

(ver o autor o ano do evento)
maio 7/197 817/197 7573

DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA EMISSORA TRIDIMENSIONAL RELACIONADA AO CÁLCULO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

IPEN / CNEN - SP
BIBLIOTECA
Produção Científica

Carlos A. F. Sartori José Roberto Cardoso
Departamento de Engenharia Elétrica PEA
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
05508-900 Cidade Universitária São Paulo - S.P Brasil

Resumo - Apresenta-se uma metodologia de avaliação do campo magnético no espaço e no tempo, associado a fenômenos transitórios, a partir de uma célula elementar tridimensional, formada por linhas de transmissão ortogonais. O desenvolvimento teórico tem como base as teorias de linhas de transmissão e de propagação de ondas na determinação da resposta impulsiva da célula e os métodos da imagem e do dipolo de corrente infinitesimal, variável no tempo, na determinação do campo magnético resultante. Atualmente, os autores estão desenvolvendo atividades relacionadas à implementação do cálculo do campo elétrico.

I. INTRODUÇÃO

A avaliação dos campos eletromagnéticos emitidos por equipamentos e acessórios eletro-eletrônicos é uma das etapas a serem desenvolvidas durante a análise de compatibilidade eletromagnética dos diversos equipamentos e sistemas eletro-eletrônicos.

Além das atividades relacionadas ao regime normal de operação dos equipamentos e seus acessórios, os campos eletromagnéticos decorrentes das descargas eletrostáticas, das descargas atmosféricas, do chaveamento de dispositivos de acionamento, entre outras formas de transitórios, precisam ser avaliados, já que a utilização de equipamentos de elevada susceptibilidade, tais como os eletrônicos, têm assumido um destaque especial na sociedade atual.

Tais requisitos podem estar relacionados às regulamentações existentes ou à otimização dos projetos dos sistemas de proteção e dos arranjos dos dispositivos e equipamentos, que poderá ser alcançada através da comparação entre os níveis de emissão determinados e os níveis de susceptibilidade dos sistemas e equipamentos considerados.

A metodologia descrita neste trabalho tem por objetivo satisfazer as necessidades anteriormente descritas, com ênfase nos aspectos relacionados à avaliação dos campos eletromagnéticos, decorrentes de fenômenos transitórios.

II. DESCRIÇÃO RESUMIDA DO MÉTODO

Corresponde a uma técnica de "discretização" do fenômeno a ser estudado, no espaço e no tempo.

Para atender este propósito foi desenvolvido um elemento tridimensional ou célula emissora, onde o nó central corresponde à junção de linhas de transmissão, formando uma descontinuidade em cada uma destas linhas. A figura 1 apresenta este elemento ou célula.

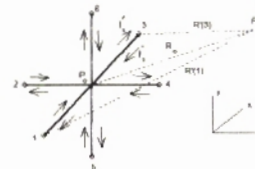


Figura 1: Célula emissora proposta

A resposta desta célula aos impulsos de tensão e a distribuição de corrente são determinadas com base na teoria de linhas de transmissão e de propagação das ondas [1].

A seguir, com base na teoria das imagens e do dipolo infinitesimal de corrente variável no tempo [2], é calculado o campo magnético devido à contribuição de cada uma das correntes refletidas e incidentes da célula.

O campo magnético total em função do tempo, em um ponto qualquer do espaço, pode ser determinado por superposição, dividindo-se o arranjo dos condutores do sistema considerado em unidades elementares, representada pela célula emissora tridimensional proposta [6,7,8].

Este método difere de outros apresentados até o momento na literatura científica, devido às suas características intrínsecas. Neste método não existe a necessidade de se resolver nenhum sistema de equações e, graças a metodologia direta de avaliação da resposta impulsiva, não existem problemas relacionados à convergência, o método é incondicionalmente estável.

Outra característica a ser mencionada é que na determinação do campo magnético são consideradas as correntes incidentes e refletidas e não a corrente resultante da soma destas correntes. Este fato é muito importante, já que o sentido de percurso das correntes está diretamente vinculado ao tempo de validação ou de retardo, relacionado à determinação do campo magnético.

Algumas simplificações são adotadas, sem prejuízos para a filosofia geral adotada até o momento.

Entre estas simplificações, menciona-se a não consideração dos efeitos relacionados ao fenômeno da ionização. Neste caso, para se minimizar as eventuais imprecisões decorrentes deste fato, pode-se adotar um procedimento simplificado, onde as não linearidades são manipuladas separadamente.

Atualmente, esta metodologia vem sendo utilizada pelos autores, em estudos de avaliação de ambientes eletromagnéticos em estruturas atingidas por descargas atmosféricas. No entanto, ressalta-se que poderá ser utilizada em outras aplicações, como na avaliação de campos resultantes de fenômenos transitórios em sistemas de

Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo,
Florianópolis, SC, 1995 p. 283-286
IPEN-DOC 2911

aterramento, dos transitórios resultantes da abertura de dispositivos de chaveamento, das descargas eletrostáticas em placas de circuitos impressos, entre outros fenômenos similares.

Resposta Impulsiva da Célula

A resposta impulsiva da célula aos impulsos de tensão, nos instantes k , $k+1$ and $k+2$, é apresentada na fig.2.

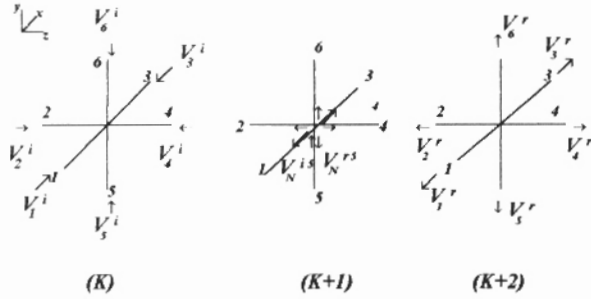


Fig. 2: Resposta impulsiva da célula nos instantes k , $k+1$ and $k+2$

Se, $_{k-2}V_n^i$ são os impulsos das tensões incidentes nos nós séries n (1 a 6) da célula, no instante $t = (k-2)\Delta l/2c$, então os impulsos de tensão refletidos nestes nós, no instante $t = k\Delta l/2c$, serão representados através da equação (1).

$$_{k}[V_n'(z, x, y)] = [\sigma(I, J)]_{k-2}[_{k-2}V_n^i(z, x, y)] \quad (01)$$

Enfatiza-se que, se o nó (z, x, y) é o nó atingido pelo impulso externo, decorrente do fenômeno em análise, na equação anterior deverá ser acrescentado o valor do impulso de tensão imposto no instante $(k-1)$.

O parâmetro Δl é o comprimento entre dois nós séries da célula, $\Delta l/2c$ é o tempo de propagação do impulso em cada segmento de linha de transmissão da célula, adotado como intervalo de amostragem no processo de cálculo, e $[\sigma(I, J)]$ é a matriz dos coeficientes de transmissão, onde os coeficientes σ_h e σ_v , utilizados na expressão a seguir (2), são correspondentes às linhas 1-4 e 5-6, respectivamente.

$$[\sigma(I, J)] = \begin{bmatrix} (\sigma_h - 1) & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & (\sigma_h - 1) & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & (\sigma_h - 1) & \sigma_h & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & (\sigma_h - 1) & \sigma_v & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & (\sigma_v - 1) & \sigma_v \\ \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_h & \sigma_v & (\sigma_v - 1) \end{bmatrix} \quad (02)$$

A equação (3) mostra-nos como os impulsos refletidos das células vizinhas transformam-se em impulsos incidentes na célula (z, x, y) :

$$\begin{bmatrix} _k V_1^i(z, x, y) \\ _k V_2^i(z, x, y) \\ _k V_3^i(z, x, y) \\ _k V_4^i(z, x, y) \\ _k V_5^i(z, x, y) \\ _k V_6^i(z, x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} _k V_1^r(z, x + \Delta l, y) \\ _k V_2^r(z + \Delta l, x, y) \\ _k V_3^r(z, x - \Delta l, y) \\ _k V_4^r(z - \Delta l, x, y) \\ _k V_5^r(z, x, y + \Delta l) \\ _k V_6^r(z, x, y - \Delta l) \end{bmatrix} \quad (03)$$

Condições de Contorno

De um modo geral, as condições de contorno são representadas pela equação (3). Outras condições poderão ser introduzidas dependendo da maneira como as células se conectam nas regiões de fronteira.

Distribuição das Correntes

As correntes incidentes e refletidas ao longo das linhas "n", no instante "k", são expressas respectivamente pelas equações (4) e (5), onde Z_n é a impedância característica da linha "n" e o valor de SR^D depende da posição e da direção da propagação de onda:

$$_{k}[I_n'(z, x, y)] = \left[\frac{1}{Z_n} \right] SR^D [_k V_n'(z, x, y)] \quad (04)$$

$$_{k}[I_n^i(z, x, y)] = \left[\frac{1}{Z_n} \right] [C(I, J)] SR^D_{k-1} [_{k-1} V_n^i(z, x, y, \Delta l)] \quad (05)$$

A tabela I apresenta os valores de SR^D em função dos sinais das coordenadas (z, x, y) das células. Os valores (0) ou (1) são atribuídos às coordenadas positivas ou negativas das células, respectivamente.

TABELA I
VALORES DE SR^D EM FUNÇÃO DAS COORDENADAS DAS CÉLULAS

Z	X	Y	I/n	1	2	3	4	5	6
0	0	0	3	-3	-3	3	3	-3	3
0	0	1	2	-1	-1	1	1	1	-1
0	1	0	3	1	-1	-1	1	-1	1
0	1	1	4	1	-1	-1	1	1	-1
1	0	0	5	-1	1	1	-1	-1	1
1	0	1	6	-1	1	1	-1	1	-1
1	1	0	7	1	1	-1	-1	-1	1
1	1	1	8	1	1	-1	-1	1	-1

Se o ponto (z, x, y) corresponde ao nó atingido pelo impulso, imposto externamente pelo fenômeno considerado, SR^D assumirá o valor 1. Isto é, a direção da propagação de onda será considerada sempre coincidente com as dos impulsos refletidos nas linhas da célula considerada.

Determinação do Campo Magnético

O Campo Magnético $\vec{B}$, resultante de um dipolo elementar de corrente, localizado ao longo do eixo y , em y'

e em um comprimento dy' , pode ser obtido através da seguinte expressão [2] :

$$dB_{\phi}(r, \phi, y, t) = \frac{\mu_0 dy'}{4\pi} \left(\frac{r}{R^3} i(y', t - \frac{R}{c}) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(y', t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (06)$$

Os fatores geométricos utilizados na eq. (6) estão definidos na fig. 3, μ_0 é a permeabilidade do vácuo e $i(y', t - R/c)$ é a corrente em função do tempo, considerada uniformemente distribuída, que se propaga com velocidade constante v na direção y . A coordenada y' indica a posição da fonte de corrente.

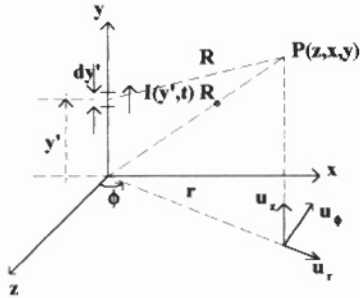


Fig. 3: Definição dos fatores geométricos utilizados na determinação do campo magnético.

Se a equação anterior for particularizada para uma função degrau de corrente, definida por :

$$i(y', t) = I_0 u(t - \frac{y'}{v}), \text{ onde } u(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi < 0 \\ 1, & \xi \geq 0 \end{cases} \quad (07)$$

(a função de Heaviside $u(\xi)$ assegura que a corrente será zero para $y' > vt$), a primeira parcela da eq.(6) será representada pela seguinte expressão :

$$\frac{\mu_0 I_0 r}{4\pi R^3} dy', t) \frac{R}{c} + \frac{y'}{v} \quad (08)$$

O segundo termo da eq.(6) resultará em um valor diferente de zero, apenas devido à descontinuidade da corrente, e assumirá o seguinte valor :

$$\frac{\mu_0 I_0 r}{4\pi c[(y-y')^2 + r^2]} \left[\frac{1}{v} - \frac{(y-y')}{c\sqrt{(y-y')^2 + r^2}} \right] dy', t) \frac{R}{c} + \frac{y'}{v} \quad (09)$$

Desta forma, o campo magnético devido a uma função degrau de corrente, uniformemente distribuída, que se propaga ao longo do eixo y com velocidade v , pode ser obtida integrando-se a função resultante da soma das equações (8) e (9). O tempo $(R/c + y'/v)$ é denominado tempo de retardo ou de validação.

O campo magnético, resultante das correntes refletidas e incidentes, que se propagam ao longo das linhas 5 e 6 da célula emissora, é obtido utilizando-se o método das imagens após integrar convenientemente a função resultante anteriormente mencionada.

O mesmo raciocínio é utilizado para se obter o campo magnético resultante das correntes ao longo das linhas 1,3 e

2,4 da célula emissora. O campo magnético total, em um instante t , em um ponto P qualquer do espaço, é obtido por superposição. A fim de facilitar esta abordagem, os autores utilizaram o sistema de coordenadas cartesianas na obtenção da soma dos campos devido a todos os dipolos elementares da célula [6].

III. RESULTADOS

Com o propósito de ilustrar a método proposto, apresenta-se a seguir um exemplo, onde o campo magnético no interior de uma estrutura atingida por descarga atmosférica é avaliado :

Neste exemplo, utiliza-se uma célula, cujas distâncias entre os nós série são de 6m. As impedâncias horizontais e verticais dos condutores, determinadas através de fórmulas tradicionalmente apresentadas na literatura [9,10], assumem os valores de $323,97\Omega$ e $424,92\Omega$, respectivamente.

O sistema de aterramento é simulado conectando-se uma resistência, denominada resistência de aterramento, em cada descida do sistema de proteção contra descargas atmosféricas. O valor adotado neste exemplo para a resistência de aterramento é de 5Ω .

A descarga atmosférica é representada pela função :

$$I = 5 t \text{ (kA) para } t \leq 2 \mu s \\ \text{e } I = 10 [0.5 t - 0.51(t - 2)] \text{ (kA), para } t > 2 \mu s \quad (10)$$

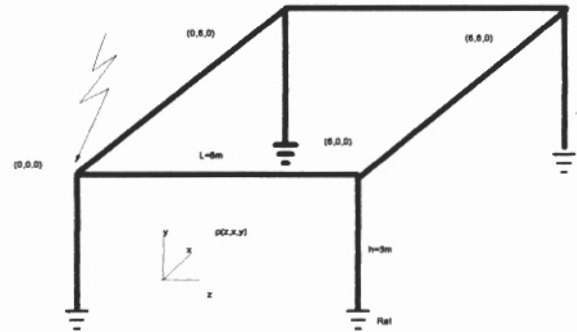


Fig. 4 : Esboço da estrutura considerada atingida por uma descarga atmosférica no ponto (0,0,0) .

A densidade de fluxo magnético, em função do tempo no ponto (0,3,-1.25) m, devido à distribuição das correntes na estrutura, é representada na Fig. 5.

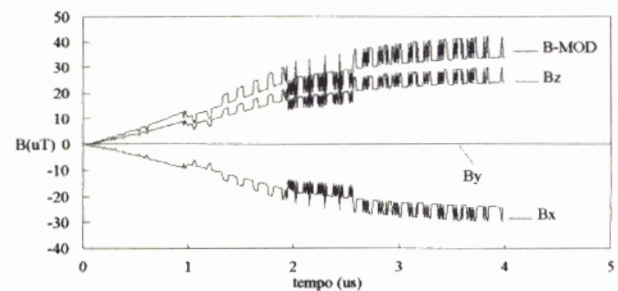


Fig. 5: Densidade de fluxo magnético B (μT) e suas componentes em função do tempo (μs) no ponto (0,3,-1.5)m.

O perfil do campo magnético ao longo da diagonal dos eixos z e x , para a configuração apresentada na Fig. 4, no instante $t = 2\mu s$ e para uma coordenada $y = -1.5m$ é representado pela figura a seguir :

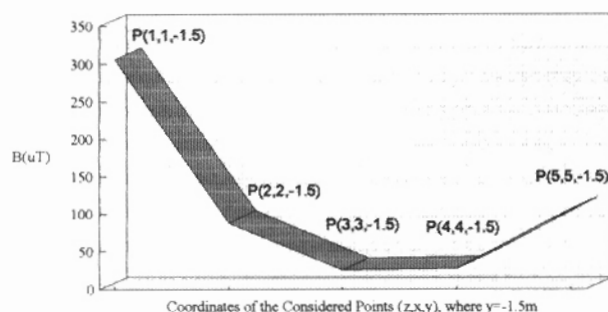


Fig. 6: Densidade de fluxo magnético $B (\mu T)$ ao longo da diagonal dos eixos z e x , $t = 2\mu s$.

IV. CONCLUSÃO

Apresentou-se um modelo de simulação, onde são utilizadas as teorias de linhas de transmissão e de propagação de ondas para o cálculo da distribuição das correntes nos meios condutores e a teoria do dipolo de corrente infinitesimal, variável no tempo, e o método das imagens na determinação do campo magnético na região considerada.

V. REFERÊNCIAS

- [01] Johns, P. B.; Beurle, R. L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission line matrix. *Proc. IEE*, v.118, n.9, p.1203-8, Sept. 1971.
- [02] Rubinstein M.; Uman, M. A. Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole, revised. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v.33, n.4, p.312-20, Nov. 1991.
- [03] Kuramoto, S.; Sato, M.; Ohta, M. Surge current and voltage distribution in a reinforced concrete building caused by direct lightning stroke. In: 1991 International Symposium on EMC, Cherry Hill - N.J, 1991. *Proceedings*. p.84-89.
- [04] Geri, A.; Veca, A. A complete lightning protection system simulation in the EMI analysis. In: 1991 International Symposium on EMC, Cherry Hill - N.J, 1991. *Proceedings*. p.90-95.
- [05] Sowa, A. Surge current distribution in building during a direct lightning stroke. In: 1991 International Symposium on EMC, Cherry Hill - N.J, 1991. *Proceedings*. p.103-105.

Com o intuito de ilustrar a metodologia proposta, foram apresentados alguns resultados numéricos, obtidos a partir de um exemplo de aplicação.

Mostrou-se que a metodologia apresentada é simples mas apropriada às aplicações relacionadas a estudos de compatibilidade eletromagnética.

Algumas das vantagens deste método podem ser ressaltadas :

- . É um método direto e rápido, quando se considera os aspectos computacionais;
- . Utilizando-se apropriadamente a célula desenvolvida, é possível se representar vários tipos de configurações de condutores e
- . O método assume particular importância quando utilizado como auxílio nas tomadas de decisões. Este fato pode ser exemplificado mencionando-se os estudos de compatibilidade eletromagnética, onde vários parâmetros estão normalmente envolvidos.

Os autores estão desenvolvendo atualmente diversas atividades com o objetivo de implementar o cálculo do campo elétrico e diminuir algumas das simplificações atualmente adotadas no modelo apresentado.

- [06] Sartori, Carlos A. F. Avaliação do ambiente eletromagnético em estruturas atingidas por descargas atmosféricas. Qualificação Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Out. 1993.
- [07] Sartori, Carlos A. F.; Cardoso, J. R. Evaluation of electromagnetic environment around a structure during a lightning stroke. In: 1994 International Symposium on EMC, Roma - Italy, Sept. 1994. *Proceedings*. p.746-749.
- [08] Sartori, Carlos A. F.; Cardoso, J. R. A Method for Calculating the Current Distribution and Magnetic Field Around a Lightning Struck Structure. In: 1994 International Symposium on EMC, São Paulo - Brazil, Dec. 1994.
- [09] Lat, M. V. et al. Application guide for surge arrester on distribution systems. Report for The Canadian Electrical Association. Toronto, Ontario Hydro. Sept. 1988.
- [10] Anderson, J. G. Lightning performance of EHV-UHV lines. In : Electric Power Research Institute. Transmission line reference book 345 kV and above. 2nd ed. Palo Alto, EPRI, 1982. chap. 12, pp. 545-597.