

# 초고압 GIS 접지시스템에서 낙뢰 및 고장에 의한 과도특성 해석

이형수\*, 심건보\*\*, 김정훈\*\*, 정상진#

\* 한국 산업 안전연구원  
\*\* 홍익대학교 공과대학 전기계어공학과  
# 한전 전력연구원

## Transient Characteristics of GIS Grounding Systems by Lightning and Fault

Hyung-Soo Lee, Keon-Bo Shim, Jung-Hoon Kim, Sang-Jin Chung

\* Industrial Safety Research Institute, KISCO  
\*\* Dept. of Electrical & Control, Hong-ik University  
# KEPRI, Dept. of Power System

### ABSTRACT

In performing lightning and fault studies in GISs, it is of great importance to accurately model the conductor network consisting of the grounding systems and overhead conductor structures. In particular, the overhead grounded pipe enclosures of the GIS should be appropriately modelled. In this paper, the overhead pipe enclosures of a 500 kV SF<sub>6</sub> breaker and substation grounding system are presented in detail. During a phase-to-ground fault, scalar potentials and electromagnetic fields are computed at different frequencies for various conductor network configurations is defined by varying the number of conductors used to represent the pipes at different frequencies are obtained. Such knowledge will be very useful in reducing computation time for a transient ground potential rise study which will be performed in the future.

### 1. 서론

최근에 전력시스템 설비는 대용량화, 도시기능의 고도화 및 환경적인 문제 등과 연계되어 필연적으로 소형화된 대용량의 설비가 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족시켜주는 SF<sub>6</sub> 절연가스를 사용하는 GIS변전소의 등장은 높은 절연성능과 더불어 설비의 소형화 및 고신뢰화를 가능하게 하였다. 그러나, 이러한 GIS가 널리 보급됨에 따라 재래식 변전소와는 다른 새로운 변전소의 설계방식이 필요하게 되었으며, 소형화와 밀폐화로 대표되는 GIS의 특성 때문에 GIS내부에서 낙뢰나 고장과 같은 과도상태가 되면 재래식 변전소에 비하여 심각한 절연사고를 유발하게 된다. 이와 같은 과도상태는 특히 GIS에서의 1선 지락고장에 의한 경우가 많으며, 이 사고는 일반적으로 SF<sub>6</sub> 가스로 채워진 엔클로저와 상도체 사이에서 발생한다. 또한, GIS에서 SF<sub>6</sub> 가스의 절연파괴는 단로기의 조작이나 상도체에 가해지는 뇌격에 의하여 일어나며, 이러한 현상이 발생하면 매우 큰 전류가 변전소의 접지망을 통해 대지로 방류되기에 앞서 변전소내 기기 및 주변 구조물에 흐르게 된다. 이 뇌전류에 의하여 유기되는 전계 및 자계는 대단히 짧은 순간에 큰 값을 나타내게 되며, 이러한 과도 대지전위 상승은 GIS와 다른 2차 기기의 절연파괴, 제어회로상의 보호기기와 및 인명에 위험을 초래하게 된다. 또한, 뇌전류에 의한 전자계는 전자회로의 손상을 초래하여 측정에서 오차를 유발하는 원인이 된다. 따라서, 변전소의 접지시스템 설계시에 이러한 현상이 발생되지 않도록 하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 접지시스템에 유입되는 과도전류의 분포를 정확하게 예측하는 것이 매우 중요한 과제이다.

과도전류의 분포로부터 전위 및 자계의 영향을 해석하기 위하여 본 연구에서는 GIS에 대하여 고장 및 과도상태에서 가공도체와 접지시스템이 이루고 있는 회로망을 모델링하고자 하였으며, 특히 500 kV 급 SF<sub>6</sub> 차단기와 접지시스템을 대상으로 모델링을 하고, 정상상태 및 고장상태의 경우와 1선지락고장시 과도상태에 대하여 여러 주파수 범위에서의 전위 및 자계를 해석적으로 계산하였다.

### 2. 계산 알고리즘

본 연구에서는 유기된 도체에 의한 전계 및 자계의 해석을 위하여 주파수 영역에서의 해법과 시간 영역에서의 해법을 사용하였다.

#### 2.1 주파수 영역에서의 해법

유기된 도체에 의한 전계 및 자계의 해석을 위하여 주파수 영역에서의 해법으로는 지중도체와 가공도체의 영향을 고려하는 장이론(field theory) 해석법이 사용될 수 있다. 이 방법은 임의의 점에서 주입된 전류에 의하여 유기된 가공 및 지중 도체의 전류 분포를 최적화 알고리즘에 의하여 구하는 방법이다. 첫번째의 최적화 알고리즘은 전류에 대하여 선형 제약조건을 갖는 가중 최소 자승법(weighted least square method)에 의하여 전계점의 보조방정식을 푸는 방법이며, 두번째 알고리즘은 저주파 범위와 유전체만을 대상으로 하는 최소화법이다. 두 알고리즘은 모두 기하학적으로 불변이고, 선형제약을 갖는 2차 최소화 문제의 해를 구하는 해법이다. 특히, 저주파에서는 선형제약인 파라데이의 법칙에 의하여 유기 전류가 결정된다. 공기중이나 대지에서의 전계는 주파수, 도체의 위치 및 관측점에 따라서 해석적으로 계산이 될 수 있다.

#### 2.2 시간 영역에서의 해법

시간영역에서의 전계와 자계해석법은 이미 잘 알려져 있는 푸리에 변환법(Fourier Transformation)을 사용하게 된다. 먼저, 뇌써이지의 과도전류를 전진 푸리에 변환(Forward Fourier Transformation)에 의하여 주파수 성분으로 분해를 한 다음에, 표본의 주파수 스펙트럼으로 구성된 유한개의 전류를 선택하면 각각의 선택된 전류에 대하여 접지 그리드의 주파수 영역특성을 평가할 수 있다. 하나의 주파수에 대하여 그리드의 응답을 구하게 되면, 한 점에서 뇌써이지의 과도현상에 의한 시간영역에서의

전계특성은 푸리에의 역변환(Inverse Trasformation)에 의하여 간단히 구할 수 있다. 공간적으로 분포되어 있는 장에 대한 값들은 각 점에 대하여 푸리에 역변환을 반복하면 구할 수 있다. 공간적으로 분포되어 있는 장에 대한 값들은 각 점에 대하여 푸리에 역변환을 반복하면 구할 수 있다. 이 때 계산시간을 줄이기 위해 주파수 스펙트럼을 정확하게 표현할 수 있는 최소화 알고리즘이 필요하다.

### 3. GIS의 모델링

과도전류의 분포를 정확하게 예측하기 위해서는 변전소의 모델링이 필요하다. 그림 1은 정상상태, 고장상태 및 과도상태에서의 전위, 전자계 해석을 위한 500 kV급 GIS의 모델을 나타내고 있다. GIS는 500 kV 3상 도체를 구성하기 위한 파이프와 연결된 접지그리드를 가진 하나의 도체망으로 나타낼 수 있으며, 접지그리드는 30×25 [m]의 메시로 0.5 [m]의 지표아래에 매설되어 있다. 이 때 균질대지이며, 대지저항률은 100 [Ωm], 비유전율 1, 비유전율 1로 가정하였다.

또한, B, C 상 및 A상의 도체는 Y축을 따라 각각 Y=0, 2.5, 5 [m]의 위치에서 파이프의 중앙을 통과하고 있다. 파이프의 반경은 0.3 [m], 길이는 2.5 [m]이다. 파이프의 벽을 5개의 부분으로 나타내고 있으며, 접지그리드에 연결되어 있다.

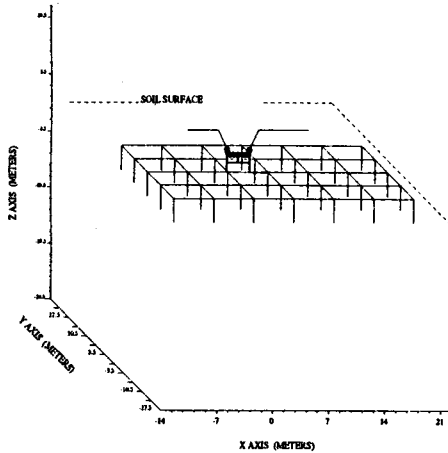


그림 1. GIS 및 접지시스템 모델

## 4. 사례 연구

### 4.1 정상상태 및 고장상태에서의 계산결과

GIS의 각 상에 인가되는 전원전압은  $(500/\sqrt{3})e^{j\phi}$  ( $\phi = -120, 0, 120$ ) [kV]이고, 1000 [A]의 전류가 흐른다고 하면 부하는 288.675 [Ω]이 된다. 삼상 도체는 접지그리드에서 50 [m] 떨어진 지점의 대지에 연결되어 있다고 하자. 정상상태란 60 [Hz]에서 어떤 고장없이 정상운전되고 있는 상태를 말하며, 고장상태의 경우는 A상과 파이프의 중앙부근에서 지락고장이 발생한 것으로 가정하고 각각의 상태에서 지표면(Z=0)과 지상 1.6 [m] 지점(Z=1.6)에서의 전계, 자계 및 전위분포를 구하였다.

그림 2는 정상상태, 그림 3은 고장상태시의 주파수 60 [Hz]에서 지표면(Z=0)의 전위분포를 3차원으로 각각 나타낸 것이다. 여기서, 고장시 전위분포가 급격하게 상승하지만 지주파 영역일 경우, 적절한 접지 설계를 통하여 접촉전압과 보폭전압을 안전범위내로 완화시킬 수 있다. 그러나, 고주파 영역일 경우에는 접지

임피던스를 무시할 수 없으며, 이때 고장전류의 대부분은 고장점 부근에서 방류되므로 전위분포는 고장점 부근이 다른 곳보다 높게 나타난다. 특히, 전계의 경우 높은 주파수일수록 전계분포가 낮아지는 경향으로서 주파수에 종속적이지만, 자체인 경우에는 주파수에 독립적임을 알 수 있다.

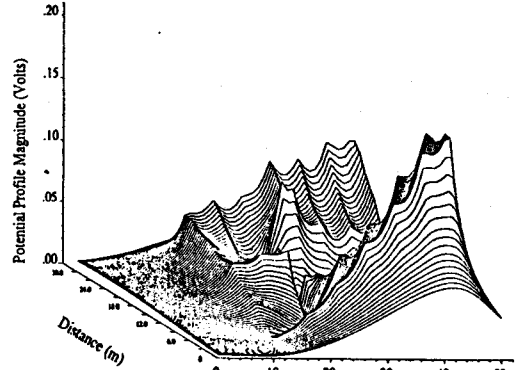


그림 2 정상상태에서의 전위분포(60Hz)

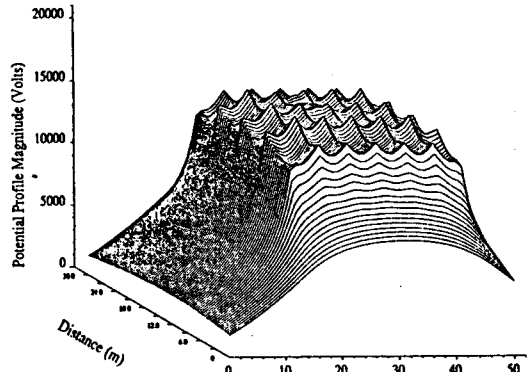


그림 3 고장상태에서의 전위분포(60Hz)

### 4.2 과도상태시 시간영역에서의 계산결과

한 상에 뇌격이나 스위칭으로 인하여 순간적으로 상도체와 파이프에 단락고장이 발생하는 과도상태가 될 수 있다. 이 때의 GIS에 대하여 과도 GPR 및 자계를 구하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 상황을 가정하여 그림 4와 같은 뇌격어지 임펄스를 상정하였으며, 뇌격어지 임펄스가 GIS내에 가해지면 접지계통을 통해 순간적으로 대지로 방류되면서 대지와 지상공간에 강력한 전계 및 자계가 발생된다. 상도체 A에 뇌격의 순간 1선지락이 발생하는 것으로 가정하였으며, 전위 및 전자계는 X축의 6개 프로파일에 따라 Y=-12.5 [m]에서 5 [m]씩 증가하면서 구하였다.

뇌격어지 주파수 스펙트럼의 해석을 위하여 대표적인 스펙트럼의 집합을 21개의 표본값으로 나타낸 예들 표 1에 나타났다. 표 1에서 주어진 전위값을 접지그리드에 각각 적용하여 주파수 응답을 구하면 된다.

본 연구에서는 뇌격어지 임펄스의 주파수 스펙트럼을 0 - 13.65 [MHz] 범위의 73개 주파수를 선정하였으며, 전위가 침투 값인 주파수는 8.28 [MHz]이다. 따라서 각각의 주파수에 대하여 전위 및 전자계를 구하면 된다. 그림 5와 6은 지표면의 한 점 x=25, y=12.5 에서의 주파수 함수로 계산된 전위응답의 실수부와 허수부에 대한 그림을 각각 나타내고 있다. 또한, 그림 7은 시간변화에 따른 전위를 나타내고 있는데 뇌격 발생후 2 [μs] 이내에 지정된 전위의 범위에 도달되는 것을 알 수 있다.

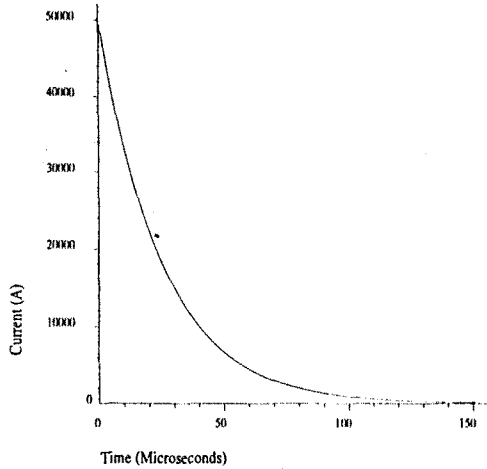


그림 4. 뇌 썬어지 임펄스

표 1 주파수 스펙트럼의 표본값

Frequency(Hz)	Current(A/Hz)	
	Real	Imaginary
0.0	8274.98	0.0
6677.	3591.07	-4140.85
26670.	437.44	-1876.49
53330.	105.04	-978.09
60000.	80.71	-871.99
73333.3	50.23	-716.06
93333.3	26.45	-564.17
140000.	5.02	-376.92
173333.	-0.96	-304.51
206667.	-4.28	-255.46
386667.	-9.89	-135.94
700000.	-11.29	-73.99
933333.	-11.42	-54.59
1946670.	-10.55	-23.27
3893330.	-7.80	-8.09
5840000.	-5.65	-3.53
7786670.	-4.32	-1.72
9733330.	-3.57	-0.85
11680000.	-3.18	-0.36
13626700.	-3.06	-0.46
13653300.	-3.06	0.0

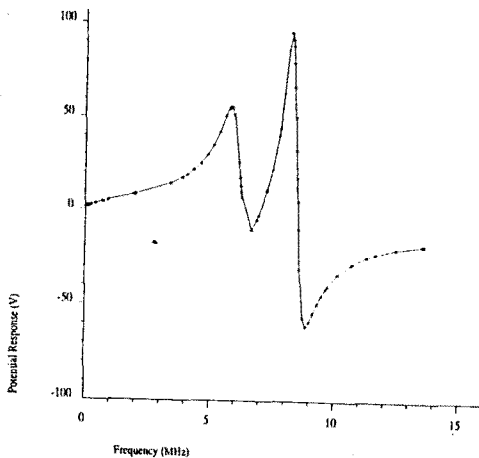


그림 5. 과도상태시 전위의 주파수 응답(실수부)

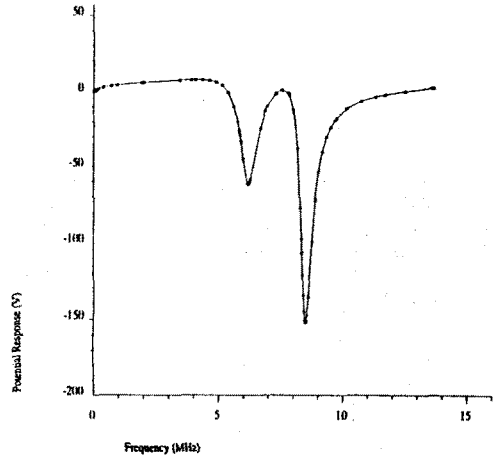


그림 6. 과도상태시 전위의 주파수 응답(허수부)

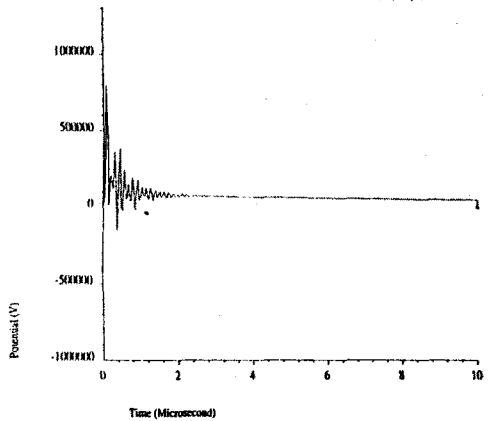


그림 7. 과도상태시 전위의 시간응답

## 5. 결론

본 연구에서는 초고압 GIS에서 고장이나 뇌썬어지에 의한 과도상태시 전위분포 및 전계, 자계의 영향을 해석하기 위하여 GIS의 모델을 제안하였으며, 60 [Hz]일 때 1000 [A]의 전류가 흐른다고 가정할 때 접지망에 분포되는 전류분포를 계산하였다. 또한, 정상상태와 고장상태시의 전위, 전자계를 구하였으며, GIS의 과도상태에서 주파수 및 시간영역에서 자세한 전계 및 자계 해석을 하였다.

전위와 전계분포는 주파수에 따라 증가할수록 증가하며, 고장점 부근에서 높게 나타나며, 자계분포는 주파수의 영향이 작다는 것을 알 수 있었다. 또한, 고장상태에서는 지표면에서의 전위, 전자계는 시간변화에 따른 값을 구하였는데, 뇌격 발생 2 [ $\mu$ s] 이내에서 급격한 진동이 있음을 알 수 있다.

앞으로 본 연구에서 제안한 GIS의 모델을 주파수 영역에서 등가회로의 R, L, C 값을 구하는 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] F.P. Dawalibi & A. Selby, "Electromagnetic Fields of Energized Conductors", IEEE/PES 1992 Summer Meeting, Paper #92 SM 456-4 PWRD.
- [2] F.P. Dawalibi, "Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors", IEEE Trans. on PWRD, Vol. PWRD-1, no. 4, pp. 105-119, 1986.
- [3] F.P. Dawalibi & W.K. Daily, "Measurement and Computations of Electromagnetic Fields in Electric Power Distribution Substations", IEEE/PES Winter Meeting, Paper 92 WM 222-0-PWRD.
- [4] F.P. Dawalibi, W. Ruan & S. Fortin, "Lightning Transient Response of Communication Towers and Associated Grounding Networks", 1st IEEE Malaysia Int'l Conference on Electromagnetic Compatibility 1995, Kuala-lumpur, Malaysia.