

적응적 기법을 이용한 전력소 모선하의 3차원 전계분포 해석

◦명성호* 이병윤** 박종근** 민석원*** 김용식**** 이재복* 하태현*

*한국전기연구소 **서울대학교 ***순천향대학교 ****호서대학교

Three-Dimensional Electric Field Calculation around Substation Busbars Using Adaptive Technique

Sung-Ho Myung* Byeong-Yoon Lee** Jong-Keun Park** Suk-Won Min*** Eung-Sik-Kim**** Jae-Bok Lee* Tae-Hyun Ha*

*KERI **Seoul National University *** SoonChunHyang University ****Hoseo University

Abstract - This paper presents optimal charge arrangement through potential error analysis. In order to decide the number of charges per conductor for a large system, adaptive simulation charge arrangement technique has been proposed. "Grouping" technique which means to divide analysis domain into two groups has been described through field error analysis. By this method, the size of matrix to calculate E field at a calculation point is reduced remarkably. The proposed method is applied to the electric field calculation around the Substation busbars.

1. 서론

본 논문에서는 일반 3차원 모델인 전력소 모선하에서 전하 중첩법을 사용하여 적은 변수로도 고정밀도의 3차원 계산이 가능한 전위오차 분석에 기반을 둔 새로운 방법을 이용하여 전력소 모선하의 불평등 전계를 해석한다. 전력소 모선하의 불평등 전계분포 해석을 위해 유한장 선로상의 전하 분포를 선형 전하 밀도를 가진 여러 개의 유한 선전하로 모의하기 위해 전위 오차 분석에 기반을 둔 전하 배치 방법을 이용한다[5,6,7].

본 연구에서는 전력소 모선 시스템을 대상으로 여러 개의 전극이 모여 있는 경우에 초기 모의전하 개수를 결정하는 가이드라인을 제시한다. 또한, 대형 모델의 전계분포 해석의 경우에 효율적으로 계산을 하기 위한 근사화 개념의 그룹 방법을 제안한다. 사례연구로 본 연구에서 제안한 적응적 기법을 27개 모선을 갖는 전력소 모선 모델에 적용하여 그 유효성을 입증한다.

2. 유한 선전하의 전위 및 전계 해석

전압이 인가된 유한장 선로상의 전하 밀도분포는 비선형이다. 이것을 선형 전하 밀도를 가진 다수의 유한 선전하로 근사하기 위한 전위 및 전계 해석식은 이미 발표되었으므로 생략한다. [2,3,4]

3. 전극의 비균등 최적 전하 배치

유한장 선로상에 분포한 전하 밀도를 선형 전하 밀도 분포를 가진 유한 선전하를 이용하여 효율적으로 근사하기 위해서 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.

이러한 문제의 해결에는 함수값만 이용하는 직접법(Direct search method)과 함수값 및 미분값을 이용하는 경사법(Gradient method)이 있다. 본 연구에서는 먼저 적절한 해상도(Scale factor : α)를 선정하여 유한장선로의 구간을 분할하고 그 구간의 각 조합에서 전위오차를 최소화 하는 초기 배치 조합을 구한다. 다음 단계에서는 초기 배치값 부근을 해상도를 증가시켜 구간화 한 다음 다시 전위오차를 최소화 하는 2차 배치조합을 구한다. 이와 같이 반복적으로 전위오차를 최소화 하는 배치조합을 구하는 그림 2의 흐름도와 같은 바이섹션(bisection)개념의 직접법을 사용하였고 여기에 사용된 기호는 다음과 같다.

<Definition of symbols at flow chart>

err : Potential error function

2L : Line length

n : Number of segments

m : Resolution step

M : Maximum resolution step given n

$\Delta^{(m)}$: Resolution at m_th step

$\alpha^{(m)}$: Scale factor at m_th step

ϵ : Reasonable error limit

x_i : Positions of simulation charges

$x_1 = 0, x_{(n+2)/2} = L, x_{n+1} = 2L$

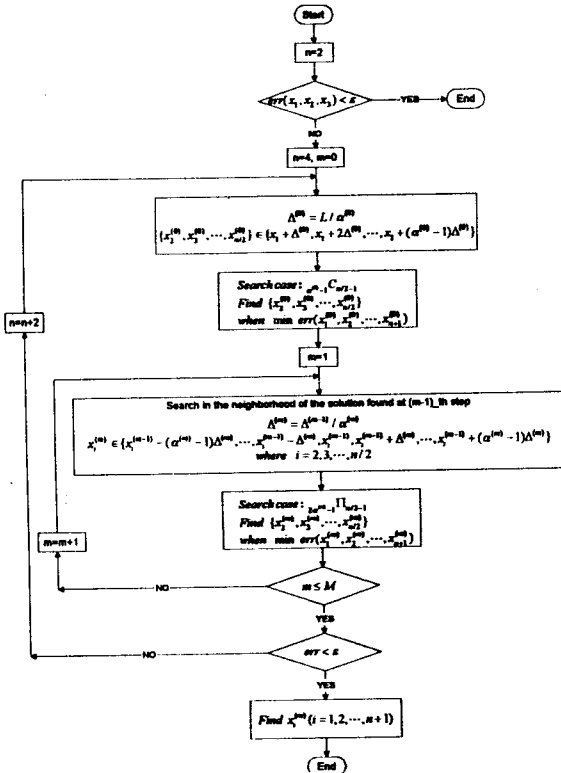


그림 2. 적응법 흐름도

4. 각 모선의 모의전하 개수 결정 가이드라인

전하중점법을 이용하여 정확한 전계를 계산하기 위해서는 무엇보다도 가상전하의 배치가 중요하며, 이를 위해서는 먼저 각 전극에 몇개의 모의전하를 사용할 것인가가 결정되어야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 적응적인 기법의 전하 배치 방법을 제안하고자 한다. 적응적인 기법의 전하배치 방법은 먼저 각 전극의 오차특성을 파악한 후 오차가 작은 전극의 전하수는 감소시키고 오차가 큰 전극의 전하수는 증가시켜 정도 개선을 꾀하는 방법으로 모든 전극에 일률적으로 같은 수의 전하를 배치하는 방법에 비해 적은 전하수로 바람직한 계산결과를 얻을 수 있게 된다. 이를 위해서는 전극의 오차특성 파악이 선행되어야 하는데 본 연구에서는 각 전극을 하나의 상수 전하로 모의하는 기본 전하배치를 통해 전극의 오차특성을 파악하는 방법을 사용하고자 한다. 표 1은 전위 허용오차를 1[%]미만으로 전체계산을 하기 위해서 기본 전위오차가 파악되었을 때, 각 전극의 모의전하의 개수를 결정하기 위한 가이드라인이다.

5. 대형 모델 해석을 위한 그룹 방법

그룹방법은 대형 모델에서 3 차원 전계분포를 해석하는 경우에 효율적으로 계산을 하기 위한 것이다. 이것은 근사화

표 1. 기본 전하배치에 따라 모의전하 개수를 결정하기 위한 가이드라인

Basic potential error	the number of simulation charges
Under 1[%]	1 - 2
1 - 3 [%]	2 - 4
3 - 7 [%]	4 - 8
7 - 12 [%]	8 - 12
12 - 20 [%]	12 - 16

하기 위한 모델 축약의 개념으로 해석 영역을 두개의 영역으로 나누어 임의의 지점 P의 전계값에 큰 영향을 주는 주영역은 자세히 모델링하고 전계값에 큰 영향을 주지 않는 부영역은 유한장 선로를 하나의 상수전하로 기본 모델링하는 방법이다. 본 연구에서 그룹방법은 다음과 같은 수순에 따른다.

1) i 번째 도체의 전하량을 Q_i 라고 가정하면 도체로부터 r_i 만큼 떨어진 임의의 지점 P에서의 전계는

$$E_p \propto \sum Q_i / r_i^2$$

2) 전계값에 영향을 주는 요소는 Q_i 및 r_i 두 개의 변수이므로 r_i 변수로만 그룹하기 위해서 각 전하량을 기준 전하량 Q_{ref} 로 스케일링(Scaling)한다.

$$Q_1/r_1^2, Q_2/r_2^2, Q_3/r_3^2, \dots, Q_n/r_n$$

$$= Q_{ref} / ((\sqrt{Q_{ref}/Q_1})r_1)^2, Q_{ref} / ((\sqrt{Q_{ref}/Q_2})r_2)^2,$$

$$Q_{ref} / ((\sqrt{Q_{ref}/Q_3})r_3)^2, \dots, Q_{ref} / ((\sqrt{Q_{ref}/Q_n})r_n)^2.$$

$$E_p \propto \sum_{i=1}^n Q_{ref} / ((\sqrt{Q_{ref}/Q_i})r_i)^2$$

3) 임의의 지점 P의 전계에 가장 큰 영향을 주는 거리는 다음과 같으며 여기서 Q_i 는 전극을 하나의 상수 전하로 모의하는 기본모델에서 구한다.

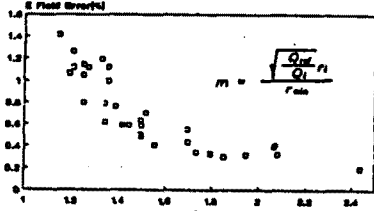
$$\text{Min}((\sqrt{Q_{ref}/Q_1})r_1, (\sqrt{Q_{ref}/Q_2})r_2, \dots, (\sqrt{Q_{ref}/Q_i})r_i, \dots, (\sqrt{Q_{ref}/Q_n})r_n)$$

4) 계산의 정도를 결정하는 그룹축약 계수 m은 많은 모의 실험으로부터 얻어진 그림 3에서 선정된 다음 식을 이용하여 룬다.

$$(\sqrt{Q_{ref}/Q_1})r_1 / r_{\min} < m$$

6. 적응적 기법을 이용한 전력소 모선주변의 3 차원 전계분포 해석

그림 4와같은 전력소 모선(400[kV] Substation) 모델에 대하여 지표면에서의 3차원 전계분포를 계산하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 각 모선에 일정하게 8개의 모의전하로 모의한 전력소 모델에서는 총 225개 변수로 평균전위오차가 0.553[%]인데 비하여, 전하배치에 적응적인 기법을 사



$$r_{min} = \text{Minimum} \left(\sqrt{\frac{Q_1}{Q_2} r_1}, \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1} r_2}, \dots, \sqrt{\frac{Q_n}{Q_1} r_n} \right)$$

$$E \text{ field error} = \frac{E \text{ field value calculated by grouping}}{\text{exact } E \text{ field value}}$$

$$\text{Grouping Distance Coefficient} = \frac{\text{distance of arbitrary conductor}}{\text{distance of minimum } r}$$

그림 3. 그룹 기준

유한 모델에서는 총 211개 변수로 0.429[%]로 모의 가능하여 적응적인 기법의 전하배치가 보다 장점을 갖음을 알 수 있었다.

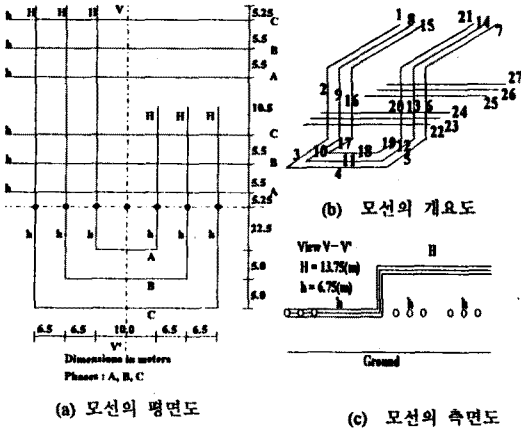


그림 4. 변전소 모선 모델 (400[kV] Bruegal Substation)

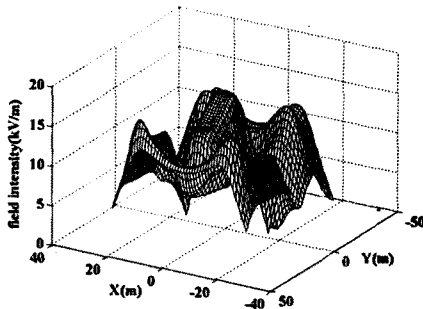


그림 5. 지표면에서의 3 차원 전계값

앞에서 설명한 그룹방법의 유효성을 알아보기 위하여 모선 #11 아래에서 그룹모델과 전 모선을 자세히 모의한 모델에서 실제 지표면 전계 계산값을 그림 6에 비교하였다. 그룹 모델의 특성은 표 2에 나타내었다.

표 2. 그룹 모델의 특성

(Y=22.5m, Z=0.0m)

Calculation Point	Busbars of dominant	Grouping Model	Full Detail Model	Reduced Size
0 ≤ X ≤ 5	#4, #11, #18	51X51	279X279	1/30
5 ≤ X ≤ 8	#4, #5, #11, #12, #18, #19	72X72	279X279	1/15
8 ≤ X ≤ 13	#4, #5, #11, #12	57X57	279X279	1/24
13 ≤ X ≤ 20	#5, #12	43X43	279X279	1/42

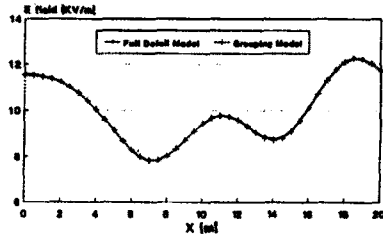


그림 6. 모선 #11 아래에서의 그룹모델과 자세한 모델에서의 지표면 전계값 비교

7. 결론

본 논문에서는 전력소 모선하에서의 전계 분포를 전하중점법을 이용하여 일반 3 차원적으로 계산하였다. 여기에서 사용된 방법은 유한장 선로를 선형 전하 밀도를 가진 유한 선전하들로 근사화 했기 때문에 정도가 높게 계산할 수 있다. 특히 전하 배치는 가능한 한 적은 전하수로 요구되는 정도의 오차를 얻을 수 있도록 비균등한 최적 배치방법을 사용하였다. 본 연구에서는 전력소 모선 시스템을 대상으로 여러 개의 전극이 모여있는 경우에 모의전하 개수를 결정하는 가이드라인과 대형 모델의 전계분포 해석의 경우에 효율적으로 계산을 하기 위한 근사화 개념의 그룹방법을 제안하였다. 사례연구로 본 연구에서 제안한 적응적 기법을 27개 모선을 갖는 전력소 모선 모델에 적용하여 그 유효성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] 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
- [2] 명성호, 이병윤, 박종근, 민석원, 김용식, "전하중점법을 이용한 송전선로의 3 차원 전계해석에 관한 연구(I)," 대한전기학회 논문지 44 권 10 호, pp1355-1364. 1995 년 10 월
- [3] 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.
- [4] 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