



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GLT/12
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

NOVO INDICADOR PARA CONSTATAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Martin Max L. C. Negrão(*)
UFPA

Paula Renatha N. da Silva
UFOPA

Petrônio Vieira Junior
UFPA

Jorge Cabuçu Lima Freitas
ELETRONORTE

RESUMO

Este artigo apresenta um novo indicador da condição normal e anormal de funcionamento de uma linha de transmissão que é a capacitância das frequências harmônicas da corrente de fuga. Inicialmente é apresentado um modelo matemático adequado para aplicação em manutenção preditiva de trechos de linhas de transmissão a baixo custo, sem necessidade de sensores distribuídos ao longo da linha. Este modelo permite o emprego da metodologia de detecção, diagnóstico e localização de falhas (FDI) através do acompanhamento da corrente de fuga de linhas de transmissão. O modelo foi validado através de medidas obtidas em um trecho de linha de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Corrente de Fuga, Poluição em Isoladores, Capacitância, Decomposição Harmônica.

1.0 - INTRODUÇÃO

A poluição de isoladores, o vandalismo, as queimadas, a invasão urbana com a construção na faixa de servidão da linha são alguns motivos que causam faltas e consequentes desligamentos nas Linhas de transmissão (LTs). Estes eventos reduzem o nível de isolamento da linha, um aumento de sua corrente de fuga (I_F). A evolução destes eventos é gradativo o que supõe a possibilidade da observância da evolução da falha até a ocorrência da falta. Adicionado a estes fatos, tem-se o envelhecimento e desgaste natural da linha, que deve ser levando em conta no estudo do nível de isolamento da mesma. Existem métodos de detecção em tempo real de faltas em LT's, alguns analisam a tensão e a corrente de linha, observando a fase entre elas para a localização de faltas (1). Outras metodologias analisam as características dos fasores tensão e corrente para fazer a estimativa do estado das linhas de transmissão (2). Existem ainda alguns métodos que analisam amostras temporais da tensão e da corrente para medir a impedância da linha de transmissão e possibilitar o uso de sistemas de estimação do local das falhas (3). Esses métodos, contudo, não têm o poder de estimar o estado de isolamento da linha de transmissão e nem prever um futuro caso de falha. Por outro lado, trabalhos como o de (4) observam a mudança no comportamento da I_F na ocorrência de flashover. Outros trabalhos como o de (5) e (6), verificaram que através da decomposição harmônica da corrente de fuga em isoladores contaminados, há um nível máximo de magnitude para determinadas frequências, e que estas sinalizam o mau funcionamento da isolação. (7) incluiu em seu artigo os efeitos climáticos somados a poluição marinha (salina) e industrial. Nestes casos com a monitoração das condições de funcionamento da LT através da verificação da corrente de I_F é possível desenvolver uma proteção automática e preditiva, através da detecção e diagnóstico de falhas incipientes na LT.

Este artigo apresenta um modelo adequado para monitoração de LTs que objetiva a detecção e diagnóstico de falhas em LT, por meio da análise da I_F . Para tanto foi utilizado a metodologia de detecção, diagnóstico e localização chamada de FDI (Fault Detection Isolation).

(*) Avenida Augusto Corrêa, n° 1 – CEP 66075-900 Belém, PA – Brasil
Tel: (+55 91) 8248-6563 – Email: max@ufpa.br

2.0 - DESENVOLVIMENTO DE MODELO PARA EMPREGO DO FDI

Os métodos de detecção de falhas aplicadas na monitoração em contínuo e associados com o tempo possibilitam desenvolver métodos de predição de falhas (8). A detecção de falhas para predição deve comparar, de forma contínua e em tempo real, o comportamento normal do sistema com o comportamento real, como sugere a Figura 1. O sinal resultante desta comparação é chamado de resíduo. Para diagnóstico pode-se utilizar padrões de sinais de modos de falha e os sinais do resíduo. Para o utilizar desta metodologia é necessário o emprego de modelos de funcionamento normal e dos modos de falha.

2.1 Modelos para Problemas FDI

O modelo a ser obtido, através dos estudos apresentados neste artigo, é para ser empregado na detecção da falha incipiente através do método baseado em modelos. Este método tem por base modelos analíticos paramétricos ou não paramétricos com uma precisão que permitia realizar uma redundância analítica (9). Segundo (10) a redundância analítica baseia-se na comparação entre medições reais e sinais gerados por um modelo matemático do sistema. O modelo analítico do comportamento de modos de falha para as entradas do sistema e a detecção e diagnóstico da falha é realizada pela verificação de resíduo, como mostrado na Figura 2. O resíduo é a diferença determinada entre as medições reais e as calculadas pelo modelo (11). Nem sempre um resíduo significativo representa uma falha, pode ser um comportamento imprevisto, que pode ser descrito pela co relação dos parâmetros do modelo. Se esta correlação é perdida então é porque foi introduzido um novo elemento no sistema.

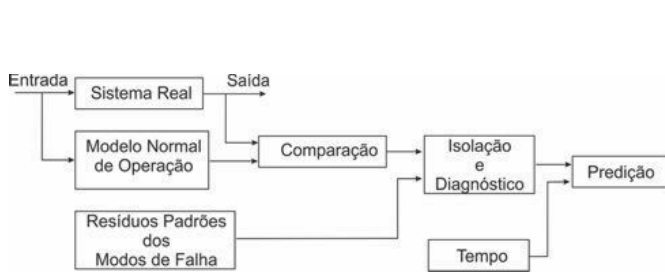


FIGURA 1 – Método de detecção de falha usando modelo de funcionamento normal e os modos de falha do sistema.

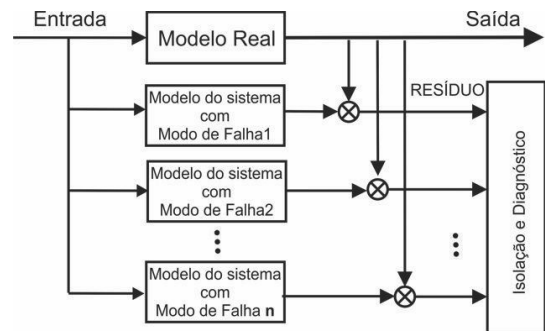


FIGURA 2 – Método de Detecção e Diagnóstico com resíduos gerados por modelos dinâmicos de modos de falha.

A obtenção do resíduo é o primeiro passo para a detecção de uma falha. Um segundo passo seria verificar se este resíduo representa ou não uma falha. No segundo passo a informação do resíduo pode ter uma assinatura que represente um padrão associando o sinal do resíduo com a causa da falha e sua localização. Pelo exposto, pode-se perceber a grande importância de se ter um modelo matemático de funcionamento normal que represente o sistema analisado com um alto grau de precisão.

2.2 Identificação do Sinal para Obtenção do Resíduo em Problemas FDI Aplicados em LTS

Foi descrito na introdução deste artigo que a monitoração das condições de isolamento ou de funcionamento de uma LT pode ser realizada através da observação da corrente de I_F . Ainda, segundo (12), a capacitância, associada com uma resistência, representa as perdas dielétricas LT, isto é, perdas representadas pela I_F , já que esta normalmente passa pelos isoladores. Em outras palavras, o comportamento da I_F esta diretamente ligada ao valor da capacitância da linha. Na detecção de falhas em LTS, proposta neste trabalho, o resíduo é o resultado da comparação do sinal da I_F medida com o sinal da I_F obtida por modelo matemático de funcionamento normal da LT. Por outro lado a capacitância de uma LT varia com as variáveis ambientais (VAs) e consequentemente o comportamento da I_F também. Portanto, para o desenvolvimento do modelo matemático de funcionamento normal da LT é necessário caracterizar a I_F também em relação as VAs (temperatura ambiente, umidade relativa do ar).

3.0 - CARACTERIZAÇÃO DA I_F

A determinação experimental da I_F é calculada usando a teoria das superfícies gaussianas. Esta teoria assegura que a soma algébrica das corrente que entram e saem de uma superfície fechada é igual à zero (13) como mostrado na Figura 3. Isto significa que ao monitorar um trecho de LT, pode-se obter sua I_F a partir da soma vetorial das correntes de saída e entrada deste trecho (equação1).

$$I_F = I_{SEGuamá} - I_{SEUtinga} \quad (1)$$

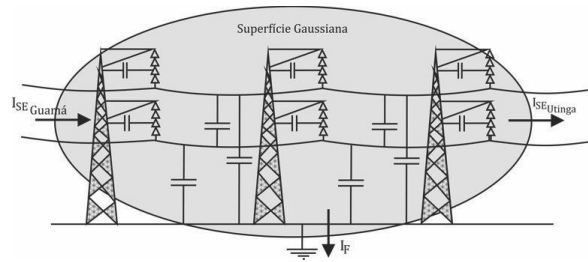


FIGURA 3 – Aplicação do teorema de Gauss para superfícies fechadas para um trecho de linha de transmissão.

4.0 - CAPACITÂNCIA E VARIÁVEIS AMBIENTAIS - EXPERIMENTO

As VAs que mais influenciam na capacitância da LT são Temperatura Ambiente (T_{amb}), Umidade Relativa do Ar (U_{ar}) e a Velocidade do Vento (V_{vent}). Para investigação do comportamento da capacitância, com a variação ambiental, foi construída uma bancada experimental. Um registro fotográfico desta bancada é apresentado na Figura 4, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 5. Esta bancada consiste basicamente de um capacitor coaxial (C), cuja capacitância é conectada em série com uma resistência (R). O capacitor coaxial é instalado em uma cuba de acrílico, chamada Cuba de Ensaio, onde as condições ambientais são controladas. A corrente através do capacitor é a medida indiretamente através da leitura da tensão V_2 nos terminais do resistor R. As medições são realizadas para diversos níveis de tensão e diferentes condições para U_{ar} , T_{amb} e V_{vent} . As temperaturas T_{amb1} e T_{amb2} são medidas na entrada e na saída do capacitor coaxial. A temperatura T_{amb3} é tomada juntamente com a medição da velocidade do vento V_{vent} .

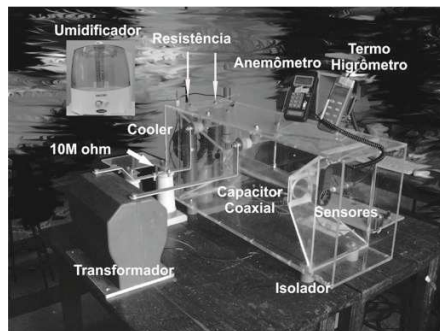


FIGURA 04 – Cuba de ensaios.

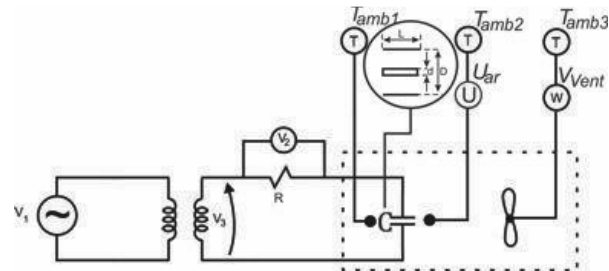


FIGURA 05 Diagrama elétrico da Cuba de Ensaios para determinação da permissividade.

O comportamento da variável ambiental velocidade do vento é constante em relação a capacitância e, portanto, não foi considerada na modelagem. Sendo assim, as VAs empregadas foram somente T_{amb} e U_{ar} . Estes resultados estão de acordo com os trabalhos de (14), que determinaram a relação do efeito Corona com a T_{amb} e a U_{ar} , e de (15) e (16) que investigaram os efeitos da U_{ar} na I_F em LTs. Os comportamentos da capacitância com a variação da temperatura, umidade relativa do ar e tensão pode ser observado nas Figuras 6 e 7. É possível aproximar as curvas visualizadas nas figuras por polinômios de ordem 2 para o comportamento da capacitância em relação às variáveis ambientais temperatura e umidade relativa do ar.

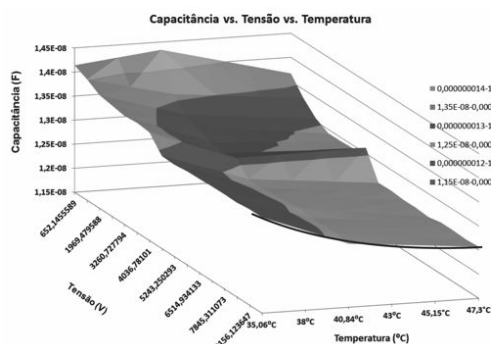


FIGURA 6 – Comportamento da capacitância com a temperatura ambiente e a tensão, com uma aproximação linear por um polinômio de ordem dois.

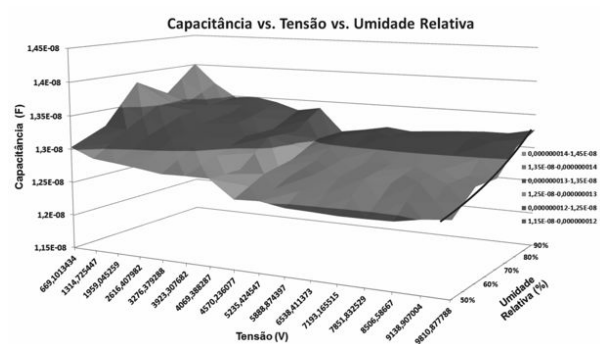


FIGURA 7 – Comportamento da capacitância com a umidade Relativa do Ar e tensão, com uma aproximação linear por um polinômio de ordem dois

Por meio de extrapolação numérica obteve-se os valores de capacitância com relação as VAs para nível de tensão de até 230 kV (nível de tensão do trecho de LT analisado). Por meio dos gráficos mostrados nas Figuras 08 e 09, obtiveram-se as equações 2 e 3 referentes a capacitância em função da T_{amb} e a capacitância em função da U_{ar} , respectivamente.

$$C(T_{amb}) = 8,9042 \times 10^{-12} T_{amb}^2 - 4,4181 \times 10^{-10} T_{amb} + 1,5693 \times 10^{-8} \quad (2)$$

$$C(U_{ar}) = 8,3261 \times 10^{-13} U_{ar}^2 - 1,4097 \times 10^{-10} U_{ar} + 1,6145 \times 10^{-8} \quad (3)$$

Como o modelo matemático admite apenas uma equação que contemple os efeitos na capacitância em relação as VAs. Foi desenvolvida a Equação 4 que contempla os efeitos das duas VAs, simultaneamente, na capacitância.

$$C(T_{amb}, U_{ar}) = 0,5076 \cdot (8,9042 \times 10^{-12} T_{amb}^2 - 4,4181 \times 10^{-10} T_{amb} + 1,5693 \times 10^{-8}) + 0,5093 \cdot (8,3261 \times 10^{-13} U_{ar}^2 - 1,4097 \times 10^{-10} U_{ar} + 1,6145 \times 10^{-8}) \quad (4)$$

Os coeficientes 0,5076 e 0,5093 foram determinadas empiricamente fim de adequarem melhor por se aproximarem do valor de capacitância medida pela cuba de ensaio.

5.0 - MODELO MATEMÁTICO DA LT EM CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

A isolamento de uma LT pode ser caracterizada por uma associação de resistência e capacitância, que pode ser chamada de capacitância da isolamento, conforme Figura 8. A I_F de LTs percorre esta associação. Portanto a I_F depende do estado da isolamento da linha. Neste caso a I_F é a contribuição da corrente que atravessa o isolador (I_C) e a corrente que passa pela superfície do isolador (I_R), Equação 5:

$$I_F = I_C + I_R \quad (5)$$

Para representar a LT é empregado o modelo matemático de Gary e Skilling-Umoto, mostrado na Figura 9, onde a isolamento da LT foi apresentada na Figura 8. A detecção e diagnóstico de falhas incipientes na isolamento de LTs é verificada em frequências entre 120Hz e 3kHz, assim, apesar do modelo apresentado, incorporar o efeito Corona este não será verificado, pois é percebido em frequências entre 2MHz – 20Mhz, (17) e (18).

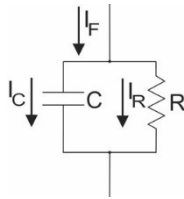


FIGURA 8 – Esquemático da isolamento

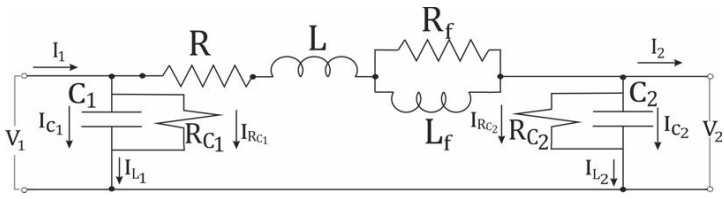


FIGURA 9 - Circuito elétrico equivalente para o modelo matemático adotado

O modelo matemático em blocos pela ferramenta Simulink/Matlab, é representado pela Figura 10, onde cada bloco representa uma torre.

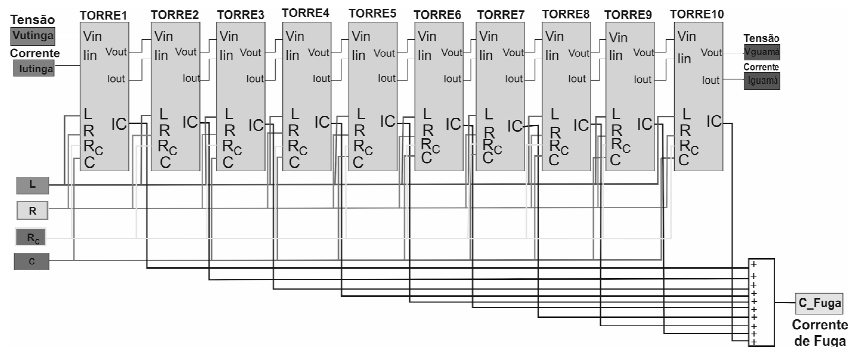


FIGURA 10. Modelo Matemático utilizado para representação da LT feito em Simulink/Matlab.

O parâmetro capacitância foi determinado considerando os efeitos do solo e aterramento como descrito em (19). Os valores de capacitância do modelo estão em termos das VAs conforme verifica-se a seguir (Equações 6 e 7). Este valor foi ajustado a fim de incorporar as influências das VAs.

$$I_{C2} = C_2(T_{amb}, U_{ar}) \frac{dV_2}{dt} \quad (6)$$

$$I_{C1} = C_1(T_{amb}, U_{rm}) \frac{dV_1}{dt} \quad (7)$$

6.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As curvas apresentadas nas Figuras de 11 a 13 descrevem o comportamento da I_F sem considerar as VAs. Para facilitar a visualização somente uma das três fases da LT é mostrada. A Figura 13 apresenta a superposição entre as formas de ondas da I_F medida, em preto, e a calculada pelo modelo, em cinza.

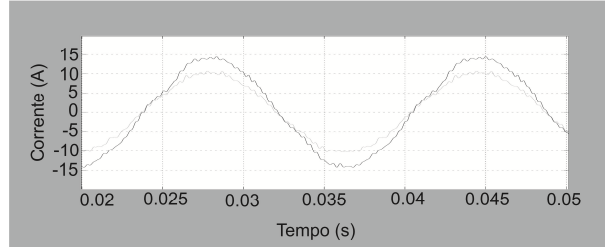


FIGURA 11 – Superposição das formas de onda da I_F medida (Preto) e calculada pelo modelo matemático (Cinza)

Verificou-se uma grande diferença no valor de pico da I_F , de aproximadamente 6A. Utilizando o Erro Médio Quadrático (Mean Squared Error -MSE) tem-se um erro de aproximadamente 0,8. Já as Figuras 12 e 13 representam as decomposições das componentes harmônicas (DCH) da I_F medida e calculada pelo modelo, respectivamente.

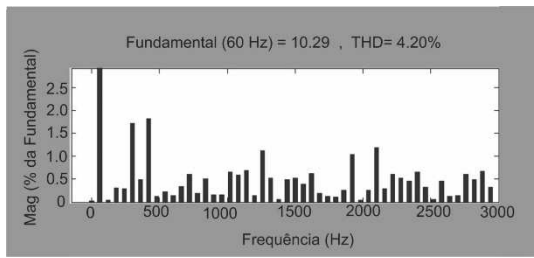


FIGURA 12 - Decomposição harmônica da I_F medida pelos instrumentos instalados nas Subestações

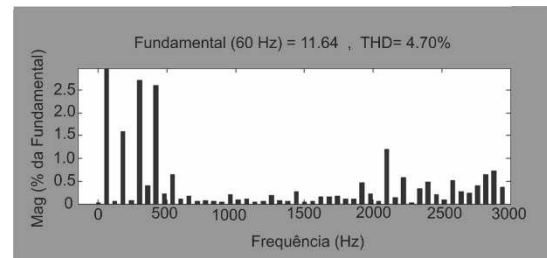


FIGURA 13 - Decomposição harmônica da I_F calculada pelo modelo.

Verificou-se que a diferença nas magnitudes de todas as frequências foi de aproximadamente 0,1 o que representa um erro grande. A melhoria da aproximação, entre a curva obtida através de medição daquela obtida pelo modelo, é alcançada quando se introduz as VAs. Esta introdução das VAs no modelo pode ser entendida observando o diagrama de blocos da simulação, mostrado na Figura 10, em que o bloco da capacitância depende dos valores de T_{amb} e U_{ar} , isto é, tornando o bloco da capacitância da isolamento como função das Variáveis ambientais, $C(T_{amb}, U_{ar})$, responsável por correlacionar VAs e Capacitância. Considerando o ajuste da capacitância em função das VAs, obteve-se um MSE próximo de 0,05 (Figura 14). Na Figura 15 visualiza-se a DCH da I_F calculada pelo modelo matemático, levando-se em conta os efeitos ambientais de T_{amb} e U_{ar} . Observou-se a diminuição do valor do TDH. Mas apesar da melhora na forma de onda, as magnitudes da DCH pouco mudaram permanecendo um erro grande, em torno de 0,1. Sinalizando para um estudo específico das VAS no domínio da frequência.

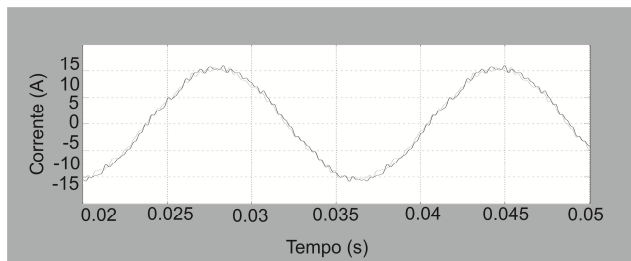


FIGURA 14 – Superposição das formas de onda da I_F medida (preto) e calculada pelo modelo matemático

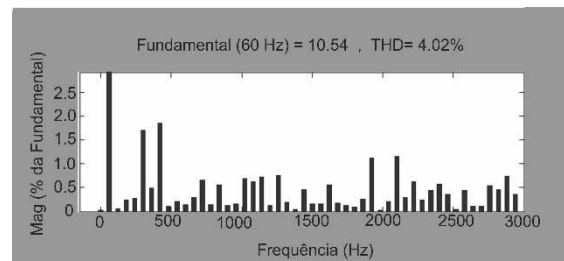


FIGURA 15 - Decomposição harmônica da I_F calculada pelo modelo matemático depois do

(cinza)

primeiro ajuste na capacitância

7.0 - DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO

Um dos motivos da grande diferença entre as magnitudes da DCH da I_F medida e calculada são provavelmente as influências das VAs serem distintas para cada harmônico (15). Para obter-se a magnitude dessas influências para cada harmônica foi utilizado o PCA. Este método estatístico multivariado simples pode ser usado para compressão de dados e redução de dimensionalidade, extração de características e projeção de dados. Neste artigo ele foi utilizado na determinação de quais harmônicos são mais afetados pela temperatura e pela umidade relativa do ar. A Figura 16 mostra a contribuição de cada harmônico da I_F para a variação de temperatura. É possível verificar que para até o 23º harmônico tem-se 96,7 % da informação completa, isto é, são estes os harmônicos que mais contribuem no valor da capacitância devido a variação de temperatura. Já na Figura 17 tem-se a distribuição de cada harmônico da I_F para a variação umidade relativa do ar.

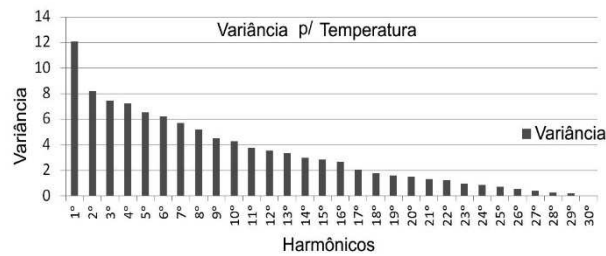


FIGURA 16- Contribuição da temperatura ambiente para cada harmônico da DCH da I_F .

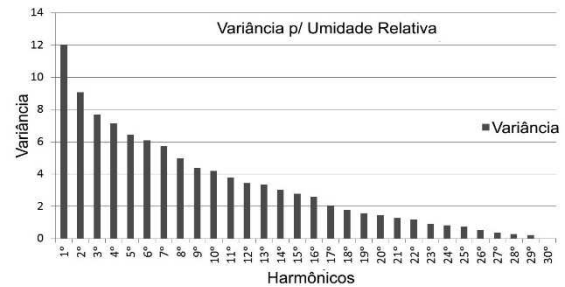


FIGURA 17 - Contribuição da umidade relativa do ar para cada harmônico da DCH da I_F .

Após determinação das magnitudes que cada harmônico da DCH da I_F devido as VAs, estes resultados são utilizados no modelo aplicando o teorema da superposição. Este Teorema permite definir um modelo onde a frequência para cada harmônico contribui para um circuito elétrico individual e o resultado considerando todas as harmônicas simultaneamente é obtido pela soma de cada contribuição individual, como mostrado na Figura 18.

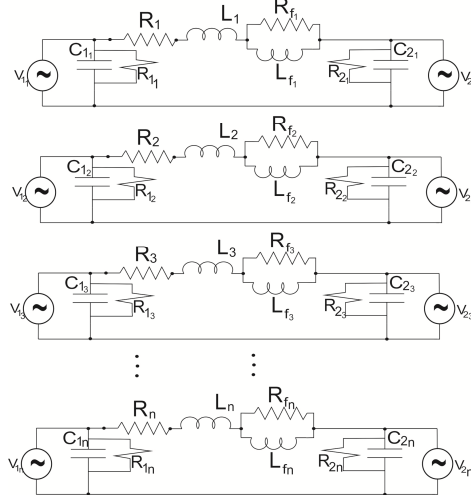


FIGURA 18 – Diagrama de circuito elétrico utilizado para ajuste da capacitância da isolamento devido as VAs pela contribuição individual de cada harmônico na I_F .

Na Figura 19 pode-se visualizar as formas de onda da I_F obtida das medições (preto) e pelo modelo matemático (cinza), com capacitância da isolamento ajustada individualmente para cada frequência considerando as VAs. Nesta figura o MSE ficou em torno de 0,02, portanto um erro bem menor que o apresentado anteriormente. A Figura 20 mostra a decomposição harmônica da corrente de fuga, com o valor da capacitância da isolamento ajustada individualmente para cada frequência considerando as VAs. Nesta o MSE ficou em torno 0,009. Pode-se observar que o modelo de detecção consegue reproduzir com um bom grau de fidelidade tanto a forma de onda quanto a decomposição harmônica da I_F . Através desta metodologia é possível reproduzir através do modelo matemático a forma de onda da I_F com aceitável grau de precisão para a detecção de falhas incipientes. Onde a determinação do modelo de funcionamento normal deve ser obtido pela caracterização do estado de funcionamento no momento em que foram caracterizados os ajustes de capacitância para um determinado instante de monitoração da linha. Portanto o modelo de funcionamento normal deve evoluir de acordo com o estado de funcionamento da LT. Sendo assim, esta metodologia permite verificar a degradação da linha no seu estado de funcionamento normal. Desta

maneira este modelo também sugere uma metodologia para avaliação da eficiência da linha baseada na sua degradação natural e não nas condições de sua época de instalação e dados de projeto. Por fim, o ajuste da capacitância para cada frequência harmônica sugere que este seja o identificador de distúrbios na LT. Ou seja, este ajuste poderia diagnosticar a causa da falta incipiente. Com isto pode-se sugerir um novo indicador das condições de isolamento da LT que é a magnitude da capacitância da linha no ajuste da corrente de fuga para cada ordem harmônica, denominada neste artigo como MCOH (Magnitude da Capacitância por Ordem Harmônica). A validação da constatação deste novo indicador é o tema de pesquisas ainda em andamento.

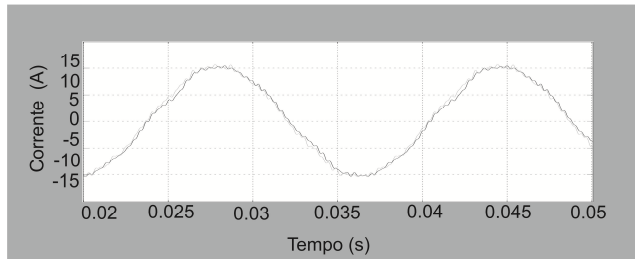


FIGURA 19 – Superposição das formas de onda da I_F medida (preto) e calculada pelo modelo matemático (cinza), com ajuste da capacitância de isolamento devido as VAS e contribuição individual de cada harmônico na I_F .

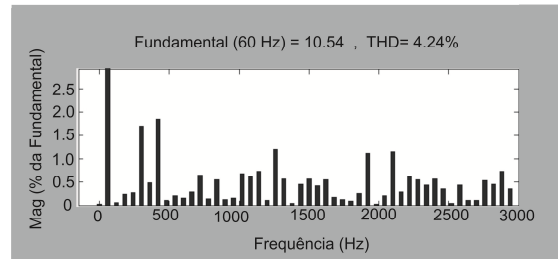


FIGURA 20 - Decomposição harmônica da I_F calculada pelo modelo matemático, com ajuste da capacitância de isolamento devido as VAS e contribuição individual de cada harmônico na I_F

8.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho constatou que as variáveis ambientais influenciam em harmônicos específicos da corrente de fuga da linha de transmissão a partir da verificação experimental da correlação entre capacitância e variáveis ambientais. O modelo de linha de transmissão utilizado foi a de Gary e Skilling-Umoto que obteve bons resultados para detecção de falhas para valores da capacitância dependente das variações ambientais. O modelo é dinâmico pois as condições de funcionamento variam com a degradação da isolamento. Isto é, o modelo de funcionamento normal de uma LT evolui com o tempo devido ao desgaste natural. Este modelo é adequado a metodologia de detecção e diagnóstico de falhas incipientes de linha de transmissão que busca a identificação de um modelo normal para um determinado instante. Ou seja este modelo permite verificar quando uma condição de falha tornar-se condição normal devido ao desgaste natural da linha de transmissão. Pode-se estender este raciocínio para os modelos de modo de falha a serem empregados no diagnóstico. Este modelo tem como uma das principais vantagens a monitoração em contínuo que busca o indicativo de funcionamento normal e os modos de falha considerando o desgaste natural da LT e portanto caracterizando as condições em que esta linha pode ser operada, contribuindo com a determinação da real remuneração da linha de transmissão. Por fim este artigo contribui com a sugestão de um novo indicador das condições de isolamento da LT que é a magnitude da capacitância da linha no ajuste da corrente de fuga para cada ordem harmônica, denominada, neste artigo, como MCOH (Magnitude da Capacitância por Ordem Harmônica).

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GRAEME, HEGGIE.- "Detection de Defaillance Dans Les Lignes de Transport D'electricite" – (Patente) ALSTOM UK LTD. CA2314838, 2001.
- (2) ZIMA, M. REHTANZ, C.- "Electric power transmission network state estimation" – (Patente) ABB RESEARCH LTD. (Affolternstrasse 52, 8050 Zürich, CH) EP1324455, 2005
- (3) BACHMANN, BERNHARD.- "Impedance Measurement System for Power System Transmission Lines" – (Patente) ABB Inc. US6397156, 2002
- (4) SUDA T.; "Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of an Artificially Polluted Suspension Insulator". IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation; Vol.8, No.4, August 2001. Pags. 705 a 709.
- (5) ZHICHENG G. AND, GUOSHUN C.; "A study on the leakage current along the Surface of Polluted Insulator". Proceedings of the 41th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials July 3-8, 1994. Brisbane Australia. Paper 5110.
- (6) DOUAR M.A. MEKHALDI A. AND BOUZIDI M.C.; "Frequency Analysis of the Leakage Current under Non Uniform Polluted Conditions on One Insulator Plane Model.". 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 978-1-4244-9470-5/10 IEEE.
- (7) KANASHIRO A.G. AND BURANI G.F.; "Leakage Current Monitoring of Insulators Exposed to Marine and Industrial Pollution". Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19, 1996. 271 p.
- (8) ISERMANN, R. "Fault- Diagnosis System: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance". Springer,

2005.

- (9) RANDALL, R. B. (2004). "Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes, Engineering Failure Analysis" 11(2): 177-190.
- (10) RANDALL, R. B. (2004). "Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes, Engineering Failure Analysis" 11(2): 177-190.
- (11) SIMANI, S. AND FANTUZZI, C. (2006). Dynamicsystem identification and model-based faultdiagnosis of an industrial gas turbine pro-totype, Mechatronics 16: 341{363}.
- (12) S. SIMANI AND C. FANTUZZI, "Neural networks for fault diagnosis and identification of industrial processes" in ESANN'02 (ESANN, ed.), vol. 1, (Bruges, Belgium), pp. 489–494, Proc. of the 10th European Symposium on Artificial Neural Networks, April, 24–26 2002. Invited paper. ISBN: 2–930307–02–1.
- (13) FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979
- (14) BUTKOV, E., "Matemactical Physics", St. Jonh's University, New York. Addison-Wesley Publishing Company. 420 p.
- (15) LI J.Y. SUN C.X., AND SEBO S.A.; "Humidity and contamination severity impact on the leakage currents of porcelain". Published in IET Generation, Transmission & Distribution. Received on 6th October 2009. Revised on 12th July 2010. Distrib., 2011, Vol. 5, Iss. 1, pp. 19–28.
- (16) MAO Y., ZINCHENG G., WANG L.; "Analysis of the Leakage Current Pulses of Outdoor Insulators in Different Relative Humidity". 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.. Pags. 400 a 403.
- (17) VIEIRA JR. P., GOMES, C. R., CÔRREA, S. M., GOMES JR., L. A. "Computation of Capacitance of a Transmission Line using the Finite Element Method", In: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis – CMD, Changwon, 2006.
- (18) WEI-GANG, H.; "Computation of Electro-magnetic Transients on Three-Phase Transmission Lines with Corona and Frequency Dependent". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, July 1987. Pags 887 – 898.
- (19) WANG, W., CHENGRONG L., JIANBING F, CHEN G. ; JUN Z. ; YITAO J.; "The Effect of Temperature and Humidity on Corona Performance of UHV DC Transmission Line". Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on. Pags. 66 a 68.

10.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Martin Max Luis de Castro Negrão, Nascido Abaetetuba/PA em 1975, com graduação em Física pela Universidade Federal do Pará (UFPA) em 2001, Mestrado em Eng. Elétrica pela UFPA em 2009. Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica na UFPA onde desenvolve pesquisa na área de Sistemas de Energia.



Paula Renatha Nunes da Silva, nascida em Recife/PE em 1981, com graduação e mestrado em Eng. Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2004 e 2007, respectivamente. Atualmente leciona Sinais e Sistemas na Universidade Federal do Oeste do Pará onde também desenvolve pesquisas na área de Sistemas de Energia.



Petrônio Vieira Junior, nascido em Macapá/AP em 1963, graduado em Eng. Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 1987, mestrado em Eletrônica de Potência pela Universidade Federal de Santa Catarina, doutorado em Mecatrônica pela Universidade de São Paulo e Pós-doutorado em Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sistemas pela Universidade de Comillas Madri/Espanha em 2009. Atualmente leciona Eletrônica de Potência e Automação Industrial na Universidade Federal do Pará onde também desenvolve pesquisa na área de Sistemas de Energia.

Jorge Cabuçu Lima Freitas, nascido em Belém/PA, em 1952. Graduado em Engenharia Elétrica, opção Eletrônica,

na Universidade o Pará, em 1975; pós graduação em Manutenção de Sistemas Elétricos na PUC, RJ. Atuação em Manutenção de sistemas de Geração e Transmissão de Energia, na Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletronorte.