



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 06 7587

Tópico: Fontes de Distúrbios

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ESTUDO DE TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

THAÍS
OHARA DE
CARVALHO

ALEXANDRE
PIANTINI

IEE – USP

ACÁCIO
SILVA
NETO

JORGE M.
JANISZEWSKI

USP

RUY ALBERTO C.
ALTAFIM

USP

ANDRÉ L. T.
NOGUEIRA

CPFL

RESUMO

A busca de melhor qualidade de energia passa necessariamente por um melhor entendimento dos fenômenos relacionados às descargas atmosféricas. No caso de redes de distribuição, uma parcela significativa das interrupções se deve às sobretensões induzidas por descargas próximas às linhas.

O objetivo do trabalho foi desenvolver e implantar um sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas indiretas através da obtenção simultânea das formas de onda de tensões induzidas em duas linhas com diferentes configurações.

Este artigo descreve as características gerais do sistema e apresenta resultados preliminares compreendendo formas de onda típicas das tensões.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas atmosféricas, tensões induzidas, distribuição.

1.0 INTRODUÇÃO

Apesar do fenômeno das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas vir sendo estudado teórica e experimentalmente há muito tempo por pesquisadores de diversos países, sérias divergências são ainda verificadas entre as teorias existentes, mesmo quando não se considera na linha a presença do condutor

neutro, cabo guarda e equipamentos mais complexos, como transformadores e pára-raios.

Em [1] foi desenvolvido um novo modelo, utilizando-se como base a teoria de Rusck [2], porém com modificações tais que permitiram que se levasse em conta tanto os efeitos de descargas em estruturas metálicas como os efeitos do comprimento do canal de descarga, do comprimento e configuração da linha e da presença do “leader” ascendente. A comparação das tensões calculadas pelo modelo desenvolvido com resultados obtidos experimentalmente no Japão [3-5] confirmou a melhora significativa no modelo de Rusck após a introdução das referidas modificações.

Embora o modelo matemático desenvolvido em [1] tenha sido validado através de comparações com resultados de pesquisas experimentais realizadas no Japão, julgou-se conveniente avaliar o seu desempenho em outras situações. Deve-se observar que, dada a complexidade do fenômeno, tal avaliação só pode ser feita caso sejam conhecidos todos os parâmetros que afetam significativamente as tensões induzidas. A dificuldade na obtenção de dados nessas condições é certamente uma das razões para a existência, ainda hoje, de teorias conflitantes. Assim, a limitação do número de casos disponíveis e o desconhecimento de parâmetros como, por exemplo, a velocidade de propagação da corrente, o comprimento do canal da descarga e a ocorrência ou não do “leader” ascendente, nas pesquisas japonesas, motivaram o desenvolvimento de um modelo em escala reduzida, o qual permitiu uma análise bem mais abrangente do fenômeno [6]. Posteriormente foi

desenvolvida nova metodologia, a partir do modelo proposto em [1], a qual possibilita a determinação das tensões induzidas em situações em que a linha encontra-se protegida através de cabo-guarda e/ou pára-raios, considerando também a presença de transformadores e do neutro multiterrado. Em [7] são apresentados os resultados desse novo modelo para o caso de tensões induzidas em linhas aéreas quando da ocorrência de descargas atmosféricas em estruturas metálicas situadas em suas proximidades.

Apesar dos bons resultados obtidos nas diversas comparações realizadas, é sabido que a comprovação final de qualquer modelo matemático complexo deve ser feita com base em resultados de campo. Esse é um dos objetivos desta pesquisa, pois com a comprovação no campo da validade da metodologia desenvolvida ter-se-á uma ferramenta extremamente poderosa para avaliação do número de interrupções em linhas rurais e urbanas, protegidas com cabo guarda, pára-raios ou ambos, considerando-se os parâmetros relevantes envolvidos. Tal metodologia poderá ser também aplicada na obtenção de subsídios para definição de critérios de instalação de pára-raios em transformadores de redes urbanas. Além disso, com uma quantidade estatisticamente relevante de dados medidos, futuramente, o trabalho permitirá que seja analisado o desempenho de linhas de distribuição de média tensão, com proteção e sem proteção, face a descargas atmosféricas. Com base nesses resultados, serão definidos critérios para a utilização das técnicas mais eficazes que podem ser adotadas tendo em vista a melhoria do desempenho das linhas.

Também em etapas futuras, o estudo irá avaliar a eficácia do pára-raios como dispositivo de proteção contra descargas atmosféricas. Destaca-se aqui o pioneirismo deste trabalho, pois com exceção da pesquisa desenvolvida em [6], através de modelo em escala reduzida, não se tem conhecimento de outro estudo experimental no qual o efeito da utilização de pára-raios na redução das tensões induzidas tenha sido determinado diretamente. Assim, além de possibilitar uma avaliação direta da eficácia do sistema de proteção utilizado, os resultados obtidos permitirão a realização de comparações entre as tensões medidas induzidas na linha e as tensões calculadas através do modelo matemático desenvolvido em [7-9]. Tais resultados representarão uma importante contribuição para o estado da arte do conhecimento do fenômeno, tendo em vista a

escassez de dados de campo envolvendo registros simultâneos de tensões induzidas e de correntes de descargas.

2.0 METODOLOGIA

O sistema de aquisição de dados foi implantado no Campus da cidade de São Paulo da Universidade de São Paulo.

O trabalho prevê a obtenção de registros simultâneos das correntes de descargas atmosféricas incidentes em uma torre de captação e das correspondentes tensões induzidas em duas linhas de distribuição monofásicas situadas na proximidade da mesma ou somente de tensões induzidas.

Para a determinação da altura com que a torre deveria ser construída, alguns parâmetros importantes, como o nível cerâmico e a densidade de descargas para a terra por quilômetro quadrado na cidade de São Paulo foram obtidos e o número estimado de descargas diretas na torre foi calculado (uma descarga a cada 1,5 ano). Obviamente, o número obtido deve ser considerado como mera estimativa, não significando que irão ocorrer efetivamente tantas descargas quantas previstas.

A torre na qual podem incidir as descargas é metálica, com estais isolantes e altura de 62,5 m. Para a medição das correntes das descargas, na base da torre foi instalado um resistor “shunt” por onde toda corrente flui até atingir o sistema de aterramento. O resistor “shunt” foi projetado para que o seu valor fosse baixo ($3,28 \text{ m}\Omega$), possibilitando a medição direta das correntes das descargas pelo osciloscópio. A base da torre é isolada da terra por isoladores de porcelana tipo suporte cilíndrico. O sistema de medição de corrente é composto pelo resistor “shunt”, osciloscópio, “mini modem”, bateria, carregador de bateria e protetor contra surtos.

O osciloscópio dedicado à medição das correntes das descargas atmosféricas está sempre ligado. Isso se deve ao fato deste osciloscópio ser alimentado por baterias que são carregadas por painéis solares.

O sistema de medição de correntes instalado na base da torre requereu uma verificação quanto à eficiência da blindagem proporcionada pela caixa metálica que armazena o osciloscópio. Para as correntes com amplitudes de até 41 kA aplicadas no resistor “shunt” não foram constatados ruídos significativos nas formas de onda medidas causados por interferências eletromagnéticas e

tampouco mau funcionamento do osciloscópio durante as aplicações.

Os equipamentos destinados à medição das tensões induzidas estão contidos dentro de caixas metálicas instaladas em postes da linha de distribuição. A utilização de cruzetas de tamanho superior ao convencional permitiu a instalação de duas linhas nos mesmos postes, em uma das quais foram instalados pára-raios em pontos estratégicos das mesmas. A outra está desprovida de qualquer tipo de proteção. Em dois postes foram instalados divisores de tensão e osciloscópios, que constituem o sistema de medição de tensões.

Para a medição das tensões induzidas pelas descargas atmosféricas são utilizados divisores de tensão resistivos localizados em dois pontos de cada linha experimental. Cada divisor de tensão foi instalado em uma caixa blindada, ficando em seu interior o braço de baixa tensão do divisor, um osciloscópio e suas pontas de prova e um "mini modem" de comunicação via fibra óptica. Alguns cuidados foram tomados antes de instalar os equipamentos de medição de tensão e corrente, destacando-se a medição de temperatura dentro das caixas expostas à luz solar intensa e a verificação da estanqueidade das caixas.

O sistema de medição de tensões induzidas é composto por quatro divisores de tensão, quatro osciloscópios, duas baterias, dois carregadores de bateria, dois contatores, dois "mini modems" e dois protetores contra surtos. O acionamento do sistema pode ser realizado de duas maneiras através do programa de controle e aquisição de dados: a primeira, é quando o sistema funciona durante o período previamente agendado. A segunda, é através do monitoramento de um dos osciloscópios que está sempre ligado, ou seja, quando ocorre uma indução nas linhas, a forma de onda de tensão é armazenada pelo osciloscópio e isso faz com que o programa envie um comando para ligar os demais osciloscópios.

A Fig. 1 apresenta o esquema das linhas experimentais que são monofásicas, têm aproximadamente 2,7 km de comprimento e não estão energizadas. Na linha mais afastada da torre foi instalada proteção (pára-raios). Essas duas linhas são sustentadas pelos mesmos postes e instaladas nos dois extremos de cruzetas especiais, com aproximadamente 6 m de comprimento. Essa separação das linhas é suficiente para que não haja influência mútua significativa. Ambas as linhas experimentais possuem resistores com valor de resistência igual ao da impedância característica das linhas

instalados em suas extremidades, para minimizar a ocorrência de reflexões das ondas de tensão. Além do resistor, a linha protegida tem pára-raios em uma das extremidades, como mostrado na Fig. 2. Um dos pontos de medição está situado a apenas 30 m do pára-raios para facilitar a verificação do seu efeito na diminuição das tensões induzidas. Por sua vez, o outro ponto de medição está mais afastado do pára-raios. Logo, a influência da distância entre pára-raios nas tensões induzidas pode ser avaliada.

Para verificação do efeito da distância de separação entre as linhas monofásicas (tamanho da cruzeta) em relação às tensões induzidas nas linhas com e sem proteção foram feitas diversas simulações, utilizando-se a metodologia descrita em [7-9]. Nas simulações, a amplitude da forma de onda da corrente da descarga foi variada entre 10 e 80 kA. Tais simulações mostraram que as diferenças entre as tensões fase-terra do condutor isolado, ou seja, sem nenhum dispositivo de proteção em sua proximidade e do condutor sem pára-raios não são relevantes, indicando que a distância de 6 m, ilustrada na Fig. 1, é suficiente para que os pára-raios da linha protegida não interfiram significativamente nas tensões induzidas na linha sem proteção.

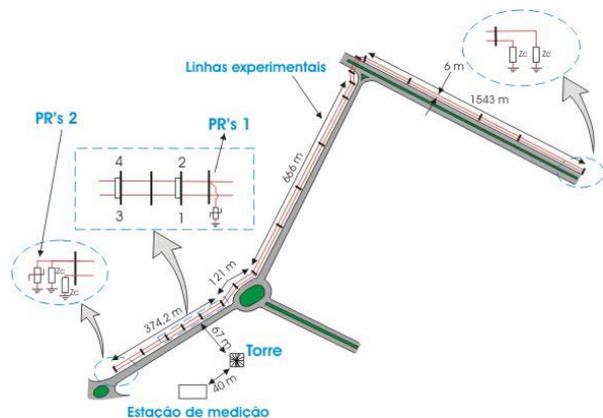


Fig. 1 – Traçado real das linhas experimentais com a localização dos pára-raios, torre e estação de medição.

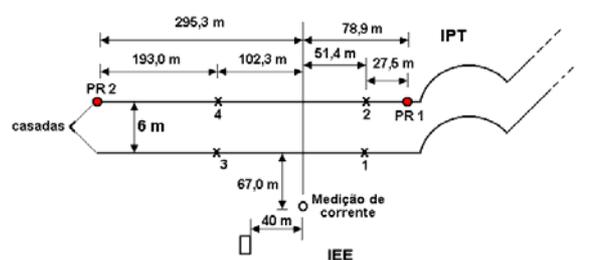


Fig. 2 - Localização dos pontos de medição 1, 2, 3 e 4.

IEE - Instituto de Eletrotécnica e Energia
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Na iminência de uma tempestade, a alimentação da rede elétrica nos pontos de medição das tensões é desconectada. Isto provoca a abertura dos contatos normalmente abertos (NA) dos contatores e os carregadores são desligados da rede, enquanto as baterias são ligadas aos osciloscópios através dos contatos normalmente fechados (NF) dos mesmos contatores. Para evitar sobretensões que poderiam danificar o sistema, as entradas de alimentação dos pontos de medição estão protegidas através de pára-raios. Após o período de medições (final da tempestade), a conexão da rede é restabelecida com os carregadores, desligando-se, ao mesmo tempo, os osciloscópios das baterias.

Os sinais elétricos armazenados nos osciloscópios são transmitidos via fibra óptica até o computador instalado dentro da estação de medição, sendo a conversão sinal elétrico/sinal óptico e vice-versa feita por “mini modems”.

Nas proximidades da torre foi construída uma estação de medição blindada onde ficam os equipamentos responsáveis pelo gerenciamento e controle da aquisição, do armazenamento dos dados e pelo acionamento do sistema de medição de tensões induzidas.

A estação de medição está situada a aproximadamente 40 m da torre. Um computador com “multiplex” está conectado através de “mini modems” de comunicação via fibra óptica com os cinco osciloscópios. O computador armazena os registros relativos às tensões induzidas nas duas linhas e às correntes das descargas incidentes na torre. A aquisição das formas de onda armazenadas nos osciloscópios é feita através de uma conexão “full duplex” de fibra óptica entre o computador e cada osciloscópio. Para realizar essa conexão é utilizado um “mini modem” assíncrono ligado à porta serial RS232 do osciloscópio e outro “mini modem” ligado à porta serial de um “multiplex” (MUX). O computador executa um programa que controla a aquisição de dados dos cinco osciloscópios utilizados. Primeiramente, o programa verifica quais osciloscópios registraram formas de onda e guarda quais foram. Após essa averiguação, o programa lê o canal 1 do primeiro osciloscópio. Em seguida, lê o canal 2 desse mesmo osciloscópio e repete esse procedimento de leitura para todos os osciloscópios que contiverem formas de onda memorizadas. Cada osciloscópio é habilitado para fazer novas

aquisições depois da leitura de seus canais. Atualmente, o programa verifica se há novas formas de onda registradas nos osciloscópios a cada 10 segundos. A Fig. 3 apresenta o esquema de funcionamento do sistema de aquisição de dados.

Cuidados especiais foram tomados em relação ao efeito de aberturas na blindagem da estação de medição, tais como o caso de portas e janelas, visando obter perfeita continuidade dos materiais condutores das paredes e dos acessos.

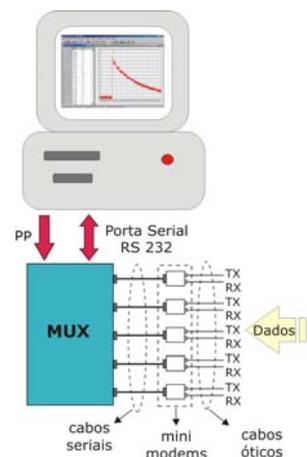


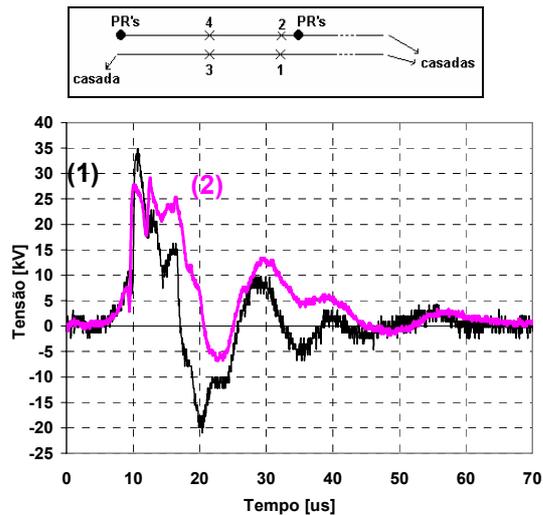
Fig. 3 – Esquema de funcionamento do sistema de aquisição de dados.

3.0 RESULTADOS PRELIMINARES

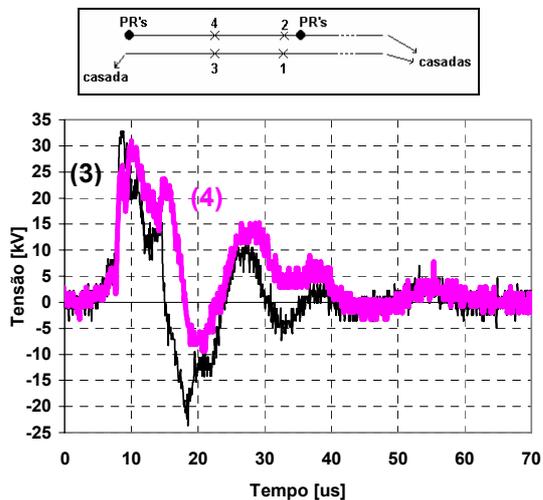
O início efetivo das medições foi no final do período de chuvas (verão 2001/2002), sendo, desde então, obtidas várias formas de onda de tensões induzidas. Até outubro de 2003 a extremidade da linha protegida, que contém o pára-raios, não estava casada.

Podem ser observadas na Fig. 4 formas de onda de tensões induzidas nos quatro pontos de medição existentes nas linhas com e sem proteção. As amplitudes das tensões induzidas foram suficientemente elevadas para fazer com que os pára-raios atuassem. Com isso, houve redução da amplitude de tensão induzida de 29 % no ponto de medição 2 em relação ao 1 e de 20 % no ponto de medição 4 em relação ao 3.

A Fig. 5 mostra as formas de onda de tensões induzidas na linha sem proteção registradas nos pontos de medição 1 e 3. As formas de onda são bipolares e têm amplitude de aproximadamente 16 kV.



(a)



(b)

Fig. 4 – Tensões induzidas - 21/01/2003 (15h 43' 07")
 a) nos pontos de medição 1 e 2
 a) nos pontos de medição 3 e 4

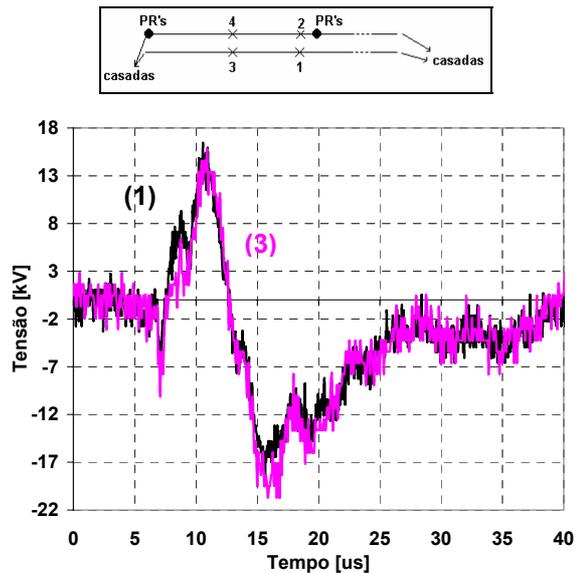


Fig. 5 – Tensões induzidas nos pontos de medição 1 e 3 – 25/02/2005 (18h 14' 15").

4.0 CONCLUSÕES

Foram apresentadas, neste trabalho, as linhas gerais do projeto, da construção e da implantação dos sistemas de medição e de aquisição de dados de um estudo que visará, em etapas futuras, avaliar o comportamento das tensões induzidas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas indiretas e a eficácia da utilização de pára-raios na redução dessas tensões. Para isso é necessária uma quantidade de dados estatisticamente relevante de formas de onda de tensões induzidas. Foram também discutidas algumas soluções para problemas técnicos que foram encontrados nessa implantação. Considerações foram feitas para que as medições realizadas não sofressem influência de ruídos e interferências decorrentes de campos eletromagnéticos, em especial ao sistema de medição de correntes de descargas incidentes na torre de captação, uma vez que o osciloscópio que faz a medição foi instalado na base da torre. Como se sabe, a realização de medições em campo envolve vários parâmetros não controláveis, como temperatura, umidade, resistência de aterramento e outras. Antes da instalação do sistema de medição foram feitos os ensaios de estanqueidade e elevação de temperatura nas caixas que abrigam os osciloscópios e demais equipamentos.

Conclui-se que o conjunto formado pelos sistemas de medição de correntes de descargas atmosféricas e de tensões induzidas e de aquisição de dados está funcionando de forma

satisfatória, tendo em vista as medições de várias formas de onda de tensão que são apresentadas neste trabalho.

5.0 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Companhia Paulista de Força e Luz, pelo apoio financeiro, aos engenheiros P. F. Obase e C. P. Braz e ao técnico C. Y. Kodaira.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PIANTINI, A. **Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas**, Dissertação de Mestrado, Dep. Eng. Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1991.
- [2] RUSCK, S. Induced lightning over-voltages on power-transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks. **Transactions of the Royal Institute of Technology**, n. 120, p. 1-118, 1958.
- [3] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; TAKANISHI, A. Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 102, n. 8, p. 2420-27, 1983.
- [4] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; YAMAZAKI, N. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 2, p. 129-39, 1986.
- [5] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; FUKUI, S. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines (II). **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 4, p. 2196-2203, 1989.
- [6] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. An experimental study of lightning induced voltages by means of a scale model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21., Berlin, 1992. **Proceedings. ICLP**. Berlin, 1992. paper 4.08, p. 195-199.
- [7] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, n. 5, p. 2799-2802, 1998.
- [8] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. The Extended Rusck Model for calculating lightning induced voltages on overhead lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 7., Curitiba, 2003. **Proceedings. SIPDA**. São Paulo, 2003, p. 151-155.
- [9] PIANTINI, A. ; SILVA NETO, Acácio . Tensões Induzidas em Linhas de Baixa Tensão por Descargas Atmosféricas. In: IEEE/PES Transmission & Distribution Latin America 2004, 2004, São Paulo. 2004 **IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America**. São Paulo: Sonopress R Indústria e Comércio Fonográfico Ltda., 2004.