



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 10 7751
Tópico: Indicadores e Limites

INFLUÊNCIA DA NÃO CONFORMIDADE SENOIDAL DA TENSÃO DE SUPRIMENTO NAS PERDAS EM VAZIO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

FRANCISCO JOSÉ PONTE DE AGUIAR

FERNANDO ANTUNES

UFC

UFC

RESUMO

Este trabalho trata da influência da tensão de alimentação não senoidal nas perdas de um transformador em vazio. Em laboratório foram executados os ensaios a vazio em um transformador de trifásico de 5kVA utilizando-se uma fonte programável de distúrbios fornecendo tensões na faixa de tensão de 60% a 100% da tensão nominal trifásica de 220V para tensões com frequências fundamentais de 60Hz, 120Hz e 180Hz e com tensões distorcidas nos níveis estabelecidos pela norma IEC 61000-3-6. Também foram empregadas tensões compostas da fundamental de 220V-60 Hz e da 5ª harmônica com TDH's de 10% a 25% em intervalos de 5%. Foram calculadas as perdas no núcleo adotando-se o *princípio geral de separação de perdas*. Existe uma grande diferença entre os valores calculados para as perdas totais de magnetização considerando o *princípio geral de separação de perdas* e os valores medidos em laboratório. Resultados experimentais e simulações foram utilizados para a avaliação das perdas em vazio em transformadores de distribuição.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia elétrica, tensões não senoidais, núcleos ferromagnéticos, transformadores trifásicos.

1.0 INTRODUÇÃO

Um dos parâmetros que caracterizam a qualidade de energia elétrica é a conformidade senoidal da onda de tensão de suprimento. Correntes harmônicas injetadas nos sistemas

elétricos de distribuição pelos dispositivos eletrônicos e por outros tipos de cargas não lineares, podem afetar consideravelmente, dependendo da potência de curto circuito da rede, o aspecto da forma de onda de tensão nas barras de suprimento.

Quaisquer dispositivos que gerem arco elétrico, como lâmpadas de descarga ou máquinas de solda, bem como dispositivos com núcleos saturados, como transformadores e reatores, introduzem perturbações. A novidade é o crescente uso de cargas não lineares, representadas por conversores estáticos, compensadores estáticos, fontes chaveadas, acionamentos a velocidade variável e ciclo conversores, que provocam perturbações, não previstas quando do projeto dos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica.

Neste contexto, os transformadores, peças fundamentais dos sistemas de potência, atuam tanto como fonte de perturbações como sofrem seus efeitos.

Em um transformador de potência, há perdas devido à corrente de carga, correntes de magnetização, correntes *inrush*, correntes parasitas, perda por histerese e perdas por efeito pelicular.

Perdas por histerese e por correntes parasitas aparecem quando os circuitos magnéticos são sujeitos a densidades de fluxo variáveis no tempo – perda de potência na forma de calor no núcleo de ferro. Estas perdas estão presentes no transformador em carga e a vazio. No núcleo as correntes parasitas não apenas resultam em perda de energia, mas também exercem um efeito de desmagnetização do núcleo.

O conjunto de perdas torna-se significativo na determinação do rendimento do transformador, de seu carregamento, do sistema de refrigeração e de sua vida útil. Dentre estas, as perdas no núcleo são as mais importantes.

Vários estudos e pesquisas têm sido feitos^{[5],[6],[7],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15]} para determinar a influência da alimentação não senoidal na perda de lâminas que compõem o núcleo de transformadores de potência.

Objetivando aplicar os estudos feitos para as lâminas, este trabalho avalia a influência da presença de harmônicas na tensão da fonte de alimentação, isto é, da não conformidade senoidal da tensão de suprimento nas perdas no núcleo dos transformadores. Serão avaliadas as perdas no núcleo dos transformadores em vazio. Será mostrado que o valor das perdas magnéticas calculadas do transformador por unidade de volume é diferente do valor das perdas por unidade de volume medidas no núcleo do transformador, o que mostra a influência das dimensões e geometria do núcleo nas perdas. Propõe-se, portanto, avaliar a influência da alimentação não senoidal nas perdas em núcleos ferromagnéticos de transformadores de distribuição de energia elétrica.

Será avaliada analiticamente e por medição em laboratório a influência de variáveis como ordem de frequência, intensidade de fluxo magnético e densidade magnética, intensidade de corrente e tensão, bem como a influência do material do núcleo, sua geometria e dimensões.

Um transformador de 5kVA foi especialmente projetado montado e ensaiado, obedecendo aos padrões adotados pelas normas técnicas e pela indústria, para possibilitar a execução da parte experimental deste estudo.

2.0 PERDAS MAGNÉTICAS

De acordo com a teoria clássica quando materiais magnéticos são submetidos a fluxos magnéticos alternados, apresentam perdas por histerese e Foucault^[1]. O modelo clássico despreza a real presença dos domínios magnéticos e assume um processo de magnetização perfeitamente homogêneo no material magnético. Como uma consequência deixa-se de considerar, no modelo clássico uma parcela das perdas apresentadas pelo material magnético. Estas perdas são chamadas de perdas em excesso p_{exc} , sendo em muitos casos maiores que as próprias perdas clássicas^{[2],[3],[4]}. Expressando o total das perdas como:

$$p = p_{his} + p_{class} + p_{exc} \quad (1)$$

As *Perdas em Excesso* são supostamente originadas do excesso de correntes induzidas, além das calculadas pelo método clássico, devido ao fenômeno de deslocamento das paredes de domínios magnéticos^[7]. Bertotti^{[3],[4]} e Fiorillo^[2], abordaram de forma estatística o processo de magnetização dinâmica e as perdas por excesso em lâminas de materiais magnéticos submetidos a campos magnéticos senoidais.

Alguns progressos importantes têm sido feitos modelando perdas em excesso em ligas laminadas, com base nas considerações das correntes parasitas resultantes do movimento das *paredes de domínio*^{[3],[4]}. Entretanto, todas as aproximações usando separação de perda também têm uma desvantagem prática: elas requerem medição extensiva e extração de parâmetro com um dado material antes deles tornarem-se práticos.

Sob condições de magnetização não senoidais, espera-se que as perdas nos aços elétricos cresçam devido à presença de componentes harmônicas superiores, as quais produzem perdas adicionais por correntes parasitas.

3.0 MATERIAIS MAGNÉTICOS SUBMETIDOS A FLUXOS MAGNÉTICOS NÃO SENOIDAIS.

Tradicionalmente os métodos de medida das propriedades magnéticas dos aços elétricos tomam como condição de referência o valor de pico do campo magnético senoidal com Fator de Forma igual a $1,11 \pm 1\%$. Sob condição de fluxo não senoidal o valor de referência mencionado não pode ser aplicado e é mais difícil escolher uma condição padrão para magnetização. O uso apenas do valor de pico do campo magnético como no caso de medições senoidais para avaliar as perdas magnéticas pode levar a valores ambíguos. Tem-se verificado que a Taxa de Distorção Harmônica Total (TDH) e não o Fator de Forma tem sido usada para descrever a forma de onda do campo magnético.

Formas de onda com diferentes TDH's resultam em diferentes valores de pico da componente harmônica fundamental^{[10],[11]}. Quando as perdas são consideradas baseadas no mesmo valor de pico do campo magnético sob excitação não senoidal, o valor eficaz da componente fundamental da tensão será diferente para diferentes taxas de distorção harmônica da onda não senoidal do campo magnético.

Sob condições de forma de onda complexa, a magnitude da componente fundamental relativa ao valor de pico do campo magnético depende da forma de onda.

As pesquisas visando estimar as perdas de potência em materiais magnéticos têm sido feitas em lâminas de ferro silício de grãos orientados, não orientados e materiais amorfos, utilizando o Quadro de Epstein ou núcleos toroidais. Trabalhos têm surgido tentando estabelecer fórmulas gerais e métodos simples de predição das perdas sob tensões com formas de ondas não senoidais [2],[4],[5],[6],[7],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15].

É ainda conveniente citar que o cálculo das perdas totais, obtido através da multiplicação do Volume do núcleo pela perda de potência média por unidade de volume, calculada conforme os métodos disponíveis desenvolvidos em laboratório, não levam em conta as perdas localizadas nas juntas em forma de "T" (garfos e pernas), nem nas juntas de cantos dos núcleos de ferro [16].

Conclui-se destes trabalhos, que não se dispõe ainda de uma metodologia de fácil aplicação para caracterização magnética de um núcleo de ferro silício montado para uso em um transformador de potência, capaz de prever com exatidão as perdas magnéticas sob regime não senoidal, já que todos os estudos estão voltados para perdas em lâminas isoladas.

4.0 CÁLCULO DAS PERDAS EM NÚCLEOS FERROMAGNÉTICOS

Aplicando o *princípio geral de separação das perdas* [2],[3],[4] utilizando o modelo estatístico proposto por Bertotti, pode-se calcular separadamente as perdas por *Histerese, Clássicas e por Excesso* empregando-se as equações (2), (3) e (4).

$$P_{his} = K_s \times f_m \times (B_{m\acute{a}x})^n \times Volume \quad (2)$$

$$P_{cl\acute{a}ss(m\acute{e}dia)} = \frac{w^2}{12 \times \rho \times N^2 \times S^2} E_{ef}^2 \quad (3)$$

$$P_{e(m\acute{e}dia)}(t) = 8,67 \times \sqrt{\sigma \times G \times V_0 \times S} \times (f_m \times B_{m\acute{a}x})^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

Onde:

G = Coeficiente adimensional que representa o coeficiente de atrito do movimento das paredes dos domínios. [3]

V_0 = Equivale a um campo coercitivo em excesso no processo de magnetização do material [5]

S = Área da seção transversal do núcleo.

σ = Condutividade elétrica do núcleo de ferro.

K_s = Coeficiente de Steinmetz.

n = Expoente de Steinmetz cujo valor inicialmente proposto foi de 1,6. Depende do valor de $B_{m\acute{a}x}$ atingido e varia de 1,5 a 2,5.

$B_{m\acute{a}x}$ = Máxima densidade de fluxo.

ρ = Resistividade do material.

N = Número de espiras do condutor da bobina.

w = Espessura das lâminas do núcleo.

As equações (2), (3) e (4) foram aplicadas no cálculo das perdas teóricas totais em um transformador de potência trifásico de 5 kVA especialmente construído para possibilitar a execução das partes teórica e experimental deste trabalho. A Tabela abaixo apresenta os parâmetros do transformador:

Parâmetros do transformador

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Volume: | 0,0042 m ³ |
| Espessura da Lâmina: | 0,27 mm |
| Resistividade do Fe : | 18 x 10 ⁻⁸ Ω.m |
| Espiras do Primário: | 120 |
| Seção Transversal: | 41,3 cm ² |
| Lâmina de aço silício | GO tipo E-004 |

Foram aplicadas tensões na faixa de 60% a 120 % da tensão nominal de 220 V nas frequências de 60 Hz, 120 Hz e 180 Hz; tensões na faixa de 60% a 120% da tensão nominal de 220,72 V, composta da tensão fundamental de 220 V-60 Hz e das tensões harmônicas de 4,40 V-120 Hz, 11,00 V-180 Hz, 2,20 V-240 Hz e 13,20 V-300 Hz, que são as tensões harmônicas nos níveis de compatibilidade de TDH permitidos pela IEC- 61000-3-6 - Níveis de Compatibilidade de Tensões Harmônicas. Outros níveis de tensão fundamental e componentes harmônicas também foram utilizados: tensões na faixa de 60% a 120 % da tensão nominal de 221,10 V composta da tensão fundamental de 220 V-60 Hz e da tensão harmônica de 22,00 V-300 Hz, correspondente a uma TDH de 10% de 5a ordem; tensões na faixa de 60% a 120 % da tensão nominal de 222,46 V-300 Hz composta da tensão fundamental de 220 V-60 Hz e da tensão harmônica de 33,00 V-300 Hz, correspondente a uma TDH de 15% de 5a ordem; tensões na faixa de 60% a 120 % da tensão nominal de 224,36 V composta da tensão fundamental de 220 V-60 Hz e da tensão harmônica de 44,00 V-300 Hz, correspondente a uma TDH de 20% de 5a ordem; tensões na faixa de 60% a 120 % da tensão nominal de 226,77 V

composta da tensão fundamental de 220 V-60 Hz e da tensão harmônica de 55,00 V-300 Hz, correspondente a uma TDH de 25% de 5ª ordem.

Para cada valor de tensão aplicada no primário conforme descrito anteriormente, foram calculados os valores de $B_{máx}$ correspondentes às Induções Magnéticas Máximas.

Os valores de $B_{máx}$ para os casos das tensões nominais de 220 V-60 Hz, 220 V-120 Hz e 220 V-180 Hz, foram obtidos usando-se a equação (5):

$$B_{máx} = \frac{V_{ef} \times 10^4}{120 \text{ esp.} \times 4,44 \times 41,3 \text{ cm}^2 \times f_m} \quad (5)$$

Para as Induções Magnéticas Máximas compostas das harmônicas citadas anteriormente, os valores de $B_{máx}$ foram calculados empregando-se o Teorema de Parseval, utilizando-se a equação geral abaixo, obtida da fórmula (5).

$$B_{máx} = \frac{0,4544 \times V_{ef}}{f_m} \quad (6)$$

Para as *Perdas Totais por Histerese*, foram adotados na fórmula de Steinmetz os valores de 1,6 para o expoente e de 251 para o coeficiente de acordo com o SI de unidades e um *Volume* de 0,0042 m³ de projeto para o núcleo, resultando de (2) a equação (7):

$$P_{his} = 251 \times f_m \times (B_{máx})^{1,6} \times 4,222 \times 10^{-3} \quad (7)$$

Para os casos onde se tem Induções Magnéticas Máximas compostas das harmônicas citadas anteriormente, as perdas foram calculadas separadamente para cada frequência e cada indução máxima e posteriormente somadas (superposição dos efeitos).

Para as *Perdas Totais por Correntes Parasitas*, a equação (3) foi multiplicada pelo *Volume* do núcleo.

A equação (3) passou a ter então a seguinte expressão geral para os cálculos:

$$P_{cláss} = 0,1374 \times 0,0042 \times E_{ef}^2 \quad (8)$$

Já que a equação (3) é independente da forma de onda e da frequência e válida em qualquer sistema consistente de unidades, pode-se empregá-la para calcular as perdas clássicas tanto nos casos de uma só frequência quanto naqueles de frequências múltiplas, desde que seja calculada a tensão eficaz composta,

facilmente obtida através do Teorema de Parseval:

Para as *Perdas Totais em Excesso*, a equação (4) foi multiplicada pelo *Volume* do núcleo. Na execução dos cálculos foram considerados os valores estabelecidos por Bertotti [3] de 0,136 para o coeficiente adimensional "G" e de 0,15 A/m para o parâmetro "Vo" independente de " $B_{máx}$ ". Para a condutividade " σ " foi adotado o valor [3] de $2,2 \times 10^6 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ e para a seção transversal do núcleo "S" o valor estabelecido no projeto do transformador de 0,00413 m², passando a equação (3) a ter então a seguinte expressão geral para os cálculos:

$$P_{exc} = 118,0376 \times (f_m \times B_{máx})^{3/2} \times 0,0042 \quad (9)$$

Para os casos onde se tem Induções Magnéticas Máximas compostas das harmônicas citadas anteriormente, as perdas foram calculadas separadamente para cada frequência e cada indução máxima e posteriormente somadas (superposição dos efeitos).

Em seguida os cálculos teóricos de previsões das perdas magnéticas, ainda segundo o *princípio geral de separação das perdas*, foram executados empregando-se as fórmulas propostas pela Acesita – Cia. Aços Especiais Itabira [8]. Estas fórmulas abaixo transcritas foram obtidas para lâminas de aço silício GO tipo E-004 denominação Acesita, ensaiadas no Quadro de Epstein, para induções magnéticas na faixa de 0,6 T a 1,8 T, frequências de 10 Hz a 150 Hz e fornecem a perda por quilograma de ferro no Sistema Internacional de Unidades:

$$P_{his} = \frac{1,691 \times 10^{-3} \times B_{máx}^{2,2073} \times f_m \times \text{Peso}}{0,725} \quad (10)$$

$$P_{cláss} = \frac{1,3087 \times 10^{-5} \times B_{máx}^2 \times f_m^2 \times \text{Peso}}{0,725} \quad (11)$$

$$P_{exc} = \frac{4,8543 \times 10^{-4} \times B_{máx}^{1,706} \times f_m^{1,5} \times \text{Peso}}{0,725} \quad (12)$$

As perdas também foram calculadas usando as fórmulas empíricas da CEMEC, fabricante do transformador, sendo estas últimas válidas somente para a frequência de 60 Hz.

5.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os cálculos foram executados na faixa de 60% a 120% da tensão nominal em cada caso, visando uniformizar o procedimento estabelecido para os ensaios de laboratório.

As perdas e as induções magnéticas crescem com o aumento das tensões aplicadas ao transformador em todas as situações avaliadas.

Para a tensão de 220 V - 60 Hz foram encontradas perdas totais de 667,47 W nos cálculos elaborados conforme a teoria aqui apresentada, sendo 143,93 W ou 21,56% de perdas por histerese; 27,93 W ou 4,18% de perdas por correntes parasitas e 495,60 W ou 74,26% de perdas em excesso, observando-se destes valores uma predominância das perdas em excesso.

Usando-se as fórmulas propostas pela Acesita, foram encontradas perdas totais de 43,80 W, sendo 13,95 W ou 31,85% de perdas por histerese; 5,83 W ou 13,31% de perdas clássicas e 24,02 W ou 54,84% de perdas em excesso, observando-se também nesta metodologia uma predominância das perdas em excesso.

No entanto, é muito grande a diferença dos valores de previsões de perdas obtidos por estes dois critérios. A perda total de 667,47 W calculada conforme as Equações (7), (8) e (9), corresponde a 15,2 vezes o que está sendo considerado como correto para lâminas pela indústria do aço que estimou as perdas em 43,80 W.

Os cálculos empregando as fórmulas empíricas atualmente em uso pelo fabricante do transformador, válidos somente para tensões senoidais nas frequências de 50 Hz e 60 Hz e que não levam em conta o *princípio geral de separação de perdas*, estimaram a perda total em 79,61 W, valor este que está 8,38 vezes abaixo das formulações teóricas em uso e corresponde a 1,82 vezes o que foi obtido através das fórmulas empíricas propostas pelo fabricante do aço.

Para a tensão de 220 V – 120 Hz, o valor da indução magnética calculado passou a ser de 0,833 T, ou seja, metade de 1,666 T obtidos para 220 V – 60 Hz. Como consequência deste fato, a quantidade obtida para as perdas por histerese também decresceu, já que embora sendo estas perdas diretamente proporcionais à frequência que dobrou de valor, são também diretamente proporcionais à indução magnética, que ficou reduzida à metade, afetada do expoente 1,6 na Equação (7). O valor obtido para as perdas por correntes parasitas manteve-se o mesmo, porque a tensão aplicada no primário foi também de 220 V. Conforme a Equação (8), estas perdas só dependem do material usado no núcleo, de sua geometria, do número de espiras e do quadrado da tensão aplicada. O valor obtido para as perdas em excesso também não sofreu alteração

com relação à condição 220 V – 60 Hz. Conforme a Equação (9), estas perdas são diretamente proporcionais ao produto da frequência pela indução magnética, elevado ao expoente 3/2, havendo portanto uma compensação quando a frequência dobra e a indução magnética fica reduzida à metade. Foram encontradas perdas totais de 618,49 W nos cálculos elaborados conforme as equações (7), (8) e (9), sendo 94,96 W ou 15,35% de perdas por histerese; 27,93 W ou 4,52% de perdas por correntes parasitas e 495,60 W ou 80,13% de perdas em excesso, observando-se destes valores uma predominância das perdas em excesso e que, para a frequência dupla de 120 Hz, as perdas totais se reduziram a 92,66% do valor obtido a 60 HZ.

Empregando-se as fórmulas propostas pela Acesita, foram encontradas perdas totais de 32,69 W, sendo 6,04 W ou 18,47% de perdas por histerese; 5,83 W ou 17,83% de perdas clássicas e 20,82 W ou 63,70% de perdas em excesso, observando-se também nesta metodologia uma predominância das perdas em excesso.

A perda total de 618,49 W, calculada conforme os critérios teóricos atuais, corresponde a 18,9 vezes o que está sendo calculado pela Acesita, cujo valor foi de 32,69 W.

Para uma frequência de 120 Hz, as fórmulas do fabricante do transformador não se aplicam.

Para a tensão de 220 V – 180 Hz, os valores obtidos nos cálculos semelhantes aos anteriores mantiveram as mesmas tendências de variações. A indução magnética passou a ser de 0,555 T. A perda total calculada segundo os métodos atuais ficou em 597,98 W, distribuídos em 74,45 W ou 12,45% de perdas por histerese; 27,93 W ou 4,67% de perdas clássicas e 495,60 W ou 82,88% de perdas em excesso, observando-se destes valores uma predominância das perdas em excesso e que, para a frequência tripla de 180 Hz, as perdas totais se reduziram a 89,59% do valor obtido a 60 Hz.

Empregando-se as fórmulas propostas pela Acesita, foram encontradas perdas totais de 28,69 W, sendo 3,70 W ou 12,90% de perdas por histerese; 5,83 W ou 20,32% de perdas clássicas e 19,16 W ou 66,78% de perdas em excesso, observando-se também nesta metodologia uma predominância das perdas em excesso.

A perda total de 597,98 W, calculada conforme os critérios teóricos atuais corresponde a 20,8 vezes o que está sendo calculado pela Acesita, cujo valor foi de 28,69 W.

Para uma frequência de 180 Hz, as fórmulas do fabricante do transformador não se aplicam.

As situações estudadas a seguir, corresponderam à aplicação no primário do transformador, de tensões de 220 V – 60 Hz juntamente com componentes harmônicas de 60 Hz a 300 Hz segundo o critério do IEC 61000-3-6 e de 300 Hz com TDH's de 10%, 15%, 20% e 25%. Equivalem à aplicação de tensões eficazes compostas, cujos valores vão de 220,72 V para o primeiro caso estudado, até 226,77 V no caso extremo da composição da fundamental com a 5ª harmônica de TDH igual a 25% .

Nestas condições, as induções magnéticas compostas, variaram de 1,666 T a 1,668 T, mantendo-se portanto praticamente constantes. No entanto os cálculos das perdas foram feitos de forma individualizada, considerando em cada situação, o seu valor de indução magnética e a sua frequência correspondente. Para cada caso estudado foram feitas as somas das perdas correspondentes, considerando o princípio da superposição dos efeitos. As perdas totais calculadas segundo a bibliografia disponível, variaram de 684,06 W a 737,11 W e de 44,21 W a 45,88 W de acordo com o critério da Acesita, valores estes superiores a 667,46 W e 43,80 W obtidos para 220 V – 60 Hz. O importante é observar a tendência sempre crescente das perdas quando também aumentam os níveis da TDH. Estas formas de cálculos não levam em consideração uma possível saturação magnética do núcleo quando submetido a níveis elevados de tensões distorcidas.

6.0 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

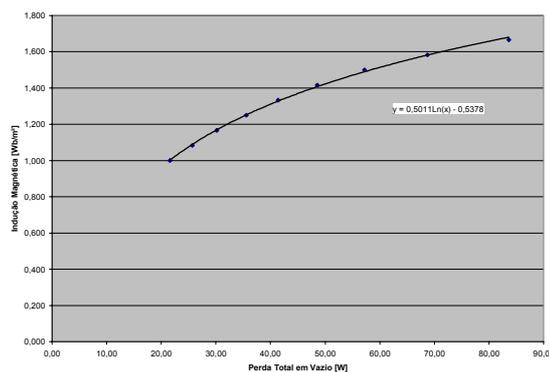
Foi especialmente projetado e fabricado um transformador trifásico de uso contínuo a seco, tensão dos enrolamentos secundários 110V, tensão dos enrolamentos primários 220V, ligação Δ -Y 220V/190,5V, bobinas com todos os terminais acessíveis, possibilitando qualquer tipo de ligação, potência aparente nominal de 5 kVA e frequência de 60 Hz.

Em laboratório, utilizando-se uma fonte programável de distúrbios elétricos, foram executados os ensaios a vazio do transformador para a determinação das perdas no núcleo de ferro do transformador. *O transformador em vazio foi submetido a valores de 60% a 100% da tensão nominal nas frequências de 60Hz, 120Hz e 180Hz e nas frequências compostas da fundamental de 60 Hz e das harmônicas até a 5ª ordem, nos níveis estabelecidos pela norma IEC*

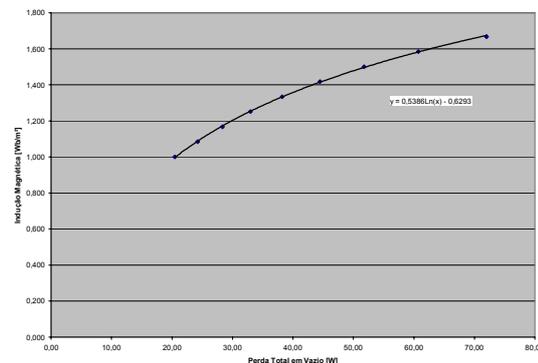
61000-3-6, e com as Taxas de Distorções Harmônicas de 10%, 15%, 20% e 25%.

Os ensaios levando em conta a 5ª harmônica foram motivados pela forte presença desta componente na tensão de alimentação.

Os Gráficos 1 e 2 abaixo, *Perda Total em Vazio contra Indução Magnética Máxima*, correspondem aos resultados obtidos para a tensão nominal de 220V-60Hz e para a tensão composta de 226,77V obtida da aplicação conjunta das tensões de 220V-60Hz e 55V-300Hz, respectivamente:



Perda Total em Vazio x Indução Magnética Máxima na Frequência de 60 Hz
Gráfico 1



Perda Total em Vazio x Indução Magnética Máxima nas Frequências de 60 Hz e 300Hz com TDH de 25%
Gráfico 2

As perdas totais em vazio na condição inicial de 220 V, 60 Hz atingiram o valor de 83,64 W. Ao ser aplicada a mesma tensão nas frequências de 120 Hz e 180 Hz as perdas decresceram bruscamente, estando esse comportamento de conformidade com as previsões clássicas. Para tensões aplicadas ao transformador, superiores ao valor nominal de 220V, obtidas da composição formada pela fundamental mais as harmônicas até a 5ª ordem nos níveis permitidos pelo IEC, ou ainda, da fundamental mais a 5ª harmônica nos níveis de 10% a 25% da tensão nominal, as perdas medidas decresceram de forma significativa – de 83,64 W a 71,99 W - na

proporção em que as taxas das distorções harmônicas aumentaram. Tais fatos mostram que a indução magnética máxima não se comporta conforme as previsões clássicas com ondas em multi-freqüências.

Para uma tensão fundamental de 220 V, 60 Hz, ligação em triângulo, foram encontradas perdas de 83,64 W em laboratório e de 667,47 W de cálculo.

Considerando-se agora o caso extremo de TDH de 25% para a 5ª harmônica, também para uma tensão fundamental de 220V, 60Hz, ligação em triângulo, as perdas atingiram os valores de 71,99W em laboratório e 737,11W de cálculo.

Enquanto os valores medidos decresceram com o aumento da TDH, fato contrário aconteceu com valores calculados.

7.0 CONCLUSÃO

Existe uma grande diferença entre os valores calculados para as perdas totais de magnetização considerando o *princípio geral de separação de perdas* e os valores medidos em laboratório.

Sob condições de fluxo não senoidal é mais difícil escolher uma condição padrão para magnetização. O uso apenas do valor de pico do campo magnético como no caso de medições senoidais, para avaliar as perdas magnéticas com tensões de alimentação não senoidais, pode levar a valores ambíguos, visto que o valor eficaz da tensão distorcida não tem uma relação linear com o valor eficaz das componentes das tensões nas freqüências superiores. Ficou constatado que tal procedimento conduz a resultados muito diferentes dos resultados de laboratório.

As fórmulas empíricas de previsões de perdas utilizadas no projeto pelo fabricante do transformador chegaram a valores praticamente iguais aos medidos. Entretanto, estas fórmulas só se aplicam para tensões senoidais, não dispendo atualmente a indústria de formulações teóricas para previsões de perdas contemplando a presença de harmônicas.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]Vembu Gourishankar, "Conversión de Energía Eletromecánica", Capítulo 3, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México
- [2]F. Fiorillo e A. Novikov, "An Improved Approach to Power Losses in Magnetic Laminations under Nonsinusoidal Induction Waveform", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, nº 5, pp 2904-2910, setembro 1990.
- [3]G. Bertotti, "General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, nº 1, pp 621-630, Janeiro 1998.
- [4]G. Bertotti, "Physical Interpretation of Eddy Current Losses in Ferromagnetic Materials. I. Theoretical Considerations. II. Analysis of Experimental Results", J. Appl. Phys., vol. 57, nº 6, pp. 2110-2126, março 1985.
- [5]N.J.Batistela e J.P.A. Bastos, "Uma Metodologia de Caracterização Magnética de Aço Silício e Aplicações na Predição das Perdas Magnéticas sob Regimes de Indução Senoidal e Distorcido", GRUCAD, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6]Marcelo S. Lancarotte, "Previsão das Perdas Magnéticas na Presença de Harmônicos" M.Sc dissertação, EPUSP, 95p, 1999.
- [7]Nelson J. Batistela, "Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e Avaliação das Perdas no Ferro sob Vários Regimes de Indução", Revista Controle & Automação, vol 13, nº 2, pp. 156-164, maio a agosto 2002.
- [8] Fórmulas para o Cálculo das Perdas no Ferro fornecidas pela Acesita contidas nos documentos:
"Coeficientes da Equação de Steinmetz para o Aço Silício GO".
"Perdas Medidas e Calculadas" - Tabela em Excel.
- [9]Jieli Li, Tarek Abdallah e Charles R. Sullivan, "Improved Calculation of Core Loss with Nonsinusoidal Waveforms", IEEE IAS Power Electronics Devices and Components Committee 2001.
- [10]A.J.Moses, J.Leicht e P.Anderson, "Iron Losses in Electrical Machines Excited by Nonsinusoidal Voltages", Power Electronics, Machines and Drives, 16-18 abril 2002, Conference Publication nº 487 IEEE 2002.
- [11]A.J.Moses e J.Leicht, "Power Loss of Non Oriented Electrical Steel Under Square Wave Excitation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, nº 4, julho 2001.
- [12]M.Amar, R. Kaczmarek, "A General Formula for Prediction of Iron Losses Under Nonsinusoidal Voltage Waveform", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, nº 5, setembro 1995.
- [13]M. Amar e F. Protat, "A Simple Method for Estimation of Power Losses in Silicon Iron Sheets under Alternating Pulse Voltage Excitation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, nº 2, março 1994.
- [14]E. Barbisio, F. Fiorillo e C. Ragusa, "Predicting Loss in Magnetic Steels Under Arbitrary Induction Waveform and With Minor Hysteresis Loops", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, nº 4, julho 2004.
- [15]K. Venkatachalam, C. R. Sullivan, T. Abdallah e Hernán Tacca, "Accurate Prediction of Ferrite Core Loss with Nonsinusoidal Waveforms Using Only Steinmetz Parameters", COMPEL 2002: 8th IEEE Workshop on Computers in Power Electronics.
- [16]A. Basak, A.J. Moses, "Harmonic Losses In a Three Phase Transformer Core", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-14, nº 5, setembro 1978.

