



GRUPO X

GRUPO DE ESTUDOS SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS – (GSI)

ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA ESTUDOS DE APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Luiz Cera Zanetta Jr*

Carlos Eduardo de Moraes

Fernando Augusto Moreira

EPUSP - PEA

RESUMO

A aplicação de pára-raios em linhas de transmissão tem se constituído em uma

das alternativas mais eficazes para a redução dos índices de desligamento em virtude de descargas atmosféricas.

Neste artigo é apresentado um procedimento para o cálculo dos índices de desempenho operativo das linhas equipadas com pára-raios. As linhas de transmissão são detalhadamente modeladas no programa ATP e os índices são calculados através de um programa de desempenho operativo baseado no método de Monte Carlo.

São descritos alguns componentes da rede e sua interação com as características aleatórias da corrente de raio que compõem o fenômeno de saídas de linhas de transmissão por descargas atmosféricas, sendo particularmente enfocados o comportamento da descarga de isoladores e o efeito da tensão operativa da linha de transmissão.

PALAVRAS –CHAVE

Linhas de Transmissão - Pára-raios – Sobretensões - Coordenação do Isolamento

1.0 - INTRODUÇÃO

A instalação de pára-raios de linha em paralelo com as cadeias de isoladores visando reduzir os índices de desligamento de linhas de transmissão está se tornando um procedimento comum para um grande número de concessionárias em vários países. Em determinadas circunstâncias esta alternativa tem se mostrado mais eficiente e econômica do que o método clássico de redução das altas resistências de

aterramento que geralmente existem nas linhas que apresentam elevados índices de desligamento. As aplicações podem ser voltadas para descargas diretas, nas linhas com deficiência no ângulo de blindagem, ou nas descargas indiretas, com ocorrência de backflashover.

Nos EUA e no Japão, diversas concessionárias vêm utilizando os pára-raios de linha desde a década de 80 (1,2,3). Concessionárias do México, Colômbia e França também já instalaram pára-raios de linha em suas redes de transmissão (4). No Brasil, FURNAS, CEMIG e CPFL estão começando a promover a instalação deste equipamento nas suas linhas de transmissão (5,6).

A instalação de pára-raios pode ser motivada por alguns fatores como custo, solução de problemas localizados em torres com frequentes registros de queima de isoladores, facilidade de instalação de pára-raios adicionais em uma linha com desempenho ainda insuficiente, possibilidades de realocação de pára-raios entre torres ou fases procurando otimizar seus posicionamentos em função dos resultados observados, proteção de circuitos duplos, eliminação de cabos guarda, etc.

2.0 - MODELAGEM

Os componentes de uma linha de transmissão precisam ser modelados em um programa de transitórios eletromagnéticos para se determinarem as sobretensões que aparecem no sistema em virtude de descargas atmosféricas. Neste trabalho são apresentados alguns modelos dos componentes da linha.

* Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Av. Prof. Luciano Gualberto, 158, trav. 3 – São Paulo – SP – CEP 05508-900
tel: (011) 818-5276 fax (011) 818-5719 E-mail: lzanetta@pea.usp.br

2.1 - Modelagem das torres

A representação precisa das torres de transmissão em programas de transitórios eletromagnéticos tem sido alvo de diversos estudos e é um dos pontos importantes na análise do desempenho operativo de linhas de transmissão, pois o modelo de torre tem uma influência significativa na determinação das sobretensões.

Chisholm, Chow e Srivastava (9) usam um valor médio para um modelo com impedância constante, verificando que a impedância de surto depende da direção da injeção da onda, com injeções verticais em cilindros e cones concordando com Wagner e Hileman e Sargent e Darveniza e injeções horizontais coincidindo com experimentos de Breuer

2.2 - Aterramento

Para aterramentos de pequena dimensão, geralmente realizados com hastes, discos ou mesmo cabos contrapesos de pequenos comprimentos, é sugerido um modelo (3), que leva em conta o efeito da ionização do solo. Este efeito reduz a resistência de aterramento devido à descarga de altas correntes em eletrodos concentrados. O grau de redução da resistência de aterramento depende da magnitude do gradiente de ionização do solo da ordem de 300 a 400 kV/m.

Para aterramentos extensos realizados com cabos contrapesos, a possibilidade de que seja atingido um campo elétrico suficiente para provocar a ionização do solo é mais remota, pois a corrente está mais distribuída ao longo do condutor. Algumas referências recentes (11) utilizam em seus estudos a própria resistência de dispersão como valor constante para a impedância de aterramento. Os desenvolvimentos computacionais na representação do comportamentos dos campos eletromagnéticos em condutores enterrados deverá permitir um modelamento mais preciso do aterramento.

2.3 - Cabos condutores e guarda

Para se calcularem as sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas com precisão razoável, é necessário utilizar um modelo de linha de transmissão no qual os parâmetros da linha estão representados de uma forma apropriada (10). Devem ser incluídos os cabos-guarda e modelar cada vão de linha, de modo a considerar as reflexões nas torres.

Uma vez que na propagação de ondas existem várias frequências envolvidas é conveniente representar a linha com os parâmetros variando com a frequência.

2.4 - Pára-raios de óxido metálico

A forma mais simples para se modelar um pára-raios de óxido metálico no ATP é através de um resistor não linear representando-se sua característica $V \times I$. Entretanto, no caso de surtos atmosféricos com frentes de onda muito rápidas, algumas características dinâmicas podem ser significativas para os estudos, necessitando de modelos mais sofisticados.

2.5 - Surto atmosférico

O raio pode ser representado como uma fonte de corrente ideal, injetando a corrente no ponto de queda, o qual pode ser o cabo-guarda (queda indireta) ou os cabos de fase (queda direta); tanto na torre como no meio do vão. A fonte de corrente pode também incluir a impedância do canal do raio. Os parâmetros da corrente variam estatisticamente, seguindo, aproximadamente, uma distribuição log-normal (7).

2.6 - Efeito corona e tensão operativa da linha

O aparecimento do corona aumenta a capacitância do condutor, conseqüentemente aumentando também o coeficiente de acoplamento com os outros condutores. Isso leva ao aparecimento de sobretensões nas cadeias de isoladores menores do que se o efeito corona não fosse considerado, melhorando o desempenho operativo da linha frente aos surtos atmosféricos. Embora as conseqüências do efeito corona sejam bem conhecidas, não se dispõe ainda de um modelo simples no programa ATP. A correta representação do corona em programas de transitórios eletromagnéticos tem sido assunto de diversos trabalhos recentes e espera-se que em breve um modelo esteja disponível no ATP.

2.7 - Suportabilidade a impulso atmosférico

O isolamento apresenta um comportamento distinto para diferentes frentes de onda e duração da tensão aplicada, em particular para surtos atmosféricos, o aumento da duração do impulso provoca disrupções com magnitudes inferiores sendo este fato evidenciado na curva *tensão x tempo de disrupção* (curva $v \times t$).

A referência (11) baseia-se na suportabilidade para um tempo de disrupção $t=2\mu s$ que é de 822 kV/m, 68% acima da tensão crítica de descarga (CFO) de 489 kV/m.

Uma abordagem da suportabilidade, em função da forma da onda de tensão é possível através dos métodos de integração de tensões e cálculo do efeito disruptivo, conforme a referência (12).

Este cálculo é feito com a integral:

$$de = \int_{t_0}^t [u(t) - u_0]^k dt \quad (1)$$

$u(t)$: tensão aplicada.

u_o : tensão de referência a ser ajustada.

k : coeficiente a ser ajustado

A integração é feita somente nos intervalos em que $u(t) > u_o$.

Segundo esta referência, para uma cadeia com 8 isoladores o melhor ajuste encontrado foi com os parâmetros $u_o \approx 0,9 \cdot V_{50\%}$, (639 kV) e $k = 1$.

Outro modelo para a descarga na cadeia de isoladores é baseado no comportamento do canal progressivo (leader progression) (7,10). Este modelo é baseado em hipóteses físicas para o mecanismo da descarga, ajustado segundo fórmulas empíricas e resultados experimentais.

O tempo de descarga (time to breakdown) é dado pela soma:

$$t = t_i + t_s + t_\ell \quad (2)$$

onde:

$t_i \approx 0$: tempo de início do corona.

t_s : tempo de formação do streamer

t_ℓ : tempo de propagação do leader (descarga piloto)

Existe uma formulação empírica para o t_s (μ s)

$$\frac{1}{t_s} = 1,25 \left(\frac{E}{E_{50}} \right) - 0,95 \quad (3)$$

E campo elétrico antes da descarga (kV/m)

$$E_{50} = \frac{CFO}{\ell} \quad (4)$$

Na fase do leader, um ajuste razoável para a velocidade de propagação é dado pela expressão abaixo:

$$\frac{d\ell(t)}{dt} = k \cdot u(t) \left(\frac{u(t)}{\ell - d(t)} - E_0 \right) \quad (5)$$

Temos as constantes para cadeias de isoladores:

$$k \text{ (constante)} = 1,3 \frac{\text{m}^2}{\text{kV}^2 \text{s}}$$

ℓ : comprimento da cadeia de isoladores

d : comprimento do canal

E_0 : campo elétrico de referência para cadeia de isoladores (520 kV/m para polaridade positiva e 600 kV/m para polaridade negativa).

O comprimento do canal só evolui com velocidade positiva em (5) e quando $d(t) > \ell$ ocorre a disrupção.

Apesar dos recentes desenvolvimentos permanecem algumas incertezas quanto ao melhor ajuste dos parâmetros deste modelo podendo ser esperados mais desenvolvimentos nesta área.

2.8 - Tensão operativa

A tensão operativa da linha (tensão a 60Hz) também é representada nas simulações. Verificou-se, em uma análise paramétrica, que o efeito da tensão operativa não é muito significativo na determinação dos índices de desligamento das linhas de transmissão.

3.0 - CÁLCULO DO ÍNDICE DE DESLIGAMENTOS

A metodologia de análise seguida neste trabalho consiste em fazer o levantamento, para cada tempo de crista previamente estabelecido, da intensidade de corrente mínima de raio que provocaria desligamento segundo algum método que indique o possibilidade de ocorrência de descarga através dos isoladores. A este valor de corrente dá-se o nome de corrente crítica. Uma vez que se tenha o valor da corrente crítica para vários tempos de crista, os pares de valores de intensidade de corrente e tempo de crista são levados para um programa de cálculo do índice de desligamentos. Através de um processamento estatístico do tipo Monte Carlo, são determinados os índices de desligamento.

A figura 1 mostra o diagrama de blocos geral da metodologia seguida neste trabalho. A linha de transmissão é simulada no programa ATP. O arquivo de saída passa por um programa de pós-processamento, onde as correntes críticas são determinadas, sendo utilizadas pelo programa de cálculo dos índices de desligamento da linha.

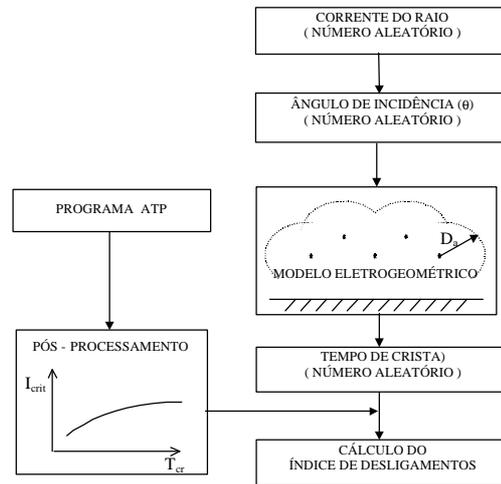


FIGURA 1 - Diagrama de blocos geral

Quando o sistema é não linear, por exemplo com a inclusão de pára-raios de linha, a determinação das correntes críticas que implicam em desligamentos é um pouco mais trabalhosa, porém, o procedimento não é substancialmente diferente.

Os parâmetros que devem ser variados são a intensidade de corrente, o tempo de crista e o ângulo de incidência.

Em (7) são encontrados os parâmetros M (mediana da variável corrente ou tempo de frente) e β (desvio padrão logarítmico destas variáveis) da corrente de raio e do tempo de crista em função desta corrente e suas respectivas faixas de aplicação.

4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Foi analisada para uma linha de transmissão com uma configuração de torre típica de linhas de 138 kV, circuito simples, com disposição vertical dos condutores e cabo guarda, a influência do modelo da cadeia de isoladores e da tensão operativa.

Três alternativas de métodos para se verificar o desligamento dos isoladores foram analisadas.

- A: Modelo do Leader progressivo.
- B: Tensão crítica de descarga (CFO)
- C: Método de integração

Estes índices foram determinados considerando um nível cerâmico de 50 dias de trovoada por ano e um fator de queda para a terra de 0,1, resultando em uma densidade de descargas para a terra de 5 descargas / km² / ano. Nesta análise comparativa dos métodos de análise dos desligamentos na cadeia de isoladores considerou-se uma tensão operativa nula na linha de transmissão. A resistência de pé de torre utilizada foi de 70 Ω .

TABELA 1 - ÍNDICES DE DESLIGAMENTO PARA AS ALTERNATIVAS ANALISADAS

método desligamento	fases com pára-raios	tensão inicial (pu)	índice relativo (pu)
A	-	1	0.956
A	-	0	1.034
A	-	-1	1.079
A	-	média	1
B	-	0	1.062
C	-	0	1.086
A	B e C	0	0.695

Observa-se a redução do índice de desligamentos com a inclusão de pára-raios de linha.

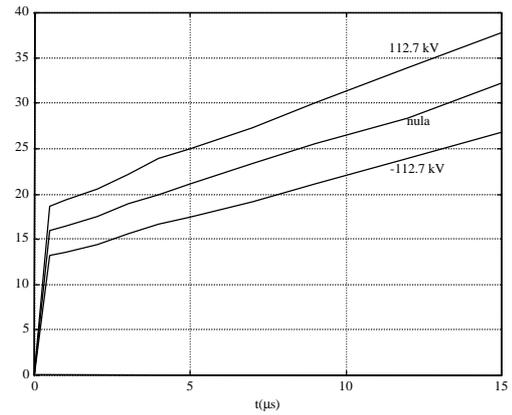


FIGURA 2 – Influência da tensão operativa na curva de correntes críticas

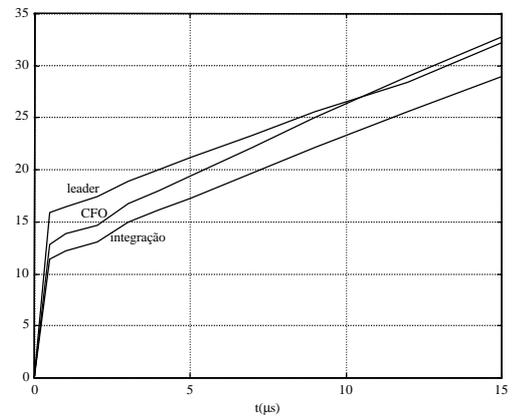


FIGURA 3 – Comparação das curvas de correntes críticas para diferentes modelos de suportabilidade dos isoladores

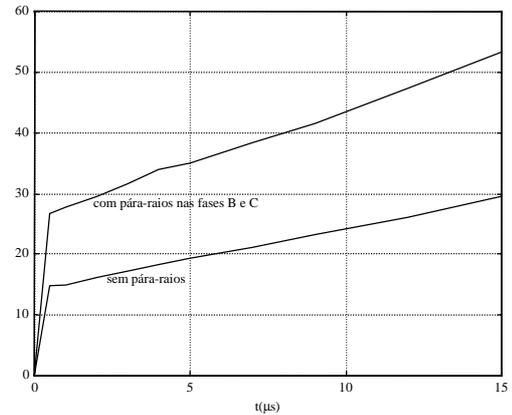


FIGURA 4 – Influência da presença de pára-raios na curva de correntes críticas

As figuras 2 a 4 mostram as correntes críticas nos casos estudados, as figuras 5 e 6 a seguir exemplificam o efeito da instalação de pára-raios nas tensões desenvolvidas sobre as cadeias de isoladores.

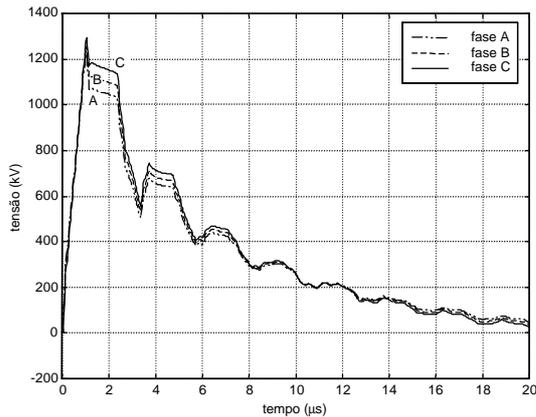


FIGURA 5 –Tensões sobre os isoladores sem a presença de pára-raios

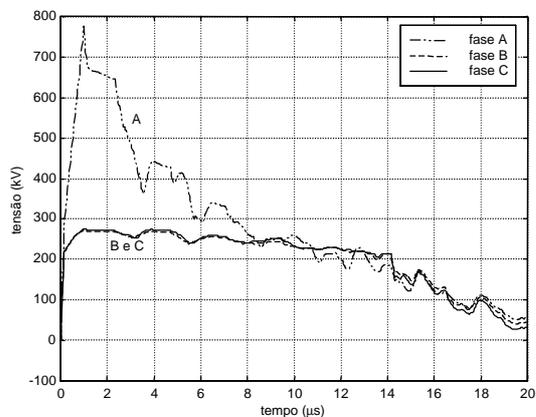


FIGURA 6 –Tensões sobre os isoladores com a presença de pára-raios nas fases B e C

5.0 - CONCLUSÕES

Além das contribuições de caráter metodológico, os estudos efetuados para linhas típicas de 138kV, em circuito simples, apresentam resultados reveladores e com conteúdo prático de aplicação.

Novos aspectos de simulação foram incluídos no cálculo do índice de desligamentos de linhas de transmissão, complementando trabalhos anteriores (5,8), em particular enfocando a presença da tensão operativa e dos métodos de cálculo de descargas em isoladores.

O método mais difundido (7) apresentou resultados inferiores de índices de desligamentos, ou seja, uma curva limite mais elevada. O efeito da tensão operativa não representou um grande impacto no cálculo dos índices de desligamentos, em termos médios, para estas linhas de 138 kV.

Outros aspectos a serem verificados nos estudos para instalação de pára-raios de linha são a capacidade de dissipação de energia que este equipamento apresenta,

e a influência do efeito corona nos resultados de índices de desligamentos.

Para a análise da energia dissipada nos pára-raios, além da intensidade de corrente, duas outras características dos surtos atmosféricos são importantes, como o tempo de cauda e o número de descargas, quando se considera a ocorrência de descargas múltiplas.

Estes aspectos deverão ser abordados detalhadamente em um trabalho futuro.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SHIH, C.H. et al. Application of special arresters on 138kV lines of Appalachian power company. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.104, n.10, p.2857-63, Oct. 1985, EUA
- (2) ISHIDA, K. et al. Development of a 500kV transmission line arrester and its characteristics. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.7, n.3, p.1265-72, July 1992, EUA
- (3) FURUKAWA, S. et al. Development and application of lightning arresters for transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.4, n.4, p.2121-9, Oct. 1989, EUA
- (4) DE LA ROSA, F.; GALVÁN, A.; VELÁZQUEZ, R. Evaluation of surge arresters protection of electric power lines in Mexico. In: CIGRÉ BRAZIL CE 33 INTERNATIONAL WORKSHOP ON LINE SURGE ARRESTERS AND LIGHTNING, Rio de Janeiro, 1996. **Technical proceedings**. Rio de Janeiro, CIGRE/IEEE, 1996. p.3.1-8, Brasil
- (5) KASTRUP, O.; ZANETTA, L.C.; NIGRI, A.; CAMPONES DO BRASIL, D.O.; MALDONADO, P.; MOREIRA, F.A. Lightning performance assessments with line arresters. In: IEEE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, Los Angeles, 1996. **Proceedings**. New York, IEEE, 1996. p.288-93, EUA
- (6) Cherchiglia, L.C., Rocha, A.C.O., et al. Application of transmission line arresters in Cemig-Brazil. Reunião Bial da Cigré, Paris, 1998, SC33/PS3, França
- (7) CIGRE Study Committee 33. Working Group 01. **Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines**. Paris, CIGRE, 1991, França
- (8) ZANETTA, L.C.; et al. Aplicação de pára-raios ZnO em linhas de 138 kV. XIV SNTPEE, Belém – PA, Brasil, Junho 1997
- (9) CHISHOLM, W.A.; CHOW, Y.L.; SRIVASTAVA, K.D. Lightning surge response of transmission towers. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.102, n.9, p.3232-42, Sept. 1983, EUA
- (10) IMECE, A.F. et al. Modelling guidelines for fast transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.11, n.1, p.493-501, Jan. 1996[44] IEEE W. G. 3.4.11 Application of Surge Protective Devices Subcommitte, Surge Protective Devices Comitte Modelling of metal oxide surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.7, n.1, p.302-9, Jan. 1992, EUA
- (11) IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.104,n.4, p.919-32, Apr. 1985, EUA
- (12) DARVENIZA, M.; VLASTOS, A.E. The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard wave shape: a theoretical basis. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v.23, n.3, p.373-81, June 1988, EUA
- (13) MATSUMOTO, Y. et al. Measurement of lightning surges on test transmission line equipped with arresters struck by natural and triggered lightning. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.11, n.2, p.996-1002, Apr. 1996, EUA