



XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2010 – 22 a 26 de novembro

São Paulo - SP - Brasil

TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS COM NÚCLEO DE LIGA AMORFA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RURAIS

Benedito Antonio Luciano	Renato Cucatu Inácio	Raimundo C. S. Freire
UFCG	Celtins	UFCG
benedito@dee.ufcg.edu.br	renato.inacio@redenergia.com	rscfreire@dee.ufcg.edu.br
Francisco C. F. Guerra	José G. A. Lira	Mário A. G. Camacho
UFCG	UFCG	Grupo Ind. João Santos
chagas@dee.ufcg.edu.br	liragutemberg@gmail.com	mariocamacho@nassau.com.br

Palavras-chave

Eficiência energética

Liga amorfa

Núcleo de transformador

Sistemas de distribuição de energia elétrica

Resumo

Neste trabalho são apresentadas considerações sobre o desempenho de transformadores com núcleo de liga amorfa, comparando-as com as de transformadores com núcleo de aço ao silício GO utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica rurais. No caso específico, foram realizados estudos experimentais com transformadores monobuchas de 5 kVA com retorno por terra – MRT. A partir dos resultados obtidos pode-se confirmar o desempenho superior dos transformadores com núcleo de liga amorfa face aos transformadores com núcleo de aço ao silício GO, particularmente no que diz respeito às perdas no núcleo e à corrente de excitação.

1. Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica nas áreas rurais apresentam, em geral, alto custo de operação para as companhias concessionárias, devido à sazonalidade de suas cargas. Nessas condições, as perdas nos núcleos dos transformadores fabricados com aço ao silício convencional, de grãos orientados – GO, tornam-se significativas pelo fato desses transformadores operarem na maior parte do tempo em condições de carga leve ou mesmo a vazio. Em tais circunstâncias, a corrente total solicitada pelo sistema tem uma parcela preponderantemente oriunda da corrente de excitação dos transformadores que, para efeito analítico, pode ser decomposta em duas componentes: uma magnetizante, de caráter não-linear, relacionada com as perdas histeréticas; e outra, em fase com a tensão, relacionada com as perdas ativas, provocada, sobretudo, pelas correntes parasitas.

Dentre os transformadores utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica rurais destacam-se os transformadores monobuchas, caracterizados como monofilar com retorno por terra – MRT, que são transformadores com somente uma bucha no lado de alta tensão e uma, duas ou mais buchas no lado de baixa tensão. Geralmente, esses transformadores são de baixo custo de aquisição e têm potências nominais de 5, 10 e 15 kVA. No Brasil, transformadores dessa natureza são fabricados de acordo com a NBR 5440¹.

O sistema de distribuição MRT, monofilar com retorno por terra, tem sido adotado em muitos países para o suprimento de áreas rurais, a exemplo da Rússia, Nova Zelândia e Austrália. No Brasil, em março de 1986, havia 40 912 km de linhas de distribuição rural operando com o sistema MRT, implantadas por empresas distribuidoras de energia elétrica, atendendo a 124 328 consumidores. Dentre elas, destacam-se as experiências das seguintes empresas: CEMAR, CELPE, COBER, LIGHT, CESP, COPEL, CELSC e CEEE².

O desenvolvimento das ligas amorfas aplicáveis em núcleos de transformadores teve início em 1975. Entretanto, a introdução no mercado destes materiais só veio a ocorrer em 1976, quando o primeiro transformador de distribuição com núcleo toroidal de material amorfo, projetado por Joseph Mas³, foi construído no Laboratório Lincoln do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA).

Naquela oportunidade, o desempenho de um protótipo de transformador de 30 kVA, confeccionado com núcleo de material amorfo, foi comparado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Realizados os ensaios, os resultados obtidos foram amplamente favoráveis ao transformador com núcleo de material amorfo, particularmente no tocante às perdas em vazio e corrente de excitação: redução de 87,5% nas perdas do núcleo e a corrente de excitação foi reduzida de 2,5 A para 0,12 A.

Estudos de casos sobre o emprego de transformadores com núcleo de liga amorfa em sistemas rurais de distribuição de energia elétrica chineses foram relatados por TANG & WANG⁶.

No Brasil, os primeiros estudos e ensaios experimentais sobre a aplicação de ligas amorfas em núcleos de transformadores tiveram origem no ambiente acadêmico⁴, passando, em seguida, para a montagem em fábricas de transformadores⁵ e instalações em sistemas de distribuição de energia elétrica⁷.

Neste trabalho são apresentados estudos experimentais sobre o desempenho de transformadores MRT de 5 kVA com núcleo de liga amorfa ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$) versus núcleo de aço ao silício GO, incluindo discussões sobre eficiência energética, custos e impactos ambientais. As razões principais para a escolha do transformador monofásico MRT foram basicamente duas: (1) técnica, pois as cargas elétricas nas zonas rurais são geralmente muito pequenas, sendo rara a necessidade do emprego de três condutores para atender a capacidade das mesmas; e (2) econômica, pois nos sistemas monofásicos há uma redução de custo em relação aos sistemas fase/fase.

2. Desenvolvimento

A seguir, são apresentados estudos experimentais sobre o desempenho de dezessete transformadores MRT de 5 kVA com núcleo de liga amorfa ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$) fabricados pela indústria brasileira ITB, em 2009. Na Figura 1 mostra-se uma fotografia dos transformadores sob estudo.



Figura 1. Transformadores MRT no ambiente da fábrica, antes da realização dos ensaios de rotina.

Cada unidade com núcleo de liga amorfa sobre as quais foram realizados ensaios de rotina possui as seguintes características:

Potência nominal: 5 kVA;

Fases: 1;

Tipo aéreo convencional;

Frequência: 60 Hz;

Tensões no lado de Alta Tensão (kV): 20,90 a 18,19;

Tensões no lado de Baixa Tensão (V): 440/220;

Derivações: 5; Alta Tensão ligada em 9,92 kV e Baixa Tensão ligada em 440 V;

Corrente nominal de Alta Tensão: 0,25 A;

Corrente nominal de Baixa Tensão: 11,36 A;

Polaridade subtrativa.

Todos os ensaios de rotina foram realizados de acordo com as normas específicas. Mas, por estarem diretamente relacionados com a eficiência energética dos transformadores foram destacados para serem apresentados neste trabalho os ensaios de perdas em vazio, corrente de excitação e o ensaio de curto-circuito.

Na Tabela 1 são apresentados os valores comparativos referentes às perdas e corrente de excitação nesses transformadores monofásicos de 5 kVA, tomando como base a NBR 5440¹.

Tabela 1 - Valores comparativos, obtidos experimentalmente, para perdas e corrente de excitação em transformadores monofásicos com tensões máximas de 24,2 kV e 36,2 kV.

Ensaio	Núcleo amorfo	Núcleo de FeSi GO	Valores de acordo com a NBR 5440 ¹
Perdas em vazio (W)	8	36	50
Corrente de excitação (%)	1,12	3,17	4,8

No ensaio de perdas em vazio e corrente de excitação, a medição das perdas foi realizada à frequência nominal, aplicando-se a tensão nominal ao enrolamento de BT e deixando o enrolamento de AT em circuito aberto, conforme especificado na NBR 5356⁸.

Na Figura 2 são apresentadas, em forma de gráficos, os resultados de ensaios comparativos entre dezessete unidades de transformadores com núcleo de ligas amorfa e dezessete transformadores com núcleo de FeSi, de igual potência nominal (5 kVA).

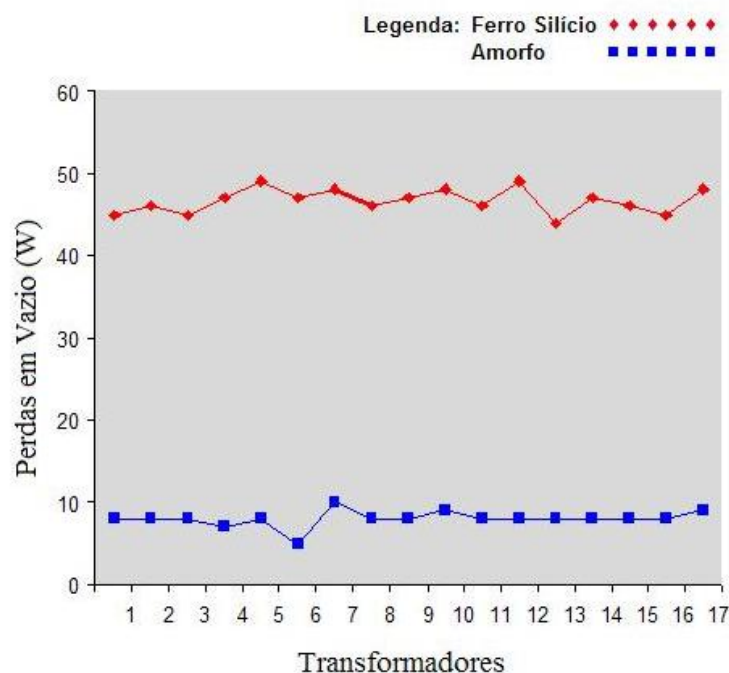


Figura 2. Perdas no núcleo de transformadores com núcleo de liga amorfa e de transformadores com núcleo de FeSi GO convencional.

Uma vez que a corrente em vazio é pequena, as perdas por efeito Joule nos enrolamentos I^2R são desprezíveis, prevalecendo as perdas decorrentes do processo de magnetização e desmagnetização do material magnético do núcleo. Em termos analíticos, essas perdas são caracterizadas como histerese, correntes parasitas (correntes de Foucault) e perdas anômalas.

A perda por histerese é diretamente proporcional à frequência da tensão de alimentação e a perda por correntes parasitas é diretamente proporcional ao quadrado da frequência da fonte. Esta é a razão pela qual este teste deve ser realizado à frequência nominal.

Fisicamente, o porquê de a corrente de excitação ser pequena, em comparação com a corrente nominal do enrolamento, deve-se ao fato de o transformador em vazio poder ser representado por uma carga de alta impedância com relação à fonte de alimentação. Essa impedância é tão maior quanto maiores forem a permeabilidade magnética e a resistividade elétrica do material do núcleo.

No caso específico da liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ utilizada nos núcleos dos transformadores, esses valores são superiores aos valores apresentados pelas ligas de FeSi GO utilizadas em transformadores convencionais. Pois, o valor máximo da permeabilidade magnética relativa da liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$, a 60 Hz, se situa em torno de 70 000, enquanto o valor dessa grandeza para o FeSi GO, a 60 Hz, se situa em torno de 40 000. Já o valor da resistividade elétrica da liga amorfa $Fe_{78}B_{13}Si_9$ se situa entre 130 e 135 $\mu\Omega.m$, enquanto o valor dessa grandeza para o FeSi GO se situa entre 10 e 47 $\mu\Omega.m$.

O elevado valor da permeabilidade relativa propicia um melhor acoplamento magnético e o elevado valor da resistividade elétrica resulta em menores perdas por correntes parasitas no núcleo.

Observa-se também que, embora ambos os transformadores apresentem valores de corrente de excitação e perdas em vazio abaixo dos valores preconizados na NBR 5440¹, verifica-se que os valores da corrente de excitação (0,13 A) e das perdas em vazio (8 W), para os transformadores com núcleo de liga amorfa, são inferiores aos dos transformadores com núcleo de FeSi GO: 0,36 A e 36 W, respectivamente.

A medição das perdas em curto-circuito foi realizada à frequência nominal, conectando os terminais da fonte de ensaio aos terminais do enrolamento de AT do transformador e mantendo-se os enrolamentos de BT em curto-circuito, conforme previsto na NBR 5356-1⁸ e mostrado na Figura 3.



Figura 3. Transformador com buchas de BT em curto-circuito.

É importante ressaltar que, diferentemente do ensaio de circuito aberto (ensaio de perdas em vazio), no ensaio de curto-circuito as perdas por efeito Joule nos enrolamentos I^2R não são

desprezíveis e dependem da temperatura. Este é o motivo pelo qual a temperatura ambiente deve ser registrada quando da realização do ensaio.

Na Tabela 2 são apresentados os valores comparativos referentes aos testes de curto-circuito referentes aos transformadores monofásicos de 5 kVA com tensões máximas de 24,2 kV e 36,2 kV, tomando como base a NBR 5440¹.

Tabela 2 - Valores comparativos, obtidos nos ensaios de curto-circuito para os transformadores monofásicos com tensões máximas de 24,2 kV e 36,2 kV.

Ensaio de curto-circuito	Núcleo amorfo	Núcleo de FeSi GO	Valores de acordo com a NBR 5440 ¹
Perdas (W)	118	100	120
Corrente (A)	0,25	0,24	0,25
Tensão (V)	536,05	527,34	-

Quando da realização dos ensaios com os transformadores com núcleo de liga amorfa, a temperatura ambiente registrada foi de 32 °C e no ensaio realizado com o transformador com núcleo de FeSi a temperatura registrada foi de 27 °C.

Conforme se pode perceber na Tabela 2, há pouca diferença entre os valores obtidos nos ensaios de curto-circuito para ambos os tipos de transformadores. Isto, de fato, já era esperado, pois as perdas ativas dizem respeito ao efeito Joule nos enrolamentos, não tendo qualquer dependência com o material magnético do núcleo e a corrente de curto-circuito depende da impedância de curto-circuito. De acordo com o modelo analítico do transformador, a impedância de curto-circuito é dada pela expressão complexa: $R + jX$, na qual R é a resistência ôhmica dos enrolamentos, refletida ao lado onde o transformador é conectado à fonte durante o ensaio, e X é a reatância de dispersão, associada fisicamente à quantidade de fluxo magnético disperso pelo ar. Portanto, tanto R como X são parâmetros lineares que não dependem do material do núcleo.

3. Conclusões

Embora a adoção da tecnologia das ligas amorfas em núcleos de transformadores tenha se consolidado em diversos países, em sistemas de distribuição de energia elétrica em diversos continentes, estudos sistemáticos sobre a redução das perdas continuam sendo realizados e publicados em revistas e eventos técnicos e científicos⁹.

Analisando as perdas oriundas dos transformadores instalados nos sistemas rurais de distribuição de energia elétrica e levando-se em consideração o carregamento de cada região, verifica-se que a eficiência energética dos transformadores MRT com núcleo de liga amorfa é superior àqueles com núcleo de aço-silício de igual potência nominal.

No tocante ao custo de aquisição, atualmente, no Brasil são fabricados e comercializados transformadores de distribuição com núcleos de liga amorfa, a preços equivalentes aos dos transformadores com núcleo de FeSi GO.

De maneira global, a opção por transformadores com núcleo de liga amorfa, por serem mais eficientes energeticamente, pode contribuir de forma significativa para a redução de CO₂ no meio ambiente. Segundo estudos realizados por Hasegawa & Azuma¹⁰ essa redução poderia ser de 170 milhões de toneladas, em torno de 2,5% do total de emissões em todo o Mundo.

Portanto, como a eficiência energética dos transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de liga amorfa face aos transformadores com núcleo de aço-silício GO ficou comprovada, a opção pela aquisição desses transformadores para instalação em sistemas rurais de empresas de distribuição de energia elétrica dependerá de outros fatores como: visão estratégica no combate as perdas técnica, negociação comercial entre fornecedores e departamento de suprimento, capacidade de fornecimento do equipamento pelo fabricante e políticas energéticas governamentais¹¹.

Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES, à Fundação Parque Tecnológico da Paraíba, à FAPESQ-PB, à ITB Equipamentos Elétricos e à CELTINS pelo apoio financeiro em forma de bolsas e de suporte à pesquisa.

4. Referências bibliográficas

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5440 – Transformadores para redes aéreas de distribuição/Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.
- 2 ELETROBRÁS/CEPEL. Seleção de Sistemas – MRT – RER- 05. Rio de Janeiro: Eletrobrás, s.d.
- 3 RASKIN, Donald & DAVIS, Lance A. Metallic glasses: a magnetic alternative. *IEEE Spectrum*, Vol. 18, n. 11, p. 28-33, 1981.
- 4 LUCIANO, Benedito A. Estudo de aplicações da liga $Fe_{78}B_{13}Si_9$ amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência, (Tese de Doutorado), Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, 1995.
- 5 LUCIANO, Benedito A. & ROCHA, Paulo Melo C. Transformador com núcleo de material amorfo: uma experiência conjunta universidade-empresas. In: *Anais do III Congresso Latino-Americano de Distribuição de Energia Elétrica*, p. 349-353, 1998.
- 6 TANG, Li & WANG, Ke. Economic Rural Network Renovation. *Transmission & Distribution World*, p.46-50, August 2000.
- 7 CAVALCANTI, Lemarx F. & LUCIANO, Benedito A. Análise da viabilidade técnica/econômica da utilização de transformadores com núcleo amorfo em redes rurais de distribuição de energia, classe 15 kV. In: CD-ROM do I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia - CITENEL. Brasília, 06 e 17 de novembro de 2001.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-1 – Transformadores de potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
9. HSU, Chang-Hung & CHANG, Yeong-Hwa. Systematic study of loss amorphous core transformers: design and testing. In: *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems*, p. 234-239, 2009.
- 10.HASEGAWA, Ryusuke & AZUMA, Daichi. Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency end environment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, p.2451-2456, 2008.
11. FRAU, Juan & GUTIERREZ, Jordi. Energy efficient distribution transformers in Spain: new trends. In: *19th International Conference on Electricity Distribution*, p.1-4, 2007.