

3차원 전계해석법을 통한 초고압 GIS차단부 절연성능에 관한 평가

윤정훈, 안희섭, 최종웅, 강성모, 임성삼, 오일성, 이성호, 신영준
(주)LG 산전

The estimation of dielectric performance in GIS using three dimensional electric field analysis

Jeong-Hoon Yoon, Heui-Sub Ahn, Jong-ung Choi, Sung-Mo Kang, Sung-Sam Lim, Il-Sung Oh, Sung-Ho Lee, Young-Jun Shin
LG Industrial Systems

Abstract - 본 논문에서는, 초고압 GIS(Gas Insulated Switchgear)용 GCB(Gas Circuit Breaker)의 3상 배치구조 설계를 위한 상간, 극간, 대지간의 절연성능을 평가하였다. 뇌임펄스 전압과 상용주파 전압인가 시 상간, 극간, 대지간의 절연설계 기준을 근거로 절연설계 안전율을 고려하여 설계에 적용하였다. 수치적 전계 해석법으로 3차원 전계 해석법과 2차원 축대칭 해석법을 이용하여 절연설계 여유율과 현장에서의 절연파괴 시험을 통한 데이터와 비교 분석하였으며, 분석한 결과 절연설계 기준에 적합한 상배치 구조 설계임을 확인하였다.

1. 서 론

가스절연개폐장치는 차단기, 단로기, 접지 개폐기, 변류기 등 대부분의 전력기기를 금속탱크로 밀폐시킨 후 SF₆ 가스를 절연매질로 하여 우수한 절연성능과 차단성능을 확보하고 있기 때문에 운전신뢰성이 높아 전력계통에 많이 설치되고 있으나, 절연파괴에 의한 사고 발생률도 높아지고 있으며, 사고 발생 시 파급효과도 커서 이를 감소 또는 방지하기 위한 다양한 연구가 진행 중이다.

외국의 선진 제작업체들은 기술력을 바탕으로 고신뢰도화, 소형, 축소화된 GIS를 개발하기 위해 지속적으로 노력하고 있다. 따라서 고전압이 인가된 도전부와 접지 탱크간의 거리가 더욱 짧아져 축소에 따른 각종의 절연 문제가 발생하고 있어 이를 효과적으로 해결하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. GIS내 복잡한 형상의 구조물에 대한 전계 강도를 계산하기는 매우 어려우므로, 컴퓨터 이용한 수치 해석적 방법으로 편미분 및 적분 방정식을 이용하거나 라플라스 또는 포아송방정식의 해를 구하여 고전압 설비의 절연설계에 많이 이용하고 있다. 초고압 GIS의 절연설계 시 고려되어야 할 사항으로는 SF₆가스 압력에 따른 상간, 극간, 대지간의 절연성능의 변화, 전극 표면조도 및 면적 효과에 의한 전계강도에 미치는 영향, 부품의 제조 및 조립과정에서 도전성 파티클의 혼입에 의한 영향으로 인한 절연성능의 저하 등 절연 설계 시에는 이를 모든 인자에 대한 사전 검토를 충분히 해야 한다. 이러한 부분들에 대해서는 제품설계 후 시험을 통한 검증만으로는 많은 시행착오와 이에 따른 시간과 비용도 많이 소요되게 된다. 따라서, 초고압 GIS설계 시 각 부분에 대한 기계적인 해석이나 전기적인 해석을 통한 사전 평가 후, 본격적인 기기 설계에 임하게 된다. GIS등의 초고압기기에 대한 전계해석의 경우 차단부내의 아크접점, 주접점, 노즐의 형상과 탱크는 2차원 축 대칭으로 형상을 근사화 하여 극간의 절연성능을 평가하지만 3상 일괄형 배치구조, 스페이스, DS(Disconnecting switch)의 상간이나 대지간 등은 2차원에 비하여 실제 형상과 유사하게 모델링할 수 있는 3

차원 전계 해석을 통하여 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다. 물리적인 정전계 현상들은 눈으로 확인할 수 없으므로 수치해석을 이용하여 그 현상을 모의하고 해석한 결과는 IEC, ANSI등 국제 규격과 국내 규격인 ES 규격을 적용한 시험결과와 비교하여 해석 오차율을 줄이는 방법으로 연구를 진행하고 있으며, 본 논문에서도 초고압 차단부를 2차원 및 3차원 전계해석을 한 결과와 뇌임펄스 내전압 시험 결과와 비교하였다[1].

2. 본 론

2.1 모델링과 경계조건

초고압 GCB의 3상 배치구조를 설계하기 위하여 상간, 대지간, 극간 절연성능을 평가하기 위해 2차원 및 3차원 전계해석을 하였다. 3차원 해석 모델은 그림 1과 같으며 전체 GCB모델 중 상부측의 고정부를 모델링 하였다. 그림 1은 3차원 전계해석을 위한 간략화 모델이다.

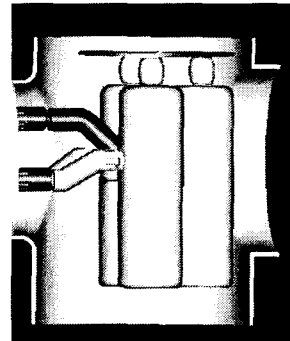


그림 1. 3차원 전계해석 간략화 모델

그림 2는 소호부를 2차원 전계해석을 하기 위한 모델이며 축대칭 구조로 해석을 하였다. 3차원 모델을 통해서 상간, 대지간의 전계해석을 하였으며, 2차원 모델은 극간, 대지간 절연성능을 평가하였다.

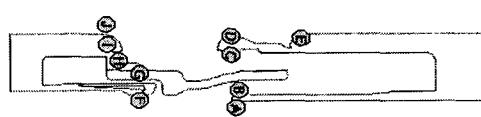


그림 2. 2차원 전계해석 간략화 모델

전원부는 100V, 접지부는 0V의 전압을 인가하였으며, 계산되어진 전계강도에 해석모델에 맞는 정격시험전압을 곱하여 전계강도를 산출하였다. 2차원 모델을 해석

하기 위해 다음과 같은 경계조건을 부여하였다. 차단기는 모두 개극상태에서 모델링하였으며, 외함 0V, 가동부 100V, 고정부 0V를 인가하여 가동부를 계산 하였고, 고정부를 계산하기 위해 외함 0V, 가동부 0V, 고정부 100V의 전압을 인가하였다. 3차원 모델은 3상 일괄형이고 형상이 좌우 대칭구조이므로 A상과 B상에만 전압을 100V씩 인가하여 전계해석을 하였다. 차단기는 투입상태로 모델링 하여 A상에 100V, B, C상에 0V, 외함에 0V를 인가하여 해석한 후, B상에 100V, A, C상, 외함에 0V를 인가하여 계산하였다.

2.2 요소분할

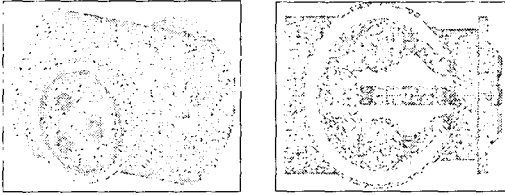


그림 3. 경계요소법에 의한 요소 분할

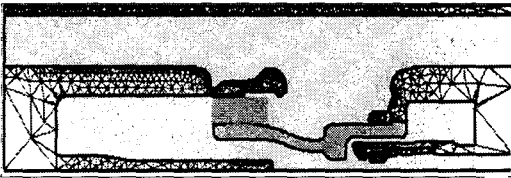


그림 4. 유한 요소법에 의한 요소 분할

해석 모델을 요소분할한 형상을 각각 그림 3과 4를 통해 나타내었다. 2차원 모델과 3차원 모델은 서로 다른 수치 해석 방법을 통해 전계해석을 하였으며 2차원 모델은 유한요소법을 사용하였고, 3차원 모델은 경계요소법을 사용하였다. 경계요소법은 모델형상의 경계나 표면에 해당하는 부분만 요소분할을 하고 분할된 영역만 수치연산을 한다. 하지만 유한요소법은 체적을 요소 분할하므로 그림 3과 같이 차단부 형상 뿐만 아니라 SF₆ 가스로 채워진 공간 부분도 요소분할이 되어 있음을 알 수 있다[2]. 2차원 모델의 요소분할 개수는 20,000개, 3차원 모델은 36,000개로 절대적인 수는 3차원이 많지만 공간적인 측면을 고려할 경우 3차원 공간이 2차원 평면보다는 상대적으로 요소 분할 할 표면이 많다는 점과, 2차원 모델은 차단부 내 구조 형상만 모델링 되어 있지만 3차원 모델은 스페이서와 지판도체, 지지대 등을 고려했다는 점도 고려해 볼 때 요소분할 개수는 상대적으로 적다고 할 수 있다[3].

2.3 전계해석 결과

2차원으로 전계해석한 결과는 표 1에, 3차원으로 해석한 결과는 표 2에 나타내었다. 표 1, 2는 절대압력 6kgf/cm²에서 해석한 결과이다. 표 1에 단차 15mm, 단차 10mm, 단차 0mm는 고정아크접점과 고정 주접점사이의 길이 차이를 나타내며, 길이 차이가 증가할수록 고정아크접점 선단의 전계강도는 감소하고 있으며, 가동아크접점 선단의 전계강도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 가동측 노즐을 지지하는 플랜지 부분의 전계강도도 고정아크 접점과 주접점 사이의 거리가 멀어질수록 증가함을 알 수 있다. 고정아크접점과 주접점 사이의 거리에 따라 가동아크접점 선단과 고정아크접점 선단의 전계

변화에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 접점사이의 거리가 15mm인 경우가 10mm, 0mm인 경우보다 최대 전계값이 낮게 분포되어 이를 설계에 반영 하였다. 표 2는 3차원 전계 해석한 결과이며, 대지간과 상간의 전계강도가 최대인 지점과 이 지점에서의 최대 전계값을 나타낸다. 2차원으로 해석한 D지점과 3차원으로 해석한 B상, 1지점은 고정부 실드 상단으로 해석 결과를 비교해 보면 각각 0.996p.u.과 0.974.p.u.으로 비슷한 결과를 나타내고 있다. 표 2의 대지간 A상 2의 경우 최대 전계는 당사 기준으로 6kgf/cm²(abs)에서 1.065p.u.으로 허용전계 기준치를 초과하고 있다. 위 경우를 제외하고는, 2차원 전계해석을 한 결과 가운데 단차 15mm인 경우와, 3차원 전계해석한 결과는 모두 허용전계 기준치 이하로 안정된 절연특성을 나타내고 있다.

*알파벳은 그림 2 참조

	고정부 전압인가				가동부 전압인가				
	A	B	C	D	F	G	H	I	J
단차15mm	0.875 p.u.	0.911 p.u.	0.996 p.u.	0.996 p.u.	0.964 p.u.	0.968 p.u.	0.534 p.u.	0.815 p.u.	0.883 p.u.
단차10mm	0.971 p.u.	0.982 p.u.	1p.u.	0.985 p.u.	0.940 p.u.	0.964 p.u.	0.530 p.u.	0.826 p.u.	0.879 p.u.
단차0mm	1.189 p.u.	1.234 p.u.	0.996 p.u.	0.996 p.u.	0.925 p.u.	0.961 p.u.	0.534 p.u.	0.819 p.u.	0.883 p.u.

표 1. 2차원 전계 해석 결과

*1 p.u.: 허용전계기준강도

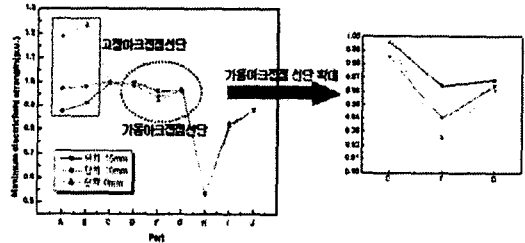


그림 5. 단차 별 차단부 내 2차원 전계해석 결과

구 분	대지간			
	A상 -1	B상 -1	A상 -2	B상 -2
최대 전계값	0.888p.u.	0.974p.u.	1.065p.u.	0.509p.u.
position				
구 분	상간			
	A상 -1	B상 -1	A상 -2	B상 -2
최대 전계값	0.802p.u.	0.488p.u.	0.684p.u.	0.809p.u.
position				

표 2. 3차원 전계해석 결과

ES 150-580 3.2절의 GIS 절연강도를 표 3에 요약하였으며, 동상 주회로 단자간 및 이상주회로간의 절연강도는 대지간 절연강도 이상으로 되어야 한다고 규정되어 있다. 170kV와 72.5kV의 경우 DS 극간은 차단부 대지 및 극간, 상간 절연에 대하여 115%이상으로 규정하고 있다. 362kV의 경우, 극간은 대지간 절연에 비해 115% 이상을 이상간 절연은 대지절연의 150%이상으로 명시하고 있다. 이것은 뇌써지가 이상간에 역극성으로 전파하

여 오는 경우를 상정하고 있다. 일반적으로 분파현상(뇌가 침입한 상과 다른 유도상들에 역극성의 선간과와 동극성의 대지파로 썬어지가 나뉘어져 선로를 전파해 가는 현상)으로 인해 상간 썬어지는 감쇄해 버리게 되므로 상간 절연은 대지절연과 동등하게 처리할 수 있으나 감쇄가 적은 선로와 상간 절연과과의 영향을 고려하여 대지의 150%로 안전하게 설계해야 한다 라고 명시하고 있다[4][5]. 당사도 국내 국제 규격에 따라 절연설계 기준 설정시 상간, 극간, 대지간 각각 일정 기준치 이상의 절연성능을 유지하도록 적용하고 있다.

정격전압 (kV,rms)	상용주파내 전압 (kV, 실효치)		뇌임펄스 내전압 (kV,파고치)1.2/50us	
	대지 및 극간 상간	DS극간	대지 및 극간 상간	DS극간
72.5	140	160	325	375
170	325	375	750	860

정격전압 (kV,rms)	상용주파내 전압 (kV, 실효치)		뇌임펄스 내전압 (kV,파고치) 1.2/50us		개폐 임펄스 내전압 (kV,파고치) 250/2500us	
	도전부와 대지간	동상극간	도전부와 대지간	동상극간	도전부와 대지간	동상극간
362	450	520	1175	1175(205)	950	800(285)

표 3. 한전 시방서에 명시되어 있는 GIS의 절연장도

2.4 뇌임펄스 내전압 시험

그림 1과 같은 차단부를 제작하여 절연성능을 확인하기 위해 뇌임펄스 내전압 시험을 하였다. 시험은 국제(IEC), 국내(ES) 규격에 따라 시행 하였으며 상간, 극간, 대지간의 성능을 확인 하기 위해 이에 상응하는 결선을 하였으며 spec(정격)시험과 파괴 시험으로 나누어 건조상태에서 정, 부극성 각각 15회씩 연속적으로 인가하였다. 파괴시험은 정격전압에서 시작하여 승강법으로 20kV씩 전압을 증가시키며 진행하였다. Spec 시험결과 A상, B상, C상의 상간, 대지간, 극간 모두 정격전압에서 절연파괴가 발생되지 않았다. 파괴시험을 실시한 결과, 상간, 극간, 대지간이 정격전압의 20%-60%의 여유율을 가지는 절연특성을 나타내고 있다. 표 2에 3차원 해석 결과를 보면 대지간 A상-2의 경우 1.065p.u.으로 허용전계치를 초과하지만 내전압 시험결과 안정된 절연특성을 나타냈다. 상간 파괴 시험시 일정 전압 이상에서도 절연 파괴가 발생되지 않아 전압을 하강하였다. 따라서 상간 파괴 전압은 시험 결과보다 더 높다고 할수 있다. 전압을 내린 이유는, 차단기에 많은 스트레스가 가중되어 다음 단계의 시험에 영향을 미치기 때문에 정확한 다음 시험 결과를 얻기 위함이다.

2.5 뇌임펄스 내전압 시험과 전계해석 결과 비교

뇌임펄스 시험 결과와 2차원 및 3차원 전계해석 한 결과를 표 4에 나타내었다. 시험치 여유율과 해석시 여유율의 차는 정격전압에 대한 파괴전압의 여유율과 해석시 허용전계에 대한 여유율의 차이를 나타낸다. 아래 표에 따르면, 시험 여유율과 해석 여유율의 오차범위가 크개는 15%, 적개는 4% 이내 임을 알수 있다. 차단부내에서 발생될수 있는 여러 사항을 고려하여 해석에 적용할 수 없으므로 해석 결과와 시험 결

과의 오차 발생 확률은 항상 존재하지만 모델 별 시험데이터와 해석 데이터를 축척하여 데이터 베이스화 하면 오차범위를 줄일수 있고 제품 설계에도 많은 도움이 되리라 예상된다.

	(시험치여유율- 해석치 여유율)
상 간	15.4%
극 간	3.8%
대지 간	8.6%

표 4. 뇌임펄스 시험결과와 전계해석 결과 비교

결 론

초고압 GIS 차단부의 상간, 대지간, 극간 절연성능여부를 확인하기 위해 2차원 및 3차원 전계해석을 하였으며 전계해석과 임펄스 내전압 시험을 비교한 결과는 아래와 같다.

1. 2차원 축대칭으로 해석한 결과, 고정 아크점점과 주점점 사이의 거리에 따라 아크 점점 선단의 전계변화에 큰 영향을 미친다.
2. 2차원 및 3차원으로 전계 해석한 결과 상간, 극간은 당사 허용 전계 기준치 이하의 안정된 절연특성을 가지고 있다. 대지간은 1.065p.u.으로 설계 기준치를 초과하지만 뇌임펄스 내전압 시험시 안정된 절연특성을 나타 내었다.
3. 뇌임펄스 내전압 시험으로는 spec시험과 파괴시험을 하였으며, 정격전압 내에서는 상간, 대지간, 극간 모두 절연성능을 확보 하였다. 파괴시험 결과, 정격의 20-60%의 여유율을 확인하였다.
4. 뇌임펄스 내전압 시험과 전계해석 한 결과를 비교해 보면 4%-15%의 오차가 발생하였다.

[참 고 문 헌]

- [1]R. Parraud, "Comparative Electric Field Calculations and Measurements", Prepared by author on behalf of the Working Group 03 of Study Committee 22. Published in ELECTRA, April, 1992.
- [2]J.Lopez-Roldan,P.Ozers Reyrolle, T.Judge,C.Rebizant, R.Bosch,J.Munoz "Experience using the boundary element method in electrostatic computations as a funmental tool in high voltages switchgear design" IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington DC, WA, USA,June 1998
- [3]S. S. Bamji, A. T. Bulinski, K. M. Prasad, "Electric Field Calculations with the Boundary Element Method", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Ottawa, ON, Canada, February 1993.
- [4]한국전기 연구원,"초고압 전력기기 기초 설계기술 개발" 산업자원부. 2000
- [5]한국전기 연구원,"초고압 전력기기의 최적설계를 위한 가스중 절연특성 연구" 과학기술처, 1995