

고체 절연체의 도전을 변화에 따른 GIS 내부 전기분포 해석

민 석원*, 김 용준*, 김 응식**

*순천향대학교 정보기술공학부 **호서대학교 제 3공학부

Analysis of Electric Fields Distribution Inside GIS
By Changing Conductivity of Spacer

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

*Soonchunhyang University **Hosei University

Abstract - In this paper, electric field distribution of GIS by changing conductivity of spacer is analysed by the use of 3 dimensional Surface Charge Method. We find electric field distribution inside GIS was much influenced when volume resistance are lower than $10^7(\Omega\text{-cm})$.

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]-[3]. 이에 따라 전력설비는 대형화, 중량화 및 초고압화 하고 있으나 우리 나라와 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 절연효과가 높으나 불균등 전계하에서는 절연 효과가 급격히 감소하는 전계의존성을 갖고 있는 특징이 있다.

따라서 저자들은 GIS 내부 고체절연체(스페이서)에 공극이 있는 경우의 전계 분포를 해석하였고[4], GIS내의 불균등 전계를 일으킬 수 있는 금속 이물질(부유도체)을 가스 절연체에 위치시켜 GIS 내부의 전계를 해석하여 발표하였으며[5]. 금속 이물질이 전압 인가도체 또는 접지측에 위치할 경우와 이물질 크기 변화에 따른 스페이스 표면에 나타나는 전계 분포를 해석하였다[6].

그러나 실제로 사용되고 있는 고체절연체는 유전을 뿐만 아니라 도전을 포함하고 있으므로 GIS 내부의 전계 분포를 정확히 알아보기 위해서는 도전을 고려하여 계산하여야만 한다. 따라서 본 논문에서는 고체 절연체의 유전을 뿐만 아니라 도전을 고려하여 일반 3차원 표면전하법 프로그램을 개발하였고 체적 저항율의 변화에 따라 가스 절연체와 고체절연체 표면의 전계변화를 알아 보았다. 또한 금속이물질이 가스절연체 부근에 존재하는 경우 금속이물질 주변의 전계 변화에 대해서도 알아보았다.

2. 계산 원리

일반 3차원 표면 전하법은 이미 잘 알려진 이론이기 때문에 여기서는 체적 저항을 고려한 경계조건만을 기술한다.

표면 전하법을 이용하여 도체부와 유전체부의 표면 전하를 모의하였다. 그림 1과 같은 기지의 전위를 갖는 도체부와 공기 및 고체 유전체로 구성된 다매질장을 예로

경계 조건식을 설명하면 다음과 같다.

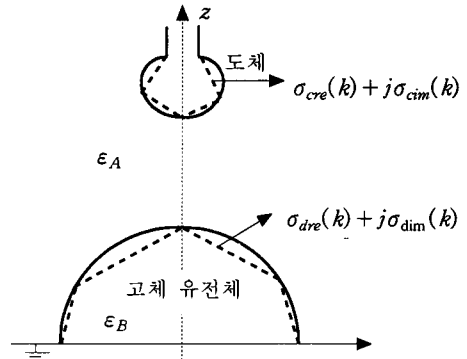


그림 1 표면 전하법 설명도

도체 표면의 전위 경계 조건식

$$\sum P_c(i, k) \{ \sigma_{cre}(k) + j\sigma_{cim}(k) \} + \sum P_c(i, k) \{ \sigma_{dre}(k) + j\sigma_{dim}(k) \} = V_{re}(i) + jV_{im}(i) \quad (1)$$

여기서 $P_c(i, k), P_d(i, k)$: 삼각형 표면 전하 k와 운곽점 i 간의 전위 계수,

$\sigma_{cre}(k), \sigma_{dre}(k)$: 각각 도체와 고체 유전체의 k번째 삼각형 표면 전하 밀도의 실수부,

$\sigma_{cim}(k), \sigma_{dim}(k)$: 각각 도체와 고체 유전체의 k번째 삼각형 표면 전하 밀도의 허수부,

$V_{re}(i), V_{im}(i)$: 도체 전위의 실수부와 허수부이다.

유전체 경계면의 법선 방향 전속 밀도 경계 조건식

$$[1 - \{ \epsilon_A \epsilon_0 - j1 / (\omega \rho_A) \} / \{ \epsilon_B \epsilon_0 - j1 / (\omega \rho_B) \}] [\sum F_{nc}(i, k) \{ \sigma_{cre}(k) + j\sigma_{cim}(k) \} + \sum F_{nd}(i, k) \{ \sigma_{dre}(k) + j\sigma_{dim}(k) \}] = \{ \sigma_{dre}(i) + j\sigma_{dim}(i) \} / \{ \epsilon_A \epsilon_0 - j1 / (\omega \rho_A) \} \quad (2)$$

여기서 ϵ_A, ϵ_B : 유전체 A, B의 비유전율,

ϵ_0 : 공기 유전율,

E_{nA}, E_{nB} : 유전체 A, B 경계면 법선방향 전계성분,

$F_{nA}(i, k), F_{nB}(i, k)$: 삼각형 표면 전하 k와 운곽점 i 간의 법선 방향 전계 계수,

ρ_A, ρ_B : 각각 유전체 A, B의 저항율,

ω : 각속도(= $2\pi f$) 이다.

만약 도체에 전압을 인가하지 않고 대신에 기지의 균

등 전계를 인가하면 식(1)은 사용하지 않고 식(2)의 $\sum F_{nc}(i, k) \{ \sigma_{cre}(k) + j\sigma_{cim}(k) \}$ 를 인가 균등 전계의 유전체 경계면에서의 법선 방향 전계의 실수부와 허수부 값인 $E_{nore}(i) + jE_{noim}(i)$ 로 바꾸어 적용한다.

3. 적용 결과

1. 오차분석

본 논문에서는 유전체의 체적 저항율을 고려한 일반 3차원 형상의 전위·전계를 해석할 수 있는 일반 3차원 표면 전하법 프로그램을 개발하였고, 프로그램의 오차를 검증하기 위해 해석해가 존재하는 균등 전계하의 반구에 대해 해석해와 그 계산값을 비교하여 프로그램의 정확도를 알아보았다.

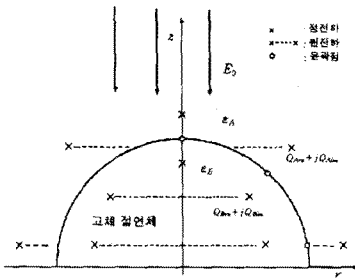


그림 2 균등 전계하의 유전체 반구

표 1은 그림 2와 같이 1[kV/cm]의 균등 전계하에 반지름이 1cm인 유전체 반구에 체적 저항율을 $10^7 \sim 10^{15} [\Omega\text{-cm}]$ 의 값으로 변화시켰을 경우에 유전체 외부(좌표 $x=0.0\text{cm}, y=0.0\text{cm}, z=1.5\text{cm}$)에서 해석해와 계산값을 비교하여 나타낸 것이다.

표 1 균등 전계하의 유전체 반구 외부에서 해석해와 계산값 전위 비교

체적 저항율 [$\Omega\text{-cm}$]	해석값[kV]		계산값[kV]		오차[%]	
	실수부	허수부	실수부	허수부	실수부	허수부
10^7	1.0641	4.2791×10^{-2}	1.1099	3.487×10^{-2}	4.302	1.85
10^9	1.2772	1.1067×10^{-2}	1.2917	9.86×10^{-3}	1.135	10.91
10^{12}	1.2777	1.1095×10^{-5}	1.2922	1.085×10^{-5}	1.131	2.21
10^{15}	1.2777	1.1095×10^{-8}	1.2922	1.079×10^{-8}	1.131	2.74

표 1에서 체적 저항율을 변화시켰을 경우 계산값의 실수부 오차를 보면 체적저항율이 $10^7 [\Omega\text{-cm}]$ 에서 약 4.3%인 것을 제외하고는 약 2%미만의 오차가 나타나는 것을 알 수 있고, 허수부 오차는 체적 저항율이 $10^9 [\Omega\text{-cm}]$ 에서 약 10%가 발생하는 것을 제외하고는 모두 3%미만의 오차가 발생함을 알 수 있다. 체적 저항율이 $10^9 [\Omega\text{-cm}]$ 에서 허수부의 오차가 약 10% 발생하였지만 허수부의 전위값이 실수부 전위값에 비해 그 크기가 매우 작으므로 허수부의 오차를 무시할 수 있다. 따라서 체적 저항율을 변화시켰을 경우 유전체 외부에 나타나는 전위값은 해석해와의 비교에서 오차가 작은 범위 안에 있으므로 계산된 전위·전계값을 신뢰할 수 있다.

2. GIS 내부 전계 분포해석

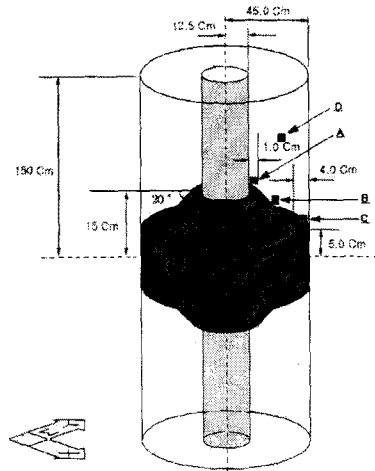


그림 3 GIS 계산 모형

그림 3과 같은 길이 300cm의 GIS 내부 도체에 100[kV] 전압을 인가했을 경우의 도체표면, 절연체 표면 등 GIS 내부의 전위, 전계를 계산하였다. 도체를 지지하는 절연체는 예측시 수치로 유전율을 3으로 하였고, 가스 절연체는 유전율을 1로 가정하였다. 전극을 지지하는 고체 절연체의 체적 저항율은 $10^7 \sim 10^{15} [\Omega\text{-cm}]$ 의 경우를 고려하였다.

표 2는 고체절연체의 유전율만 고려한 경우와 고체절연체의 체적 저항율을 고려한 경우에 그림 3의 고체 절연체 표면인 A, B, C 위치의 전계를 나타낸 것으로 A는 전압 인가도체 부근의 고체 절연체 표면, B는 전압 인가도체와 접지도체 중간 부분의 고체절연체 표면, C는 접지 도체 부근의 고체 절연체 표면을 각각 나타낸다.

표 2 체적 저항율 변화에 따른 정상 상태의 고체 절연체 각 위치별 표면 전계 비교

계 산	유전율	체적 저항율 [$\Omega\text{-cm}$]	전계의 세기[kV/cm]		
			A 위치	B 위치	C 위치
1	3	∞	5.5456	3.4492	2.6139
2	3	10^{14}	5.5456	3.4492	2.6139
3	3	10^9	5.5441	3.4540	2.6191
4	3	10^7	5.2532	5.2500	4.5016

표 2에서와 같이 유전율과 체적 저항율을 고려한 경우에서는 체적 저항율이 $10^9 [\Omega\text{-cm}]$ 이상의 경우에는 유전율만을 고려한 경우와 거의 같은 값을 나타내는 것을 알 수 있으며 체적 저항율이 $10^7 [\Omega\text{-cm}]$ 일 때는 고체 절연체의 각 부분에서 전계의 변화가 나타나는 것을 알 수 있다. 체적 저항율이 $10^7 [\Omega\text{-cm}]$ 일 때 전계의 세기가 가장 크게 변화를 나타낸 위치는 접지도체와 고체 절연체가 접하고 있는 C 위치로 전계의 세기가 약 72% 정도 증가함을 알 수 있다. 이것은 체적 저항율의 감소로 비교적 전계값이 작게 나왔던 접지 도체 쪽의 전계의 세기가 증가하여 전체적으로 고체 절연체 표면에서 비슷한 전계가 나타났기 때문이다. 또한 상대적으로 접지 도체 쪽으로부터 먼 위치인 B 위치에서의 전계의 변화는 약 52%정도 증가하였으며, 전압인가 도체 쪽인 A 위치는 반대로 약 5% 정도 감소함을 보였다.

GIS에서 고체 절연체로 사용되는 에폭시 수지는 정상 경우에는 체적 저항율이 약 $10^{12} \sim 10^{17}(\Omega\text{-cm})$ 이므로 유전율만을 고려한 경우와 같은 결과로 접지 도체 쪽으로 갈수록 전계의 세기가 약해지는 것을 알 수 있었지만 오손으로 인해 체적 저항율이 $10^7(\Omega\text{-cm})$ 정도로 감소하는 경우에는 접지 도체쪽 전계의 세기가 커져 연면 방전의 원인이 될 수 있음을 알 수 있었다.

그림 4는 그림 3의 D위치인 가스절연체 부분(중심좌표 $x=25\text{cm}$, $y=0.5\text{cm}$, $z=170.5\text{cm}$)에 가로, 세로, 높이가 각각 1cm인 정육면체 금속이물질이 있을 때, 고체 절연체의 유전율만을 고려한 경우, 금속 이물질 주변 ($x=22.5 \sim 27.5\text{cm}$, $y=0 \sim 1\text{cm}$, $z=171.1\text{cm}$)에 나타나는 전계의 세기를 표현한 것이다. 이 그림에서 x 좌표의 왼쪽은 전압인가 도체쪽이고 오른쪽은 접지 도체쪽을 의미한다. 또한 그림의 A는 금속 이물질과 조금 떨어진 전압인가 도체 부분이며, B는 금속 이물질의 오른쪽 주변을 나타낸다.

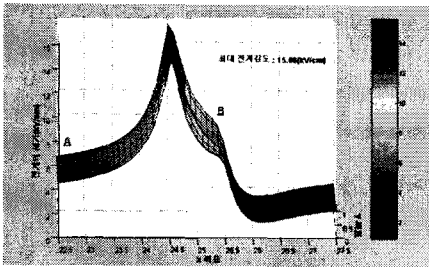


그림 4 고체 절연체의 유전율만을 고려한 경우 금속 이물질 주변의 전계분포

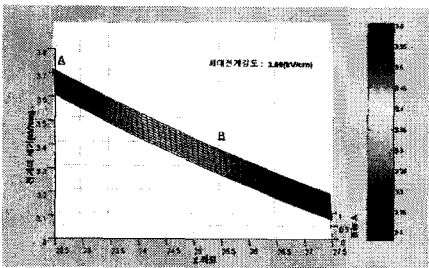


그림 5 고체 절연체의 유전율만을 고려한 정상 상태의 가스 절연체부분의 전계 분포

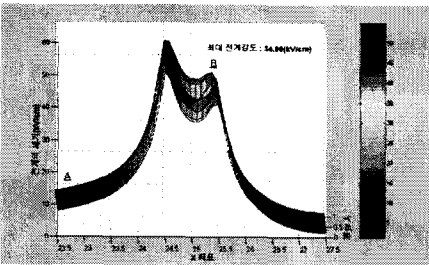


그림 6 체적 저항율이 $10^7(\Omega\text{-cm})$ 인 경우 금속 이물질 주변의 전계 분포

그림 5는 그림 4의 동일한 조건에 금속 이물질을 제거하였을 때 가스 절연체의 같은 위치에서 나타나는 전계

의 세기를 표현한 것으로 $3.1 \sim 3.6(\text{kV/cm})$ 의 균등한 전계가 형성된 형성됨을 알 수 있다.

그림 4에서 알 수 있듯이 금속 이물질이 존재하면 전계의 세기가 최대 약 $15.66(\text{kV/cm})$ 로 그림 5의 같은 위치에서 전계의 세기 보다 약 3.6배 증가한 것을 의미한다. 이와 같이 금속 이물질의 유입으로 인해 금속 이물질 주변에서는 전계가 급속히 커지고 또한 전계가 급속히 낮아지는 곳과의 비가 약 17인 불평등 전계 분포가 발생한다는 것을 나타내는 것으로 이로 인해 GIS 내부의 절연파괴가 쉽게 진행될 수 있음을 예상할 수 있었다.

그림 6은 그림 4와 같은 조건에서, 고체 절연체의 오손을 고려하여 체적 저항율이 $10^7(\Omega\text{-cm})$ 인 경우 금속 이물질 주변의 전계의 세기를 나타낸 것이다. 그림 4의 유전율만을 고려한 경우와 최대 전계의 세기를 비교해 보면 크기가 약 2.5배 증가하였으며, 금속이물질의 유입이 없는 경우보다는 같은 위치에 약 15.3배 증가하였다. 또한 그림 4와는 달리 B부분에서도 높은 전계가 발생하는 것을 알 수 있었고, 또한 A부분에서도 전계가 약 1.8배 증가하였다. 이와 같이 고체 절연체의 오손이 발생하여 체적 저항율이 $10^7(\Omega\text{-cm})$ 정도로 낮아지면 금속 이물질 주변 및 가스 절연체 전체의 전계 분포를 불균일하게 만들어 더욱 더 쉽게 GIS 내부의 절연파괴가 진행된다는 것을 예상할 수 있었다.

4. 결 론

GIS의 고체 절연체로 사용되고 있는 에폭시 수지는 유전율 뿐만 아니라 저항성분을 가지고 있으므로 본 연구에서는 체적 저항을 고려하여 전계 계산을 할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 계산 결과로, 고체 절연체 표면의 전계 분포는 체적 저항이 $10^9(\Omega\text{-cm})$ 이상 일 때는 유전율만 고려한 경우와 동일하였으나 고체 절연체 표면이 오손으로 인해 체적 저항이 $10^7(\Omega\text{-cm})$ 로 된 경우는 접지 도체와 고체 절연체가 접하고 있는 위치에서 전계의 세기가 약 72% 정도 증가함을 알 수 있었다. 또한 금속 이물질의 결합이 발생한 경우도, 체적 저항율이 $10^7(\Omega\text{-cm})$ 일 때 유전율만 고려한 경우보다 최대 전계의 세기가 약 2.5배 증가함을 알 수 있었다.

본 연구는 한국전력공사에서 지원한 기초전력공학 연구소 98-중-01 과제로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- (1) 민 석원, 김 정부, "코로나 케이지를 이용한 765 kV 초고압 송전선 다중 도체방식 선정", 대한전기학회 논문지 제542권 7호, 84-94, 1993.
- (2) 민 석원, 박종근, "코로나 잠음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구", 대한전기학회 논문지 제39권 5호, 508-515, 1990.
- (3) S.W. Min, J.K. Park, J.B. Kim, "Conductor Bundle Geometry Optimization in view of Conductor Surface Gradient", IEE Japan, 111-B, pp.1065-1072, 1991.
- (4) 김 용준, 민 석원, 김 응식, "일반 3차원 표면전하법을 이용한 GIS 내부 전계 해석", 대한전기학회 1999년도 방전·고전압 연구회 춘계 학술 발표회, pp.243-247, 1999.
- (5) 김 용준, 민 석원, 김 응식, "일반 3차원 표면 전하법을 이용한 금속 이물질이 유입된 GIS 내부 전계 해석", 대한전기학회 1999년도 하계 학술대회 논문집, pp.2117-2119, 1999.
- (6) 민 석원, 김 용준, 김 응식, "금속 이물질 크기 변화에 따른 GIS 스페이스 표면 전계 분포 영향 해석", 대한전기학회 2000년도 방전 및 고전압연구회 춘계 학술 발표대회 논문집, pp.94-97, 2000.