

3차원 전계해석법을 통한 초고압 GIS 상배치 구조에 관한 절연성능평가

윤정훈, 정석영, 최종웅, 강성모, 오일성, 임성삼
(주)LG 산전

Three Dimensional Electric Field Analysis for 3-phase encapsulated Arrangement of GIS

J.H.Yoon, S.Y.Jeong, J.W.Choi, S.M.Kang, I.S.Oh, S.S.Im
LG Industrial Systems

Abstract - 본 연구는, 초고압 GIS(Gas Insulated Switchgear)용 GCB(Gas Circuit Breaker)의 3상 배치구조를 설계 하기 위한 상간, 대지간의 절연성능을 평가하였다. 뇌임펄스 전압과 상용주파 전압인가시 상간, 대지간의 절연설계 기준과 비교하여 절연설계 안전율을 고려하여 설계에 적용하였다. 수치적 전계 해석법으로 3차원 전계 해석법과 2차원 축대칭 전계 해석법을 통해 전계 강도를 비교하였으며 3차원 전계 해석법으로는 경계 요소법(Boundary Element Method)을 사용하는 상용프로그램인 coulomb을 사용하였으며, 2차원 전계 해석법으로는 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하는 Maxwell을 통해 절연성능 평가를 하였다. 마지막으로, 전계 해석을 통해 절연설계 기준에 적합한 상배치 구조 설계를 하였다.

1. 서 론

SF₆가스를 절연매질로 하는 GIS(Gas Insulated Switchgear)는 우수한 절연성능과 차단성능을 확보하고 있기 때문에 운전신뢰성이 높아 전력계통에 많이 설치되고 있으나, 절연파괴에 의한 사고 발생률도 높아지고 있으며, 사고 발생 시 파급효과도 커서 이를 감소도는 방지하기 위한 다양한 연구가 진행중이다.

복잡한 형상의 구조물에 대한 전계분포를 계산하기는 매우 어려우므로, 컴퓨터를 이용한 수치해석적 방법으로 편미분 및 적분 방정식을 이용하거나 라플라스 또는 포아송방정식의 해를 구하여 고전압 설비의 절연설계에 많이 이용하고 있다. GIS의 절연설계 시 고려되어야 할 사항으로는 대지 절연성능, 동상, 극간 절연 성능, 이상간 절연성능, 3상 일괄형에서의 절연성능과 SF₆가스 압력에 따른 절연성능, 전극 표면전도도 및 전극면적의 영향과 이물의 영향, 절연물에서의 절연성능 등 고려해야 할 부분들이 많으며 이 부분들에 대해 제품설계 후 시험을 통한 검증만으로는 많은 시행착오에 따른 시간과 비용이 소요되게 된다. 최근 소전류나 대전류를 평가하기 위한 해석 프로그램 개발에도 많은 노력을 기울이고 있다. 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 형크는 2차원 축 대칭으로 형상을 근사화 하여 극간의 절연성능을 평가하지만 3상 일괄형배치구조, DS(Disconnect switch)의 상간이나 대지간 등은 2차원에 비하여 실제와 더욱 근사화 할 수 있는 3차원 전계 해석을 통하여 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다. 물리적인 정전계 현상들은 눈으로 확인할수 없으므로 수치해석을 이용하여 그현상을 모의하고 해석한 결과는 IEC, ANSI 절연설계 기준에 따른 다양한 시험결과와 비교하여 해석 데이터와의 오차율을 줄이는 방법으로 연구를 진행하고 있다[1].

2. 본 론

2.1 3차원 전계 해석 적용

3상 일괄형 GIS의 차단부의 상간, 대지간의 절연설계를 위하여 IES Coulomb 3D와 Maxell 2D 상용패키지를 사용하여 전계해석을 수행하였다. 전계해석은 차단부가 투입된 상태에서 SF₆ 가스 중에서 허용 전계강도 이하를 유지하므로써 일정한 절연성능을 확보하기 위한 절연설계를 목적으로 하고 있다. 2차원으로 모델링 하지 못하는 복잡한 형상이나 대칭구조가 아닌 경우는 3차원으로 모델링하여 전계 해석을 수행하여야 더 정확한 결과를 얻을 수 있으므로, 본 논문에서도 이동변 삼각형 구조로 2차원(축대칭)로 정확한 모델링이 불가능한 3상 배치구조의 차단부 형상을 경계요소법(Boundary Element Method)을 적용하여 전계해석을 하였으며, 최대전계가 집중되는 부분은 2차원으로 근사화하여 해석하였다.

2.2 경계요소법과 유한요소법의 비교

유한요소법은 전자기 수치해석법에 많이 적용되는 방법으로서 경계요소법과의 차이점을 표 1에 비교하였다 [2].

	IES BEM	FEM
Modeling(3D)		
1.Physical Geometry	exact geometry	artificial discontinuities
2.Mesh	Surface-easy production and inspection	Volume-complex to produce, inspection difficult
3.Size-Mesh Points	N ²	N ³
4.open boundary conditions	automatically satisfied-for source balance or zero potential at infinity	artificial boundaries
5.Non-Linear Material	subarea only where saturation occurs-general solution	unique values for each element
Analysis		
1.Solution Method	Integral solution formulation, iterative solver, Galerkin	partial differential equations
2.Initial Solution	charge/current source	potential(scalar or vector)
3. Parametric Solutions	no remeshing	must remesh
4.Post Processing	integrating-inherent stability	potential derivatives
5.Solution Time	kN ²	N ^{3.5 to 4.5}
6.Error Detection	simple	complex
7.Storage •temporar • final solution	N ² N ²	N ³ N ³

표 1. 경계요소법과 유한요소법 비교

경계요소법(BEM)이란 모델형상의 경계나 표면에 해당되는 부분만 요소분할을 하고 분할된 영역에서만 수치연

산을 하는 방법이다[2]. 경계요소법을 이용한 정전계 해석에는 경계나 표면을 미소하게 분할하여 각 요소의 전하밀도를 구하는 간접경계요소법 혹은 표면 전하법이 있으며, 전하밀도 대신에 경계혹은 표면의 전위와 전계를 적용하여 전하를 구하는 직접경계 요소법등이 있다.

2.3 GIS용 GCB 3상일괄형 상배치 구조 전계 해석
2.3.1 모델링 (modeling)

차단부가 투입되었을때의 실제 3차원 형상은 그림 1과 같으며 전계해석을 위한 근사화 모델은 그림 2에 나타내었다. 형상자체가 복잡할 경우 해석 시 많은 시간이 소요되므로 그림 2와 같이 section 1, 2, 3 으로 분할하여 근사화 모델링하였다. 세 종류의 section에 임의로 A,B,C 상을 정의하여 각각의 section에 고정경계조건(Dirichlet)을 사용하였다. 3상의 배치구조는 이등변삼각형 구조이고 section 2 A,B 상은 좌우가 동일한 형상이 아니므로 해석을 위한 경계조건으로는 section 1의 A상에 100V 인가 시 B,C상은 0V, B상에 100V인가 시 A,C상에 0V를 인가하였으며, section 2의 A상에 100V인가 시 B,C 상은 0V, B상에 100V 인가 시 A, C상에 0V를 인가하였으며, section 3은 A상에 100V, B상에 0V를 인가하였다.

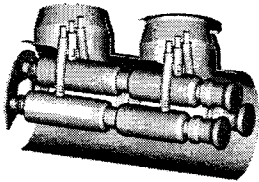


그림 1.차단부 형상



SECTION 1 SECTION 2 SECTION 3
 그림 2.근사화 형상

2.3.2 요소분할(Discretization-element)과 등전위선 (Electric potential)

실제 차단부 형상은 110,000만개의 요소가 분할되었으며 section 1은 20,000개 section 2는 26,000개 section 3은 37,000개의 요소가 분할된 형태가 그림 4이다. 경계요소법은 요소분할시 모델형상 표면(surface)을 분할하지만, 유한요소법은 체적(volume)을 요소분할하므로 경계요소법이 상대적으로 적은 수의 요소가 분할되어 생성된다. 그림 3은 근사화모델에 대한 등전위선 분포를 나타내고 있다.

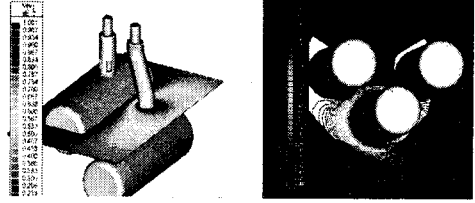
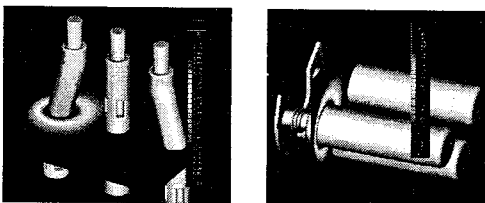


그림 3.등전위선 분포

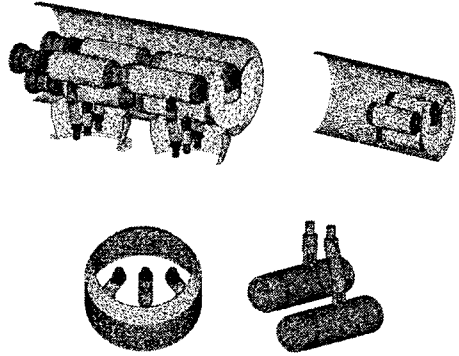


그림 4.요소분할

2.3.3 전계해석 결과

3차원 좌표공간에 임의의 plane을 만들어 section 1은 Y축으로 section 2, 3은 Z축으로 이동시키며 절연성능을 평가하기 위해 필요한 데이터를 추출하였다. 전계 해석으로부터 구한 데이터는 절연설계 기준에 따라 상용주파 인가시와 뇌임펄스 인가시로 구분하여 표 2에 결과를 표시하였다.IEC 60694규격에 따라 상용주파수와 뇌임펄스를 인가전압으로 하여 계산하였다. 그림 5는 대지간과 상간으로 나누어 상간에 section에 1,2,3,4 대지간은 1,2,3,4,5를 적용하여 그래프로 표현하였다. 대지간 3지점과 상간 3지점에서 최대점을 나타내고 있다.

	대지간				상간				
	section 1		section 2		section 1		section 2		section 3
뇌임펄스	A상(1) 100V	B상(2) 100V	A상(3) 100V	B상(4) 100V	A상(1) 100V	B상(2) 100V	A상(3) 100V	B상(4) 100V	A상(5) 100V
인가	0.62p.u	0.73p.u	0.89p.u	0.57p.u	0.75p.u	0.87p.u	0.91p.u	0.51p.u	0.81p.u
상용주파수	A상 100V	B상 100V	A상 100V	B상 100V	A상 100V	B상 100V	A상 100V	B상 100V	A상 100V
수인가	0.57p.u	0.66p.u	0.81p.u	0.52p.u	0.68p.u	0.8p.u	0.83p.u	0.46p.u	0.74p.u

표 2.대지간과 상간 전계강도 비교

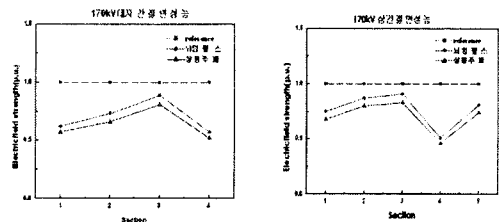


그림 5.뇌임펄스와 상용주파인가시 전계강도 비교

차단부 각 부분의 형상에 따라서 최대 전계값의 차이가 발생되지만 그림 6에서 보듯이 대기간 A, 상간은 B, C 상에서 에너지가 집중하여 최대 전계값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 근사화 모델링한 section 2의 A 지점은 실제 형상과 차이를 보이고 있으며 도체부와 외함과의 거리가 실제보다 가혹하게 모델링되어 해석한 절연설계기준 안전을 보다는 더 높은 절연내력을 가질것으로 추측된다. 전계 해석 결과, 상용주파수와 뇌임펄스 전압 인가시 상간, 대기간 모두 절연설계 기준에 부합되는 절연내력을 확보할 수 있다는 것을 알게 되었다.

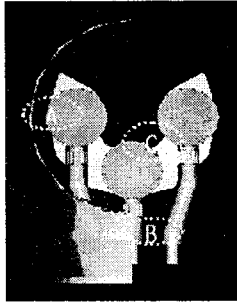


그림 6.3차원 전계해석 후 최대전계 지점

2.3.4 2차원과 3차원 전계해석 비교

그림 7의 좌측에 있는 3차원 차단부 형상을 수직 방향으로 잘라서 우측과 같이 2차원으로 모델링(cartesian)한 후 정전계 해석을 수행하였다. A B C D E F의 각 지점들을 3차원으로 해석한 결과와 비교하였다.

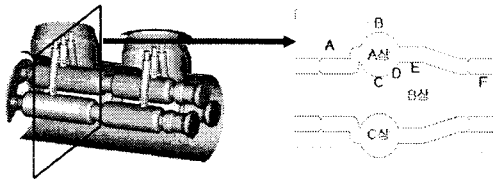


그림 7.근사화한 2차원 형상

2차원과 3차원 전계해석 결과를 비교해 보면, 그림 8에서와 같이 3차원 전계해석 값이 더 크다는 것을 확인할 수 있으며 해석 전계값의 오차율은 형상마다 차이가 있으며 최대 오차율은 24.6%였다.

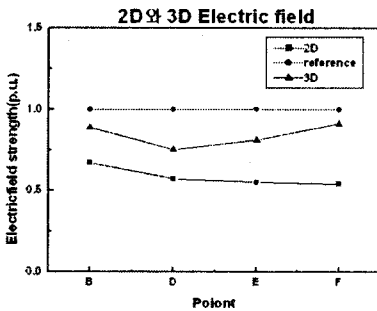


그림 8.2차원과 3차원 전계해석 결과 비교

중심도체에서 연결되어 지관부로 나가는 도체부분인 F 지점이 3차원 해석결과 최대지점이지만 2차원 해석결과는 비교적 낮은 전계값을 나타내고 있다. F지점은 2차원 의 경우, 유한한 크기의 평등 전계를 가지는 전극구조의

형태로 수치해석을 하지만 실제 3차원형상은 원통도체들 사이에 존재하는 불평등 전계 이므로 3차원으로 고려해야 보다 정확한 해석결과를 얻을수 있을것이라 추측된다. SF₆ 가스로 절연된 GIS는 전계완화를 위한 방법으로 도체는 동축 원통구조이고, 최종 끝단은 동심 도체구 구조로 되어 있다. 단상의 경우, 동축원통구조에서 중심 도체 표면의 전계를 최소화 하기 위한 r₁과 r₂의 관계는 식 1과 같이 계산할 수 있으며, 3상 일괄형인 경우는 아주 복잡한 형태의 계산식이 산출된다. 따라서 2차원으로 모델링하여 수치해석할 경우 해석의 오차가 발생할 수 있다.

$$V = E_{\max} r_2 \frac{r_1}{r_2} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (1)$$

r₁: 내부도체의 반지름

r₂: 외함의 반지름

그림 6의 C지점을 3차원으로 해석할 경우 평행한 원통 구조로 식 2와 같이 계산할 수 있지만 2차원으로 해석할 경우 두 개의 평판전극 구조나 축대칭으로 근사화 모델링을 해야 하므로 실제 형상과는 차이가 발생되므로 전계해석의 결과도 정확성이 감소될것으로 예측된다.

$$E = \frac{V}{S} \frac{\sqrt{\left(\frac{S}{2r}\right)^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2}}{\left(1 + \frac{y}{r} - \frac{y^2}{rS}\right) \ln\left(1 + \frac{S}{2r} + \sqrt{\left(\frac{S}{2r}\right)^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2}\right)} \quad (2)$$

S : 도체사이의 거리

r : 원통도체의 반지름

V : 인가전압

2차원으로 전계 해석한 결과도 절연설계 기준에 준하는 최소안전율을 이상을 확보하고 있음을 확인하였다.

3. 결 론

GIS 3상 일괄형 배치 구조를 갖는 차단부의 절연내력 확보 여부를 해석하기 위해 3차원 전계 해석과 2차원 전계 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 3차원 전계해석의 경우, 경계요소법은 유한요소법에 비해 요소분할 개수는 적지만, 매트릭스 생성수가 많아서 해석 시간은 더 소요된다.

2. GIS 차단부 전계해석을 수행한 결과, 상간 대기간 모두 절연설계 기준 허용범위안에 포함된다.

3. 해석 결과, 24.6%의 3차원 해석값이 높으며 실제 형상도 더 정확하게 구현되므로 2차원 해석값보다 정확한 해석 결과라 예상된다.

4. 2차원으로 구현하기 복잡한 형상이나 대칭구조로 해석이 불가능한 경우 3차원으로 정전계해석을 해야 정확한 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

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. Rehizant, 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. Barnji, A. T. Bulinski, K. M. Prasad, "Electric Field Calculations with the Boundary Element Method", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Ottawa, ON, Canada, February 1993.