



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

GCQ - 04
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA- GCQ**

**COMPATIBILIDADE DE TERRA DURANTE
TRANSITÓRIOS EM MALHAS DE ATERRAMENTO**

**Marcos André Mattos*
Okime Eletromagnetismo Aplicado**

RESUMO

A queima de equipamentos e ruptura de isolamento da cablagem em subestações de energia elétrica tem sido uma questão a ser tratada a contento, desta forma, análise e simulação numérica de ruídos gerados durante transitórios em malhas de terra são tarefas indispensáveis nesta questão. A técnica apresentada permite antecipar tensões e correntes de modo comum surgidos em conexões entre equipamentos aterrados. O processo leva em conta o sistema de proteção aéreo contra descargas atmosféricas, a malha de terra e a cablagem de interligação dos equipamentos. Neste trabalho é mostrada uma comparação entre diversas situações de aterramento, sendo variado a resistividade do solo, a permissividade relativa do solo, o arranjo dos equipamentos e a distribuição de corrente pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramento, Malha de Terra, Compatibilidade Eletromagnética, Transitórios, Descarga Atmosférica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os problemas advindos da falta de compatibilidade eletromagnética entre equipamentos em subestações de energia elétrica não são recentes mas têm se agravado por ter havido substituições de dispositivos mecânicos por dispositivos elétricos mais sensíveis além dos equipamentos e da comunicação digital dentro da subestação. Estes efeitos indesejados de interferência têm causado danos não apenas com a perda de dados e mau funcionamento de equipamentos mais também com queima de isolamento de fios e cabos além de queima de equipamentos. Uma análise criteriosa destes eventos gerados por transitórios (7) na subestação deve ser levada à frente para se ganhar com qualidade de energia e economia na substituição de equipamentos e cabos queimados. Estes dispositivos afetados são relés, transformadores de potencial, cabos, equipamentos de diagnóstico, interface ótico-eletrônica, dispositivos de controle e de monitoração. O CIGRE (11) expõe algumas equações básicas para aplicar na avaliação destes efeitos indesejados durante transitórios, estas equações são de uso maçante e pouco precisas. Processos computacionais são ferramentas mais práticas e precisas (1,2,3,4,5,6). O trabalho aqui proposto simula tensões e correntes gerados na cablagem por faltas para a terra em subestações. Estas faltas são correntes de curto-circuito, descargas atmosféricas e correntes com componentes de alta frequência gerada por dispositivos não lineares.

Possibilita uma adequação dos métodos de proteção contra tensões e correntes de modo comum interferente na cablagem da instalação. A partir das tensões analisadas a cablagem poderá ser reisolada para poder suportar a interferência.

Além da aplicação profissional pode ser usado com uma ferramenta de ensino de compatibilidade eletromagnética em instalações elétricas.

O modelo proposto analisa situações como a encontrada na figura 1, em dois equipamentos interligados estão aterrados. Este procedimento leva a circulação de uma corrente de modo comum entre estes equipamentos. Tensões de modo comum estarão presentes e poderão causar danos e mau funcionamento neste equipamento.

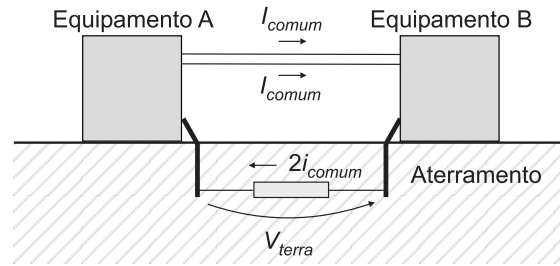


FIGURA 1 – Representação de dois equipamentos interligados e aterrados

2.0 - MODELAMENTO

O método empregado utiliza um conjunto de modelos de linhas de transmissão e um modelo de malha de terra (1,2,3,4,5), figura 2. Estes modelos juntos representam as condições transitórias adversas geradas pela malha de terra e as respectivas correntes e tensões interferentes na cablagem da subestação.

A corrente de surto injetada é via fonte de corrente concentrada. Esta fonte de corrente pode ser uma dupla exponencial para representar uma descarga atmosférica ou um chaveamento, pode ser uma senoide de até 10MHz, um degrau para analisar as condições de corrente contínua ou uma outra forma de onda qualquer. A fonte de corrente pode ser uma ou várias, estas fontes podem estar localizadas em qualquer ponto da malha, figura 2.

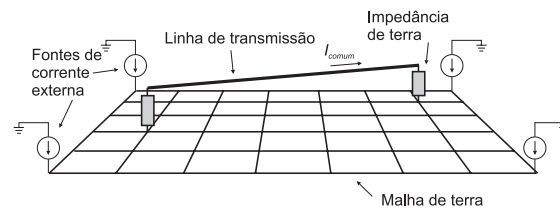


FIGURA 2 – Malha de terra, fontes de corrente, equipamentos aterrados e linha de transmissão aérea interligando estes equipamentos

A representação de tensões e correntes no sistema analisado é ilustrada na figura 3.

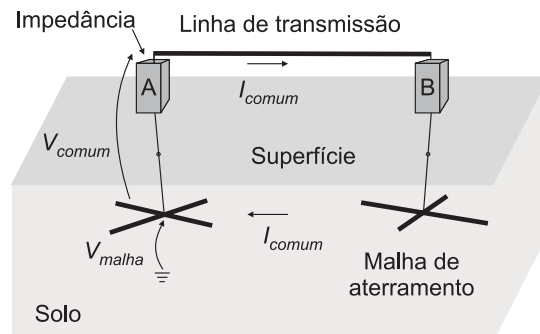


FIGURA 3 – Representação por circuito dos nós da malha.

2.1 Parâmetros

Os parâmetros da malha de terra são:

- d - comprimento do cabo entre nós considerado;
- h - profundidade da malha;
- a - diâmetro do cabo;
- μ - permeabilidade do solo;
- ϵ - permissividade do solo;
- ρ_a - resistividade aparente.

O solo é considerado homogêneo e plano. Para a linha de transmissão aérea são necessários a altura da linha, o comprimento da linha e o diâmetro do cabo.

Para as fontes de corrente são necessários conhecer as formas de onda a serem injetadas na malha. Por fim, para os equipamentos é necessário conhecer a impedância de contato com o terra

2.2 Modelo TLM

O TLM é um método numérico (9) que utiliza linhas de transmissão ideais para modelar fenômenos físicos. No modelo proposto um nó da malha é representado por linhas de transmissão com impedância

característica $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$, figura 4. O intervalo de tempo para o processo iterativo é calculado de

$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}}$, sendo Δx a largura de um segmento do cabo da malha, μ a permeabilidade do solo e ϵ a

permissividade do solo. A resistência do cabo da malha é representada por R em série com a impedância característica. As não-uniformidades são incluídas como derivações capacitivas ou indutores série.

A fonte de corrente externa é incluída como uma fonte de corrente derivação em cada nó da malha de terra, figura 4. A linha aérea é ligada à malha de terra via uma resistência R_c que representa a impedância do equipamento.

A linha de transmissão aérea representa os cabos de interligação entre os equipamentos A e B, é modelada com parâmetros de uma linha infinita e tem representação TLM como mostrado na figura 5.

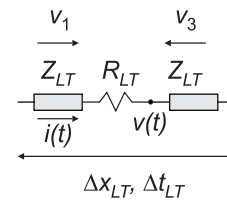
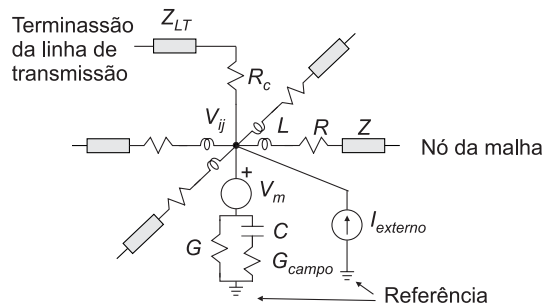
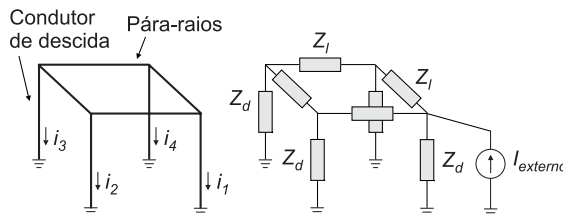


FIGURA 4 – Representação por circuito dos nós da malha. FIGURA 5 – Representação por circuito dos nós da linha de transmissão aérea.

3.0 - SIMULAÇÕES

Os resultados, tensões e correntes de modo comum na cablagem e potenciais de terra, são obtidos para diversas configurações de terminações da cablagem como circuito aberto e circuito fechado; circuito fechado e impedância diferente de zero; etc. As correntes injetadas na malha de terra representam descargas atmosféricas, início de curto circuito e chaveamento.

Para situações em que for considerada a injeção de correntes vindas de um sistema de proteção aéreo contra descargas atmosféricas o circuito da figura 6 será considerado. A partir do circuito da figura 6 chega-se a seguinte relação entre a corrente de origem externa e as correntes injetadas na malha:



$$\begin{cases} i_1 = 0.921i_{\text{external}} \\ i_2 = i_4 = 0.0379i_{\text{external}} \\ i_3 = 0.0032i_{\text{external}} \end{cases}$$

FIGURA 6 – SPDA e representação por impedâncias.

Foram simulados e analisados seis casos de tensões de modo comum em uma mesma malha de terra. Esta malha de terra tem 10x10 quadrículas de 10x10m cada a uma profundidade de 0,5m, condutor de 50mm².

As variações dos dados foram com relação as fontes de corrente, aos parâmetros elétricos do solo e ao posicionamento da linha interconectando os equipamentos. A fonte externa tem sempre a forma de uma dupla exponencial 1,2/50µs. A linha aérea está a 0,5m de altura da superfície do solo.

Os dados numéricos são $\Delta x=2\text{m}$, $\Delta t=21,0964\text{ns}$. Os parâmetros numéricos estão dentre os valores colocados em (12).

3.1 Caso 1

Neste caso foi considerado o arranjo da figura 8 em que a fonte dupla exponencial com 10kA de pico no vértice dos SPDA, esta curva está ilustrada na figura 7.

O solo com permissividade 10 e resistividade $50\Omega\cdot\text{m}$.

A linha aérea aberta ($1\text{M}\Omega$) em (2,2) e curto-circuitada (1Ω) em (10,10), com comprimento de 113,1m, impedancia de $349,32\Omega$, figura 8.

Na figura 9 estão traçadas as curvas de tensão nos terminais da linha aérea. A curva dupla exponencial está no nó aberto (1,1).

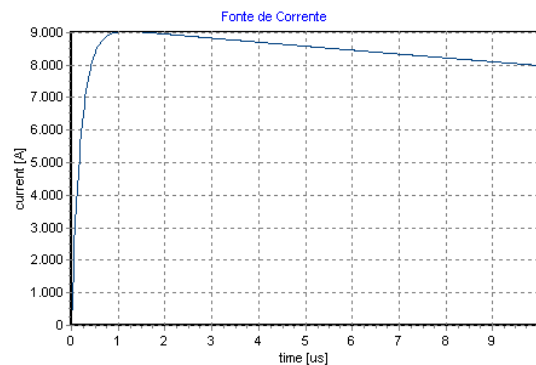


FIGURA 7 – Curva de fonte de corrente no nó (1,1)

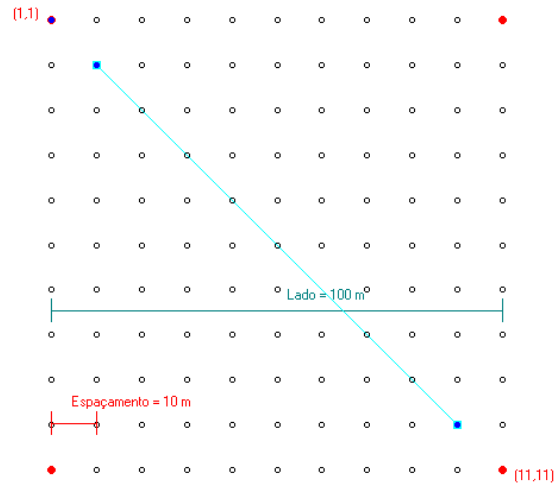


FIGURA 8 – Nós da malha de terra e cabo conectando os nós (2,2) e (10,10)

Na figura 10 são mostradas as curvas de tensão na malha nos vértices (1,1),(2,2) (10,10).

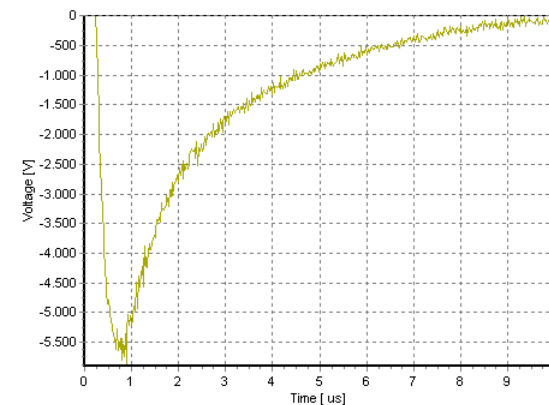


FIGURA 9 – Tensão nos terminais do cabo de conexão dos nós (2,2) e (10,10)

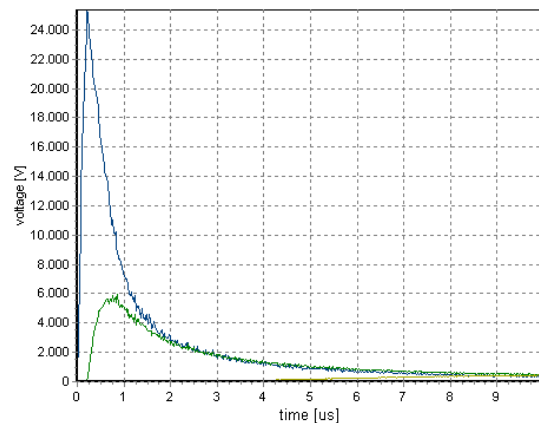


FIGURA 10 – Tensão nos nós (1,1), (2,2) e (10,10) da malha de terra

3.2 Caso 2

Neste caso a linha aérea está conectada em em (10,2) com $1\text{M}\Omega$ e 1Ω em (10,10), com comprimento de 80m. Os demais dados como no caso 1.

As curvas de tensão nos terminais dos equipamentos estão mostrados na figura 11, a curva com oscilações é no terminal (10,10).

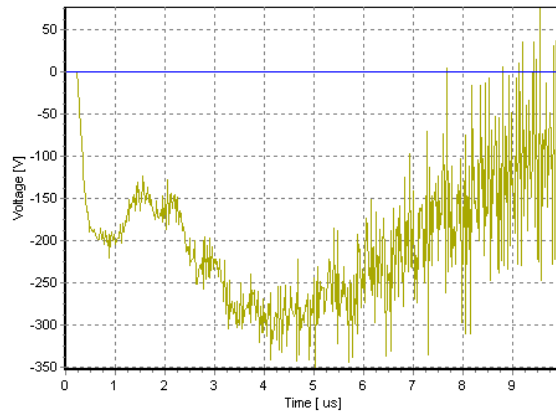


FIGURA 11 – Tensão nos terminais do cabo de conexão dos nós (2,2) e (10,10)

3.3 Caso 3

Como no caso 1 e resistividade do solo $200\Omega/m$.

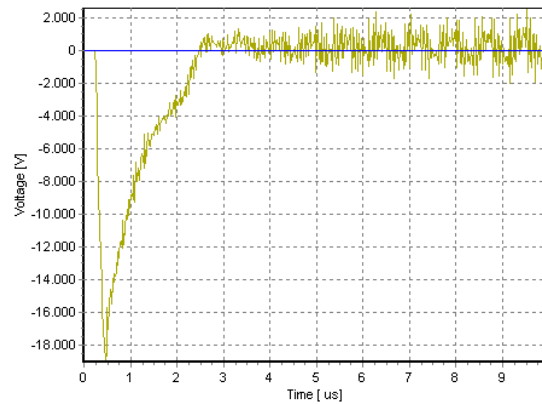


FIGURA 12 – Tensão nos terminais do cabo de conexão dos nós (2,2) e (10,10)

3.4 Caso 4

Como no caso 1 sendo que a permissividade do solo 50. A figura 13 mostra as tensões de modo comum nos terminais dos equipamentos.

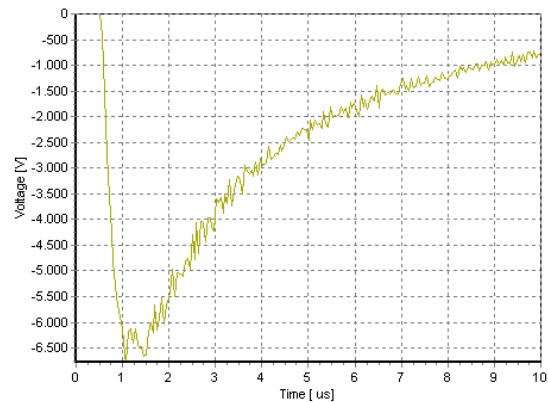


FIGURA 13 – Tensão nos terminais do cabo de conexão dos nós (2,2) e (10,10)

3.5 Caso 5

Como no caso 1 sendo que a impedância dos equipamentos assumem o valor de 50Ω em (2,2) e 50Ω em (10,10).

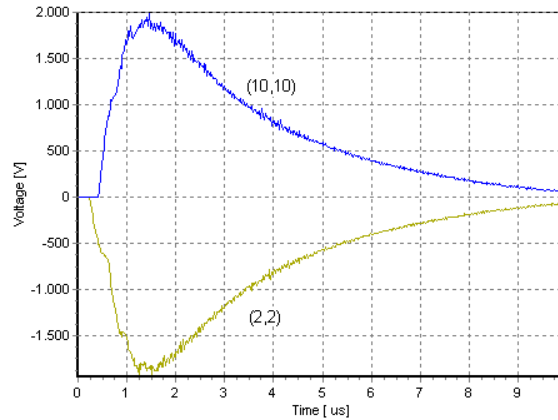


FIGURA 14 – Tensão nos terminais do cabo de conexão dos nós (2,2) e (10,10)

Neste caso em que as terminações são iguais há tensão de modo comum presente em ambas as terminações.

3.6 Caso 6

Como no caso 1, sendo que a linha aérea está conectada nos nós (10,2), aberta, e curto-circuitada em (2,10). A figura 15 mostra as tensões nos terminais dos equipamentos.

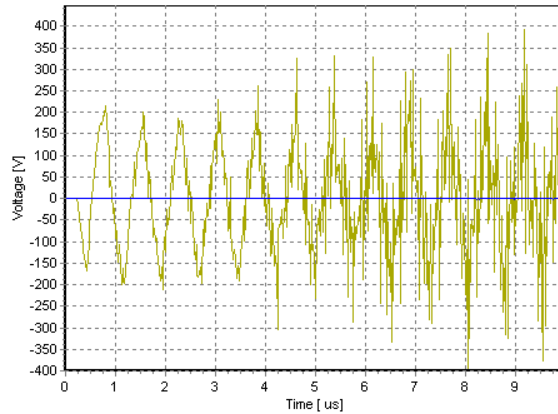


FIGURA 15 – Tensão nos terminais do cabo de conexão dos nós (10,2) e (2,10)

Há uma oscilação de tensão de modo comum em um dos terminais, embora a tensão de pico seja menor que no arranjo do caso 1, é de maior duração.

4.0 - CONCLUSÃO

Fica claro dos resultados obtidos que a disposição do cabo de conexão entre os equipamentos altera a forma e a intensidade das tensões de modo comum. Também, nota-se que a influência da permissividade elétrica é significativa quando há uma variação de 10 para 50 na tensão de modo comum, quando comparamos o caso 1 com o caso 4.

Outra comparação feita é entre o caso 1 e o caso 3 em que a resistividade elétrica do solo é aumentada para $200\Omega.m$. Com o aumento da resistividade a tensão de modo comum de pico ficou aumentada de aproximadamente 3 vezes.

Com os resultados obtidos pode-se concluir que um maior uso de protetores elétricos deve reduzir os problemas, estes protetores podem ser especificados pelos resultados obtidos pelo simulador. Outra solução é a de mudar o arranjo da cablagem e pontos de aterramento.

O modelamento adotado permite uma análise precisa do comportamento transitório de tensões de modo comum entre equipamentos aterrado em uma malha de terra para qualquer tipo de forma de onda. Os parâmetros básicos utilizados satisfazem as recomendações de (12). As tensões de modo comum entre diversos equipamentos aterrados na malha podem ser conhecidas previamente.

Útil no projeto de novas instalações e no condicionamento de instalações já existentes. No futuro este modelo será integrado com um modelo de descarga atmosférico distribuído (8).

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) M.A.F.Mattos; "Common Mode Current Generated by Multiple Transient Sources on Grounding Grids", Zurich EMC Symposium, Zurich, Suíça, Fev. 2005.
- (2) M.A.F.Mattos; "Grounding Grid Transient Simulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Jan. 2005.
- (3) M.A.F.Mattos; "Transitórios em Malhas de Terra", XVII SNPTEE, Uberlândia, MG, 19 a 24 de outubro de 2003.
- (4) M.A.F.Mattos; "Common Mode Voltage Generated by Grounding Grids, a Time Domain Solution", IEEE EMC Int. Symposium, USA, 2002.
- (5) M.A.F.Mattos; AC.Pavão; "Electromagnetic Fields Generated by Transients of Grounding Grids", Cigré Symposium on Power System EMC, Lausanne, Suíça, 1993.
- (6) Andrzej W. Sowa , Jaros aw Wiater; "LEMP Effects on Control Cables in Hight-voltage Substations", Sendai 2004, Japão.
- (7) IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group; "Modeling Guidelines for Fast Front Transients"; IEEE Trans. Power Delivery, VOL. 11, NO. 1, Jan 1996.
- (8) 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.
- (9) C.Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method TLM*, IEEE press, (1995).
- (10) C.Wiggins and S.Nilsson; "Comparison of Interference from Switching, Lightning and Fault Events in High Voltage Substations", CIGRE, 28 August-3 September, 1994.
- (11) CIGRE WG 36-04; "Guide on EMC in Generating Plants and HV Substations", E2-204-94-036b/3604-5.DOC 27 março 1995.
- (12) IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group; "Modeling Guidelines for Fast Front Transients"; IEEE Trans. Power Delivery, VOL. 11, NO. 1, Jan 1996.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- Marcos André da Frota Mattos;
- Rio de Janeiro, 19 de março de 1958;
- Ph.D., University of Nottingham, Inglaterra, 1989;
- Compatibilidade eletromagnética, aterramento, proteção elétrica, transitórios, harmônicas e simulação computacional.

