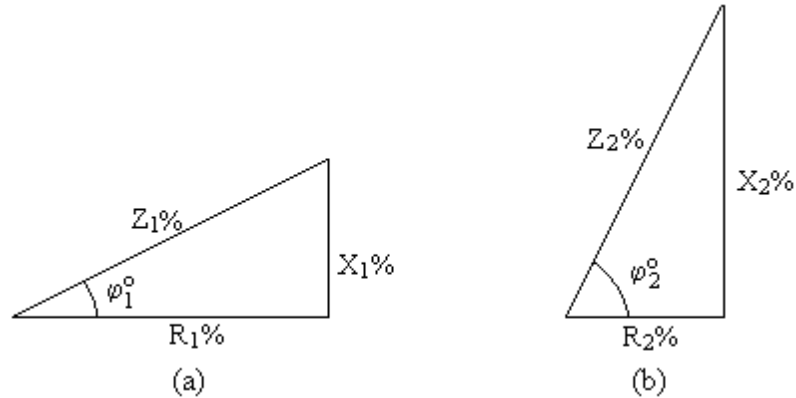


fig. 12.5

Supondo-se que $|Z1\%| = |Z2\%|$ e $\phi_1^o \neq \phi_2^o$, o ângulo entre as duas correntes será:

$$\alpha = \phi_2 - \phi_1 \quad 12.9$$

A tensão dos transformadores é única, portanto havendo um defasamento entre as correntes, haverá também entre as potências, de forma que:

$$S_c = V1 \cdot I_1^* + V1 I_2^* \quad 12.10$$

A potência S_c será máxima se $\alpha = 0$, conforme fig. 12.6, e, para que $\alpha = 0$, vem:

$\phi_2 = \phi_1$, ou seja:

$$\frac{R1\%}{X1\%} = \frac{R2\%}{X2\%} \quad 12.11$$

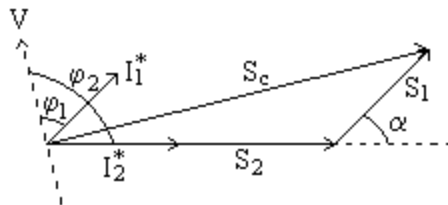


fig. 12.6

Portanto para que a potência entregue à carga seja máxima, os transformadores devem ser a mesma relação entre resistências e reatâncias.

1.13 HARMONICOS EM TRANSFORMADORES

1.13.1- Introdução

O propósito de um sistema elétrico de potência é suprir um grande número de consumidores com tensões perfeitamente senoidais com amplitude e frequências constantes; entretanto, por uma série de fatores, as formas de onda de tensão podem estar distorcidas. Este problema tem se agravado nos últimos anos devido a importância que estão adquirindo os equipamentos que utilizam semicondutores de potência.

A palavra “harmônica” foi originalmente usada na acústica e corresponde à frequência de vibração de uma corda ou coluna de ar múltipla de uma básica ou fundamental. A mesma idéia foi aproveitada em sistemas elétricos para representar uma forma de onda distorcida de corrente ou tensão; ou seja, a forma de onda pode ser representada como a soma de uma onda com frequência fundamental e uma série de outras com frequência múltiplas desta fundamental (ou harmônica).

Observa-se que, se um sistema elétrico deve alimentar cargas com tensões senoidais, é evidente que os alternadores deverão gerar forma de onda mais próxima desta condição; de fato, o projeto de geradores de grande porte é dirigido para corrigir ao máximo as distorções de fluxo (utilizado, por exemplo, enrolamentos amortecedores) e, para efeitos práticos, a forma de onda da tensão ocorre na transmissão e distribuição da energia.

Partindo-se da central elétrica, o primeiro componente que afeta a forma de onda é o transformador, como será analisado nos próximos tópicos. Por outro lado, a existência de cargas que utilizem semicondutores de potência ou que contenham núcleos saturados, bem como, iluminação com lâmpadas fluorescentes e de descarga entre outras, podem provocar uma grande quantidade de distorções harmônicas.

As citadas distorções harmônicas no sistema podem ocorrer, não apenas devido às grandes instalações, mas pela combinação dos efeitos de grande número de pequenos consumidores; como exemplo mais característico, tem-se os aparelhos de televisão, grandes geradores de harmônicos.

A geração de harmônicos acarreta, muitas vezes, entre outras menos importantes, são:

Sobrecargas em capacitores acoplados ao sistema, principalmente quando são partes de circuitos ressonantes; o problema é que o capacitor pode ter sua vida reduzida se um aparelho de proteção atuar indevidamente desconectando-o do sistema;

Possível aumento das perdas em motores, e seus reflexos no sistema de distribuição quando acionados por alguma ponte conversora (como afetar medidores de energia);

Instabilidade no sistema de controle de pontes conversoras;

Interferência em circuitos de comunicação, à qual se traduz em ruídos nos receptores e indução de tensões, algumas vezes perigosas.

Pelo exposto, nota-se a necessidade da limitação de tais harmônicos; os principais meios para a sua redução são a instalação de filtros e aumento do número de pulsos dos conversores. Existem outros métodos porém estão em estágio experimental.

Em relação aos transformadores, notou-se que, em certos casos, as tensões que as esperadas, causando problemas de isolamento nos

enrolamentos; desta forma, este texto analisa os problemas citados e outros nos transformadores.

1.13.2 – GERAÇÃO DE HARMÔNICOS EM TRANSFORMADORES

A figura 1 mostra esquematicamente um transformador monofásico, com uma tensão senoidal U_1 aplicada ao primário, e o secundário aberto. Nestas condições, circula no primário a corrente de excitação (i_o), que por sua vez origina um fluxo no núcleo do transformador (ϕ) que atravessa ambos os enrolamentos. Este fluxo, devido à sua variação à sua variação, induz tenções no primário e secundario.

Figura 1.13.1 transformadores monofásicos operando em vazio.

Como se sabe, sendo a tensão U_1 senoidal, e_1 também o será e , em conseqüência, o fluxo ϕ (porém com um defasamento de 90°). Sendo assim, devido ao aspecto do ciclo de histerese para a maioria dos materiais magnéticos, a forma de onda da corrente de magnetização, obrigatoriamente não é senoidal, como mostra a figura 1.13.2

Figura 1.13.2 – forma de onda da corrente em vazio – exemplo.

A decomposição da forma de onda mostra que a mesma é constituída por uma senoide da freqüência fundamental (60 Hz, por exemplo) e harmônicos de ordem ímpar (terceira, Quinta e outros que correspondem, por exemplo, a 180 Hz, 300 Hz, etc); nestas condições, verifica-se que há uma acentuada predominância da componente de terceiro harmônico, cujo valor é da ordem de 30 % a 40 % da fundamental.

A figura 1.13.3 mostra, a título de exemplo, as formas de onda das componentes fundamental e de terceiro harmônicos.

Figura 1.13.3 – Formas de onda das componentes fundamental e de terceiro harmônico – exemplo.

1.13.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE O TERCEIRO HARMÔNICO EM TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

Supondo-se três transformadores monofásicos formando um banco trifásico e, que inicialmente apenas o primário está ligado em triângulo, estando os secundários em circuito aberto e não conectados entre si. Se os transformadores são exatamente iguais e as tensões entre fases são equilibradas, a forma de onda das correntes de excitação dos transformadores serão iguais, porém defasadas de 120° .

Se as tensões entre fases (aplicadas à cada bobina) variam senoidalmente, as formas de onda das correntes são aquelas mostradas na figura 1.13.5.

A decomposição das formas de onda mostra que a corrente de linha não apresenta a componente de terceiro harmônico, ao contrário das fase, como se verifica pela análise a seguir.

Figura 1.13.4 – Banco de transformadores trifásicos com o primário em Delta.

Figura 1.13.5 – Formato das correntes na fase (i_{oAB} , i_{oCA}) e na linha (i_{oA}).

Considerando-se, inicialmente, os terceiros harmônicos das correntes no triângulo, as três correntes de fases (i_{oAB} , i_{oBC} e i_{oCA}) estão defasados de 120° entre si; entretanto mesmo por método gráfico, verifica-se que os terceiros harmônicos correspondentes estão em concordância de fase. Para as ondas fundamentais e de terceiro harmônico, tem-se o diagrama fasorial mostrado na figura 1.13.6.

FIGURA 1.13.6 – Diagrama Fasorial para as Correntes de Excitação.

A figura 1.13.7 mostra o circuito percorrido pelas correntes de terceiro harmônico no interior do delta.

FIGURA 1.13.7 – Circuito para as Correntes de Terceiro Harmônico.

Observa-se da figura 1.13.7, que a soma das correntes no ponto A é nula, ou seja:

$$I_{oA3}^{\circ} H + I_{oCA3}^{\circ} H - I_{oAB3}^{\circ} H = 0 \quad (1)$$

Mas sabe-se que:

$$I_{oAB3}^{\circ} H = I_{oAC3}^{\circ} H = I_{oCA3}^{\circ} H = I_{o3}^{\circ} H \quad (2)$$

Então:

$$I_{oCA3}^{\circ} H - I_{oAB3}^{\circ} H = 0 \quad (3)$$

Assim:

$$I_{oA3}^{\circ} H = 0 \quad (4)$$

Em outras palavras, se o sistema é ligado em triângulo, as correntes de terceiro harmônico poderão circular no seu interior, não existirão nas correntes de linha.

Naturalmente, o mesmo ocorre com os harmônicos múltiplos de três; entretanto as amplitudes destas componentes são bem menores que a do terceiro, podendo serem desprezadas.

A figura 1.13.8 mostra o primário ligado em estrela com neutro isolado e as correntes de terceiro harmônico.

Observa-se que, no ponto N, obrigatoriamente:

$$I_{oA3}^{\circ} H + I_{oB3}^{\circ} H + I_{oC3}^{\circ} H = 0 \quad (5)$$

FIGURA 1.13.8 – Ligação estrela com neutro isolado e Correntes de Terceiro Harmônico.

De (2), tem-se:

$$I_{o3H} = 0 \quad (6)$$

Este resultado mostra que na conexão estrela com neutro isolado não há circulação de correntes de terceiro harmônico na linha. Porém, se o neutro da estrela for aterrado, poderá haver circulação de correntes de terceiro harmônico, conforme indicado na figura 1.13.9.

FIGURA 1.13.9 – Circulação da Corrente de Terceiro Harmônico – primário do transformador com neutro aterrado.

As tensões de terceiro harmônico, pelos motivos expostos anteriormente, possuem o mesmo módulo e fase e podem existir em um sistema em estrela, entre fase e neutro mas não existem entre fases, como mostra a figura 1.13.10.

FIGURA 1.13.10 – Tensões Harmônicas – estrela com neutro aterrado.

Em consequência deste fato, a tensão existe entre fase e neutro será maior que a tensão de linha dividida por $\sqrt{3}$. Na conexão estrela com neutro isolado, ocorre o mesmo; observa-se entretanto que, que a corrente de magnetização será senoidal e o fluxo distorcido. As tensões, caso a conexão seja triângulo, obrigatoriamente são senoidais, pelos motivos expostos no ítem anterior. Pelo exposto, nota-se que as componentes de terceiro harmônico são de sequência zero.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. Do ensaio a vazio obteve-se as seguintes leituras P_o , I_o e V_1 . Determine os parâmetros rms e xms para o modelo de transformador cujo ramo magnetizante é série.
02. Quando não for possível realizar o ensaio em curto-circuito com tensão que faça circular as correntes nominais, mas sim, uma parcela destas, pergunta-se:
 - a) - É possível a realização do ensaio? por que?
 - b) - Caso afirmativo, qual a fórmula de correção?
 - c) - E se o ensaio fosse a vazio?
03. Determine K_t e K_N para os transformadores da fig. 1.
04. Do ensaio em curto-circuito obteve-se para um transformado trifásico de 100 MVA, 220/13800 V, os seguintes valores: $P_{cc} = 2$ kW, $V_{cc1} = 2,2$ kV.

a) - Determine o valor da impedância equivalente percentual de dispersão quando o transformador estiver operando em sobrecarga na temperatura de 120°C. O ensaio foi realizado a 20°.

b) - Qual o valor relativo da perda no núcleo, sabendo-se que esta é proporcional à tensão aplicada ao quadrado.

05. Determine os parâmetros do circuito equivalente L, relativo a uma fase, para o transformador Y-Y, bem como a regulação quando o rendimento for máximo (trabalhar em pu).

TRANSFORMADOR

5 MVA
69/13.8 kV

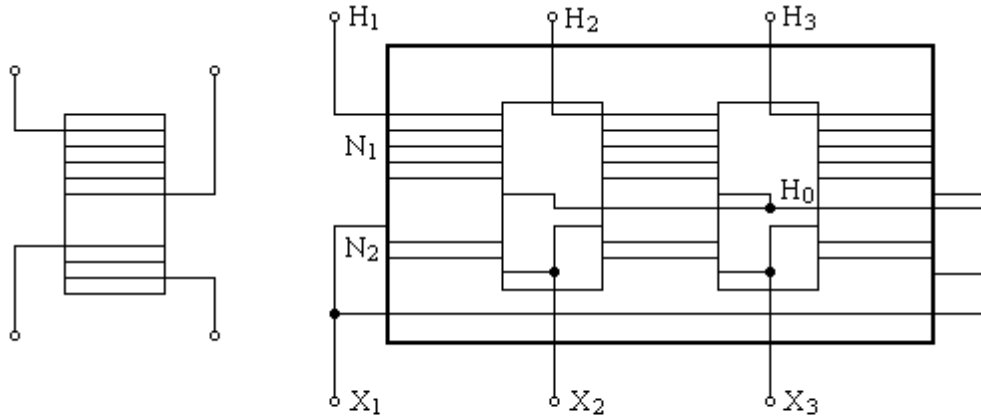
ENSAIOS

VAZIO
Vo2 = 13,8 kV
Io2 = 8,36 A
Po = 10 kW

CURTO-CIRCUITO

Vcc = 3150 V
Icc1 = 41,84 A
Pcc = 60 kW

06. Determine a polaridade e o defasamento angular para os transformadores da fig. 1 (a, b e c).



(a)

(b)

$$N_1 > N_2 = N_3$$

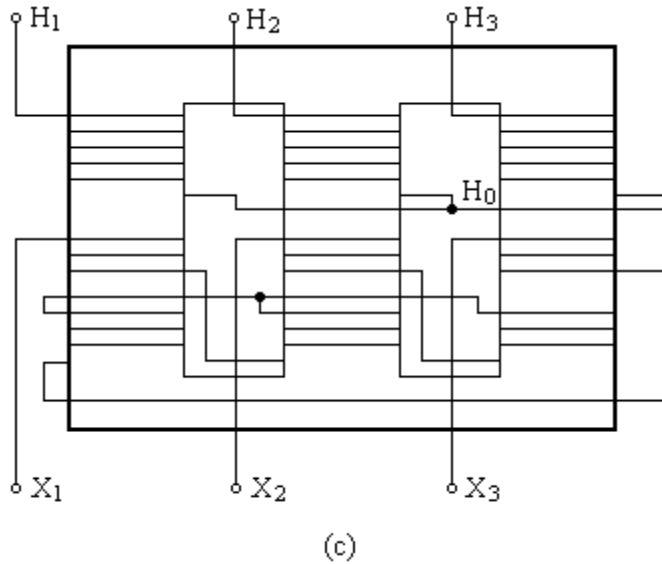


fig. 1

07. Um transformador de 600/20 V, 1 KVA, 400 Hz, 3000 esp/100 esp deve ser utilizado a partir de uma rede de 60 Hz. Mantendo a mesma densidade de fluxo permissível, calcule:

- a) - A máxima tensão que pode ser aplicada ao lado de AT a 60 Hz.
- b) - A máxima tensão que pode ser aplicada ao lado de BT a 60 Hz.
- c) - Os valores originais da relação volts/espira a 400 Hz.
- d) - As relações volts/espiras a 60 Hz.
- e) - A capacidade em KVA do transformador a 60 Hz.

08. Há 1000 espiras no lado de AT de um transformador de 10 KVA, 10/1.

- a) - Quando se aplicam 1000 V a 60 Hz, ao lado de AT, a densidade máxima de fluxo é 5000 gauss (maxwlls/cm^2). Qual a área do núcleo em cm^2 e em pol^2 ?
- b) - Se aumentar a tensão aplicada para 1500 V, encontre a densidade máxima de fluxo.
- c) - Repita (b) para 50 Hz e a mesma tensão (1500 V).

09. O rendimento de um transformador de 20 KVA, 1200/120 V, é máximo a 50% da carga nominal e vale 98%. Calcule:

- a) - As perdas no núcleo.
- b) - O rendimento à plena carga.
- c) - O rendimento para cargas de 75% e 125%.

10. Um transformador de 20 KVA, 1200/120 V, que está permanentemente ligado, é carregado com cargas de fator de potência unitário durante um período de 24 horas, como se segue: 5 horas à plena carga, 5 horas à meia carga, 5 horas a um quarto de carga. O rendimento máximo ocorre à plena carga e é 97%. Calcule o rendimento diário.

11. Um transformador de 10 KVA, 60 Hz, 4800/240 V é ensaiado a vazio e em curto-circuito respectivamente, sendo os resultados:

	Tensão	Corrente	Potência	Enrol. Usado
Ensaio a vazio	240 V	1,5 A	60 W	BT
Ensaio Curto-circuito	180 V	Nominal	180 W	AT

Utilizando os dados, calcule:

- A resistência e a reatância equivalentes relativas ao lado de AT.
- A resistência e a reatância equivalentes relativas ao lado de BT.
- A regulação de tensão do transformador abaixador a FP unitário e plena carga.
- Repita (c) para FP de 0,8 em atraso, à plena carga.

12. A partir dos dados do problema 11, calcule:

- As perdas no núcleo do transformador.
- As perdas no cobre, à plena carga, do transformador.
- O rendimento diário, quando se carrega o transformador com: 6 H à plena carga, FP unitário; 4 H à meia carga com FP 0,6 em atraso e 12 H a vazio.

13. Determine o defasamento angular para:

- Autotransformador Y-Y ($N_1 = N_2$) subtrativo
- Autotransformador zigzague-Y ($N_1 = N_2$) subtrativo
- Autotransformador Δ - Δ ($N_1 = N_2$) subtrativo