

신마산 345kV 전력소 모선하의 3 차원 불평등 전계분포 해석

○명성호* 이병윤** 한인수** 박종근** 민석원*** 김용식**** 이기철*
 *한국전기연구소 **서울대학교 ***순천향대학교 ****호서대학교

Three-Dimensional Electric Field Calculation around the 345kV Sinmasan Substation Busbars

Sung-Ho Myung* Byeong-Yoon Lee** Inn-Su Han** Jong-Keun Park** Suk-Won Min*** Eung-Sik Kim**** Ki-Chul Lee*
 *KERI **Seoul National University ***SoonChunHyang University ****Hoseo University

Abstract - For the rather complicated and time-consuming three-dimensional electric field calculation in the vicinity of substations, this paper proposes a numerical calculation method based on charge simulation method(CSM). In order to represent non-uniform charge distribution on an electrode better, it is subdivided into small segments with linear charge density. Non-uniform arrangement of subdivided segments makes it possible to obtain high accuracy with a small number of variables. As for the arrangement of subdivided segments, effective formulas were derived from multiple regression analysis of many simulations. These formulas make the arrangement of segments fast and effective. The proposed method is applied to the electric field calculation around the 345kV Sinmasan Substation busbars and the distribution of calculated electric fields is compared with that of the measured electric fields.

1. 서론

송전 전압 격상에 따라 전력 계통에서 고전계가 발생되어 이에 대한 대처 방안이 요구되고 있다. 이를 위해서는 무엇보다도 정확한 전계 평가 선행되어야 한다. 그러나 전력소와 같은 복잡한 구조의 경우 전계 계산이 어렵기 때문에 대부분 실측에 의존해 왔다[1]. 이외에 scale model study와 같이 실규모의 전력소와 동일 구조의 소규모 전력소를 구성하여 전계를 평가하는 방법이 있었으나 시간과 노력이 많이 요구되고 경제적인 면에서도 바람직스럽지 않았다[2]. 초기의 이론적 접근으로는 Ground Grid performance를 이용한 J.T.Villas의 방법을 들 수 있다[3]. 이 방법에서는 유한장 선로가 상수 전하 밀도를 갖는다고 가정하여 유한장 선로를 하나의 상수 전하로 모의하였다. 이는 모델링이 어렵고 매우 큰 계산기의 용량을 요구하기 때문에 3차원 문제를 2차원적으로 접근하여 계산하였으므로 계산오차가 상당히 큰 단점이 있다.

본 연구에서는 일반 3차원 모델인 전력소 모선하에서 전하중첩법[4,5,6]을 이용하여 전계를 계산한다. 이를 위해 유한장 선로상의 전하 분포를 선형 전하 밀도를 가진 여러개의 유한 선전하로 모의하기위해 전위 오차 분석에 기반을 둔 전하 배치 방법을 이용한다[7,8,9]. 이것은 유한장 선로를 하나의 상수 전하 밀도를 가진 선전하로 모의한 방식에 비해 오차를 크게 감소시킬 수 있

으며 요구되는 정도의 전위 오차 이내로 유한장 선로를 모의할 수 있는 최소의 전하 개수를 최적화기법을 이용하여 결정하고 있다. 그리고 유한장 선로의 구조가 변함에 따라 배치된 전하의 위치가 변하므로 매번 전위 오차 분석을 해야하는 부담을 덜기 위해 선로의 구조가 주어지면 유한 선전하의 배치 위치를 결정할 수 있는 전하배치식을 사용한다.

본 연구에서 제안한 방법을 실제 345kV 신마산 전력소 부스바하에서의 3차원 전계 계산에 적용하였으며 계산한 전계 분포와 실제 현장에서 실측한 전계 분포를 비교를 위해 나타내었다.

2. 유한 선전하의 전위 및 전계 해석

전압이 인가된 유한장 선로상의 전하 밀도분포는 비선형이다. 이것을 선형 전하 밀도를 가진 다수의 유한 선전하로 근사하기 위해 그림 1에서와 같이 x축에 평행한 유한 선전하에 의한 임의의 지점에서의 전위 및 전계의 식을 표현하면 식 (1) 및 (2)와 같다.

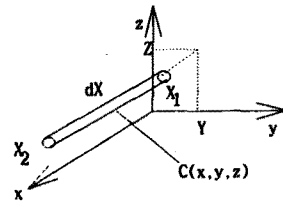


그림 1. 전극의 한 요소내에 배치된 유한 선전하

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma(X) dX}{r}$$

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

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(AX+B)(x-X)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}^3} dX$$

$$E_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(AX+B)(y-Y)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}^3} dX \quad (2)$$

$$E_z = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(AX+B)(z-Z)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}^3} dX$$

여기에 σ 는 전하 밀도, A,B는 전하 밀도의 계수, 공기의 유전율 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [F/m]$ 이다. 전위 및 전계에 대한 자세한 해석식은 이미 발표되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다[7,8,9].

3. 전하 배치식의 유도

유한장 선로상에 분포한 전하 밀도를 선형 전하 밀도 분포를 가진 유한 선전하를 이용하여 효율적으로 근사하기위해서 전위 오차 분석에 기초한 전하 배치 방법 이용하였다. 즉, 유한장 선로의 기하학적 구조인 선로의 길이(L), 선로의 반경(R), 선로의 높이(H)와 모의하고자 하는 전하수(n)이 결정되면 전위 오차는 전하들의 위치 함수가 된다. 따라서 전위 오차를 목적 함수로 두고 이를 최소화 하는 배치점들을 구하였다. 그 결과 비균등하게 전하를 배치하는 것이 적은 수의 전하로도 정도가 높게 모의 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 선로의 구조(길이, 반경, 지상고)가 변함에 따라 배치된 전하들의 위치가 변하므로 이때마다 전위 오차 분석을 통하여 배치점을 찾기위해서는 많은 시간이 요구된다. 따라서 전하 배치에 대한 일반적인 식을 구하기 위하여 유한장 선로의 구조(L,R,H)에 따른 전위 오차를 최소화 하는 배치점을 많은 Simulation 결과를 토대로 분석하였다. 그 결과 L,R,H의 비율($\mu = L/H, \eta = R/L$) 이 배치점과 일정한 상관 관계가 있었다. 이를 요약하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{cases} x = \xi(a\eta + b) & \mu \leq 1 \\ x = \xi(c\mu + d\eta + e) & \mu > 1 \end{cases} \quad (3)$$

여기에서 ξ 는 선로의 길이 보정 계수로 실제 선로 길이를 기준선로의 길이로 나눈 값이고 a,b,c,d,e는 전하 배치 계수이다.

전하 배치 계수들은 선로의 구조에 따른 많은 Simulation 결과들을 선형 회귀 분석을 이용하여 구할 수 있다.[7] 이것을 행렬 식으로는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 이와 같이 비균등 배치식은 전위 오차 분석을 하여 직접 배치점을 구하는 것에 비해 근사화한 방법이지만 계산의 정도를 유지하면서 간단하고도 신속하게 비균등 전하 배치를 할 수 있는 장점을 갖는다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \xi \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \mu \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \eta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

4. 전력소 모선하의 3 차원 전계 계산 실적용

그림 2는 본 연구에서 대상으로 한 신마산 전력소 345 kV 실제 전경을 나타냈다. 그림 3과 같은 신마산 전력소 345 kV 모선 구조에 대하여 본 연구에서 제안한 비균등 전하 배치 모델링 방법을 적용하여 그 유효성을 알아보고자 한다. 그림에서와 같이 신마산 전력소의 모선은 높이가 h와 H인 두 그룹으로 나뉘어져 있다. 그리고 그림상의 점들은 서로 다른 높이의 두 모선을 연결해주는 지면에 수직인 작은 길이의 부모선을 표시하고 있다.

이 연결점들을 기준으로 각 부모선은 두개 혹은 세개로 분할되었고 분할된 것들을 하나의 유한장 선로로 가정하였다. 따라서 부모선을 포함하여 모두 81개의 유한장 선로가 존재한다. 표 1은 각 유한장 선로상에 분포한 전하 밀도를 6,8,10개의 선형 전하 밀도를 가진 유한 선전하를 이용하여 전극 표면에서의 전위 오차를 계산한 결과를 보여주고 있다. 비교를 위해 각 유한장 선로를 하나의 상수 전하로 모의한 경우의 전위 오차도 같이 나타내었다. 그림 4는 각 유한장 선로를 10개의 유한 선전하로 모의한 경우의 지표면에서의 전계 강도를 도시한 것이다.

그림 5는 계산한 전계값과 실측한 전계값을 비교하기위해 실측한 전계값을 도시한 것이며 그림 6은 측정에 사용한 Holiday HI3600 ELF 전계계강도 측정기를 나타내었다.

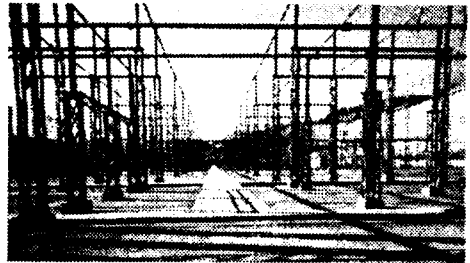
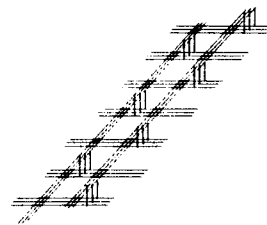


그림 2. 신마산 전력소 345 kV 실제 전경



(a) 평면도



(b) 측면도

그림 3. 345 kV 신마산 전력소의 구조

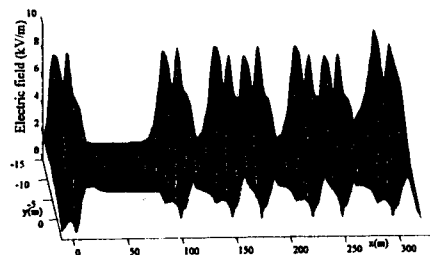


그림 4. 그림 3(a)의 점선 지역내에서 계산한 지표면 전계 강도

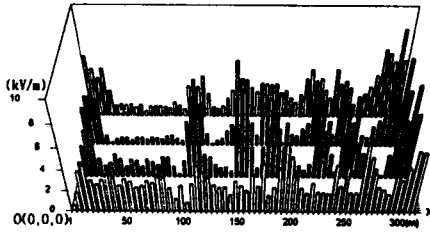


그림 5. 그림 3(a)의 점선 지역내에서 측정된 지표면 전계 강도



그림 6 ELF 전계강도 측정기(HI3600)

표 1. 각 유한장 선로를 모의한 유한 선전하의 개수에 따른 전위 계수 행렬의 크기 및 전위 오차

전하수	matrix 크기	전위 오차의 평균값
1	81 x 81	6.31 %
6	567 x 567	0.66 %
8	729 x 729	0.39 %
10	891 x 891	0.29 %

5. 결론

본 논문에서는 전력소 모션하에서의 전계 분포를 전하중첩법을 이용하여 일반 3차원적으로 계산하였다. 여기에서 사용된 방법은 실측 또는 scale model study와 비교하여 시간적인 면에서나 경제적인 면에서 우수하며 ground grid performance를 이용하여 유한장 선로를 하나의 상수 전하로 모의하여 계산한 것에 비하여 선형 전하 밀도를 가진 유한 선전하들로 근사화했기 때문에 정도가 높게 계산할 수 있다. 특히 전하 배치는 가능한 한 적은 전하수로 요구되는 정도의 오차를 얻을 수 있도록 전위 오차 분석을 통하여 얻었으며 그 결과 비균등한 전하 배치가 효율적임을 확인하였다. 또한 유한장 선로의 구조가 변함에 따라 전하 배치 위치도 변하므로 이를 간단하고 신속하게 배치할 수 있도록 다중 선형 회귀 분석법을 이용하여 도출한 전하 배치식을 사용하였다. 제안한 방법을 신마산 345 kV 전력소 모션하에서의 일반 3차원 전계 계산에 적용한 결과 적은 변수로 보다 정도가 높게 전계 분포를 계산할 수 있었으며 이를 실측한 전계값과 비교하였다.

참고문헌

[1] T.Vinh,C.W.Yi,C.H.Shih,"Measurements and Analysis of Electric Fields in HV and EHV Stations," IEEE Trans.on PAS,Vol.PAS-101,No.10,pp.4122-4130,Oct.,1982

[2] Stephen A.Sebo,Ross Caldecott,"Scale model studies of AC Substation Electric Fields," IEEE Trans.on PAS,Vol.PAS-98,No.3,pp.926-939,May/June,1979

[3] J.E.T.Villas,F.C.Maia,D.Mukbedkar,Vasco S.Pa costa,"Computation of Electric Fields Using Ground Grid Performance Equations,"IEEE Trans.on PWRD,Vol.PWRD-2,No.3,pp.709-716,July,1987

[4] 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

[5] "최근의 수치전계계산법[II]", 전기학회지,Vol.34. No.5,1985

[6] 河野照哉, 宅間 董, 數値電界計算法, Corona 사,1980

[7] 명성호,이병윤,박종근,민석원,김용식,"전하중첩법을 이용한 송전선로의 3차원 전계해석에 관한 연구(I)," 대한전기학회 논문지 44 권 10 호, pp1355-1364. 1995년 10월

[8] Sung-Ho Myung, Byeong-Yoon Lee, Jong-Keun Park, Suk-Won Min, Eung-Sik Kim," A Study on 3D-Electric Field Analysis of Substation Busbars Using CSM with Nonuniform Charge Arrangement," IEE of Japan Power & Energy'95, August, 1995, pp.197-202.

[9] Sung-Ho Myung, Byeong-Yoon Lee, Jong-Keun Park, Suk-Won Min, Eung-Sik Kim,"Three Dimensional Electric Field Analysis of Substation Busbars Using Nonuniform Optimal Charge Simulation," ISH,Graz,Austria,Europe,pp8363-1-4,August 29-September 1,1995