

# 봉상접지극의 과도임피던스 특성

김 일 권\* · 김 점 식 · 송 재 용 · 길 경 석  
한국해양대학교 전기시스템공학과

## Transient Impedance Characteristics of Grounding Rods

Il-Kwon Kim\* · Jum-Sik Kim · Jae-Yong Song · Gyung-Suk Kil  
Dept. of Electrical System Eng., Korea Maritime Univ.  
E-mail : hvlab@eng.kmaritime.ac.kr

### ABSTRACT

This paper describes the experimental results of a transient impedance characteristics of grounding rods to a square pulse and standard lightning impulse current. The test were performed on single grounding rod( $\phi 10\text{mm}$ , 1m) and triple-grounding rods( $\phi 10\text{mm}$ , 1m) of equilateral triangles with 5m spacing.

For measurements of transient impedance, a pulse generator which can produce square wave of 30ns rise time and  $20\mu\text{s}$  pulse duration was designed and fabricated.

In the experiment, transient impedance of the grounding systems have been investigated from the recorded potential and current waveforms.

The results showed that the value of the transient impedance is quite higher than the stationary resistance, and provide useful information for the design of a grounding system considered transient characteristics under a high frequency condition such as lightning strokes and ground-fault. .

## I. 서 론

최근 전력계통 운용설비의 무인화와 일반 가정 에 전자·정보기기 사용이 급증하였다. 전자제어 장치는 지락, 단락사고, 변전소 구내의 스위칭 동작, 뇌격 등과 같은 서지 및 고장전류에 매우 취약하여 기기의 오동작, 파손 및 정보의 손실을 가져오며 인체의 보안상에도 위험을 증가시킨다. 접지는 이러한 서지 및 고장전류를 대지로 흘려보 내어 각종 전기, 전자, 통신장비 및 설비에서 발생하는 재해를 방지할 수 있으므로 이에 대한 적절한 대책과 연구가 필요하다.

전력계통의 접지계에서 발생하는 전류성분을 주파수 영역에서 분류하면 상용주파수, 급준파 및 고주파 전류로 구별할 수 있다. 급준파나 고주파 전류는 수 MHz에 이르는 주파수 성분을 포함하므로 접지설계시 이 점을 고려하여 DC 및 상용주파수에 상당하는 정상접지저항은 물론 이 보다 높은 과도상태의 접지임피던스로 해석할 필요가 있다.

본 논문에서는 시공이 용이하며 경제성 및 신뢰성에서 많은 장점을 갖고 있는 봉상접지극에 대하여 단일 및 3연접을 했을 경우와 접지리드선의 길이를 변화시켰을 때의 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하였다. 또한 실제 보호시스템의 뇌서지에 대한 보호수준을 평가 또는 예측하기 위한 과도임피던스로서 임피던스 파라미터를 측정결과로부터 산출하여 비교·분석하였다. 측정·분석을 위하여 PFN(Pulse Forming Network) 이론을 이용하여 직각파 전류를 실제 제작하였으며, 국제규격인 ANSI/IEEE에서 정하고 있는 조합형 뇌충격전류 발생장치(PSURGE 4010, Haefely)를 이용하였다.

## II. 본 론

### 1. 측정계의 구성 및 측정방법

측정대상인 봉상접지극은 그림 1과 같이 단일( $\phi 10\text{mm}$ , 1m) 및 3연접( $\phi 10\text{mm}$ , 1m, 전극간격 5m)으로 구성하였으며, 접지극의 과도접지임피던스 특성을 측정하기 위해 빠른 상승시간을 가진 직각파 전류와 국제규격에 따른 실제의 뇌서지와 같은 뇌충격전류를 그림 2와 같은 측정계를 구성하여 인가하였다. 직각파 전류 발생장치는 상승시간 30 ns, 펄스 폭  $20\mu\text{s}$ , 크기 2A이고, 뇌충격전류 발생장치는 1kV, 50A의 최대값을 갖는  $1.2/50\mu\text{s}$ 의 전압,  $8/20\mu\text{s}$ 의 전류파형을 발생시킬 수 있다[1][2].

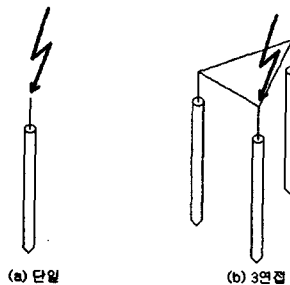


그림 1 접지극의 구성

Fig. 1 Configuration of the grounding rods

측정방법은 그림 2에서와 같이 전위강하법을 이용하여 접지전극 E와 전류보조전극 C간에 서지전류

를 인가하면 접지전극 E와 전류보조전극 P간에 전위상승이 발생하는데, 이 때 인가전류에 대한 전위상승의 비 즉,  $V(t)/I(t)$ 로써 접지임피던스를 산출한다[3][4]. 이 때 대지저항을 및 저항구역을 고려하여 전위분포곡선을 작성하고, 전위 및 전류보조전극의 타입위치를 결정하였다.

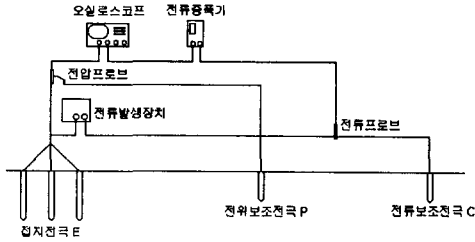


그림 2 과도임피던스 측정계  
Fig. 2 Transient impedance measuring system

2. 봉상접지극의 등가회로 모델

접지계의 과도접지임피던스에 대한 분석은 접지계를 통한 서지전류의 유입시 접지극의 전위상승 예측하여 합리적인 대책 수립과 보호수준을 정할 수 있다.

그림 3은 대지에 타입된 봉상접지극을 R-L-C 집중정수회로로 가정한 회로모델이다.

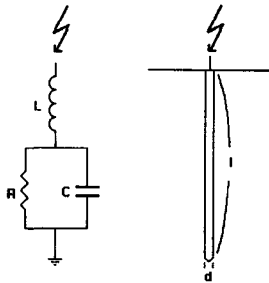


그림 3 봉상접지극의 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit of a grounding rod

이 때의 정상접지저항 R은 dwight에 의해 유도된 식 1에 의해 주어진다[5][6].

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left( \ln \left( \frac{8 \cdot l}{d} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

여기서;  $\rho$  = 대지 저항률  
 $l$  = 접지봉의 길이  
 $d$  = 접지봉의 직경

전극에 인가된 전압이 시간에 따라 변할 때, 도전성 전류뿐만 아니라 용량성 전류도 나타나게 되며 봉상접지극의 인덕턴스 L과 캐패시턴스 C는

각각 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$L = 2 \cdot 1 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot l}{d} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2)$$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot l}{d} \right)} \cdot 10^{-9} \quad (3)$$

여기서;  $\epsilon_r$  = 토양의 유전상수

급준한 상승시간을 갖는 직각파 전류에 대한 봉상접지극의 과도접지임피던스는 이러한 정수에 의하여 저항성, 유도성, 용량성 특성을 나타내며, 접지극의 고유한 시정수에 따라 전위상승 정도와 임피던스 변화 형태가 결정된다. 그림 4는 이러한 접지계의 과도특성 예를 나타낸다[7].

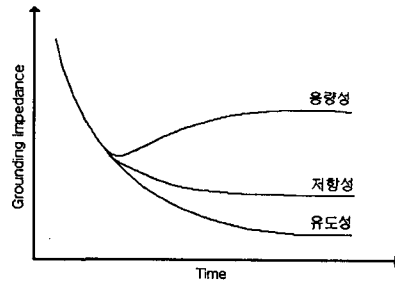


그림 4 접지임피던스의 과도특성  
Fig. 4 Transient characteristics of a grounding impedance

3. 임피던스 파라미터

접지계의 임피던스 파라미터는 뇌충격전류가 유입할 때 접지계의 보호종류와 보호수준 결정에 필요하다. Z로 정의되는 임피던스 파라미터는 뇌충격전압과 뇌충격전류의 비로 정의된다.

$$Z(t) = \frac{V(t)}{i(t)} \quad (4)$$

임피던스의 네가지 파라미터는 그림 5와 같이 뇌충격전압과 뇌충격전류의 각 최대값을 기준으로 다음과 같이 정의한다[6].

$$Z_1 = \max(Z(t)) \quad (5)$$

$$Z_2 = \frac{V(t_1)}{i(t_1)} \quad (6)$$

$$Z_3 = \frac{V(t_1)}{i(t_2)} \quad (7)$$

$$Z_4 = \frac{V(t_2)}{i(t_2)} \quad (8)$$

여기서;  $Z_1$  = 충격전압과 충격전류 비의 최대값

$Z_2$  = 전압이 최대값에 도달할 때,  
전압의 최대값과 전류값의 비  
 $Z_3$  = 최대 전압과 최대 전류의 비  
 $Z_4$  = 전류가 최대값에 도달할 때  
전압과 전류값의 비

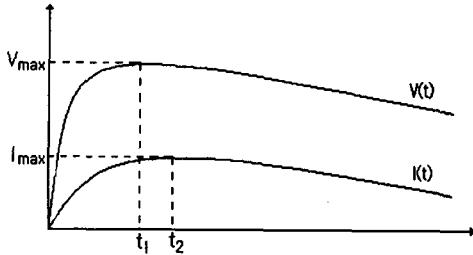


그림 5 임피던스 파라미터의 정의  
Fig. 5 Definition of impedance parameters

이는 일반적으로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 > R \quad (9)$$

특히  $Z_3$ 는 실효 서지임피던스(Effective surge impedance)라고 하며, 뇌충격전류에 대하여 경제성을 고려한 보호수준으로써 접지설계시 중요한 파라미터이다.

#### 4. 측정결과

본 측정실험의 대상인 봉상접지극에 대한 각각의 정상접지저항을 표 1에 나타내었으며, 직각파 전류에 의한 인가전류 및 전위상승파형을 그림 6에 나타내었다.

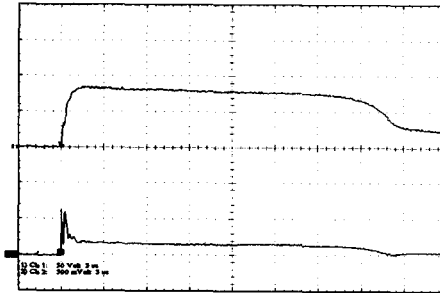
표 1 단일 및 3연접 접지계의 정상접지저항  
Table 1 Stationary resistance of the single and triple grounding systems

| 봉상접지극의 구성 | 정상접지저항[Ω] |
|-----------|-----------|
| 단일 봉상접지극  | 10.75     |
| 3연접 봉상접지극 | 4.4       |

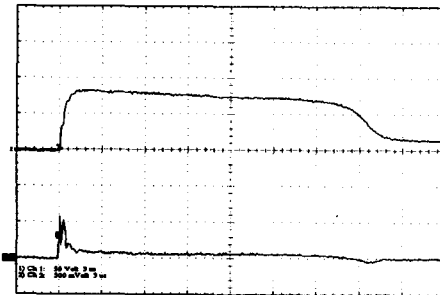
전위상승파형은 250ns부근에서 단일, 3연접 봉상접지극이 각각 62.4V, 56.4V의 최대값을 나타낸 후 점차 진동감쇠하여 1.2μs 이후에는 각각 15.4V, 6.18V의 정상상태를 유지하였다. 3연접을 한 경우, 단일에 비해 정상접지저항값은 40.9%의 낮은 값을 나타낸 반면 최대전위상승값은 90.38%의 값을 나타내어 큰 차이를 보이지 않았다.

접지리드선을 5m~50m로 증가함에 따라 전위상승은 큰 변화를 나타내는데, 이는 접지리드선의 포함된 인덕턴스 성분에 기인한다. 그림 7은 접지

리드선의 길이에 따른 최대전위상승을 나타내었다.



상: 인가전류[1A/div]  
하: 전위상승[50V/div]  
(a) 단일



상: 인가전류[1A/div]  
하: 전위상승[50V/div]  
(b) 3연접

그림 6 직각파에 대한 접지계의 응답파형  
Fig. 6 Response waveforms of the grounding systems to the square pulse

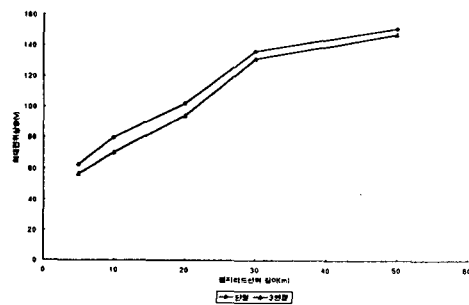
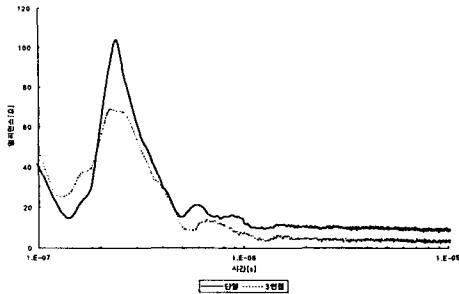


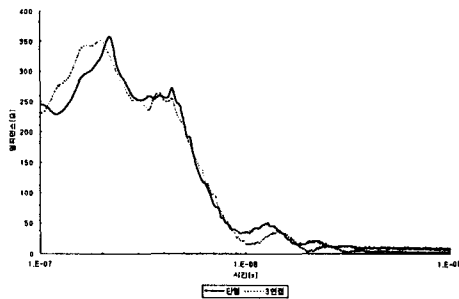
그림 7 접지선의 길이에 따른 최대전위상승  
Fig. 7 Maximum potential rising to the length of grounding leads

그림 8은 단일, 3연접 봉상접지극의 과도접지임피던스의 파형을 나타낸다. 분석해 본 결과 100ns~300ns의 상승구간을 제외하면 500ns까지는 급격히 감쇠하고 그 이후는 완만한 감쇠를 하다가 1.2μs 이후에는 정상상태를 나타내었다. 접지리드선의 길이를 증가하면 접지리드선의 인덕턴

스 성분에 의하여 100ns~300ns 구간이 높은 과도접지임피던스를 유지하는 특성을 나타내었다.



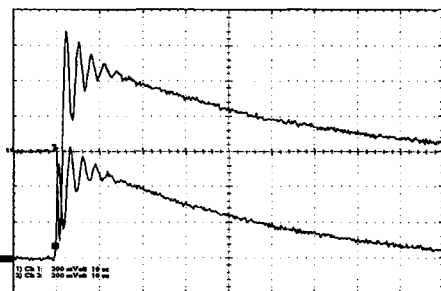
(a) 접지선 5m의 경우



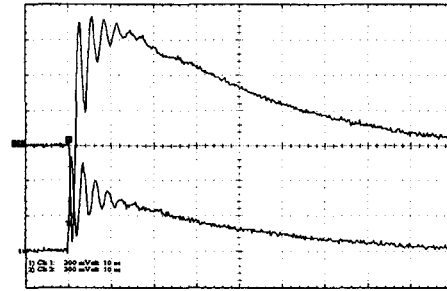
(b) 접지선 50m의 경우

그림 8 직각파에 대한 과도임피던스  
Fig. 8 Transient impedance to the square pulse

그림 9는 8/20 $\mu$ s 뇌충격 전류에 대한 봉상접지극의 형태에 따른 과도응답 파형이다. 각 봉상접지극에 대하여 접지리드선의 길이가 5m과 50m일 경우의 과도접지임피던스 파형을 그림 10에 나타내었다.

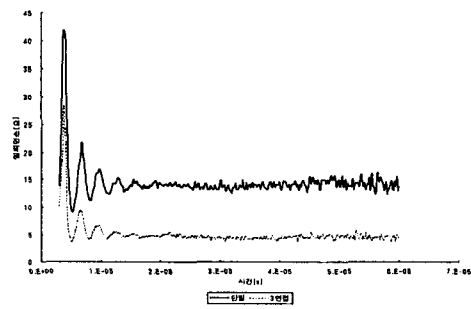


상: 인가전류[ 15A/div]  
하: 전위상승[200V/div]  
(a) 단일

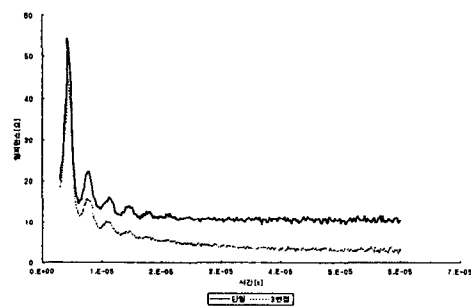


상: 인가전류[ 17A/div]  
하: 전위상승[200V/div]  
(b) 3연결

그림 9 충격전류에 대한 접지계의 응답파형  
Fig. 9 Response waveforms of the grounding systems to the impulse current



(a) 접지선 5m의 경우



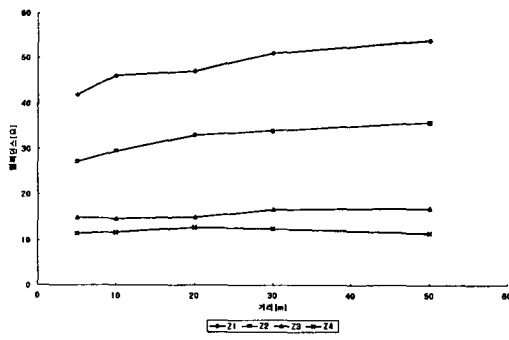
(b) 접지선 50m의 경우

그림 10 충격전류에 대한 과도임피던스 특성  
Fig. 10 Transient impedance characteristics to the impulse current

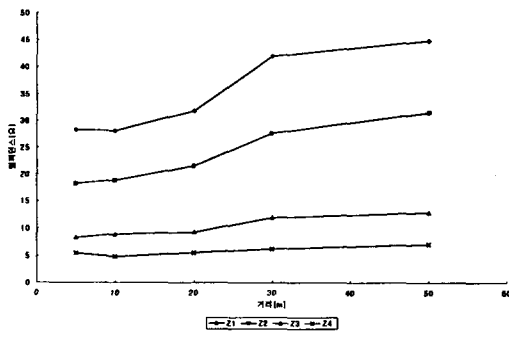
측정한 접지임피던스 파형을 보면 각 접지극의 뇌충격전류에 대한 특성은 모두 유도성 특성을 나타내었고, 접지리드선의 길이가 5m보다 50m일 경우가 과도접지임피던스의 값이 더 높고 시정수의 증가로 인하여 긴 시간을 통해 정상상태로 감소하는 특성을 나타내었다.

뇌충격전류에 대한 접지계의 과도접지임피던스는 정상접지저항과 다른 양상을 보이기 때문에 서지에 대한 보호측면에서 과도접지임피던스를 검토하기 위해 임피던스 파라미터  $Z_1 \sim Z_4$ 를 설정하였다.

그림 11은 뇌충격전류에 대한 봉상접지극의 임피던스 파라미터를 접지리드선의 길이에 대하여 나타내었다. 각 접지전극의 정상접지저항에 대한 실효서지임피던스  $Z_3$ 의 비율을 보면 단일, 3연접에 경우 138.41%, 186.36%로 정상접지저항보다 높은 임피던스값을 가지며, 접지리드선의 길이에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내는데, 이는 접지리드선의 저항과 인덕턴스의 영향으로 볼 수 있다. 접지리드선의 길이가 50m인 경우에 단일, 3연접의 실효서지임피던스는 정상접지저항에 대하여 각각 157.21%, 292.73%를 나타내었다.



(a) 단일



(b) 3연접

그림 11 봉상 접지극의 임피던스 파라미터  
Fig. 11 Impedance parameters of the grounding rod

### III. 결 론

본 연구에서는 서지전류에 대한 봉상접지극의 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

직각파 전류에 대한 과도접지임피던스 특성은

봉상접지극의 형태와는 관계없이 100ns~300ns부근에 상승하는 것을 제외하면 500ns까지 급격히 감쇠하여 1.2μs 이후 정상상태에 도달하는 유도성을 나타내었다. 또한 접지리드선의 길이에 대해서는 접지리드선의 길이가 길어짐에 따라 100ns~300ns부근이 높은 임피던스값을 유지하는 특성을 나타내어 접지리드선의 길이에 대한 과도특성과 약의 중요성을 나타내었다. 100ns~300ns부근의 임피던스 특성을 보면, 정상접지저항값의 10배 가량에 높은 값을 나타내며, 접지리드선의 길이가 50m로 늘어날 경우 수 십 배의 높은 임피던스값을 유지하였다. 봉상접지극의 등가회로 모델의 적용으로 R-L-C 회로정수와 시정수 등을 감안하면 접지계의 임피던스 구조를 추정할 수 있으며, 또한 주파수 성분이 다른 서지에 대한 전위상승 및 과도접지임피던스 특성을 예측할 수 있다.

뇌충격전류에 대한 과도접지임피던스 특성은 단일보다는 연결했을 경우 감소하며, 접지리드선의 길이가 길어짐에 따라 증가하는 특성을 나타내었다. 직각파 전류보다 느린 상승시간과 다른 주파수 성분을 갖는 뇌충격전류에 경우 실효서지임피던스는 정상접지저항의 1.3~1.8배 정도의 값을 나타내었지만, 접지리드선의 길이가 길어질 경우 임피던스의 최대값은 수 배에 이른다. 이후 대지저항률, 전극의 길이, 타입깊이 등을 고려한 측정 및 연구를 통하여 대지저항률, 정상접지저항, 과도접지임피던스의 관계를 파악할 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] 佐藤 康宏, 池田 長康, "枝狀PFNによる單極性パルス大電流の發生", JIEE, Vol.116-B, No. 2, 218~224, 1996
- [2] Antonino Musolino, Marco Raugi, Bernardo Tellini, "Pulse Forming Network Optimal Design for the Power Supply of Eml Launchers", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 1, 480~483, 1997
- [3] 高橋 健彦, 金聖模, 李炯秀 "接地技術入門", 오ーム社, 203~218, 1997
- [4] IEEE Std 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, 17~24, 1983
- [5] 川瀬 太郎, 高橋 健彦, "ドワイトの接地抵抗公式の導出過程", 日本電氣設備學會誌, 342~344, 1987
- [6] I.F.Gonos, F.V.Topalis, I.A.Stathopoulos, "Transient Impedance of Grounding Rods", High Voltage Engineering Symposium, No. 467, 1999
- [7] 三谷 弘, "接地抵抗のサージ特性とその測定法", 日本電氣設備學會誌, 871~877, 1990