

362kV GIS 차단부 3차원 전계해석 및 스페이서에 부착된 파티클의 영향 분석

류성식, 석복렬, 이형구, 김용한, 송태현, 최영찬
현대중공업 기계전기연구소

3 Dimensional Electric Field Analysis for 362kV GIS and Analysis on the effect of particle attached on spacer

Sung-Sic Ryu, Bok-Yeol Seok, Hyeong-Goo Lee, Yong-Han Kim, Tae-Hun Song, Young-Chan Choi
HEMRI, Hyundai Heavy Industries CO., LTD.

Abstract - In this Study, the insulation safety for Closing Resistor and Disconnect Switch(DS) of 362kV GIS was estimated through 3 dimensional electric field analysis. In addition, the basic study to secure the electric insulation design technique was carried out through the research on the effect of a metallic particle which is generated in the GIS.

As a result of 3 dimensional electric field analysis, it was found that the insulation capability of Closing Resistor and DS of 362kV GIS is stable electrically. Also, the fundamental data to improve the insulation capability of spacer was obtained by analyzing the maximum electric field according to the attached angle of a metallic particle which is attached on the surface of a spacer.

1. 서 론

GIS 등의 초고압기기는 고전압·대전력용으로 사용되는 특성상 부분방전 등에 의하여 절연내력이 약화되는 경우에는 강한 Arc의 발생 등에 의하여 절연파괴사고에 이를 확률이 높아지며, 이와 같은 절연사고는 초고압기기의 고체절연물이나 금속부품에 심각한 손상을 주어 수명을 크게 단축시킬 뿐만 아니라 대형사고로 연결되어 막대한 복구비용을 발생시킬 수 있다. 따라서 GIS 등의 초고압 기기를 설계할 경우에는 사전에 각 기기가 충분한 절연내력을 가지도록 고려하여야 한다. 이러한 GIS의 설계를 위해서는 GIS의 각 구성부분에 대한 전계해석 및 GIS 내부의 SF₆ 가스 압력에 따른 절연성능 등에 대한 평가가 사전에 이루어져야 하며, 이는 제품제작을 위한 설계시간 및 비용 등에 대한 경제성 및 제품에 대한 신뢰성을 확보로 직결된다[1]. GIS 등의 고전압기기에 대한 전계해석의 경우에, GIS 구조의 특성상 일부 부품들은 2차원 축대칭으로 형상을 모델링하여 전계해석을 수행하여도 절연해석에 있어서 큰 문제가 없는 경우가 있기는 하지만, 2차원 프로그램으로는 모델링이 불가능하거나 정확한 해석결과를 얻기가 곤란한 경우가 많다. 따라서 GIS 등의 초고압기기 등에 대한 정확한 전계해석 결과를 얻기 위해서는 3차원 모델링을 통하여 GIS의 각 부분품들에 대하여 정확하게 모델링을 하여야 할 필요성이 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 상용 전·자계 해석 프로그램인 Maxwell 3D를 이용하여, 362kV급 GIS를 대상으로 전기절연사고가 발생하기 쉬운 곳 중의 하나인 Closing Resistor부와 DS부를 대상으로 하여 3차원 전계해석을 통한 설계의 절연안전성을 분석하였다. 또한, 가스절연 초고압 기기의 주사고원인의 하나인 금속성 파티클이 스페이서 근방에 혼입되었을 경우에, 파티클의 부착각도에 따른 전계해석도 병행하여 진행하였다.

2. 본 론

2.1 전계해석 조건

전계해석을 위하여 선정한 매질들의 상수는 가능한 한 실계조건과 유사하게 설정하였다. 즉, 스페이서의 재질은 유전율 4.4인 에폭시로 선정하였으며, 내부기체는 유전율이 1인 SF₆로 하였다. 인가전압은 362kV급 GIS에 적용되는 규정치를 따라, 정격 뉴임펄스 전압으로써 극간에는 1175(205)^{1.1}kV, 상-대지간에는 1175kV를 입력하였다.

2.2 362kV 차단부 전계해석 결과

362kV Closing Resistor는 GIS 차단부의 주접점의 아래 부분에 부착되어, 별별 콘덴서와 마찬가지로 극간에 발생하는 TRV를 억제시켜 SLF 차단성능을 향상시키는 역할을 한다. 그러나, 이러한 Closing resistor부는 차단시 아크의 발생 등으로 인하여 차단기 내부에 금속성 파티클이 발생하기 쉽고 이러한 파티클은 절연파괴의 주요 원인의 하나로 작용하고 있다. 그러므로, 이와 같은 절연파괴의 확률이 높은 부분에 대하여 정확한 전계해석을 통한 절연설계가 요구된다.

그림 1은 362kV 50kA 4000A 차단부에 대한 전계해석 결과로써 주로 Closing Resistor의 고정접점의 접촉면에서 최대전계가 나타났으며, Closing Resistor의 실드(Shield)부에도 전계가 높게 집중되고 있다. 해석결과에 나타난 최대전계는 당시기준으로 기압 5kgf/cm²·G에서 허용전계기준치의 0.88 p.u.으로 나타나 안정된 절연특성을 가지는 것으로 나타났다.

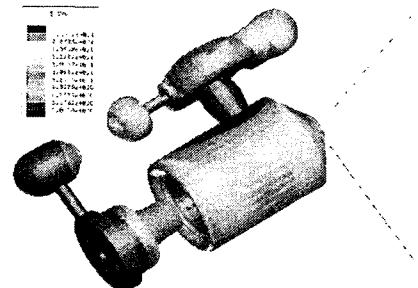


그림 1. 362kV 차단부에서의 전계분포

차단부와 마찬가지로 GIS의 ES/DS부도 접촉자의 구동 또는 제작시 조립과정의 불량 등에 의하여 금속성 파티클 등이 발생할 수 있으며, 이러한 파티클 등이 차단기 공간 내부를 자유운동하거나 스페이서 또는 도체부에 부착시 차단기의 절연내력을 크게 약화시킬 수 있다. 특히, 스페이서가 설치되어 있는 부분은 절연가스, 고압

1) 팔호 내의 수치는 피시험 단자의 반대측 단자에 인가된 상용주파전압의 파고치(-)이다.

도체부 및 고체절연물들에 의한 삼중점(tripple junction) 등의 복잡한 절연구조를 형성하고 있어서 파티클 등의 오염으로 인하여 절연특성이 크게 저하될 수 있다.

그림 2는 362kV 50kA 4000A 차단기의 DS부에 대한 3차원 전계해석의 결과이다. 그림에서와 같이 DS 가동점과의 Shield부에 전계가 가장 높게 분포되는 것을 알 수 있다. 또한, 스페이서에서도 내부 중심도체와 외함간의 전위차로 인하여 전계가 비교적 높게 분포되고 있음을 알 수 있다. 해석결과에 나타난 최대전계는 당시기준으로 기압 $4.5 \text{ kgf/cm}^2 \cdot G$ 에서 허용전계기준치의 0.34 p.u.로 나타나 상당히 안정된 절연특성을 가지는 것으로 나타났다.

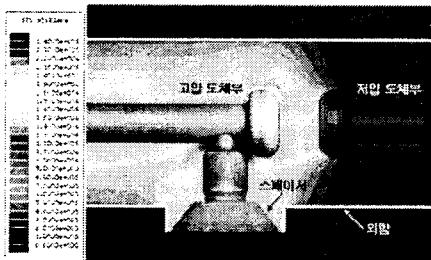


그림 2. 362kV GIS DS부 전계해석결과

실제로, GIS 내부의 절연실패의 주요한 원인들은 고체절연물인 스페이서 표면을 따라 발생하는 아크로 인하여 발생하는 경우와 스페이서와 같은 고체절연물 표면에 금속성 파티클의 부착으로 인한 고전계의 발생으로 인한 경우가 대부분을 차지한다. 그러므로, GIS 내부의 절연실패를 방지하기 위해서는 GIS내부에 존재하는 스페이서의 전계를 정확하게 알 필요가 있다. 그림 3은 DS부에 위치한 스페이서 표면에서의 전계분포를 구한 해석결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 스페이서의 상단부분의 전계분포가 하단부분보다 높음을 알 수 있다. 특히, 전압이 인가되는 도체부, 가스 그리고 스페이서가 접하는 삼중점에서 전계가 가장 높게 분포되고 있다. 이러한 삼중점에서의 최대전계는 당시의 허용전계기준치의 약 0.55 p.u.로 나타나 안정된 절연특성을 보였다. 하지만 삼중점은 여러 가지 원인들에 의하여 그 절연특성이 크게 약화될 수 있는 부분이므로 형상개선 등을 통한 적극적인 절연성능 향상대책이 고려되고 있다.

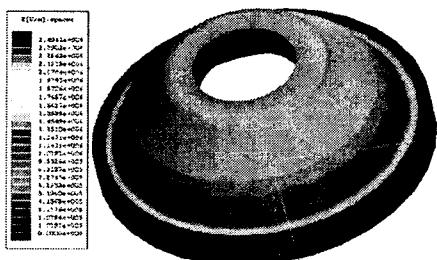
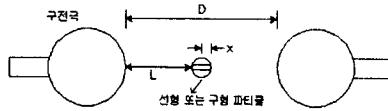


그림 3. 스페이서 표면에서의 전계분포도

2.3 파티클 혼입에 대한 전계해석 결과

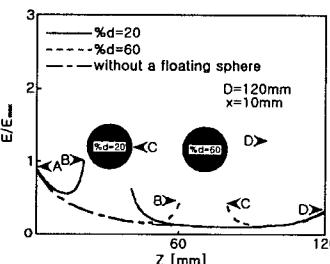
외함 내에 존재하는 금속성 파티클은 파티클에 가해지는 전계에 의한 정전력과 파티클의 중량, 가스내 점성저항의 상호영향하에 놓여진다. 그림 3과 같은 구전극 사이에 구형 또는 선형의 파티클이 존재하는 경우에 파티클에 의한 전계분포는 다음과 같다.



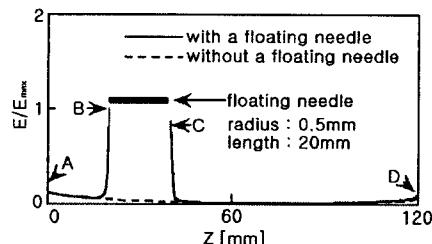
여기서, D : 구전극 사이의 전체거리
 L : 전압인가 구전극으로부터 선형 또는 구형 파티클까지의 거리
 x : 선형 또는 구형 파티클의 반경
 $\%d = \frac{L}{D-2x}$

그림 4. 자유도전성 파티클이 포함된 전극계

그림 5는 그림 4와 같은 전극계에서 구형 및 선형성 파티클이 존재할 경우, 파티클을 양단에 집중되는 전계분포를 보여준다. 그림 5(a)의 구형 파티클의 경우를 살펴보면 자유도전성 파티클이 없는 경우에 비하여 구형 파티클이 존재하는 경우 파티클 양단에 전계가 집중되는 것을 볼 수 있으며, 특히 $\%d=60$ 인 경우보다 $\%d=20$ 인 경우와 같이 파티클이 전압이 인가되는 구전극에 가까이 존재할수록 파티클 양단에 집중되는 전계가 높다는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 5(b)의 선형 파티클의 경우에도 파티클 양단에 높은 전계가 집중된다는 것을 알 수 있다[3, 4].



(a) 구형 파티클



(b) 선형 파티클

그림5. 구전극 사이에서 자유도전성 파티클의 전계분포

이와 같은 파티클들은 자유공간에서의 운동상태와 전계의 세기 등에 따라 스페이서 연면에 여러 가지 형태로 부착될 수 있다. 즉, 선형 파티클을 같은 경우는 스페이서 연면의 바닥에 눕거나 기립한 상태로 부착될 수가 있다. 각 부착상태에 따라 최대전계가 나타나는 파티클 끝단에서의 최대전계가 달라질 수 있으며, 이렇게 파티클 끝단에 집중되는 전계가 절연파괴에 중요한 역할을 하게 된다. 이상과 같은 이유로, GIS에 파티클이 혼입되었을 때 스페이서의 여러 위치에 파티클이 부착될 경우, 특히 파티클이 스페이서에 부착시 파티클의 부착 각도에 따른 영향을 살펴볼 필요가 있다.

그림 6은 그림 2의 DS부에 위치한 스페이서의 표면에 부착된 파티클의 위치를 보여준다. 즉, 그림에서와 같이 도체부와 가까운 스페이서의 상단부분과 스페이서

의 중앙부분, 그리고 외곽과 가까운 스페이서의 하단부분에 혼입된 것으로 모델링하였다. 파티클은 선형 파티클로 모의 되었으며, 스페이서에 부착되는 파티클의 부착 각도를 달리하여 이에 대한 전계해석을 수행하였다. 즉, 그림 7에서와 같이 선형 파티클이 수평으로 누워 있는 상태를 기준(0°)으로 하여 반시계 방향으로 파티클의 부착 각도를 45° , 90° , 135° 등으로 바꿔가며 각각에 대한 전계해석을 수행하였다.

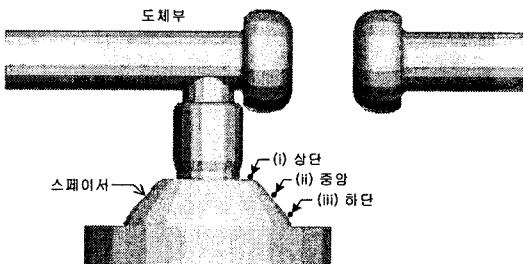


그림 6. 스페이서 표면의 파티클의 부착 위치

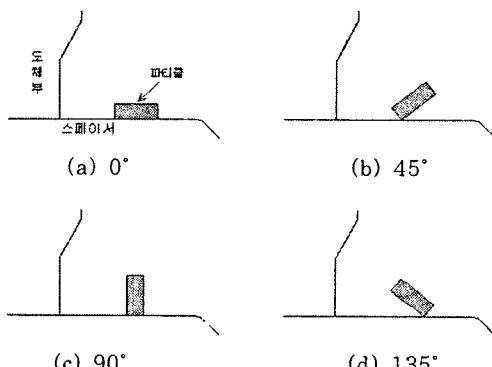


그림 7. 파티클의 부착 각도

그림 8은 그림 6에 보여진 파티클의 각각의 부착 위치에 그림 7에서 보여진 부착 각도별로 파티클 근방에 최대전계를 구한 결과이다. 파티클이 스페이서의 상단(그림 6의 (i)의 위치)에 존재할 경우, 파티클이 135° 의 각도를 가지고 부착한 경우에 파티클 근방에 집중되는 최대전계값이 가장 높게 나타났으며 45° 의 각도에서도 비교적 전계값이 높게 나타났다. 반면에 파티클이 0° 나 180° 의 수평방향으로 누워 있는 경우에는 파티클 근방에서의 최대전계가 비교적 낮은 값을 가지며, 파티클이 90° 로 수직으로 부착한 경우의 최대전계가 가장 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 파티클이 스페이서의 중앙(그림 6의 (ii)의 위치)에 존재할 경우, 파티클이 상단에 존재하는 경우에 대한 해석결과에 비하여 부착 각도가 90° 까지는 거의 변화가 없지만, 그 이상에서는 전계가 급격히 증가하여 135° 일 경우에 최대전계가 가장 높게 나타났다. 파티클이 스페이서의 하단(그림 6의 (iii)의 위치)에 존재하는 경우에 대한 해석 결과는 파티클이 스페이서의 상단에 위치할 때의 해석결과를 비교하여 그 패턴이 유사하지만, 전계값은 대체적으로 보다 높게 나타났다. 결과적으로, 파티클의 부착 위치에 관계없이 파티클의 부착 각도가 135° 인 경우에 파티클 끝단에서의 최대전계가 가장 높게 나왔으며 부착 각도가 45° 인 경우의 전계는 135° 인 경우에 비하여 상대적으로 낮게 나타났다. 파티클이 90° 로 수직인 상태의 경우에는 파티클이 스페이서의 상단과 하단에 위치할 경우 가장 낮게 나타났으며, 파티클이 중앙에 위치할 경우에는 비교적 높게 나타났다.

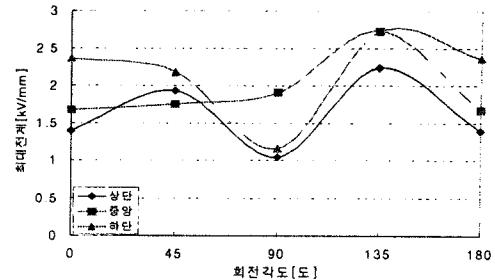


그림 8. 스페이서 표면에서 파티클의 부착위치와 부착각도에 따른 최대전계

그림 9는 스페이서의 상단의 도체부로부터 스페이서의 연면을 따라 파티클의 기립각도별 최대전계를 구한 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이, 스페이서의 상단과 하단에서는 파티클의 각도가 90° 일 때 전계가 최소로 되고, 스페이서의 중앙부에서는 파티클의 부착각도가 135° 일 때 최대전계가 나타나며 그 외의 각도에서는 대체로 비슷한 전계값을 나타냈다.

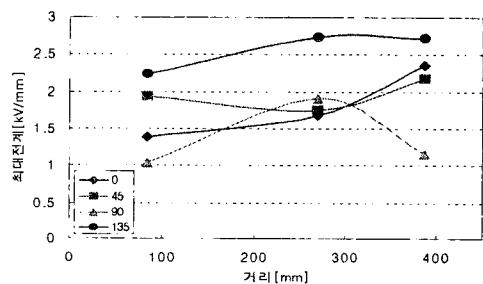


그림 9. 스페이서 표면에서 파티클의 부착 거리에 따른 최대전계

이상의 결과들로부터, 스페이서에 파티클이 부착될 경우 파티클의 부착위치와 부착각도에 따라 파티클에 집중되는 전계가 최소화 될 수 있도록 스페이서 형상에 대한 개선이 이루어져야 할 것이다.

3. 결 론

당사의 362kV 50kA 4000A 차단기의 Closing Resistor부와 DS부를 대상으로 전계해석을 수행한 결과 최대전계가 발생하는 부분을 확인할 수 있었으며, 각각의 허용전계기준치에 대하여 안정된 절연특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한, 스페이서의 여러 위치에 부착된 파티클의 부착 각도에 따른 전계해석을 통하여 최대전계를 발생시키는 파티클 부착상태에 대하여 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전기연구소, “초고압 전력기기 기초 설계기술 개발”, 산업자원부, 2000.
- [2] M. Kubuki, R. Yoshimoto, K. Tanoue and M. Hara, “Breakdown Characteristics in Air Gaps with Artificial Floating Metals under dc Voltage”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, pp. 155-166, February, 1995.
- [3] M. Kubuki, R. Yoshimoto, K. Yoshizumi, S. Tsuru and M. Hara, “Estimation of dc Breakdown Mechanisms in Air Gaps Containing Floating Metallic Particles”, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 1, pp. 92-101, February, 1997.