



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 08
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIA, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA – GCQ**

EFEITOS DA DESCARGA ATMOSFÉRICA EM CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE UMA SUB ESTAÇÃO

Marcos André da Frota Mattos *

OKIME ELETROMAGNETISMO APLICADO

RESUMO

A necessidade de se construir cada vez mais em menos espaços tem agravado os problemas de interferência eletromagnética em subestações. Uma das principais causas destas interferências são as descargas atmosféricas que atingem o sistema de proteção contra descargas atmosféricas da subestação, atingem diretamente a malha de terra ou atingem os circuitos que deixam a subestação. Estes distúrbios são de alta frequência e acoplam com o circuito de baixa tensão e com o circuito de controle de equipamentos.

Os processos de acoplamento são pelo ar via acoplamento indutivo ou capacitivo ou por efeito antena, também, sendo comum o distúrbio ir via transformador de corrente ou via transformador de potencial capacitivo.

Neste trabalho, é analisado o caso de uma descarga atmosférica atingindo o sistema de proteção contra descarga atmosférica aéreo e aterrado na malha de terra, e de seu acoplamento com um circuito de baixa tensão ligado a um transformador de potencial capacitivo. É conhecida, de verificações práticas, que é comum a queima de equipamentos através deste circuito de baixa tensão durante impulsos atmosféricos.

Este trabalho é uma continuação dos trabalhos 7, 8, 9, 10 e 11 mostrado nas referências.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Compatibilidade Eletromagnética, Aterramento, Descarga Atmosférica

1.0 - INTRODUÇÃO

Nas instalações elétricas atuais há uma série de eventos que não são devidamente entendidos e explicados, este fato é decorrente da grande complexidade da instalação e dos poucos recursos disponíveis para analisá-los. Fenômenos diversos estão presentes em uma subestação de energia elétrica, estes fenômenos são de origem interna como de origem externa à instalação. Externamente são gerados eventos eletromagnéticos que atingem a subestação por via de condutores e por propagação de ondas no ar ou no subsolo. Descargas atmosféricas e correntes de curto-circuito transitórias são os mais intensos causando estragos irreversíveis com a queima de equipamentos e de isolamento de fios e cabos. Os prejuízos financeiros decorrentes destas faltas são elevados não apenas pela necessidade de reposição dos equipamentos mais pela interrupção do serviço. Vários autores vem focando atenção em problemas de EMI e EMC em instalações elétricas [1,2,3,4,5,6,8] com o objetivo de minimizar os custos de manutenção envolvidos e de aumentar a confiabilidade.

O objetivo deste trabalho é de desenvolver uma ferramenta computacional para simular o comportamento da onda eletromagnética pelo solo para avaliar a sua influência em circuito da instalação.

A fenomenologia do processo de descarga atmosférica em malha de terra é complexa e de abordagem igualmente complexa sendo somente em anos recente sendo modelado adequadamente e com robustez [7,8,9,10,11], o resultado da distribuição do potencial elétrico na superfície do solo acima da malha de terra de uma descarga ainda na etapa inicial pode ser visto na Figura 1. Nesta figura, fica clara a variação do potencial elétrico acima da malha, muito embora esta malha esteja dentro dos padrões de segurança para condições de 60 Hz. Esta variação do potencial induz tensões e correntes nos circuitos acima do solo. Estas tensões e correntes causam queima e mau funcionamento de equipamentos. Os cabos guarda que estão aterrados nos dois extremos ou os cabos que estão solidamente conectados à malha em uma das pontas e por via de uma impedância em outra ponta estarão sujeitos a transitórios indesejados.

Condições como a exemplificada pela Figura 1, só podem ser sentidas na hora de substituir equipamentos queimados que foram programados para durarem muitos anos ou quando são feitas análises com simuladores computacionais de alto desempenho que consideram juntamente as características de circuito e de campo.



FIGURA 1 – Distribuição de potencial elétrico na superfície do solo para uma descarga atmosférica atingindo diretamente a malha no seu centro, malha 10x10 de 100x100m a 50 cm de profundidade, solo 100 Ω .m

2.0 - MODELO

O modelo considerado para a análise da compatibilidade eletromagnética com um circuito secundário leva em conta além da malha de aterramento o sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Para simular as condições de um fenômeno variando no tempo como uma descarga atmosférica o modelo desenvolvido trabalha no domínio do tempo. A técnica numérica adotada é o TLM.

2.1 Modelo do Conjunto

Na modelagem da subestação foram considerados os cabos captadores de descargas atmosféricas, os cabos de descida da descarga atmosférica, a malha de terra, onde o sistema de proteção contra descarga atmosférica está aterrado, o solo e o circuito vítima, como ilustrado na Figura 2.

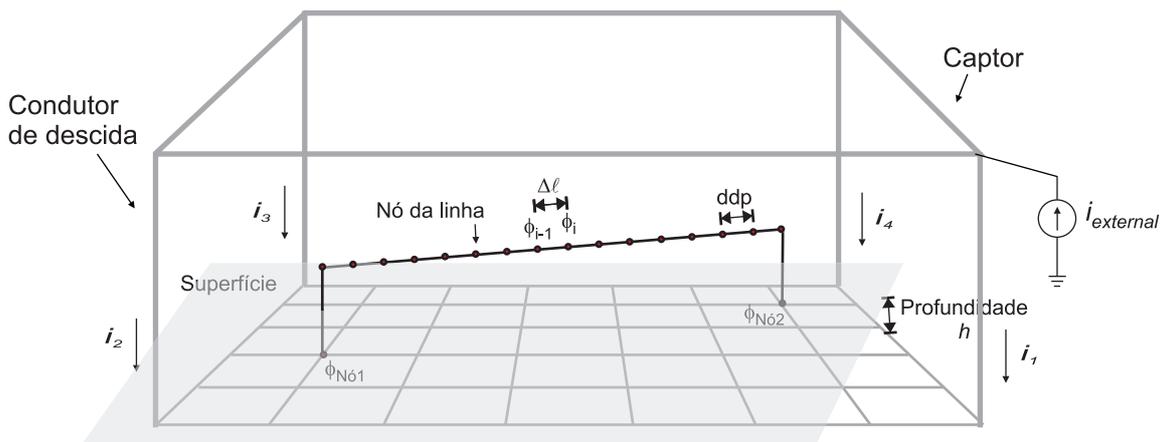


FIGURA 2 – Modelo do ambiente eletromagnético a ser analisado

A linha de transmissão vítima é tida como linear e o solo é homogêneo, porém, é adotado a resistividade aparente para o solo que é função da resistividade e da espessura das diversas camadas do solo e da geometria da malha.

Na Figura 3 está representada sobre a distribuição de potencial no nível de uma malha 5x7 com quadrículas 10x10m a um metro de profundidade e uma linha de transmissão de um circuito secundário. A representação da distribuição de potencial está em escala de cinza sendo cada tom de cinza um valor de potencial diferente. É evidente neste caso que os terminais da linha vítima está em potenciais diferentes o que levará a uma circulação de corrente indesejada no circuito, colocando tensões indevidas ao longo da linha. Estas tensões causam o rompimento do isolamento ou danificam os dispositivos ligados a linha.

O que a Figura 3 não deixa claro é a influência do potencial elétrico gerado pela circulação de corrente nos cabos da malha de terra que está justamente ao longo da linha de transmissão vítima, isto significa que mesmo estando os terminais da linha em potenciais iguais poderá haver tensão e corrente induzidas na linha vítima. Para se conhecer esta influência é necessário calcular a cada passo no tempo o campo gerado pela malha de aterramento ao longo do circuito aéreo. A linha está representada com duas terminações, um curto-circuito e uma impedância, para alta frequência o curto-circuito representa um capacitor série.

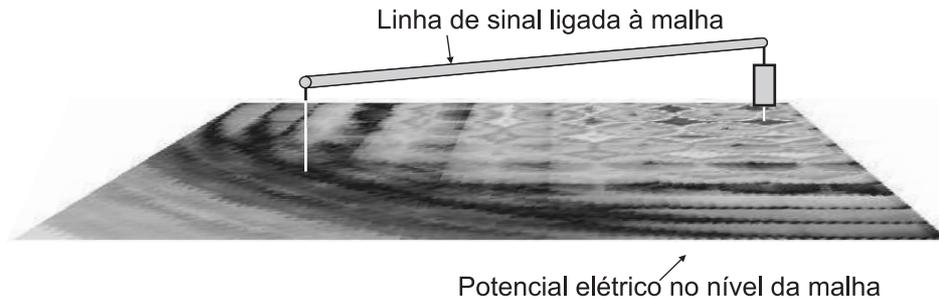


FIGURA 3 – Representação esquemática de uma linha de transmissão de sinal sobre a distribuição calculada de potencial elétrico no nível da malha de terra; cada tom de cinza é um valor de potencial elétrico no instante $t=1 \mu\text{s}$; para um impulso $1,2/50 \mu\text{s}$

2.2 Modelo do Nó da Malha

Para a análise computacional é utilizado o método numérico TLM [12] que tem a característica de ser incondicionalmente estável. A malha de terra é representada por um conjunto de linhas de transmissão que se cruzam tendo perdas longitudinais, R , para representar as perdas Joules e com perdas transversais, G , para representar a drenagem da corrente para o solo. O parâmetro G é calculado a partir de equações fornecidas por [16,17]. A interação entre os segmentos da malha é obtida com o cálculo do potencial elétrico gerado por toda a malha no nó em questão, simbolizado por V_m . Z , L e C representam a ação do campo eletromagnético gerado pela malha. A Figura 4 representa o circuito TLM que modela um nó da malha com conexão com um cabo aéreo. O modelo da malha de terra foi extensivamente analisado e comparado com medições feitas em malhas reais [7] e comparado com outros trabalhos [13,14].

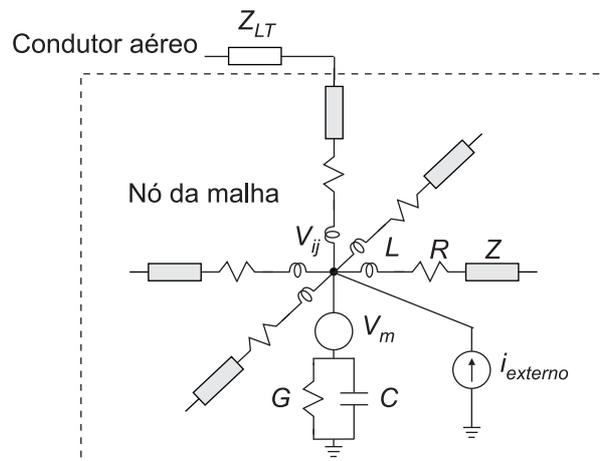


FIGURA 4 – Circuito TLM de um nó da malha de aterramento conectado a um condutor aéreo e a fonte de corrente externa

2.3 Cálculo do Potencial Elétrico

O potencial elétrico deve ser calculado para o nível em que se encontra a linha de transmissão vítima. Esta equação pode ser obtida a partir do potencial gerado por cargas pontuais no interior do solo e então integrada para se ter o efeito causado por segmentos de reta com corrente circulando. Estas equações são encontradas em [15] e a seguir:

$$\phi(x, y) = \frac{i(x, y)\rho_a}{8L\pi} \left[\begin{aligned} &F(x - x_s + L, A) - F(x - x_s - L, A) + \\ &F(x - x_s + L, B) - F(x - x_s - L, B) \end{aligned} \right]$$

$$F(t, u) = \ln\left(t + \sqrt{t^2 + u^2}\right)$$

$$A = \sqrt{(y - y_s)^2 + (z - z_s)^2}$$

$$B = \sqrt{(y - y_s)^2 + (z + z_s)^2}$$

sendo que:

$i(x, y)$ – corrente nos cabos da malha de terra;

ρ_a – resistividade aparente do solo [$\Omega \cdot m$];

(x_s, y_s, z_s) é o centro do segmento de reta;

L é o comprimento do segmento de reta [m];

Estas equações são válidas somente para segmentos de reta paralelas ou perpendiculares à superfície do solo.

A equação para o potencial elétrico acima do solo é dada por:

$$\phi(x, y) = \frac{i(x, y)\rho_a}{4L\pi} [F(x - x_s + L, A) - F(x - x_s - L, A)] \text{ [V]}$$

2.3 Interação do Circuito Secundário com o Campo Potencial Elétrico

Tendo calculado a corrente elétrica em toda a malha de terra é possível obter o potencial elétrico em qualquer parte da superfície e do subsolo. Desta forma calcula-se o potencial elétrico ao longo da linha de transmissão vítima, como ilustrado na Figura 2, e a partir daí calcula-se a ddp para cada segmento de reta. Esta aproximação é aceitável porque os segmentos de reta são eletricamente curtos para as formas de onda envolvidas na análise.

Na Figura 5 é apresentado o circuito TLM de um nó da linha de transmissão aérea com uma fonte externa representada por $\phi_i - \phi_{i-1}$. Z_{LT} é a impedância característica da linha de transmissão e R_{LT} é a resistência da linha de transmissão no segmento em questão. V_{i1} e V_{i3} são tensões incidentes no nó [12] e $v_i(t)$ é a tensão no nó.

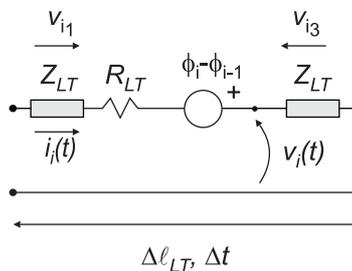


FIGURA 5 – Representação de um segmento da linha de transmissão utilizando TLM

As terminações desta linha de transmissão são ligadas a malha de aterramento como mostrado na Figura 4, onde aparece um circuito TLM de um nó da malha de aterramento.

3.0 - RESULTADOS

Com o modelo desenvolvido e programado foram levantados alguns resultados a partir de dados de malha de aterramento encontrados na literatura.

3.1 Corrente de Descarga Atmosférica

Um impulso atmosférico de 27.080 A 1,2/50 μ s atingindo o sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma malha 6x6 quadrículas e com cada quadrícula tendo 10x10 m a uma profundidade de 0,5 m em um solo de 100 Ω .m gera nos extremos da linha de transmissão aterrada nos nós (2,2) e (6,6) conforme ilustrado na Figura 6 as tensões mostradas no gráfico da Figura 7. A descarga atmosférica atinge no topo do condutor de descida ligado ao nó (1,1).

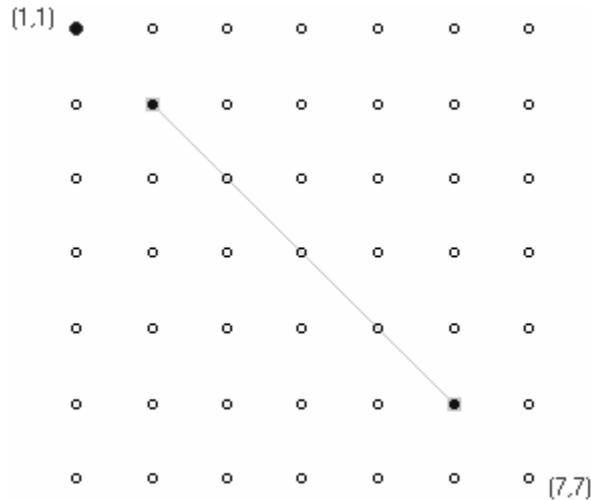


FIGURA 6 – Nós da malha de aterramento analisada e representação da linha de transmissão aérea

A linha de transmissão está ligada aos nós da malha por uma impedância de 1 Ω cada e a impedância característica da linha é de 1 Ω , com esta configuração a tensão nos terminais da linha é mostrado na Figura 7.

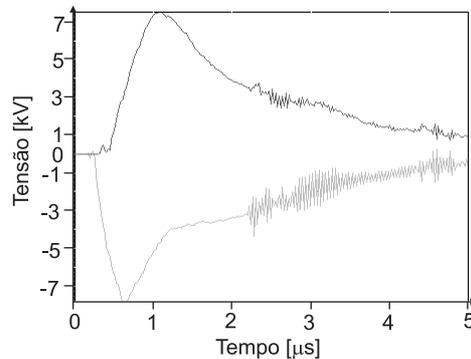


FIGURA 7 – Tensão nos terminais da linha de transmissão vítima; a tensão positiva é na conexão (6,6)

Na Figura 7 pode se notado que a frente de onda tem uma taxa de subida maior do que a do impulso injetado nos sistema de proteção contra descargas atmosféricas. O impulso injetado tem uma frente de onda de 1,2 μ s e na linha de transmissão vítima é inferior a 0,5 μ s. O conhecimento deste tempo de subida e da integral da curva na Figura 7 são relevantes para o dimensionamento de protetores elétricos.

No próximo caso a linha de transmissão está ligada aos nós da malha por uma impedância de 1Ω no nó (2,2) e $1 \text{ M}\Omega$ no nó (6,6) e a impedância característica da linha é de 400Ω , a tensão nos terminais da linha aparece na Figura 8.

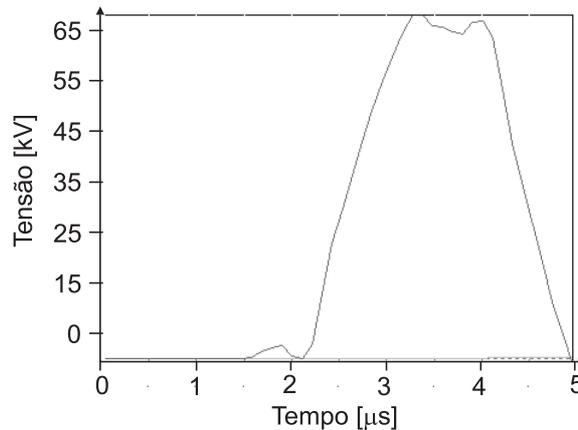


FIGURA 8 – Tensão nos terminais da linha de transmissão vítima com impedância característica de 400Ω ; a tensão positiva é na conexão (6,6)

4.0 - CONCLUSÃO

Fica evidente pelos resultados obtidos que a tensão induzida no circuito vítima é consideravelmente alta, o que levará a danos no sistema. As taxas de subida das ondas que aparecem nas Figuras 7 e 8 são maiores do que a forma de onda de corrente injetada, o que indica que o dimensionamento de dispositivos de proteção elétricos devem ser repensados. Com o simulador desenvolvido é possível identificar uma configuração que melhor atende as necessidades de compatibilidade eletromagnética dentro de uma subestação.

Esta ferramenta evitará problemas de interrupção devido à queima em subestação durante descargas atmosféricas. Os protetores elétricos, as blindagens e o aterramento dos sistemas de baixa tensão poderão ser dimensionados de modo apropriado para garantir a integridade dos equipamentos e a continuidade de serviço.

Como trabalho futuro será incluído um modelo distribuído de uma descarga atmosférica [18] e da interação do campo eletromagnético gerado por esta com o circuito secundário da subestação.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRE Working Group 36.04; "EMI Characterization of HVAC Substation-Updated Data and Influence on Immunity Assessment", Bienal Cigré, Paris, 2002.
- (2) Recapacitação da Subestação de Mogi 345/230 kV e Adaptação aos Novos Níveis de Curto-Circuito da Rede - Amon F., J, Peres, L. A. P. - XIV SNPTEE, Belém, 1997 CIGRE Working Group 36.04; "EMI Characterization of HVAC Substation-Updated Data and Influence on Immunity Assessment", Bienal Cigré, Paris, 2002.
- (3) EC TS 61000-6-5, Electromagnetic Compatibility, Part 6-5, Generic Standards – Immunity for Power Station and Substation Environments, 2001-07.
- (4) Mansoor and F. Martzloff; "The Effect of Neutral Earthing Practices on Lightning Current Dispersion in a Low-Voltage Installation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 113, No. 3, July 1998.
- (5) P.S.Wong; "Summary of BC Hydro Results on Transient Induced Voltages in Control Cables", Cigré WG36.04, 16 December 2001.
- (6) R.J.Gavazza, C.M.Wiggins; "Reduction of Interference on Substation Low Voltage Wiring", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No, 3, 1317-1329, July 1996.
- (7) M.A.F.Mattos; "Grounding Grids Transient Simulation", IEEE Trans. Power Delivery, Abr. 2005.

- (8) M.A.F.Mattos, "Common Mode Voltage Generated by Grounding Grids, a Time Domain Solution", IEEE Symposium on EMC, USA, 2003.
- (9) M.A.F.Mattos, "Common Mode Current Generated by Multiple Transient Sources on Grounding Grids", EMC Symposium, Zurich, 2005.
- (10) M.A.F.Mattos and A.C.Pavão, "Electromagnetic Fields Generated by Transients of Grounding Grids", Cigré Symposium on Power System EMC, Lausanne, Swiss, (1993).
- (11) M.A.F.Mattos, "Transitórios em Malhas de Terra ", XVII SNPTEE, Uberlândia, MG, Brazil, Oct. 19-24 (2003).
- (12) C.Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method TLM*, IEEE press, (1995).
- (13) Carlos Portela; "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, I - Physical and Methodological Aspects", *Inter.Symp. EMC IEEE*, Austin, Texas, USA, pp. 379-384, Aug. 1997.
- (14) A.P.Meliopoulos and M.G.Moharam; "Transient Analysis of Grounding Systems", *IEEE Trans. Power App. Systems*, Vol. PAS-102, No. 2, pp. 389-399, Feb 1983.
- (15) A.P.S.Meliopoulos, *Power System Grounding and Transients*, Marcel Dekker, 1988, pp. 139-158.
- (16) E.D.Sunde; *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, Dover Publications, New York, 1968, pp. 82-88, 254-259.
- (17) G.F.Tagg; *Earth Resistances*, Pitman Publishin Corporation, 1964, pp. 90-108, 143-153.
- (18) M.A.F. Mattos and C.Christopoulos; "A Nonlinear Transmission Line Model of the Lightning Return Stroke", *IEEE Trans. EMC*, Vol.30, No.3, Aug., 1988.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcos André da Frota Mattos, Ph.D.

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 19 de março de 1958.

Doutorado (University of Nottingham, Inglaterra, 1989), Mestrado (PUC-Rio de Janeiro, 1985) e Graduação (Universidade Federal Fluminense, 1982)

Empresa: Okime Eletromagnetismo Aplicado

Atuo com compatibilidade eletromagnética, transitórios e harmônicas em sistemas de potência, descargas atmosféricas e aterramento