



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA - ANÁLISE DOS ENROLAMENTOS FRENTE ÀS SOLICITAÇÕES IMPOSTAS PELO SISTEMA ELÉTRICO

**HUMBERTO MARGEL WICKERT(1); TIAGO BANDEIRA MARCHESAN(2);
CEEE-GT(1);UFSM(2);**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de modelagem de um transformador de potência para transitórios eletromagnéticos em altas frequências. O emprego deste modelo possibilita avaliar o comportamento dos enrolamentos frente aos surtos de tensão resultantes de transitórios no sistema elétrico de potência. Os cálculos foram realizados para um transformador de potência de 25 MVA, a partir dos dados obtidos de uma auditoria técnica entre concessionária e fabricante, também conhecida como design review. A representação do modelo do equipamento para a simulação é realizada através de uma linguagem descritiva, netlist. A impossibilidade de medições de tensão ao longo dos enrolamentos do transformador, submetidos a surtos de tensão, motivaram o desenvolvimento do modelo proposto e a sua validação via simulação computacional. Com o objetivo de avaliar as potencialidades do modelo desenvolvido realizaram-se simulações enfatizando a determinação da distribuição das tensões transitórias de impulso atmosférico ao longo dos enrolamentos do transformador, sendo estes resultados avaliados detalhadamente, assim como, proposto métodos de avaliação não invasiva que permita relacionar parâmetros de alta frequência com modelos de simulação tradicionais e a partir destes identificar padrões monitoráveis.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Potência, Tensões Transitórias, Suportabilidade da Isolação, Design Review, Monitoramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

As exigências, relacionadas à disponibilidade e à qualidade no fornecimento de energia elétrica entregue ao consumidor, demandam um alto investimento em equipamentos. Neste contexto destaca-se o transformador de potência, um dos principais componentes na confiabilidade operativa das subestações e interligações dos circuitos de diferentes níveis de tensões. Porém, com o aumento das interligações do Sistema Elétrico de Potência (SEP) os transformadores são muito solicitados durante os distúrbios neste sistema, podendo causar danos severos que provocam sua retirada de operação, diminuindo assim, a capacidade de transmissão de energia [1].

A estes distúrbios somam-se os fenômenos transitórios, caracterizados por tensões transitórias com frente de onda rápida, típicas de descargas atmosféricas; assim como tensões transitórias com frente de onda muito rápida, oriundas de sobretensões de manobras de equipamentos.

A confiabilidade de um transformador de potência está associada à probabilidade de ruptura do seu isolamento, quando submetido a surtos oriundos do sistema. Algumas solicitações importantes podem não ser cobertas por ensaios normatizados e devem ser criteriosamente analisadas e especificadas, a fim de certificar que o projeto



XXV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4596
GTM/28

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

do transformador leve em consideração tais solicitações[2].

É imprescindível compreender como o equipamento comporta-se frente às diversas excitações oriundas do sistema elétrico. Portanto, este trabalho apresenta uma alternativa para a modelagem de alta frequência de transformadores submetidos a transitórios, de forma a possibilitar, através de simulação computacional, o conhecimento da distribuição da tensão ao longo dos enrolamentos.

Para a obtenção de um circuito equivalente que represente a resposta de tensões transitórias em um transformador de potência, adotou-se a modelagem “caixa branca”. Esta refere-se à modelagem física do transformador, onde são conhecidas detalhadamente todas suas partes. Os parâmetros são representados de forma distribuída ou concentrada. A representação através de parâmetros distribuídos leva em consideração as dimensões e características geométricas do equipamento. Já os parâmetros concentrados não têm significado físico direto em termos de equivalência com o transformador [3].

Portanto, a combinação de esforços entre especificação e projeto (concessionária e fabricante), na etapa de design review, pode contribuir para a proteção adequada do transformador para frequências características de manobras da subestação específica, reduzindo os riscos de amplificações internas de tensões e solicitações dielétricas excessivas[4].

Este trabalho propõe a utilização do fluxograma, apresentado na FIGURA 1, durante a fase de projeto do transformador de potência, pois permite a concessionária gerar o seu próprio modelo e realizar as simulações necessárias para um conhecimento mais realista do equipamento. Também sugere relacionar modelos de parâmetros concentrados e distribuídos como ponto de partida para estudos que apresentem indicativos para avaliação das condições de transformadores de potência de modo simplificado e com poucas informações.

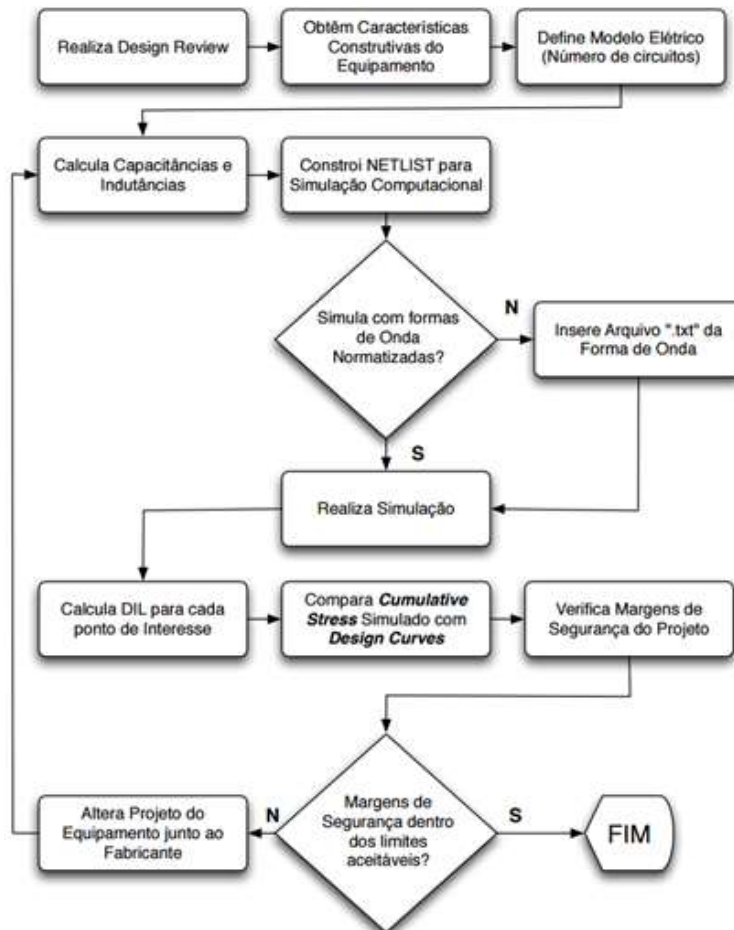


FIGURA 1 – Fluxograma proposto para análise dos transformadores

2.0 - MODELO E SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR

Os cálculos dos parâmetros do circuito equivalente utilizado estão baseados na modelagem física dos enrolamentos. Porém, o modelo utilizado considera parâmetros distribuídos apenas para o disco de entrada do enrolamento de alta tensão (AT); os demais discos deste enrolamento e dos demais enrolamentos são representados através de parâmetros concentrados, ou seja, cada parâmetro do circuito equivalente não corresponderá mais a uma única espira ou disco, e sim a um conjunto de espiras ou discos.

O circuito equivalente do transformador de potência é subdividido em diversos circuitos RLC. Para a obtenção dos parâmetros deste circuito são considerados os dados da geometria interna do transformador. Os elementos da matriz capacitância são calculados, assumindo modelos de capacitores planos ou cilíndricos [5]. Para os elementos da matriz indutância são utilizados modelos matemáticos, que consideram as indutâncias próprias e mútuas em núcleo de ar [6]-[8]. As resistências são incluídas no modelo com a finalidade de proporcionar as oscilações internas originadas no transcorrer do ensaio [7].

A complexidade na representação gráfica de um circuito, envolvendo todos os componentes do modelo equivalente de um transformador de potência, determinou a simulação através de um programa com plataforma SPICE e a descrição do circuito através de netlist. A netlist é a representação descritiva dos circuitos através de linguagem estruturada, onde são definidos todos os componentes e interligações por arquivo de texto.

3.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo de caso utilizado considera um transformador trifásico de três enrolamentos com potência nominal de 25MVA e tensões de 138/13,8/13,8 kV. O enrolamento de alta tensão (AT) é do tipo disco entrelaçado com 80 discos (40+40) e 20 espiras por disco. Na baixa tensão (BT) o enrolamento é do tipo hélice com 90 espiras, enquanto que o enrolamento terciário (T) é do tipo camada com 156 espiras. A Figura 2 apresenta o modelo simplificado com os parâmetros elétricos concentrados.

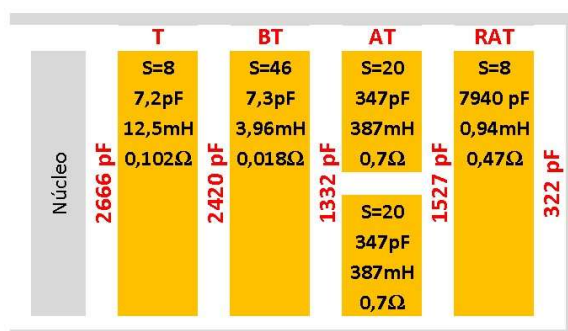


FIGURA 2 – Modelo simplificado com os parâmetros elétricos concentrados

Para análise das oscilações de tensões que ocorrem ao longo dos enrolamentos, nas simulações, utilizou-se a onda de impulso atmosférico normalizada 1,2/50μs com valor de crista de 650 kV. O diagrama de conexões e a onda de impulso aplicado na alta tensão são detalhados na FIGURA 3.

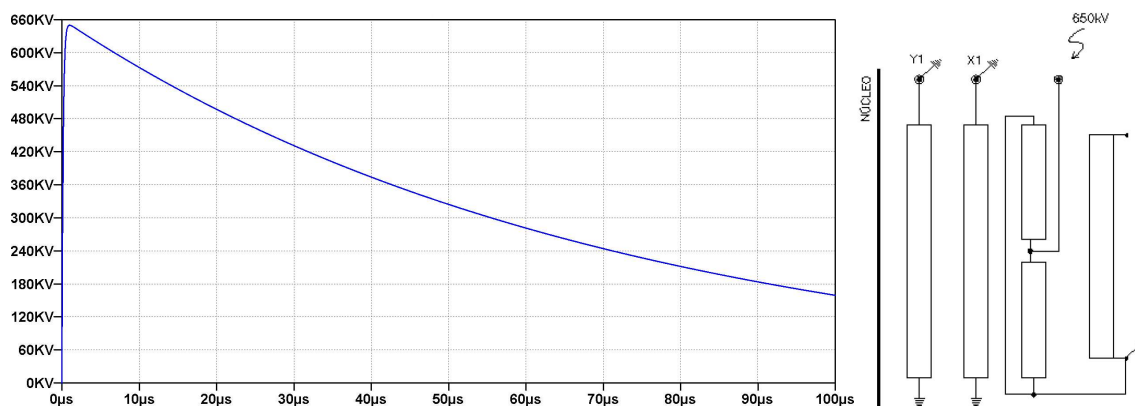


FIGURA 3 – Onda de impulso atmosférico e diagrama de conexões

3.1 Enrolamento de AT

O objetivo desta simulação consiste em representar o transformador e estudar o comportamento das tensões de impulso atmosférico ao longo de todo o enrolamento de alta tensão. A Figura 4 ilustra o esquema de ligação do enrolamento de AT, onde é possível perceber que o primeiro disco da bobina de conexão central é representado espira por espira e as demais seções equivalem a concentração de um par de discos.

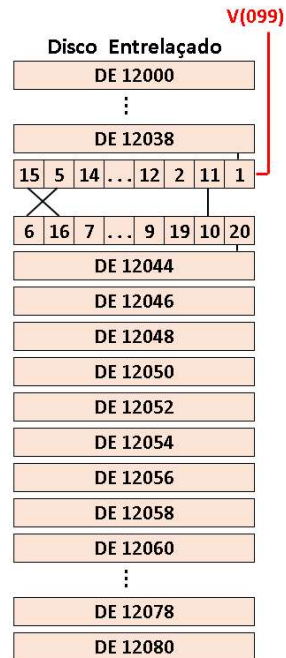


FIGURA 4 – Esquema de ligação do enrolamento de AT

A Figura 5 apresenta a evolução no tempo das tensões transitórias em dez pontos distintos deste enrolamento, conforme esquema de ligação da Figura 4.

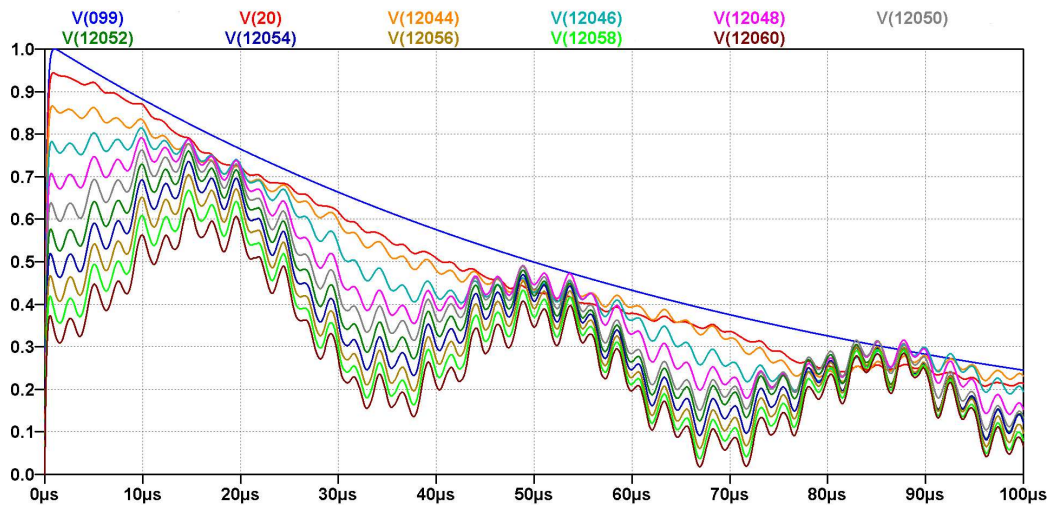


FIGURA 5 – Resposta para impulso atmosférico no enrolamento de AT

3.2 Tensões transferidas da AT para a BT

Na sequência é averiguado o comportamento das tensões transferidas entre os enrolamentos de AT e BT. O esquema de ligação da Figura 6 facilita o entendimento das simulações e análises seguintes.

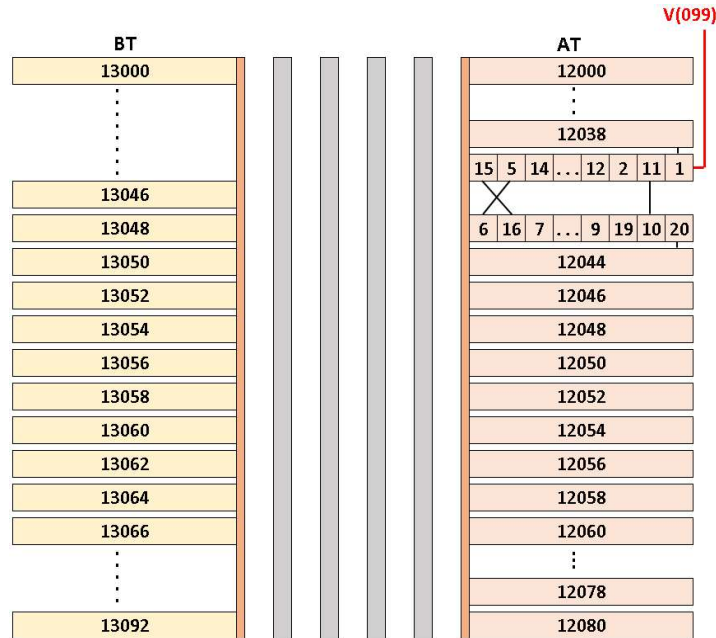


FIGURA 6 – Esquema de ligação entre enrolamentos de AT e BT.

Entre os pontos centrais dos enrolamentos, conforme o esquema de ligação da FIGURA 6, a amplificação da tensão transitória pode chegar a 1,288 pu, Figura 7, considerando como base 650 kV da onda de impulso atmosférico.

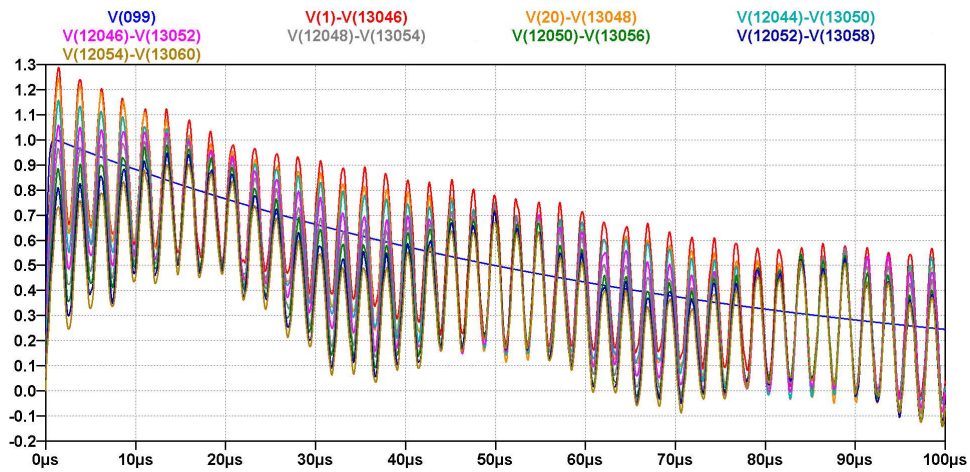


FIGURA 7 – Resposta para impulso atmosférico entre enrolamentos de AT e BT em pu

Na Tabela 1, comparam-se as tensões transferidas entre os enrolamentos de AT e BT fornecidas pelo fabricante e as tensões encontradas a partir do modelo proposto. Em razão do fabricante não ter fornecido o comportamento das tensões ao longo de todo o enrolamento, apresentou apenas os valores, considerou-se os valores máximos do modelo simulado.

Tabela 1: Tensões entre enrolamentos de AT e BT

AT - BT	Tensão (kV)		
	Fabricante	Modelo	Diferença (%)

1-13046	798	837	4,89
20-13048	798	808	1,25
12044-13050	734	752	2,45
12046-13052	679	687	1,18
12048-13054	624	627	0,48
12050-13056	581	575	-1,03
12052-13058	544	525	-3,49
12054-13060	522	476	-8,81

3.3 Tensões entre espiras do enrolamento de AT

Para o comportamento interno no enrolamento de AT, verificam-se as tensões encontradas entre as espiras do primeiro disco. Com estes valores é possível avaliar o isolamento do enrolamento, ao comparar com os valores informados pelo fabricante na etapa de design review.

No projeto do transformador, cujo enrolamento de AT é do tipo disco entrelaçado, foram avaliadas as tensões entre as espiras iniciais, centrais e finais do disco central, destacado na Figura 8.

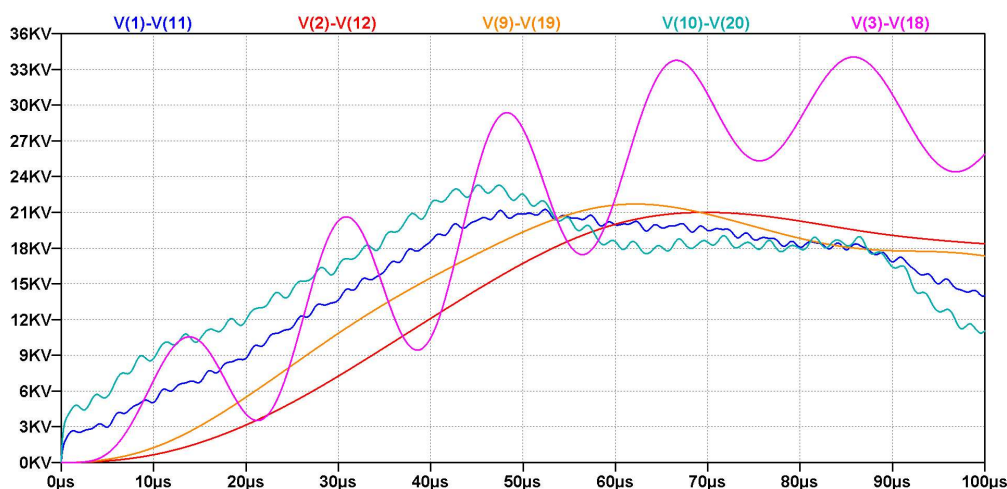


FIGURA 8 – Tensões entre espiras no enrolamento de AT

O fabricante do transformador apresentou, através de uma tabela, a tensão entre espiras de 33 kV de crista para o primeiro disco deste projeto. Destaca-se que a tensão de crista admissível considerada neste projeto é de 52 kV.

Diante destes valores apresentados pelo fabricante e da simulação na FIGURA 8, considera-se como satisfatório e com boa precisão o modelo desenvolvido. Também se observa que o isolamento projetado entre espiras atende às solicitações impostas pela onda de impulso atmosférico.

3.4 Tensões entre discos do enrolamento de AT

As tensões transitórias entre discos do enrolamento tipo entrelaçado são observadas em sete pontos distintos, conforme apresentado na Figura 9.



FIGURA 9 – Tensões entre discos no enrolamento de AT

Diante das simulações realizadas para análise das tensões entre discos do enrolamento de AT do transformador, tomam-se estes pontos como referência para comparação com os dados fornecidos pelo fabricante, conforme destacado na

Tabela 2: Tensões entre discos no enrolamento de AT (kV)

Discos	Fabricante	Modelo
12044-12046	57	61,20
12046-12048	51	54,98
12048-12050	46	49,67
12056-12058	36	33,37
12058-12060	37	30,71
12070-12072	40	39,48

4.0 - ANÁLISE DIELÉTRICA – ELEMENTOS FINITOS

A partir de duas simulações eletrostáticas realizadas no software Maxwell 16.1 em modelo 2D, utilizando os dados obtidos das simulações anteriores foram feitas análises dos mesmos no Software de Design Curves. Todas as análises utilizam a forma de onda “Atmospheric impulse”.

Na análise do transformador protótipo deste artigo, basicamente utilizam-se duas análises: o gradiente cumulativo de tensão ao longo do caminho de descarga elétrica e o estresse pontual em pontos críticos de projeto.

Os valores de estresse cumulativo para possíveis caminhos de descarga, obtidos através de simulações em elementos finitos, são comparados as curvas de projetos para as condições de descarga superficial, dutos de óleo e regiões com eletrodo isolado, conforme apresentado na Figura 10.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

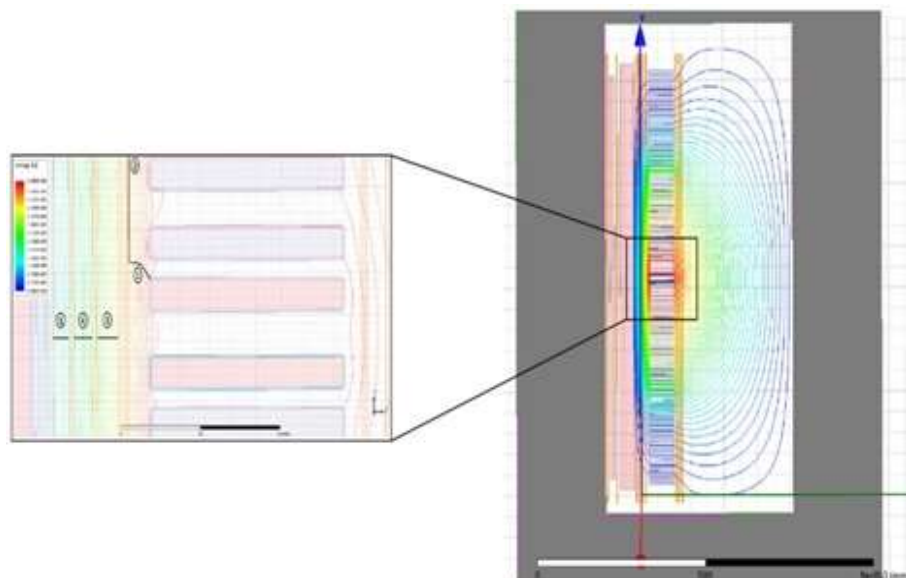


FIGURA 10 – Representação em elementos finitos

Estes pontos analisados são detalhados na Figura 11, entretanto neste artigo será abordado apenas o eletrodo isolado (ponto 1).

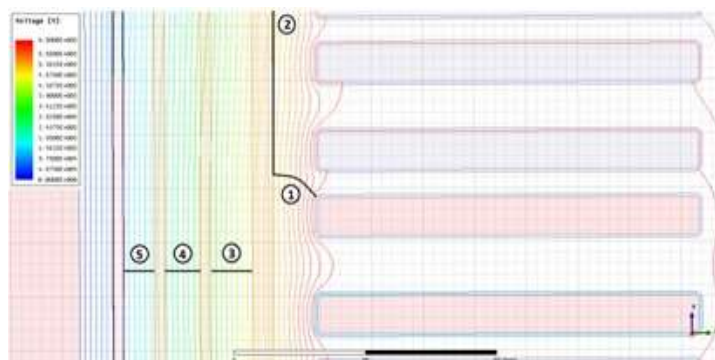


FIGURA 11 – Detalhe da isolação

Na Figura 12 apresenta-se a simulação dos gradientes de tensão para o local que será analisado. Deve-se considerar que a bobina de AT é de conexão central, isto é, os discos centrais do enrolamento estão submetidos a maiores gradientes de tensão quando da aplicação de forma de onda de impulso atmosférico. Observa-se, como esperado, a presença de campo elétrico não uniforme no topo dos discos de entrada central da bobina de alta tensão.

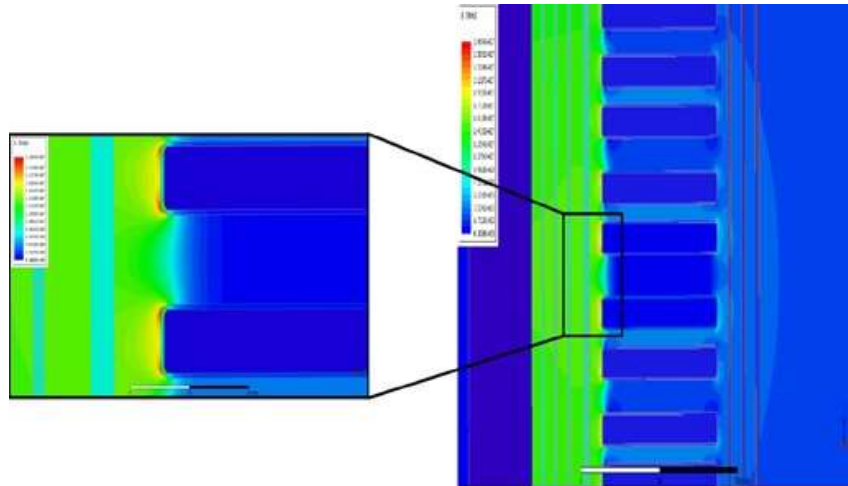


FIGURA 12 – Gradientes de tensão para os discos centrais do enrolamento de AT

A Figura 13 apresenta a análise do estresse cumulativo (ponto 1) em comparação as curvas de projeto para a condição de eletrodo isolado. Neste caso, assume-se como linear a distribuição da onda de impulso atmosférico nos enrolamentos do transformador.

Margem de Segurança: 17,85%
Máximo kV/mm: 9,49 (Abaixo do limite)

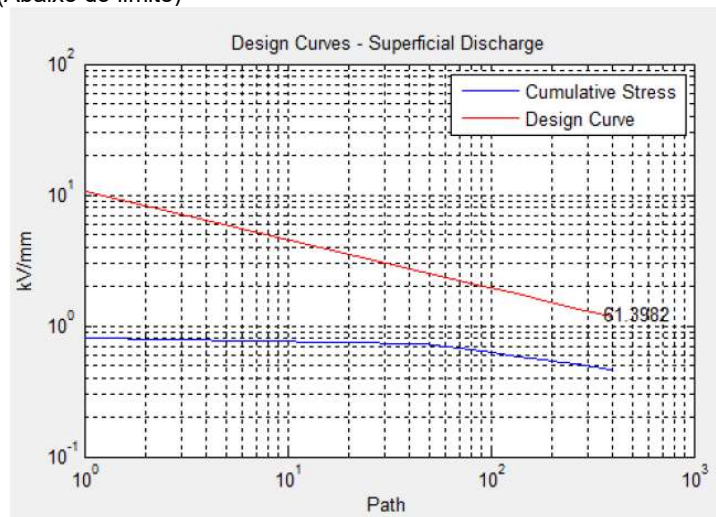


FIGURA 13 – Análise Design Curve para distribuição linear

Tendo como base as análises de projeto, observa-se que o gradiente pontual máximo de projeto está de acordo com os valores limites e a margem de segurança, segundo as análises de estresse cumulativo são de 17,85 %.

Para a análise seguinte, diferente da abordagem anterior, não se considerou a distribuição linear na onda de impulso atmosférico transferida entre enrolamentos de AT e BT. Utilizou-se a distribuição obtida nas simulações apresentadas neste estudo. As margens de segurança de acordo com as curvas estipuladas na Figura 14 é de -24,36 % e o valor de gradiente máximo encontra-se acima do valor máximo estipulado de projeto.

Margem de Segurança: -24,36%
Máximo kV/mm: 17,71 (Acima do limite)

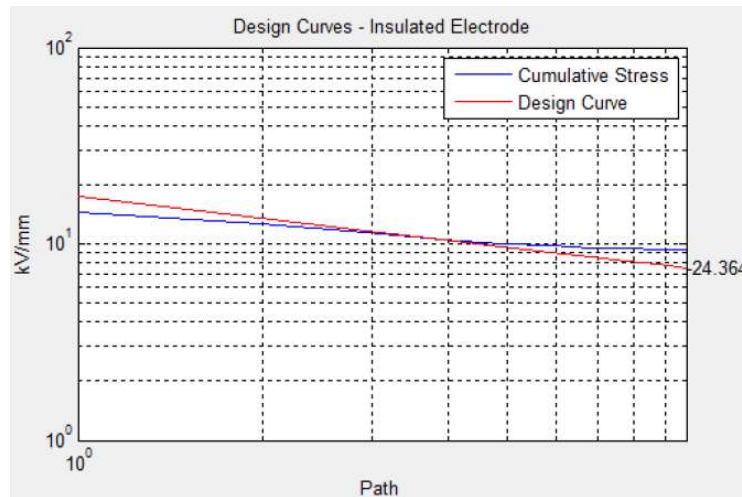


Figura 14 – Design Curve para distribuição simulada

5.0 - SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Conforme abordado neste trabalho, diversos estudos tem sido realizados para desenvolver modelos de alta frequência de transformadores que nos permitam entender sua interação com o Sistema Elétrico. Entretanto, o parque de transformadores instalados no Brasil é antigo e na grande maioria dos casos as Concessionárias de Energia não dispõem de Design Review e dados aprofundados da construção destes equipamentos.

Como o sistema de transmissão e distribuição está sujeito a constantes alterações e interligações, propõem-se a discussão do aprimoramento de métodos que relacionem dados de modelos de alta frequência e baixa frequência com ensaios e medições de parâmetros elétricos dos transformadores. Com base nisso, serão apresentados os resultados preliminares da monitoração contínua das correntes de terra oriundas do transformador mediante o prévio conhecimento do comportamento da instalação, prevendo a possível mudança das características destas correntes, definindo-se, então, as ações de estudos e manutenções preditivas.

6.0 - CONCLUSÃO

A partir das constatações obtidas nas simulações computacionais, fica evidente a importância da realização do design review entre concessionária e fabricante, assim como, a utilização do fluxograma proposto para avaliação do transformador de potência, especialmente ao sistema de isolamento submetido a transitórios.

Quando considerado a distribuição da onda de impulso atmosférico de forma não linear, utilizando os dados obtidos das simulações, observa-se através da análise em elementos finitos que a margem de segurança para o estresse cumulativo está inadequada para o projeto. Estes fatos sugerem a necessidade de uma análise detalhada do projeto do transformador, a fim de garantir sua confiabilidade de operação em campo.

Merece ser destacada a importância das simulações, pois permitem o conhecimento detalhado da distribuição das tensões internas no equipamento, dada a impossibilidade de sua obtenção nos testes de aceitação. Estes resultados podem ser analisados pelo cliente e comparados aos valores de suportabilidade do isolamento disponibilizados pelo fabricante, revelando, em alguns casos, a necessidade de estudos mais detalhados do projeto.

Ressalta-se ainda a necessidade de desenvolvimento de novos métodos que permitam avaliar de forma simplificada o parque de transformadores existente sujeitos a transitórios, de forma a elevar significativamente a confiabilidade destes sistemas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G.M.V. Zambrano, Identificação de Parâmetros de um Circuito Equivalente de Transformadores de Potência”, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. 2009.
- (2) JWG-A2/C4-03 CIGRE-Brasil. “Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência”. Brochura 12, 2011.
- (3) JWG-A2/C4.39 CIGRÉ. “Electrical Transient Interaction Between Transformers and the Power System”. Part 1 – Expertise, 2014.
- (4) MENDES, J. C. “Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Alta Tensão”. 1995. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1995.
- (5) S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, “Transformer Engineering: Design and Practice” chapter 7, CRC Press; 1st edition (May 24, 2004), ISBN-10: 0824756533.
- (6) F.W. Grover, “Inductance Calculations: Working Formulas and Tables”, Instrument Society of America, New York, 1973.
- (7) V. Venegas, J.L. Guardado, E. Melgoza, S. Maximov, M. Hernandez, “A Computer Model for Transient Voltages Distribution Studies in Transformer Windings”, 9th WSEAS/IASME International Conference. Florença, pp. 121-126, August 2011.
- (8) K.A. Wirgau, “Inductance calculation of air-core disk winding”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No.1, January/February 1976, pp. 394-400.
- (9) WICKERT, H. M. “Modelagem e Simulação Computacional de Transformadores de Potência para Estudo de Transitórios em Altas Frequências”. 2016. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.
- (10) E. L. Bonaldi, et. al., “Detecção de Defeitos em Transformadores de Potência Utilizando o Sinal de Corrente do Aterramento”. UNIFEI. 2011

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Humberto Margel Wickert Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Vale do Rio do Sinos - UNISINOS (2014) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM (2016). Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica na UFSM. Na CEEE-GT atua como Coordenador de O&M na Área de Transmissão.

Tiago Bandeira Marchesan Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) pela mesma Universidade. Realizou seu doutorado com estágio na Universidad de Oviedo, Espanha. Atualmente é Coordenador de Transferência de Tecnologia da UFSM, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (CAPES conceito 6) e professor do Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência da mesma Universidade. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, tendo atuado como pesquisador do Grupo WEG (Weg Equipamentos Elétricos S.A.), professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos



XXV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

4596
GTM/28

Sinos (UNISINOS) e da Universidade do Noroeste do Estado do RS (UNIJUI). Atua, principalmente, nas seguintes áreas: fontes chaveadas, métodos de correção do fator de potência, sistemas de iluminação, e em inovações na área de transformadores de potência (Projetos de Desenvolvimento Tecnológico)