

## 비균등 최적 전하배치를 이용한 전력소 3차원 전기해석

○ 명성호\*, 이병윤\*, 민석원\*\*, 김웅식\*\*\*, 박종근\*  
\* 서울대학교 \*\* Soonchunhyang University \*\*\* 호서대학교

### Three Dimensional Electric Field Analysis Of Substation Using Nonuniform Optimal Charge Simulation

○ Sung Ho Myung\*, Byeong Yoon Lee\*, Suk Won Min\*\*, Eung Sik Kim\*\*\*, Jong Keun Park\*  
\* Seoul National University \*\* Soonchunhyang University \*\*\* Hoseo University

#### Abstract

This paper presents a methodology for the electric field analysis of substation. For the electric field analysis of substation, the electrodes(substation busbars) must be represented by finite line with nonlinear charge density. In the case of dividing finite line into uniform segments, a large number of variables have to be used to obtain the accuracy within a desired tolerance. To deal with the problem, nonuniform charge arrangement modeling method is suggested. To reduce potential calculation errors, the linear charge density function is considered particularly for the segment charge modelling. If the charge arrangement is improper, the accuracy is not improved regardless of increment in the number of segments. This paper proposes an optimal charge arrangement method through potential error analysis. And, the optimal charge arrangement function is formulated by a lot of simulation results.

#### I. 서론

최근, 전력계통에서 발생하는 전계에 의한 영향이 전기적, 생물학적 측면에서 연구되어 그 결과가 여러 문헌에 보고되고 있다. 해외 각국에서는 이미 환경에 영향을 미치는 많은 요소들에 규제를 가하기 시작하였으며, 전계에 의한 영향도 예외가 아니라고 볼 때 전계에 의한 영향평가가 필수적이라 하겠다. 여러가지 설비중에서 전기환경에 관련된 주요한 설비는 송전선로나 전력소인데 이중 송전선로에 대해서는 1970년대부터 선로를 무한장으로 가정한 영상 전하법이나 전하중첩법에 의한 2차원 해석 연구는 많이 이루어졌으나 전력소의 경우는 선로배치가 서로 직교하는 topology에 기인한 복잡한 환경에서의 3 차원 전기계 계산의 어려움 때문에 대부분 이론적 계산보다는 실측에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이론적 측면에서 고찰하여 전력소의 3차원 전기계 계산 방법을 제안하고자 한다. 전력소의 전기계 계산을 위해서는 전극(전력소 부스바)이 비선형 전하밀도분포를 갖는 유한장 선로로 표현되어야 하는데 이러한 비선형 전하밀도분포 함수는 구간을 잘게 나누어 상수함수나 일차 함수로 근사시킬 수 있다. 상수함수나 일차함수를 도입하는 이유는 3차원 전위 및 전기해석식이 비교적 쉽게 도출되기 때문이다. 본 연구에서는 이에 관한 3 차원 전위 및 전기해석식을 유도하고자 한다.

유한장 선로를 상수함수 혹은 일차함수 전하밀도 분포를 갖는 여러개의 segment로 모델링하는 경우 균등분할(Uniform) 방식과 비균등분할(Nomuniform) 방식의 두가지가 있다. 균등분할 방식의 경우에는 어느쪽의 분포를 갖는 segment를 이용해도 바람직한 오차 이내의 정확도를 얻기위해서는 많은 변수 필요하게 되어 메모리에 의한 제약을 받게 된다. 그러므로 본 연구에서는 비균등 분할방식을 채택한 Nonuniform 전하배치 Modeling 기법을 제안하여 이러한 문제를 해결하고자 한다.

그리고 전하밀도 분포를 상수가 아닌 일차함수로 표현되는 직선전하를 사용하는 것이 적은 변수로도 오차를 최소화시킬 수 있음이 simulation을 통하여 입증되었으므로 전력소의 전기계 계산에 일차 전하밀도 분포함수를 사용하고자 한다.

Nonuniform 전하배치 Modeling 기법에서는 전하배치가 적절하지 않으면, 계산의 정도가 모의 전하의 갯수가 증가하여도 개선되지 않기때문에 전하배치가 대단히 중요하다. 따라서 본 논문은 전위 오차 분석을 통해 최적 전하배치 방법을 제안하고 Simulation 데이터를 통해 최적 전하 배치를 도출하고자 한다. 이러한 최적 전하 배치는 계산의 속도와 정도의 향상에 크게 기여할 것이다. 응용연구로 본 논문에서 제안된 방법에 의해 전력소 모델에서 3차원 전기계산을 하고자 한다.

#### II. 상수함수 및 일차함수 전하에 의한 전위, 전기계 해석

다음 그림 1 과 같은 좌표 공간에 X 축에 평행한 유한장 선로가 놓여 있을 때 선로의 전하밀도 분포를 일차함수로 모의하면

$$\sigma = Ax + B \quad \dots\dots (1)$$

이며 임의의 지점 P에서의 전위는

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma dx}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma dx}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}}$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{(AX+B)dx}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}} \quad \dots\dots (2)$$

그림 1 공간 좌표축 이다.

x1에서의 전하값을  $\sigma_1$ , x2에서의 전하값을  $\sigma_2$ , 라고 하면 일차함수 식(1)은 다음과 같이 표현 된다.

$$\sigma(x) = \frac{X_2 - x}{X_2 - X_1} \sigma_1 + \frac{x - X_1}{X_2 - X_1} \sigma_2 \quad \dots\dots (3)$$

(3)식을 (2)식에 대입하여 적분식을 해석적으로 풀면 임의의 지점 p에서의 전위  $\phi$  는 다음 (4)식과같이 된다.

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma_1}{X_2 - X_1} \left\{ - \left[ \sqrt{b^2 + (X_2 - x)^2} - \sqrt{b^2 + (X_1 - x)^2} \right] \right.$$

$$\left. + (X_2 - x) \log \frac{\sqrt{b^2 + (X_2 - x)^2} + X_2 - x}{\sqrt{b^2 + (X_1 - x)^2} + X_1 - x} \right\} \quad \dots\dots (4)$$

$$+ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma_2}{X_2 - X_1} \left\{ - \left[ \sqrt{b^2 + (X_2 - x)^2} - \sqrt{b^2 + (X_1 - x)^2} \right] - (X_1 - x) \log \frac{\sqrt{b^2 + (X_2 - x)^2} + X_2 - x}{\sqrt{b^2 + (X_1 - x)^2} + X_1 - x} \right\}$$

그리고 임의의 지점 p에서의 전계는 다음 (5)식으로부터 유도되며 이 적분식을 해석적으로 풀면 전계 E는 다음 (6)식과같이 된다.

$$E_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(AX+B)(x-X)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}} dX \quad \dots\dots (5)$$

$$E_y = -\frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(AX+B)(y-Y)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}} dX$$

$$E_z = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(AX+B)(z-Z)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}} dX$$

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{X_2 - X_1} \left\{ \sigma_1 \left[ -\frac{X_2 - X_1}{D_1} + \ln \frac{D_2 + X_2 - x}{D_1 + X_1 - x} \right] + \sigma_2 \left[ \frac{X_2 - X_1}{D_2} - \ln \frac{D_2 + X_2 - x}{D_1 + X_1 - x} \right] \right\} \quad \dots\dots (6)$$

$$\text{단, } b^2 = (f-y)^2 + (d-z)^2,$$

$$D_1 = \sqrt{b^2 + (X_1 - x)}$$

$$D_2 = \sqrt{b^2 + (X_2 - x)}$$

y축 및 z축에 평행한 유한장 선로의 전위 및 전계 해석식은 위와 같은 방법으로 유도할 수 있으며 상수 전하에 의한 전위 및 전계 해석식은 앞에서 설명한 일차 함수 전위 및 전계식에서  $\sigma_1 = \sigma_2$ 인 경우이므로 식(4), 식(5), 식(6)을 이용하여 구할 수 있다.

### III. 전하 배치에 의한 전위 에러 분석

#### 1. Uniform 전하배치

전력소의 전계 계산을 위해서는 전극(전력소 부스바)이 비선형 전하밀도분포를 갖는 유한장 선로로 표현되는데 이러한 비선형 함수는 구간으로 분할하여 그 구간을 상수나 일차 함수로 표현하여 근사시킨다. 여기에서는 상수 전하밀도 분포와 일차 함수 전하밀도 분포를 갖는 segment를 사용하여 먼저 Uniform하게 선로를 분할하는 경우를 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 선로 길이=20.0m, 선로 반경=0.1m인 전력소 부스바의 경우를 대상으로하여 구간을 5개부터 80개까지로 나누어 도체 표면에서의 전위오차를 분석하였으며 그 결과를 다음 그림 2에 나타내었다.

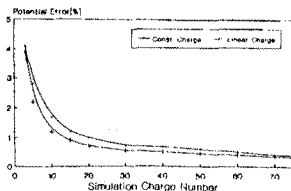


그림 2. Uniform 전하배치에 의한 전위 오차

#### 2. Nonuniform 전하배치

다음으로는 상수 전하밀도 분포와 일차 함수 전하밀도 분포를 사용하여 Nonuniform하게 선로를 분할하는 경우를 살펴보고자 한다. 여기에서도 앞에서 사용한 모델에서 segment를 4개부터 14개까지로 나누어 전위오차 분석을 하였으며 그림 3에는 전위오차 분석 결과를 나타내었다.

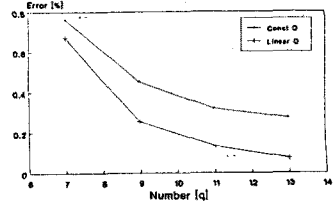


그림 3. Nonuniform 전하배치에 의한 전위 오차

### IV. 오차 분석을 통한 최적 전하배치

제 11장에서 제안한 Nonuniform 전하배치 Modeling 기법에서는 전하배치가 적절하지 않으면, 계산의 정도가 모의 전하의 개수가 증가하여도 개선되지 않기 때문에 전하배치가 대단히 중요하다. 따라서 본 논문은 전위 오차 분석을 통해 최적 전하배치 방법을 제안하고 Simulation을 통해 최적 전하배치식을 도출하고자 한다.

앞의 제 11장에서 대상으로한 길이 20m, 반경 0.1m, 인 유한장 선로가 높이 10m인 공간에 x축으로 수평하게 놓여 있을 때 선로를 8개의 segment로 Nonuniform 분할하면 일차 함수 전하를 사용할 경우 9개의 모의전하가 필요하다. 양 단면을 대칭으로 가정하면 다음 그림 4와 같은 분할을 생각할 수 있다.



그림 4. 유한장 선로의 Nonuniform 분할

여기서 x1, x5, x9은 기본 고정점이며 x2와 x8, x3과 x7, x4와 x6는 서로 대칭이므로 실제로 최적 배치를 위해 구하여야 하는 변수는 3개가 된다. 즉, 모의하고자 하는 전하의 개수가 N개 이면 구하여야 하는 변수는 (N-3)/2 개가 된다.

모의 전하를 이용한 전계 계산에서는 최적화를 위한 목적함수를 해석적으로 구할 수가 없기 때문에, 오차를 최소화 하는 배치점은 전위 분석을 통해서만이 가능하므로 본 연구에서는 brutal force 방법을 이용하여 변수를 결정하였다. 다음 그림 5에는 6개로 Nonuniform 분할하여 모의 실험한 배치점과 오차 관계를 나타내었다.

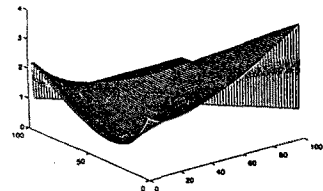


그림 5. Nonuniform 분할하는 경우 배치점과 오차와의 관계

위 그림에서 보듯이 오차를 최소화하는 배치점이 한점으로 수렴하고 있는데 이것으로부터 유한장 선로의 모델링에 있어 최적 전하배치가 가능하다는 것을 알 수 있다.

### V. 최적 전하배치에 관한 formulation

계 IV 장에서는 하나의 주어진 모델에서 전하의 갯수가 정해졌을때, 최적 전하 배치점을 구했는데 실제 문제에서는 유한장 선로의 구조가 선로의 길이(L), 선로의 반경(R), 선로의 높이(H) 등에 따라 달라지게 되므로 최적 배치점을 찾는 일반화된 formulation이 필요하게 된다. 이에 본 연구에서는 L, R, H 에 따라 최적 배치점이 어떻게 이동하는가를 분석하였다. Simulation 결과 L, R, H 의 절대적인 값이 아니라 이들의 비율이 최적 배치점과 일정한 상관 관계가 있음을 알 수 있었다.

선로의 길이 = L, 선로의 반경 = R, 선로의 높이 = H, 라 하고 입력 변수를  $x = L/H, y = R/L$  로 하였을 때, 선로의 길이 보정 계수(C)=(일의의 선로 길이)/(Parameter결정 기준 선로 길이)이 되며, 최적 전하 배치점은  $f(z)=f(x,y)$  이며  $f(z)$ 는 다음과 같은 식으로 표현 된다.

i)  $x < 1$  이면  
 $f(z) = (a1*y+a2)*C$  .....(7)

ii)  $x > 1$  이면  
 $f(z) = (b1*y+b2*x+b3)*C$  .....(8)

이것을 찾아야 하는 최적 배치점이 n 개일 경우로 보다 일반화 시키면, 식(7)와 식(8)을 다음 식(9)와 같은 행렬식으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

여기서, .....(9)

$x = \frac{L}{H}, y = \frac{R}{L}$   
 R : 도선의 반경  
 L : 도선의 길이  
 Z : 도선의 높이

### VI. 전력소 부스바 전계 계산 적용에

그림 6 및 7은 전력소 부스바(400KV Bruegal Substation)에 대하여 본 연구에서 제안한 방법을 적용하여 Ground level 에서 3 차원 전계값을 계산 하였으며 그 결과를 그림 8에 나타 내었다.

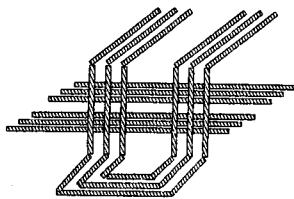


그림 6. 전력소 부스바 Layout(400KV Bruegal Substation)

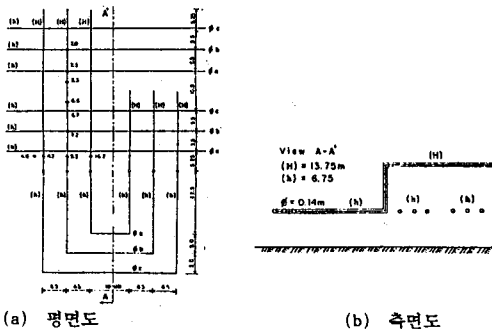


그림 7. 전력소 부스바 평면도 및 측면도

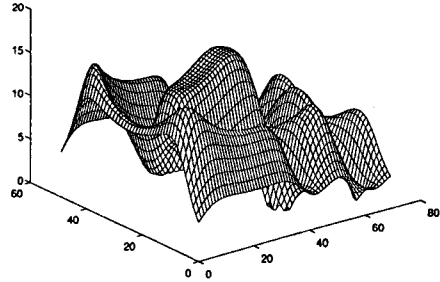


그림 8. Ground Level에서의 3 차원 전계값

### VII. 결론

전력소 부스바하의 3차원 전계 계산에 대한 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유한장 선로의 3차원 전계 계산을 위한 segment 분할에 있어, 30개의 Uniform 분할과 6개의 Nonuniform 분할의 오차가 같아 Nonuniform 전하배치 모델링 방법이 훨씬 효과적이었다.
- (2) segment의 전하밀도 분포를 상수가 아닌 일차함수를 사용하여 8개 이상의 Nonuniform 방법으로 분할하는 경우, 2배 이상으로 오차를 최소화 시킬 수 있음이 simulation을 통하여 입증되어, 본 연구에서는 segment의 전하밀도 분포에 일차 전하밀도 분포함수를 사용하였다.
- (3) Nonuniform 전하배치 Modeling 기법에서는 전하배치가 중요하여 본 논문은 전위 오차 분석을 통해 최적 전하배치 방법을 제안하였으며 Simulation 데이터를 통해 최적 전하 배치식을 도출하여 3 차원 전계 계산의 속도와 정도의 향상을 이루었다.
- (4) 본 논문에서 제안된 방법에 의해 실제 전력소 모델에서 3 차원 공간에 놓여있는 부스바 Topology에 대한 Coefficient Matrix P 를 구성하여 3 차원 전계 계산을 하였다.

### 참 고 문 헌

1. EPRI(Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book-345KV and Above," 2nd Ed. Chap. 8, 1982
2. 河野照哉, 宅間薫, 數値電界計算法, Corona 사, 1980
3. H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss, "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields," IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp. 1660-1668, 1974
4. J. E. T. Villas, F. C. Maia, D. Mukbedkar, Vasco S. Pacosta, "Computation of Electric fields Using Ground Grid Performance Equations," IEEE Trans. on PWRD, Vol. PWRD-2, No. 3, pp. 709-716, July, 1987
5. M. Abdel-Salam, M. Th. El-Mohardes, H. El-Kishki, "Electric Field around Parallel dc and Multi-Phase ac Transmission Lines," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 6, pp. 1145-1152, December, 1990
6. Tadasu Takuma, Chikahisa Honda, Tetsuya Akashi, "Electric Fields Calculation of Electrode Corners Using Charge Simulation Method with ARC Charges," IEE of Japan, Vol. 113-A, Vol-5, pp. 382-389, 1993
7. 민석원, 김용식, 명성호, 이병윤, 박종근, "765kV 교류2회선 송전선 인근의 생체 및 물체 유도 전압, 전류계산, '대한전기학회 하계학술대회 논문집 C, pp. 1509-1511, 1994
8. 이병윤, 명성호, 민석원, 김용식, 박종근, "유한장 선로의 3 차원 전계 해석에 관한 연구," '대한전기학회 하계학술대회 논문집 C, pp. 1565-1567, 1994