

Construção de uma base de dados de impulsos de corrente aplicados em varistores de ZnO

¹Pablo B. Vilar, ²Edson G. Costa, ²George R. S. Lira, ³Valdemir S. Brito

¹Doutorando no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, PPGE/UFCG

¹Professor no Instituto Federal de Alagoas

² Professores do departamento de engenharia elétrica, UFCG

³Doutorando no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, PPGE/UFCG

³Professor do Instituto Federal da Paraíba, IFPB

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Campina Grande, Brasil

pbvilar@gmail.com

Resumo— A modelagem adequada de para-raios de ZnO é fundamental em vários estudos rotineiros em sistemas elétricos, como estudos de confiabilidade e coordenação de isolamentos. Por isso, muitos trabalhos foram publicados propondo modelos que pudessem representar o comportamento dinâmico dos varistores de ZnO. Contudo, muitos destes trabalhos apresentam resultados conflitantes, além disso, poucos destes trabalhos apoiam seus modelos em medições reais, de tal forma que, a maioria dos modelos para varistores é construída exclusivamente com base em simulações e dados providos por fabricantes. Para permitir uma análise adequada dos modelos existentes, bem como possibilitar a proposição de novos modelos mais adequados, este trabalho apresenta a construção de uma base de dados de impulsos de corrente aplicados em varistores. Os dados presentes foram utilizados para avaliar o desempenho de dois dos mais comuns modelos de para-raios, indicando um desempenho inferior ao relatado nas referências.

Palavras-chave: Modelos de varistores, efeito dinâmico, compensação de indutância.

I. INTRODUÇÃO

Os para-raios são equipamentos largamente utilizados como forma de proteção contra sobretensões em outros equipamentos, sejam elas oriundas do sistema elétrico em questão ou de descargas atmosféricas. A capacidade de proteção dos para-raios é baseada no comportamento não-linear de pastilhas varistores de óxido de zinco, tais pastilhas apresentam uma elevada resistência para o nível de tensão do sistema e uma baixa resistência durante sobretensões, absorvendo assim parte da energia do surto e, principalmente, limitando a tensão a valores suportáveis pelos demais equipamentos.

A característica não-linear das pastilhas varistores sugere que ela seja modelada como uma resistência cujo valor varia em função do nível e tensão aplicado, contudo, a análise da

resposta de varistores submetidos a impulsos rápidos demonstrou um crescimento da sua tensão residual em função da redução do tempo de frente do impulso de corrente incidente [1,2]. Tais resultados indicam que forma de onda do surto também afetará a resposta do para-raios, caracterizando assim um comportamento dinâmico.

Com o intuito de representar satisfatoriamente o comportamento dinâmico dos para-raios, vários autores propuseram estruturas [1-9] que tentam reproduzir a característica dinâmica dos varistores. Além disso, outros autores se propuseram a simular, analisar e comparar os modelos desenvolvidos [10-13].

Uma análise dos trabalhos que propõe modelos para os para-raios, bem como dos trabalhos que avaliam esses modelos revela várias incoerências entre eles, sobretudo do ponto de vista quantitativo. Tais incoerências podem ser atribuídas à falta de medições confiáveis que possam ser utilizadas para propor e analisar os modelos de varistores. De tal forma que a maioria dos modelos existentes dos para-raios foi proposta exclusivamente com base nas limitadas informações provida pelos fabricantes.

O modelo proposto em [2] é um dos poucos baseados em medições nos varistores, os autores apontam uma elevação de 6% no nível de tensão do varistor em função de uma redução no tempo de frente de 8 para 1,3 μ s, os autores apontam também que dados mais antigos indicavam uma elevação de até 12%, a diferença entre as medições é creditada a indutância do arranjo de medição utilizado.

As normas IEC 60099-4 (2004) e *IEEE Standard for Metal-Oxide for AC Power Circuits (>1 kV) (2012)*, abordam o problema da indutância de medição apresentando um procedimento para avaliar e corrigir a indutância da medição de impulsos quando necessário.

Para que os modelos de para-raios possam ser avaliados com base em dados reais, é fundamental a construção de uma

base de dados de impulso de corrente em varistores de óxido de zinco [13], assim, este trabalho tem por objetivo expandir tal base de dados. O arranjo de medição utilizado utilizará o método de compensação da indutância de medição descrito nas normas mencionadas. A base de dados apresentada neste trabalho está em constante desenvolvimento, de tal forma que serão discutidos neste trabalho resultados parciais.

O procedimento tradicionalmente empregado na modelagem de para raios consiste em propor um circuito elétrico e posteriormente ajustar seus parâmetros de tal forma que o circuito reproduza a característica dinâmica do para-raios. Neste trabalho, dois dos mais tradicionais modelos de para-raios serão simulados no *alternative transient program* (ATP) de tal forma que o resultado da simulação possa ser comparado com as medições realizadas.

A ausência de dados de medições na maioria dos trabalhos envolvendo modelagens de varistores faz com que a base de dados desenvolvida neste trabalho possa ser utilizada no futuro para guiar a construção de novos modelos para melhor reproduzir o comportamento dos para-raios.

II. MODELOS DE PARA-RAIOS

A. Modelo Convencional

Devido a sua característica de funcionamento, os primeiros modelos dos para-raios o caracterizam como uma resistência não linear que se reduzia drasticamente em função da tensão aplicada, tal representação passou a ser conhecida como modelo convencional.

Atualmente, os programas de simulação de transitórios eletromagnéticos que utilizam este modelo empregam a equação apresentada em (1) como representação da não linearidade.

$$I = p(V/V_{ref})^q \quad (1)$$

A equação (1) consiste em uma representação por segmentos onde os parâmetros I e V são a corrente e a tensão no para-raios, respectivamente, q é o expoente, p o multiplicador para cada segmento e V_{ref} é uma tensão de referência arbitrária que normaliza a equação e previne problemas de representação numérica durante a potenciação.

O modelo convencional não apresenta característica dinâmica, por tanto, deve ser evitado em simulações envolvendo transitórios rápidos, contudo, esta é certamente a representação mais usual dos para-raios, sendo encontrada em muitos trabalhos onde são realizadas simulações de transitórios rápidos [10-13]. Por isso, o modelo convencional foi um dos escolhidos para ser simulado neste trabalho.

B. Modelo IEEE

O modelo do IEEE proposto pelo grupo de trabalho IEEE W. G. 3.4.11[2], formado em 1971 pelo comitê de equipamentos de proteção contra faltas do IEEE pode ser visto na figura 1. Neste modelo, a característica não linear V-I do para-raios é obtida pelas duas resistências não lineares A_0 e A_1 . O filtro R-L entre as duas resistências não lineares é responsável por gerar o efeito dinâmico do modelo.

O modelo IEEE buscou uma analogia entre os elementos do circuito e características físicas do para-raios, de modo que a indutância L_0 representa a indutância associada a campos magnéticos nas imediações do para-raios, a capacitância C simula o efeito capacitivo do para-raios e a resistência R_0 é usada para evitar instabilidade numérica durante a execução do modelo.

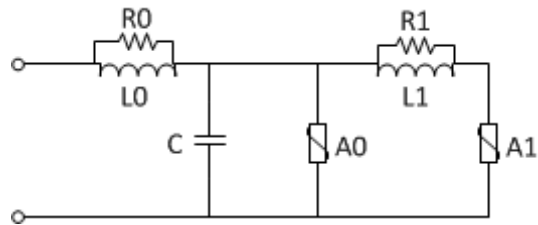


Figure 1. Modelo IEEE [2].

A partir das dimensões físicas do para-raios, algumas fórmulas foram propostas para calcular L_0 , R_0 , C e R_1 . O parâmetro L_1 tem maior influência no resultado e uma fórmula a partir das dimensões físicas do equipamento também é sugerida.

O artigo que apresenta o modelo proposto pelo IEEE relata bons resultados em termos de valores de pico, para transitórios com tempo de frente de $0,5 \mu s$ a $45 \mu s$. Contudo, verifica-se uma queda de tensão inesperada na cauda da curva de tensão, onde a forma de onda produzida pelo modelo às vezes é bastante discordante da forma de onda de tensão obtida experimentalmente [10].

III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O ensaio de impulso de corrente, ou ensaio de tensão residual, consiste basicamente em aplicar uma corrente impulsiva no varistor e medir a forma de onda da tensão que surge em consequência do impulso. A figura 2 apresenta o circuito do gerador de impulso utilizado.

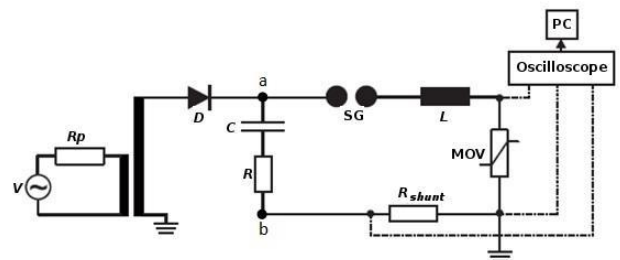


Figure 2. Circuito elétrico do gerador de impulsos de corrente.

Para aplicação de um impulso de corrente, a tensão do transformador é utilizada para carregar o capacitor C , posteriormente, um mecanismo controlado a distância, aproxima lentamente as esferas do *gap* SG, quando a distância for suficientemente pequena formar-se-á um arco que permitirá o descarregamento do capacitor sobre o varistor. A forma de onda do descarregamento será determinada pelos valores de R , L , C e pelo próprio varistor. A tensão residual é

obtida diretamente sobre o varistor, enquanto, a corrente aplicada é obtida através do resistor *shunt*.

O osciloscópio é utilizado em conjunto com o computador para realizar a aquisição dos dados de tensão e corrente no varistor. No entanto, devido aos elevados níveis de tensão residual tornou-se necessário utilizar uma ponta de prova de alta tensão para reduzir os níveis de tensão na entrada do osciloscópio. A figura 3 apresenta uma fotografia do ensaio de impulso de corrente.

Para construção da base de dados, impulsos de diferentes formas de onda foram aplicados a um conjunto de amostras de varistores obtidas de um para-raios novo com tensão nominal de 36 kV. Na tabela 1 apresenta-se as características dos diferentes impulsos que compõe base de dados desenvolvida. Com relação as amplitudes, foram aplicados impulsos de 4,0; 8,0; 10,0 e 15,0 kA, exceto para o impulso tipo II onde, devido ao impulso ser muito lento, foram aplicados impulsos de 0,25; 0,5; 1,0; e 2,0 kA.

TABLE I. CARACTERISTICAS DOS IMPULSOS APLICADOS

Impulso	Tempo de frente (μ s)	Tempo de cauda (μ s)
Tipo I	1,5	26
Tipo II	30,0	60
Tipo III	3,0	6
Tipo IV	4,0	10
Tipo V	8,0	20



Figure 3. Fotografia do ensaio de impulso de corrente.

É importante lembrar que a base de dados está em constante desenvolvimento, espera-se no futuro contemplar mais formas de onda bem como diferentes tipos de varistores e uma maior faixa de amplitudes.

Para a compensação da indutância do arranjo de medição foi aplicado o procedimento descrito na norma IEC 60099-4. Segundo este procedimento, um bloco de metal não ferroso com as mesmas dimensões da amostras de varistor deve ser submetido ao mesmo impulso de corrente que o varistor. A tensão medida no bloco é então creditada a indutância do arranjo e deve ser subtraída da medição no varistor.

A figura 4 apresenta um gráfico que ilustra a o efeito da correção da indutância de medição no resultado dos ensaios.

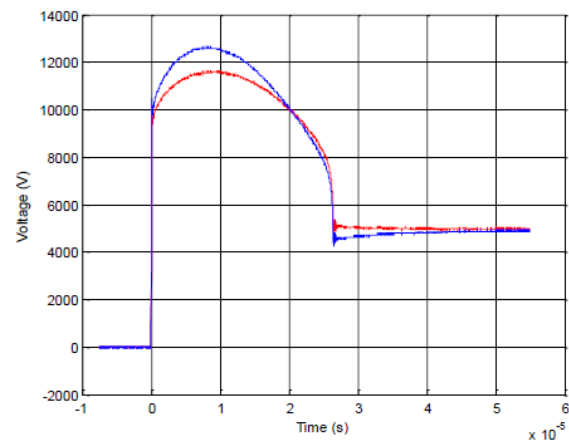


Figure 4. Medição da tensão residual em um varistor em consequência da aplicação de um impulso de corrente tipo V com 8 kA. Em azul temos a medição sem a compensação da indutância de medição, em vermelho temos a resposta com compensação.

IV. RESULTADOS

Utilizando as informações disponíveis no catalogo do fabricante do para-raios foram determinados os paramentos para o modelo convencional e IEEE. Posteriormente, estes modelos foram simulados no ambiente ATP para determinar sua capacidade de reproduzir o comportamento dos varistores caracterizado na base de dados. As figuras 5 e 6 apresentam os resultados de alguns exemplos de simulações.

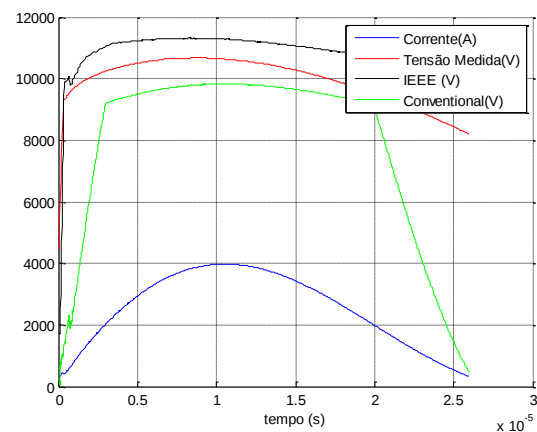


Figure 5. Resultado da simulação de um impulso tipo V com 4 kA.

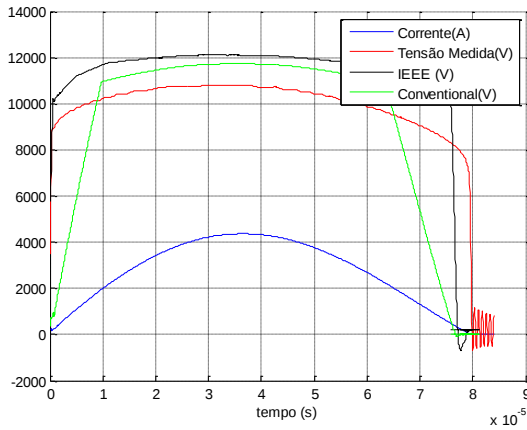


Figure 6. Resultado da simulação de um impulso tipo II com 4 kA.

Para uma análise mais completa do desempenho dos modelos analisados, nas tabelas 2 e 3 apresenta-se o erro obtido por cada modelo na determinação do valor de pico da resposta. Além disso, apresenta-se nas tabelas 2 e 3 o valor da estatística R-quadrado, que é uma medida percentual de quão bem os um modelo se ajustou aos dados observados.

TABLE II. PRECISÃO DOS RESULTADOS DO MODELO CONVENCIONAL

Impulso	Amplitude da corrente aplicada (kA)	R-quadrado	Erro percentual na determinação da amplitude
I	4	0,8385	1,8366
	8	0,8668	-3,5390
	10	0,8674	-7,1508
	15	0,8730	-11,0985
II	0,25	0,2994	19,6905
	0,5	0,3784	18,2992
	1	0,4580	17,4597
	2	0,5986	13,6711
III	4	0,6892	2,9080
	8	0,6958	-1,3857
	10	0,6966	-2,9268
	15	0,7013	-4,9970
IV	4	0,7681	5,1606
	8	0,7779	0,1523
	10	0,7780	-2,3196
	15	0,7912	-4,8004
V	4	0,6424	7,6178
	8	0,6909	2,4461
	10	0,7127	-0,0516
	15	0,7522	-3,4280

TABLE III. PRECISÃO DOS RESULTADOS DO MODELO IEEE

Impulso	Amplitude da corrente aplicada (kA)	R-quadrado	Erro percentual na determinação da amplitude
I	4	0,8939	9,5259
	8	0,8162	5,4050
	10	0,8002	1,4493
	15	0,7770	-4,4536
II	0,25	0,2018	20,1655
	0,5	0,4147	18,8164
	1	0,6977	20,8762
	2	0,6857	18,2445
III	4	0,6948	7,8879
	8	0,8057	3,5660
	10	0,8072	2,4104
	15	0,7940	-0,9021
IV	4	0,6322	8,3432
	8	0,7302	2,5371
	10	0,7501	-0,1966
	15	0,7501	-3,5502
V	4	0,8070	9,8980
	8	0,8394	1,9313
	10	0,8262	-1,3678
	15	0,7915	-6,9402

Os resultados apresentados nas tabelas 2 e 3 mostram que para o impulso padrão 8/20 μ s, que corresponde ao impulso tipo V, o erro do modelo IEEE chega a um máximo de 9,89 %, que é um valor acima do relatado no trabalho que propõe este modelo [2]. Já para o modelo convencional, o resultado está próximo ao esperado, obtendo um erro muito baixo para o valor que foi ajustado, no caso o impulso tipo V com 10 kA, contudo o erro cresce para valores diferentes deste. Analisando as demais formas de onda, percebemos que o erro na determinação do valor de pico é muito mais significativo para os impulsos de tipo II, indicando que os modelos não são capazes de representar minimamente um impulso tão lento.

Os baixos valores de R-quadrado presentes nas tabelas 2 e 3 indicam que os resultados dos modelos não se ajustam de forma adequada aos dados reais, indicando que, independente do quão precisa seja a determinação do valor de pico, os modelos não reproduzem o comportamento dos varistores.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o processo de construção de uma base de dados de impulsos de corrente em varistores de óxido de zinco. O procedimento experimental utilizado, baseado na norma IEC 60099-4 corrigiu a indutância do arranjo de medição para atingir resultados mais precisos.

A base de dados aqui apresentada está em constante desenvolvimento, os resultados apresentados neste trabalho dizem respeito a um conjunto de varistores novos submetidos a cinco diferentes tipos de impulsos com quatro diferentes amplitudes. No futuro espera-se que a base de dados contemple mais formas de onda e diferentes tipos de varistores.

Dois dos mais tradicionais modelos de para-raios foram simulados e tiveram seus resultados comparados as medições realizadas. Os resultados indicam que para a representação do valor de pico da resposta do varistor, os modelos são

adequados, precisando no máximo de algum ajuste nos parâmetros. Contudo, na representação do comportamento do varistor, o desempenho dos modelos é insuficiente.

Espera-se que a base de dados desenvolvida neste trabalho possa ser utilizada para melhor caracterizar o comportamento dos varistores, de tal forma que, além de ser utilizada para avaliar modelos, ela pode ser utilizada para guiar a proposição de novos modelos, além de expandir o conhecimento a cerca do funcionamento de varistores de uma forma geral.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl e D. Qui, "Behaviour of MO-surge-arrester blocks to fast transients," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vol. 4, Issue:1, pp. 292-300, January 1989.
- [2] IEEE W.G. 3.4.1 1 of Surge Protective Devices Committee, "Modeling of metal oxide surge arresters"- *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, NO. 1, pp. 301 - 309, January 19.
- [3] S. Tominaga, K. Azumi, Y. Shibuya, M. Imataki, Y. Fujiwara e S. Nichida, "Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, pp. 1860-1871, 1979.
- [4] P. Pinceti e M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *Power Delivery, IEEE Transactions*, Vol. 1, Issue 2., pp. 393 - 398, April 1999.
- [5] F. Fernández e R. Díaz, "Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations," *International conference on power system transients IPST'01*, p. 144, 20-24 June 2001.
- [6] I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara e M. Kobayashi, "Study of ZnO arrester model for steep front wave," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vols. 11 de 11, Issue:2, pp. 834 - 841, April 1996.
- [7] M. Magro, M. Giannettoni e P. Pinceti, "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vols. 19 de 19, Issue:4, pp. 1692 - 1695, Outubro 2004.
- [8] C. Christodoulou, L. Ekonomou, G. Fotis, P. Karampelas e I. Stathopoulos, "Parameters' optimisation for surge arrester circuit models," em *IET Science, Measurement and Technology*, 2009.
- [9] Z. KARBALAYE, H. ABNIKI e A. A. SHAYEGANI, "The Modeling of Metal-Oxide Surge Arrester Applied," em *2th International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, 2009.
- [10] A. BAYADI, N. HARID, K. ZEHAR e S. BELKHIAT, "Simulation of Metal Oxide Surge Arrester Dynamic Behavior Under Fast Transients," em *International Conference on Power System Transients – IPST.*, New Orleans, 2003.
- [11] MEISTER, ; SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G. D. Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, v. 3, p. 35-45, 2011. ISSN 11.
- [12] VITA, V. et al. Comparison of metal-oxide surge arresters circuit models and implementation on high-voltage transmission lines of the high-voltage transmission lines of the. *The Institution of Engineering and Technology*, v. 4, p. 846-859, 2010. ISSN 7.
- [13] VILAR, P. B. et al. Development of a current impulse Data Base for ZnO surge arrester models analysis. *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, Agosto 2015. ISSN [s.n.].