

일반 3차원 표면전하법을 이용한 금속 이물질이 유입된 GIS 내부의 전기 해석

김 용준*, 민 석원*, 김 응식**

*순천향 대학교 전기전자 공학부 **호서 대학교 제 3공학부

Analysis of Electric Fields Inside GIS With Metal Impurity Using 3 Dimensional Surface Charge Method

Y. J. Kim*, S. W. Min*, E. S. Kim**

*Soonchunhyang University **Hosei University

Abstract - In this paper, the electric fields inside GIS with metal impurity is analysed by the use of 3 dimensional Surface Charge Method. We find the metal impurity makes electric field distribution inside GIS non-uniform and causes breakdown of SF₆ gas in GIS.

1. 서 론

우리 나라는 전력수요증가와 인구의 대도시 집중화 현상으로 인해 신뢰도 높은 대용량 장거리 전력수송 설비를 점점 확충해야 하는 실정으로 현재 765 kV 송전선로가 건설 중에 있다[1][2][3][4]. 이에 따라 전력설비는 대형화, 중량화 및 초고압화 하고 있으나 우리나라와 같이 국토 면적이 협소한 나라에서는 발전소 및 송배전 설비의 부지 확보가 더욱 어려워 모선, 차단기, 단로기, 접지 개폐기, 변류기 등이 밀폐된 좁은 공간안에 설치되는 GIS(Gas Insulated Substation) 설비의 사용이 전국적으로 증가하는 추세이다. 초고압용 GIS는 이런 구조를 갖고 있기 때문에 사고를 사전에 외부에서 감지하기 어렵고 SF₆ 절연가스는 균등 전계하에서는 절연 효과가 높으나 불균등 전계하에서는 절연 효과가 급격히 감소하는 전계 의존성을 갖고 있는 특징이 있다. 따라서 저자들은 GIS 내부 고체절연체(스페이서)에 공극이 있는 경우의 전계 분포를 해석한 바가 있으며[5], 본 논문에서는 GIS내의 불균등 전계를 일으킬 수 있는 이물질(부유도체)을 가스 절연체에 위치시켜 GIS 내부의 전계를 일반 3차원 표면 전하법을 이용하여 검토하였다.

표면 전하법에도 여러 기법이 있고 대부분 수치적분을 이용하여 전위, 전계를 계산하지만 여기서는 일정 전하 밀도를 갖는 삼각형 요소의 전위 및 전계가 특이해 문제 없이 해석적으로 주어지는 장점이 있어 이것을 사용한 삼각형 요소 표면 전하법을 이용하였다[6][7]. 부유도체의 경우에는 도체 표면전하의 합이 0인 조건과 부유도체 표면의 전위가 같다는 조건을 이용하였다.

GIS의 내부에 이물질이 유입되는 경우 이물질 주위에 전계가 집중하여 전계치가 일정값 이상이 되면 가스 절연체에서 절연 파괴를 일으킬수 있으므로 이물질 위치 변화에 따른 전계의 세기 영향을 알아 보기 위해 이물질이 고체 절연체에 붙어있는 경우와 가스 절연체에 있는 경우로 나누어 검토하였다.

2. 계산 원리

2.1 단일 매질장

그림 1과 같이 전극 외에 1종류의 유전체가 존재하는 단일 매질장에 직육면체 도체에 전압 V가 인가 되었을 때, 전위는 전하들이 분포된 전극 표면을 여러개의 요소들로 나누어 각각 요소의 전하가 i점에 미치는 영향을

중첩하여 구하게 된다. 분할편 j에 의한 i점의 전위 Φ_{ij} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_s \frac{\sigma_j \cdot dS_j}{l} \quad \text{-----(1)}$$

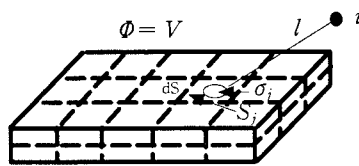


그림 1 표면 전하법의 모의전하

즉 전체요소에서의 i점에서의 전위는 이들 각 요소가 i점에 미치는 전위를 중첩하여 더하면 되므로 (2)식으로 된다.

$$\Phi_i = \sum \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_s \frac{\sigma_j \cdot dS_j}{l} \quad \text{-----(2)}$$

(2)식에서 전체 i점을 각 요소에 위치 시키면 Φ_i 는 V로 고정되고 (2)식은 (3)식과 같은 연립 방정식의 형태로 주어진다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V \end{bmatrix} \quad \text{-----(3)}$$

여기서 V : 경계조건 σ_i : 각 요소의 전하밀도

A_{ij} : 전위계수 이다.

(3) 식으로부터 σ_i 를 구하면 전위와 전계를 이 σ_i 를 이용하여 구할 수 있다.

2.2 다 매질장

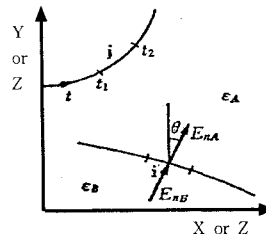


그림 2 유전체 경계면에서의 표면전하법

그림 2와 같은 다매질장의 유전체 경계면에서는 연속 밀도의 연속 조건만을 고려하면 된다.

다매질장의 경계 위의 점 i에서의 전하밀도를 $\alpha(i)$ 라 하고, 법선방향의 전계를 각각 ϵ_A, ϵ_B 의 영역에서 E_{nA}, E_{nB} 라고 하자. 이때 $\alpha(i)$ 이외의 전하에 의한 윤곽점의 전계를 E_{no} 로 하면 다음의 (4)식과 (5)식이 성립된다.

$$\epsilon_A E_{nA} = \epsilon_B E_{nB} \quad \text{-----}(4)$$

$$E_{nB} = E_{no} - \frac{\alpha(i)}{2\epsilon_0} \quad \text{-----}(5)$$

여기서는 전 공간을 단일 매질로 생각한다. (5)식을 (4)식의 양변에 대입하면 (6)식이 성립한다.

$$(\epsilon_A - \epsilon_B)E_{no} + \frac{\epsilon_A + \epsilon_B}{2\epsilon_0} \alpha(i) = 0 \quad \text{-----}(6)$$

이 식은 유전체 경계면에 n 개의 미지 표면전하를 배치하면 n 개의 식이 성립한다. 따라서 다매질장이 경우 (3)식의 시스템 방정식이 (7)식과 같이 변형된다. 이 식으로부터 $\sigma_1 \sim \sigma_m$ 까지의 전하밀도를 구한 후, 이를 사용하여 원하는 장소의 전위 및 전계를 구할수 있다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_n \\ \sigma_{n+1} \\ \vdots \\ \sigma_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{-----}(7)$$

A : 전위 계수 matrix B : 전계계수 matrix
 $\sigma_1 \sim \sigma_n$: 전극 표면의 모의 표면전하
 $\sigma_{n+1} \sim \sigma_m$: 유전체 경계면의 모의 표면전하
 $\phi_1 \sim \phi_n$: 전극 표면의 전위

2.3 부유 도체

부유도체가 전압이 인가된 도체 주변에 있는 경우 부유도체에는 타도체에 의해 전압이 유도된다. 이와같은 경우에는 부유도체의 전위를 알수 없으므로 타도체의 작용으로 발생하는 유도전위 값 V_f 를 구해야 된다. 유도전압 V_f 는 부유도체 표면전하의 합이 0인 것과 절연도체 표면의 전위가 같다는 조건 식으로부터 표면전하를 구하여 값을 얻을 수 있다. 부유도체 각 요소의 전하밀도가 $\sigma_1 \sim \sigma_m$ 인 경우 각 요소에서의 유도전위 V_f 는

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m p(1, j)\sigma_j &= V_1 = V_f \\ \sum_{j=1}^m p(2, j)\sigma_j &= V_2 = V_f \\ &\dots \\ \sum_{j=1}^m p(m, j)\sigma_j &= V_m = V_f \end{aligned} \quad \text{-----}(8)$$

$$\sum_{j=1}^m \sigma_j = 0 \quad \text{-----}(9)$$

(8)식으로부터 V_f 를 소거한 (m-1)식과 (9)식으로부터 결국 m 개의 요소에 대해 m 개의 방정식을 얻을 수 있다. 다른 도체상의 요소에 대한 전위의 방정식은 통상의 표면 전하법과 같다. 결국 모든 도체의 표면전하 $\sigma_j (j = 1 \sim n)$ 에 대하여 다음의 식이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ P_{11} - P_{31} & P_{12} - P_{22} & \dots & P_{1m} - P_{2m} & \dots & P_{1n} - P_{2n} & \dots \\ P_{21} - P_{31} & P_{22} - P_{32} & \dots & P_{2m} - P_{3m} & \dots & P_{2n} - P_{3n} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m-1,1} - P_{m1} & P_{m-1,2} - P_{m2} & \dots & \dots & \dots & P_{m-1,n} - P_{mn} & \dots \\ P_{m+1,1} & P_{m+1,2} & \dots & \dots & \dots & P_{m+1,n} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & \dots & \dots & P_{nn} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \dots \\ \sigma_m \\ \sigma_{m+1} \\ \dots \\ \sigma_n \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \quad \text{-----}(10)$$

즉 (10) 식을 풀어서 얻은 표면전하로 임의의 점의 전위, 전계를 구할 수 있고 유도 전압 V_f 도 구할 수 있다. 부유 도체에 어떤 일정표면전하 σ_j 가 인가된 경우는 (9)식 대신에

$$\sum_{j=1}^m \sigma_j = \sigma_j \quad \text{-----}(11)$$

(11)식을 적용한다.

3. 적용 결과

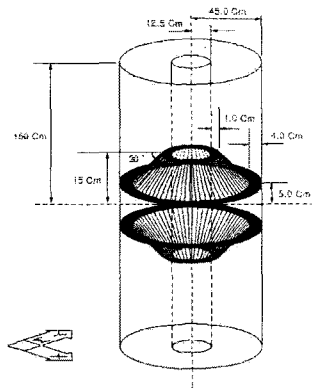


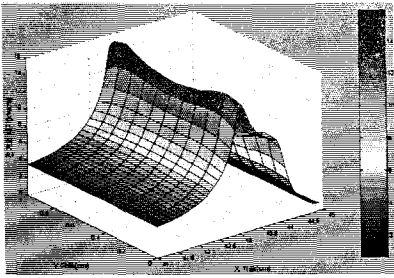
그림 3 GIS 계산 모형

그림 3과 같은 길이 300cm의 GIS 내부 도체에 100[kV] 전압을 인가했을 경우의 도체표면, 절연체, 및 이물질등 GIS 내부의 전위, 전계를 계산하였다. 도체를 지지하는 절연체는 예폭시 수지로 유전율을 3으로 가정하였고, 가스 절연체는 유전율을 1로 하였다. 이물질의 크기는 가로, 세로, 높이가 각각 1cm인 정육면체로 가정하여 계산하였다.

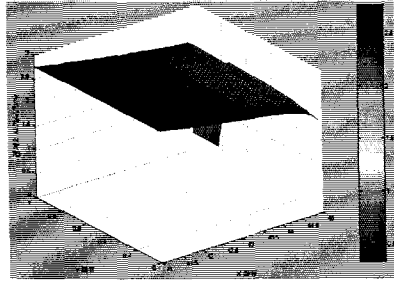
그림 4는 고체 절연체의 아래 부분에 (중심좌표 x=43.5 cm y=0.5cm, z=155.5cm) 이물질이 접촉하고 있을 경우로 이물질 표면으로부터 고려하여 적용하여 +z 방향으로 0.1cm 인 곳에서 전계의 세기를 이물질이 존재하지 않는 경우와 비교, 검토한 결과이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 이물질이 있는 경우 전계 강도가 약 6.4배 증가 하였다.

그림 5는 이물질이 고체 절연체의 경사부분(중심좌표 x=24.937cm y=0.5cm z=161.5cm)에 위치하는 경우로 역시 없을 때의 전계 강도와 비교한 결과이다. 그림 5에서는 이물질이 전압이 높은 도체쪽에 있을수록 전계 강도가 비약적으로 증가하여 부분방전의 원인이 됨을 알 수 있었다

그림 6은 이물질이 가스절연체에 위치하는 경우(중심좌표 x=25cm y=0.5cm z=170.5cm)로 역시 이물질이 없을 때의 전계 강도와 비교한 결과이다. 그림 6에서도 그림 5와 같이 이물질이 전압이 높은 도체쪽에 있어서 그림 5와 유사한 현상이 일어남을 알 수 있었다.

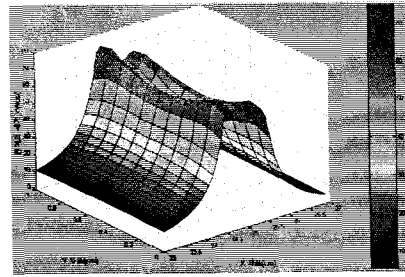


(a) 고체절연체 아래부분에 존재하는 경우

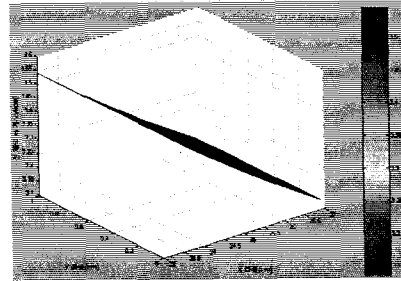


(b) 존재하지 않는 경우

그림 4 고체 절연체 아래부분에서의 이물질 전계강도



(a) 가스 절연체에 존재하는 경우



(b) 존재하지 않는 경우

그림 6 가스 절연체에 이물질이 존재하는 경우

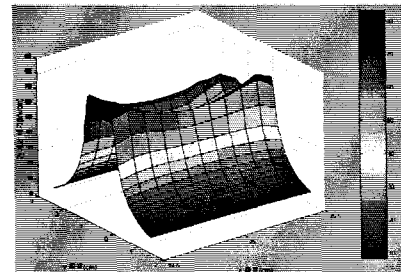
해석 결과로 가스 절연체의 각 위치에 급속 이물질이 존재하지 않는 경우에 2~4(kV/cm)의 균등한 전계가 형성된 반면 급속 이물질이 존재하는 경우에는 이물질이 전위가 높은 도체 쪽에 있을수록 전계가 급속히 증가함을 알았다.

이것으로 급속 이물질이 가스 절연체내에 존재하는 경우 급속 이물질 주위에는 불균등 전계가 형성되어 가스 절연체로 사용하고 있는 SF₆ 가스의 절연효과를 급속히 감소시켜 절연파괴가 쉽게 발생할 수 있음을 알았다.

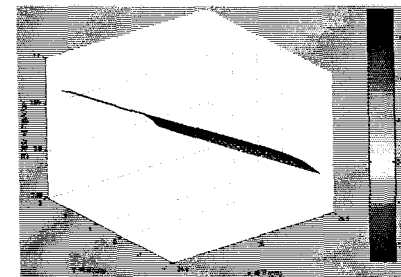
또한 고체 절연체내의 공극이 발생한 경우와 전계의 세기를 비교할 때, 급속 이물질이 훨씬 GIS 사고에 더 많은 영향을 미치는 것을 알수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 민 석원, 김 정부, "코로나 케이지를 이용한 765 kV 초고압 송전선 다중 도체방식 선정", 대한 전기학회 논문지 제542권 7호, 84-94, 1993.
- [2] 민 석원, 박종근, "코로나 잡음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구", 대한 전기학회 논문지 제39권 5호, 508-515, 1990.
- [3] S.W. Min, J.B. Kim, D.I. Lee, "A Study on Corona Characteristics of Symmetric and Asymmetric Conductor Bundle for 765kV Double Circuit Transmission Line by the Use of Corona Cage", Proc. of 8th ISH, Vol.3, 457-460, 1993.
- [4] S.W. Min, J.K. Park, J.B. Kim, "Conductor Bundle Geometry Optimization in view of Conductor Surface Gradient", IEE Japan, 111-B, 1065-1072, 1991.
- [5] 김 용준, 민 석원, 김용식, "일반 3차원 표면전하법을 이용한 GIS 내부 전계해석" 대한전기학회 1999년도 방전·고전압 연구회 춘계 학술 발표회, 243-247, 1999.
- [6] T. Kouno, T. Takuma, "Numerical Calculation Methods of Electric Fields", Corona Pub. Co., Tokyo, 1980, Appendix 6, 224-225.
- [7] T. Kouno, T. Takuma, ibid., Chap. 16, 160-178.



(a) 고체절연체 경사면에 존재하는 경우



(b) 존재하지 않는 경우

그림 5 고체 절연체 경사면에 이물질이 존재하는 경우

3. 결 론

본 논문에서는 GIS 내부에 이물질이 존재하는 경우의 전계 분포를 일반 3차원 표면 전하법을 적용하여 해석하였다. 이물질은 부유 도체로 보아 도체 표면전하의 값이 0인 조건과 도체 표면의 전위가 같다는 조건을 이용하였다.