Estudo de Aplicação Experimental e

Viabilidade de Utilização de Transformadores de

Distribuição com Núcleo Amorfo

M.  A.  Bini  e  M.  Moraes,  CPFL;  M.  L.  B.  Campos,  A.  C.  de  Silos  e  F.  A.  Salotti,  IEE/USP;  B.  A.

Luciano,  DEE/CCT/UFPB

*Resumo  -*  Este  artigo  apresenta  o  resultado  do  1o.  Ciclo  do  Projeto

com  título  em  epígrafe,  do  PAP&D  da  CPFL  do  ano  de  1999,

vinculado  à  ANEEL.

O  Projeto  consiste  na  construção  de  oito  unidades  de

transformadores  trifásicos  com  núcleo  amorfo,  realização  de

ensaios  em  laboratório,  instalação  em  redes  aéreas  de  distribuição  e

monitoração das  perdas  e suportabilidade  aos  efeitos  de

sobrecorrentes  e  sobretensões  existentes  nessas  redes,  fornecendo

subsídios  para  elaboração  de  especificação  própria  do  produto  e

identificar  as  melhores  aplicações  tecnico-econômicas.  Visa

também  atestar  a  capacitação  das  indústrias  nacionais  na  fabricação

do produto, com o desenvolvimento de unidades de

transformadores  trifásicos  de  45kVA  e  75  kVA,  a  especificação

dos  equipamentos  de  medições  e  monitoramento  das  grandezas  dos

trafos  quando  instalados,  além  das  estruturas,  locais  e  critérios  de

montagem  desses  transformadores.  Considerando  dados  já

disponíveis  de  medições  de  campo,  são  apresentados  alguns

resultados  e  as  conclusões  parcialmente  obtidas.

*Palavras-chave  -*  Eficiência  energética;  Núcleo  amorfo;

Transformador.

I  -  INTRODUÇÃO

Os  resultados  experimentais,  até  então  obtidos  com  os

protótipos  de  transformadores  monofásicos  montados  com

núcleo  de  material  amorfo  (TDMA),  têm  confirmado  o

desempenho superior destes equipamentos quando

comparados  com  transformadores  de  valores  nominais

idênticos, porém construídos com núcleos de FeSi

convencionais,  particularmente  no  que  se  relaciona  à

corrente  de  excitação  e  às  perdas  em  vazio.

Quanto  aos  transformadores  trifásicos,  o  presente  estudo

em  desenvolvimento  pretende  avaliar  a  estabilidade  das

perdas  ao  longo  do  tempo  e  nas  condições  normais  de

funcionamento,  através  do  monitoramento  “in  loco”  e  as

medições  efetuadas  com  o  transformador  instalado  e  em

operação.  Avaliará  também  a  suportabilidade  ás  diversas

situações  existentes  na  rede  de  distribuição,  tais  como:

sobrecorrentes,  sobretensões,  harmônicos  e  transientes,

vibrações,  efeitos  térmicos  e  climáticos,  etc.

Portanto,  a  substituição  de  transformadores  com  núcleos

de  materiais  ferromagnéticos  cristalinos  tradicionais  por

TDMA,  se  viável  técnicamente,  pode  significar  ganhos

consideráveis  na  conservação  de  energia  e  preservação

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

M. A. Bini e M. Moraes são engenheiros do Departamento de Engenharia

da CPFL (email: mabini@cpfl.com.br e marcelomoraes@cpfl.com.br)

A. C. de Silos é chefe da Seção Técnica de Equipamentos de Medição

do IEE/USP (email: acsilos@iee.usp.br)

F. A. M. Salotti é chefe da Seção Técnica de Máquinas Elétricas do

IEE/USP (email: fsalotti@iee.usp.br)

M. L. B. Campos é consultor do IEE/USP (email: mlbcampos@uol.com.br)

B. A. Luciano é professor do Departamento de Engenharia Elétrica do

CCT/UFPB (email: benedito@dee.ufpb.br)

ambiental.     Isto  porque,  além  de  trazer  como  benefício

econômico  a  redução  da  necessidade  de  construção  de  novas

usinas  geradoras  de  eletricidade,  evitando,  no  caso  de  usinas

hidrelétricas,  impactos  ecológicos  e  sociais,  e,  no  caso  de

usinas     termelétricas,     menor     consumo     e     emissão     de

poluentes,  pela  queima  de  combustíveis.

II.  REVISÃO  BIBLIOGRÁFICA

*A.  Aço  Silício*

No  início  do  século  XX,  Hadfield  e  outros,  estudando  as

propriedades  eletromagnéticas  das  ligas  de  Fe-Si  (ferro-

silício),  verificaram  que  a  resistividade  do  Fe  era  bastante

aumentada  com  a  adição  do  silício,  o  que  contribuía  para  a

redução  das  perdas  causadas  pelas  correntes  parasitas.

A  partir  desse  estudo,  teve  início  todo  o  desenvolvimento

tecnológico  da      fabricação  e  utilização  do  aço  silício.

Preliminarmente,  foram  desenvolvidos  os  aços  de  grão  não

orientados  (GNO),  nos  quais  a  estrutura  cristalina  não  possui

orientação  definida,  proporcionando  facilidade  de  passagem

do  fluxo  magnético  em  qualquer  direção  (anisotropia

magnética).  Esse  tipo  de  aço  é  particularmente  indicado  para

uso  em  estatores  de  máquinas  elétricas  rotativas.

Em  1934,  Norman  Goss  desenvolveu  um  método  de

produção  de  chapas  de  aço  silício  de  grãos  orientados  (GO),

cuja  estrutura  cristalina  possui  uma  direção  preferencial  de

magnetização,  o  que  potencializou  a  utilização  em  núcleos

de  transformadores.

Quando  medidas  na  direção  paralela  à  direção  de

magnetização,  as  perdas  magnéticas  dos  aços  silício  GO  são

inferiores  àquelas  dos  aços  silício  GNO.

Atualmente,  são  disponíveis  comercialmente  três  grandes

classes  de  aço  GO:

1.  Normal:  (RGO  –*Regular  Grain  Oriented*);

2.  Alta  Indução:  (HGO  –*High  permebiality  Grain*

*Oriented*,  ou*HiB*);

3.  Com  refino  de  domínios:  (DR  –*Domain  Refined*).

*B.  Ligas  Amorfas*

Cronologicamente,  o  desenvolvimento  das  ligas  amorfas

potencialmente  aplicáveis  em  núcleos  de  transformadores

teve  início  em  1975,  porém  a  introdução  no  mercado  destes

materiais  só  veio  a  ocorrer  em  1976.     A  cronologia  é

mostrada  na  Tabela  I,  com  as  características  típicas  de  cada

liga,  comparadas  ás  do  ferro-silício  de  grão  orientado.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Composição  (  %  at.)** | **Fe80B20** | **Fe82B12Si  6** | **Fe81B13,5Si3,5C2** | **Fe****78B13Si9** | **FeSi  (GO)** |
| Ano  de  introdução  no  mercado | 1976 | 1978 | 1979 | 1980 | 1935 |
| Indução  de  saturação  (  T  ) | 1,60 | 1,61 | 1,61 | 1,58 | 1,89 |
| Força  coerciva  (A/m,*as-cast*) | 8,0 | - | 6,4 | 4,0 | - |
| Força  coerciva  (A/m,*annealed*) | - | 2,4 | 3,0 | 1,6 | 10,0 |
| Temperatura  de  Curie  (  ºC  ) | 374 | 374 | 370 | 420 | - |
| Temperaturadecristalização(ºC  20K/min) | 390 | 472 | 480 | 560 | - |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ensaios |  | Núcleo dematerialamorfo |  | Núcleo deaço silícioGO |  | ValoresgarantidosNBR 5440 |
| Perdas em vazio (núcleo) | **14,7 W** | **84 W** | **85 W** |
| Perdas no cobre (enrolamento) | 286,5 W | 266 W | - |
| Perdas totais | 301,2 W | 350 W | 355 W |
| Corrente de excitação | **0,28%** | **2,90%** | **3,0%** |
| Tensão de curto-circuito (75°) | 2,47% | 2,50% | 2,50% |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Potência doTransformador(kVA, 1φ) | Perdas no núcleo (W) | Perdas no cobre (W) |
| Aço-silício | Ligaamorfa | Aço-silício | Ligaamorfa |
| 10 | **29** | **12** | 111 | 102 |
| 25 | **57** | **16** | 314 | 330 |
| 50 | **87** | **29** | 462 | 455 |
| 75 | **122** | **37** | 715 | 715 |
| 100 | **162** | **49** | 933 | 944 |

2

TABELA I.  Desenvolvimento  das  ligas  amorfas  para  núcleos  de  transformadores  [1].

A  liga  Fe80B20  (METGLAS  2605)  foi  a  primeira  liga  do

sistema  binário  Fe-B  a  apresentar  indução  de  saturação

superior  a  1,5  Tesla  (T).  A  liga  subseqüente,  Fe82B12Si6

(METGLAS  2605S),  obtida  a  partir  do  sistema  ternário  Fe-

B-Si,  mostrou-se  termicamente  mais  estável  que  a  liga

Fe80B20, apresentando porém sérios problemas de

cristalização  e  irregularidades  superficiais.  Para  superar  esta

limitação,  a  liga  Fe81B13,5Si3,5C2  (METGLAS  2605SC)

foi  introduzida  em  1978  e  segundo  RASKIN  e  DAVIS

(1981)  [2],  com  esta  liga  os  técnicos  da  Allied-Signal  Inc.

(USA)  construíram  no  Laboratório  Lincoln  do  Instituto

Tecnológico de Massachusetts (USA) o primeiro

transformador  com  núcleo  de  metal  amorfo,  em  escala

comercial:  um  transformador  monofásico  de  15  kVA,  com

núcleo  toroidal.

Em  1980,  houve  a  introdução  da  liga  Fe78B13Si9,

atualmente  em  utilização.

Nestes  projetos,  uma  das  maiores  dificuldades  encontrada

pelo  projetista  são  as  propriedades  mecânicas  do  material

amorfo  e  a  necessidade  da  realização  de  tratamento  térmico

após  a  confecção  do  núcleo,  para  que  o  mesmo  alcance  seu

potencial  pleno  de  menores  perdas  e  potência  de  excitação

[3].  A  despeito  destas  dificuldades,  os  benefícios  potenciais

dos  transformadores  de  distribuição  com  núcleo  de  material

amorfo  (TDMA)  têm  motivado  esforços  no  sentido  de

aplicações  extensivas  destes  equipamentos.

Para  efeito  de  comparação,  tomando  como  base  valores

fornecidos  pela  Allied  Signal,  Inc.  (USA),  são  apresentados  na

Tabela  II  os  valores  das  perdas  no  núcleo  e  das  perdas  nos

enrolamentos  de  transformadores  de  distribuição,  confrontando

os  materiais  do  núcleo:  aço-silício  versus  metal  amorfo.

TABELA II.  Comparação  de  perdas  em transformadores,

*C.  Pesquisas  Realizadas  no  Brasil*

monofásicos,  em função  do  material  do  núcleo  [3].

Dois trabalhos acadêmicos pioneiros, envolvendo

pesquisa  e  desenvolvimento  de  protótipos,  podem  ser  aquí

referenciados:  uma  dissertação  de  mestrado  apresentada  da

UFRS  [6]  e  uma  tese  de  doutorado  apresentada  na  UFPB

[7], que  resultou  em  1996  no  projeto  e  realização  dos

protótipos  de  transformadores  monofásicos  com  núcleo  de

liga  amorfa  pela  CEMEC,  cujo  arranjo  interno  é  mostrado  na

figura  1  e  características  na  Tabela  III.  [5].

Figura  1.  Arranjo  interno  do  transformador

Para  a  confecção  dos  núcleos  dos  protótipos  dos

transformadores,  foram  empregadas  ligas  de  duas  polegadas

de  largura  e  alguns  quilogramas  de  massa.     O  material

amorfo  foi  adquirido  junto  á  Allied  Signal  Inc  (USA),  cujo

aspecto  é  mostrado  na  figura  2.

Figura  2.  Aspecto  do  material  de  liga  amorfa

TABELA  III.  Ensaios  comparativos  entre  transformadores

Ainda         em         1996,         num         projeto         conjunto,

com  núcleos  de  FeSi  e  TDMA,  CEMEC  classe  15  kV  [5].

ELETROBRÁS/PROCEL/CEPEL  em  cooperação  com  a

LIGHT-RIO  [8]  iniciaram  um  piloto  de  avaliação,  em

laboratório  e  no  campo,  de  um  lote  de  9  unidades  de

transformadores  monofásicos  de  75  kVA,  montados  com

núcleo  de  liga  amorfa,  importados  pelo  CEPEL  da  firma

norte  americana  HOWARD,  com  recursos  do  PROCEL  .

III  –  DESENVOLVIMENTO  DO  EXPERIMENTO

O     experimento     com  início  em  Dezembro/2000  e

conclusão  prevista  para  Junho/2002,  envolve  o  projeto,

fabricação,  instalação  de  08  unidades  de  transformadores  em

campo,  a  monitoração  de  todas  as  grandezas  elétricas  afetas

ao  funcionamento  desses  transformadores  nas  redes  de

distribuição  e  as  análises  e  conclusões  desse  experimento.

Os  transformadores  a  serem  instalados,  os  critérios  de

instalação  e  os  equipamentos  utilizados  no  monitoramento,

são  descritos  a  seguir:

**Thank you for using Wondershare PDFelement.**

**You can only convert up to 5 pages in the trial version.**

**To get the full version， please purchase the program here:**

[*http://cbs.wondershare.com/go.php?pid=973&m=db*](http://cbs.wondershare.com/go.php?pid=973&m=db)