

Proteção Catódica de Fundação em Grelha de Torres de Transmissão de Alta Tensão pelo Método dos Elementos de Contorno

Eduardo Dobashi Furuzato

Luiz Alkimin de Lacerda

Centro de Estudos de Engenharia Civil - Cesec
Universidade Federal do Paraná - UFPR / PPGMNE
Curitiba, Brasil
Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento - Lactec
Curitiba, Brasil

Resumo—Uma forma eficiente de proteger superfícies enterradas contra corrosão é a proteção catódica. Este trabalho apresenta uma modelagem numérica de proteção catódica de uma fundação em grelha de torres de transmissão de alta tensão através do Método dos Elementos de Contorno. A curva de polarização que define a relação eletroquímica entre a superfície a ser protegida e o solo define uma condição de contorno não-linear. O anodo de proteção é modelado como uma fonte pontual de corrente.

Palavras-chave—Método dos Elementos de Contorno, proteção catódica, problema do potencial, corrosão, condição de contorno não-linear, fonte pontual

I. INTRODUÇÃO

A corrosão é um fenômeno eletroquímico. O metal, em um meio eletrolítico, apresenta reações de oxidação (anódicas) e de redução (catódicas). A região anódica libera elétrons e sofre perda de material em forma de íons (ex: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$). Os elétrons liberados são consumidos em reações de redução com outros íons, cujos subprodutos se acumulam na região catódica. Em meios ácidos, a reação mais comum é a redução de íons de hidrogênio para hidrogênio gasoso ($2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2$). Em meios neutros ou alcalinos, a reação mais comum é a redução de oxigênio dissolvido ($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}$). [1]

A fundação das torres de transmissão de alta tensão do tipo grelha ficam diretamente em contato com o solo (meio eletrolítico) e por isso estão especialmente sujeitas a corrosão. Existem basicamente duas técnicas de proteção contra corrosão: o revestimento, como por exemplo a pintura e a galvanização, e a proteção catódica. A proteção catódica, por sua vez, pode ser realizada de duas maneiras: utilização de anodos de sacrifício (por exemplo zinco, alumínio ou magnésio, materiais mais anódicos que o aço na escala galvânica) ou corrente impressa através de eletrodos enterrados e conectados a rede energética.

A superfície metálica estará protegida se o anodo induzir um potencial eletroquímico menor ou igual a -880mV nessa superfície [1]. A relação entre potencial e corrente na super-

fície metálica é definida por uma função não-linear chamada de curva de polarização, que é obtida experimentalmente [4].

Por outro lado, a corrosão é um fenômeno que ocorre na interface entre o corpo metálico e o meio eletrolítico, como o solo. Deste modo, o Método dos Elementos de Contorno (MEC), por requerer a discretização apenas do contorno do problema e por sua capacidade de trabalhar com o semi-espaço sem necessitar de discretização da superfície de contorno [2], é bastante adequado na modelagem dos fenômenos de corrosão de corpos enterrados sob o solo e de proteção catódica [3]–[6].

Neste trabalho, utiliza-se o Método dos Elementos de Contorno com condições de contorno não-lineares para o cálculo da proteção catódica de fundação em grelha enterrada de torres de transmissão de alta tensão através de corrente impressa por eletrodos enterrados.

II. MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO

O fenômeno eletroquímico da corrosão é governado pela equação de Poisson [6]

$$\nabla^2\Phi = b(x), \quad x \in \Omega \quad (1)$$

com condição de contorno

$$I = I(\Phi), \quad x \in \Gamma \quad (2)$$

onde I é o fluxo de corrente em relação à normal do contorno Γ , $b(x)$ são fontes pontuais de corrente, Φ é o potencial eletroquímico e Ω é o domínio do problema.

Aplicando as identidades de Green, transforma-se a Eq.1 em uma equação integral equivalente [2]

$$c(\xi)\Phi(\xi) + \int_{\Gamma} \Phi I^* d\Gamma - \int_{\Omega} b\Phi^* d\Omega = \int_{\Gamma} I\Phi^* d\Gamma \quad (3)$$

onde Φ^* é a solução fundamental do problema do potencial e I^* é a derivada de Φ^* com relação à normal de Γ .

Após a discretização do contorno com N nós funcionais, a Eq. 3 torna-se, em forma matricial

$$[H]_{N \times N} [\Phi]_N - [B]_N = [G]_{N \times N} [I]_N \quad (4)$$

onde cada nó apresenta uma relação não-linear definida pela curva de polarização dada pela expressão [5]:

$$I = e^{(\Phi+693,91)/a_1} - \left[\frac{1}{\beta_1} + e^{(\Phi+521,6)/a_2} \right]^{-1} - e^{-(\Phi+707,57)/\beta_2} \quad (5)$$

A unidade do fluxo I é $\mu A/cm^2$ e a unidade do potencial Φ é mV . As constantes possuem os valores $a_1 = 24$, $\beta_1 = 86.06$, $a_2 = 23.47$ e $\beta_2 = 55$.

III. CONDIÇÕES DE CONTORNO NÃO-LINEARES

O algoritmo de Newton-Raphson pode ser empregado para a solução de problemas não-lineares [4]. Seja $R(x) = H\Phi - GI + B$ a função resíduo, onde x é o conjunto de potenciais e fluxos incógnitos. Expandindo-se a função resíduo por meio da série de Taylor e desprezando-se os termos de segunda ordem em diante, tem-se

$$R(x) = R(x_i) + \left[\frac{\partial R}{\partial x} \right]_i (x - x_i) \quad (6)$$

onde x_i é a solução do problema na i -ésima iteração.

Sendo x a solução exata e $J = \frac{\partial R}{\partial x}$ a matriz tangente ou jacobiano, tem-se

$$J_{i-1} \Delta x_i = -R(x_{i-1}) \quad (7)$$

Os coeficientes da matriz tangente são calculados com

$$J_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (H_{ij} \Phi_j - G_{ij} I_j) \quad (8)$$

para solução do sistema de equações.

O processo iterativo termina quando a precisão desejada é alcançada e o vetor x é a solução do problema.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Como resultado numérico apresenta-se um modelo de proteção catódica de uma fundação em grelha de torre de transmissão com uma fonte pontual (Fig.1). A condutividade do solo é de $k = 4,59 \times 10^{-2} \Omega^{-1} cm^{-1}$. A fundação possui 2,55m de altura e a grelha possui 1,20m x 1,20m. A fonte pontual está a 1m da fundação, possui coordenadas (-1,5m;-1,5m;0m) em relação ao centro da interface da grelha com a superfície livre e possui magnitude de $-4,862mA$.

Nota-se na Fig. 1 que os pontos da fundação próximos à fonte pontual estão super protegidos, com potencial bastante inferior a $-880mV$. Há uma área bem protegida, com potencial próximo a $-880mV$, e os pontos distantes da fonte pontual estão desprotegidos contra corrosão, com potencial superior a $-880mV$.

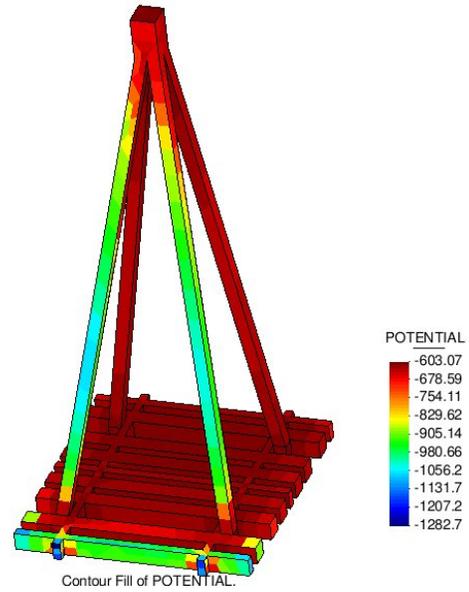


Figura 1. Potencial de fundação de torre de transmissão em grelha enterrada com uma fonte pontual

V. CONCLUSÕES

A modelagem de proteção catódica de uma fundação em grelha de torre de transmissão de alta tensão através do MEC com uma fonte pontual e condição de contorno não-linear foi realizada com sucesso.

Note-se, porém, que a superfície não está totalmente protegida no modelo estudado.

Uma continuação do trabalho poderia incluir um algoritmo de otimização, como por exemplo um algoritmo genético, para experimentar diversas localidades e amplitudes de corrente, de forma a otimizar a proteção da fundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Eletronorte (ELN 4500076536/2011) pela bolsa de estudos disponibilizada.

REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Morgan, Cathodic protection in corrosion control. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 118(6):251–258, 1981.
- [2] C. Brebbia, J. Telles e L. Wrobel, *Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984.
- [3] J.A.F. Santiago, J.C.F. Telles, On boundary elements for simulation of cathodic protection systems with dynamic polarization curves, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40:2611–2627, 1997.
- [4] P. Miltiadou, *Inverse Analysis Formulations for Cathodic Protection Systems*, Department of Mechanical Engineering, Brunel University, England, 2002.
- [5] L.C. Wrobel and P. Miltiadou, Genetic Algorithms for inverse cathodic protection problems, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 28:267–277, 2004.
- [6] L. A. de Lacerda, J.M. da Silva, J. Lázaris, Dual boundary element formulation for half-space cathodic protection analysis, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31:559–567, 2007.