

뇌충격 전류에 의한 접지극의 과도임피던스 특성에 관한 연구

김 일 권¹⁾, 송 재 용¹⁾, 길 경 석²⁾

A Study on the Transient Impedance Characteristics of Grounding Rods by Lightning Impulse Current

I. K. Kim , J. Y. Song , G. S. Kil

ABSTRACT

This paper describes the correlation of the transient impedance and its parameters with the stationary resistance of grounding systems to a lightning impulse current.

The test were performed on single grounding rod($\phi 10$ [mm], 1[m]) and triple-grounding rods($\phi 10$ [mm], 1[m]) of equilateral triangles with 5[m] spacing.

For measurements of transient impedance, impulse current tests using the standard 8/20[μ s] wave specified in IEC 61000-4-5 were carried out on the grounding system to simulate the transient characteristics in an actual field condition such as a grounding system for power distribution lines.

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.

1) 한국해양대학교 대학원

2) 한국해양대학교 전기시스템공학과

1. 서 론

최근 고도 정보화 시대에 부응하여 각종 전자·제어장비를 이용한 무인시스템의 구축이 활발히 진행되고 있으며, 그 운용에 있어 높은 효율성과 신뢰성 확보가 주요 쟁점으로 부상하고 있다. 과거 국내에서는 하절기 집중된 낙뢰에 의한 교통신호기의 손상 및 온라인 시스템의 중단에 따른 교통체증과 행정 및 각종 업무의 마비를 초래하여 사회 직·간접적 피해를 경험하였다. 접지는 전기·전자·통신기기 등의 기준전위를 확립할 뿐만 아니라 대지로 향하는 이상전압·전류에 대하여 낮은 저항 경로를 제공함으로써 각종 기기에서 발생하는 전위상승을 억제하여 절연파괴와 감전과 같은 재해를 방지할 수 있으므로 이에 대한 적절한 대책과 연구가 필요하다[1].

현재 전기설비 기술기준에 의한 접지설계는 직류 또는 상용주파수에 상당하는 정상접지저항을 기준으로 평가하고 있으나, 실제 운용조건에서는 뇌격과 같이 수 십 [kHz] 이상의 주파수 성분을 갖는 과도전류에 의하여 설계시와는 상당히 다른 비선형적 양상을 보이게 된다. 이는 접지계의 임피던스에 의한 영향으로 과도상태에 대한 측정과 평가, 저감대책을 확립한다면 낙뢰에 대하여 효과적인 접지로서 보호동작을 도모할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 실제 낙뢰에 의한 뇌격전류에 대하여 효과적인 보호대책 수립에 필요한 기초적 자료를 제공하기 위하여, 단일 및 3연접 봉상접지극을 대상으로 뇌충격 전류를 인가하였으며, 주요 연구내용은 다음과 같다.

뇌충격 전류에 의한 봉상접지극의 과도임피던스 특성을 파악하기 위해 국제규격 IEC 61000-4-5에서 정하고 있는 조합형 뇌충격 전류 발생장치(PSURGE 4010, Haefely)를 이용하였으며, 뇌충격 전류를 단일 및 3연접 봉상접지극에 인가하여 이 때의 과도임피던스 특성을 측정·분석하였다. 연접에 의한 접지임피던스 감소를 평가하였으며, 접지리드선의 길이를 변화시키면서 이에 따른 특성변화를 관찰하였다. 또한, 실제 뇌격전류에 대한 보호수준을 평가 또는 예측하기 위한 과도접지임피던스로서 임피던스 파라미터를 측정결과로부터 산출하여 비교·분석하였다.

2. 이 론

2.1 봉상접지극의 등가회로

접지계의 등가회로 모델을 제시하고 이를 통하여 과도접지임피던스 특성을 개략적으로 파악할 수 있다면 낙뢰로부터 방호를 위한 접지계의 과도특성을 예상·분석하는 절차를 간소화 할 수 있고 이러한 절차는 시뮬레이션 모델의 도구로 이용할 수 있다.

봉상접지극은 타입 및 매설이 쉬운 형태의 전극으로 가장 간단하고 경제적이며 이론적인 해석이 용이하기 때문에 뇌충격 전류하에 실제 접지계의 과도분석을 하기 위해 사용된다.

뇌충격 전류에 의한 봉상접지극의 등가회로는 그림 1과 같이 표현할 수 있으며, 이 때의 정상접지저항 R , 인덕턴스 L , 캐패시턴스 C 는 다음 식 (1)~(3)에 의해 주어진다[2],[3].

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

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

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

여기서 ρ 는 대지저항률, l 은 접지봉의 길이, d 는 접지봉의 직경, ϵ_r 은 토양의 유전상수이다.

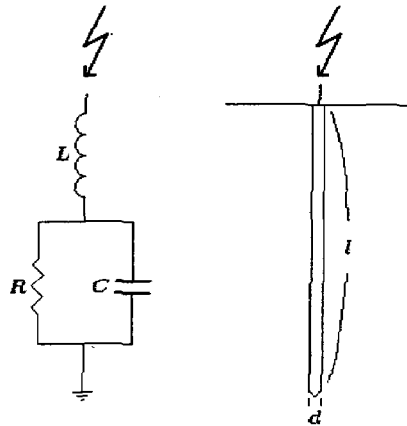


그림 1 봉상접지극의 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of a grounding rod

식 (1)~(3)은 몇 개의 가정을 통한 회로망적인 접근으로 봉상접지극을 $R-L-C$ 집중정수회로로 해석한 것이며, 전극에 인가된 전압이 시간에 따라 변할 때, 도전성 전류뿐만 아니라 유도성, 용량성 전류도 나타나게 되며 각각의 회로정수의 시정수에 따라 접지계는 과도특성을 나타낸다[4].

2.2 임피던스 파라미터

접지계의 임피던스 파라미터는 낙뢰나 과도접지의 실패와 같이 대지로 뇌충격 전류가 유입할 때, 접지계의 보호종류와 보호수준의 결정에 필요하다. Z 로 정의되는 임피던스 파라미터는 식 (4)와 같이 뇌충격 전압과 뇌충격 전류의 비로 정의된다[5].

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

임피던스의 네가지 파라미터는 그림 2에 나타낸 바와 같이 뇌충격 전압과 뇌충격 전류의 각 최대값을 기준으로 다음과 같이 정의한다.

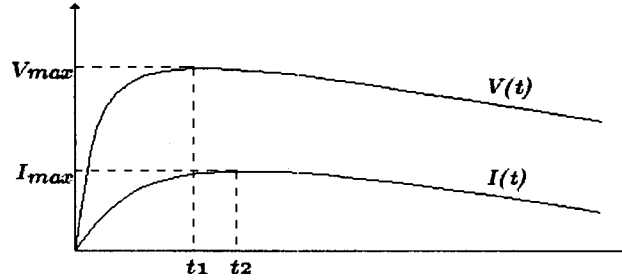


그림 2 임피던스 파라미터의 정의
Fig. 2 Definition of impedance parameters

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

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

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

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

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

이는 일반적으로 다음과 같은 관계가 성립한다.

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

특히 Z_3 는 실효서지임피던스(effective surge impedance)라 하여 뇌충격 전류에 의한 접지계의 보호종류와 보호수준을 결정하는 중요한 요소가 된다.

3. 실험장치 및 방법

접지계를 통하여 유입하는 과도전류는 낙뢰의 영향으로 뇌충격 전류의 형태를 나타내며 접지계의 보호종류 및 보호수준을 선정하기 위해서는 낙뢰의 파형과 동일한 전류가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 국제규격에 따른 8/20[μ s] 뇌충격 전류를 인가하여 실제 뇌격에 의한 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하였다.

3.1 뇌충격 전류 발생장치

본 연구에서는 국제규격 IEC 61000-4-5에서 규정한 조합형 뇌충격 전류 발생장치를 이용하여 접지계의 과도접지임피던스 측정에 적용하였다. 뇌충격 전류 발생장치는 송·배전 선로상의 직격뇌에 의한 1.2/50[μ s]의 전압이 인가되어 절연파괴가 이루어지면 8/20[μ s]의 전류 파형으로 변환되어, 실제 낙뢰에 의한 영향과 매우 유사하기 때문에 뇌충격 전류에 의한 접지계의 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하는 데에 적합하다[6]. 그림 3은 뇌충격 전류 발생장치인 Haefely사의 PSURGE 4010의 사진을 나타낸다.

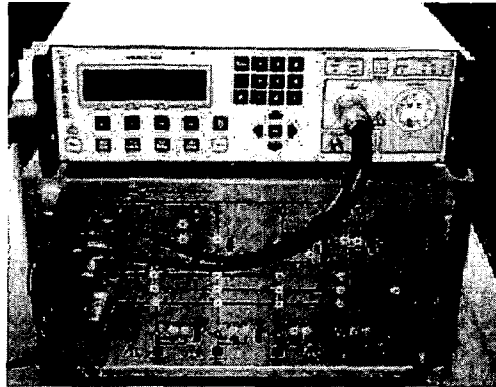


그림 3 뇌충격 전류 발생장치의 사진

Fig. 3 Photograph of the lightning impulse current generator

국제규격상의 1.2/50[μ s]의 전압파형을 수식적으로 나타내면 식 (10)과 같고, 8/20[μ s]의 전류파형의 수식적인 표현은 식 (11)과 같다[7]~[9].

$$V(t) = AV_p \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right\} \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) [V] \quad (10)$$

여기서 τ_1 는 0.4074[μ s], τ_2 는 68.22[μ s], A 는 1.037, V_p 는 전압의 최대값이다.

$$I(t) = AI_p t^3 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) [A] \quad (11)$$

여기서 τ 는 3.911[μ s], A 는 0.01243 [μ s⁻³], I_p 는 전류의 최대값이다.

그림 4는 식 (10), (11)을 그래프로 나타낸 뇌충격 전압, 전류파형이다.

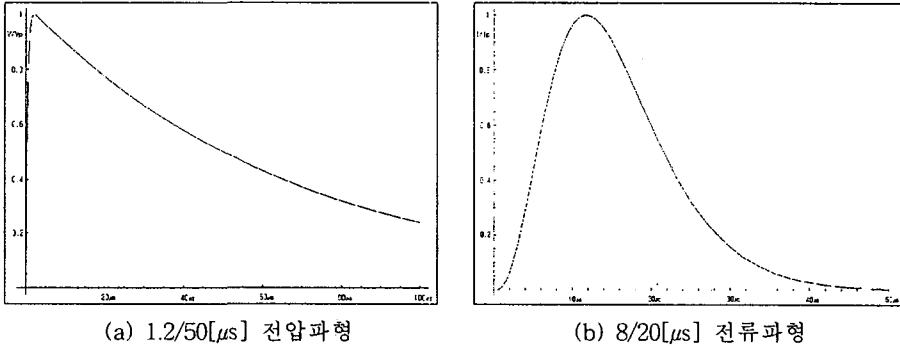


그림 4 뇌충격 전압, 전류파형

Fig. 4 Waveforms of the lightning impulse voltage and current

3.2 측정계의 구성

제한된 구역 안에서 전위강하법을 이용한 측정계를 구성하기 위해서는 접지계의 저항구역과 적절한 보조극의 위치를 선정할 필요가 있으며, 이는 전위분포곡선 또는 접지저항분포곡선으로 결정한다. 전위강하법을 위한 접지계의 접지저항분포를 관찰하기 위하여 접지극 E로부터 20[m]의 간격을 두고 전류보조극 C를 설치한 후, 전위보조극 P를 접지극 E로부터 0.5[m]의 간격으로 11[m]까지 이동하며 측정한 정상접지저항을 그림 5에 나타내었다.

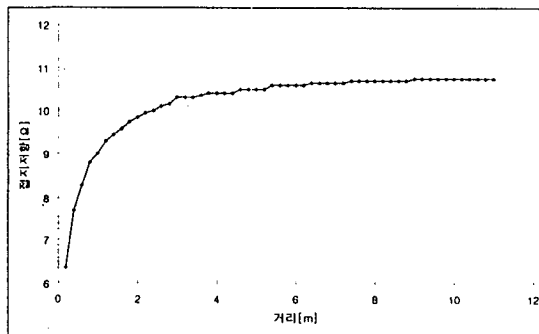


그림 5 정상접지저항의 분포곡선

Fig. 5 Distribution curve of the stationary grounding resistance

그림 5에서 나타낸 바와 같이 정상접지저항의 분포곡선에서 평탄한 부분을 이루는 지점이 9[m]에서부터 시작하였고, 접지저항계의 오차를 고려한 전위보조극 P의 위치는 12.4[m]로 설정하였다. 또한 저항구역은 12.4[m]지점의 접지저항을 전저항으로 고려할 때 전저항의 97.7[%]인 5[m]를 저항구역으로 하였다.

그림 6은 전위강하법을 이용하여 정상접지저항 및 과도접지임피던스의 측정계를 나타낸

것이다. 메시전극과 같은 대규모 접지체의 과도접지임피던스를 측정할 때에는 대지에 유입되는 전류에 의한 유도전압 때문에 전위보조극 P 를 정상접지저항을 측정할 때에는 다른 위치에 설치 해야하지만, 고임피던스 접지계의 경우는 정상접지저항 분포곡선에서 접지저항의 참값을 얻을 수 있는 평탄한 부분이 나타나기 때문에 오히려 정상접지저항을 측정할 때와 같은 방법으로 하는 것이 바람직하다[10].

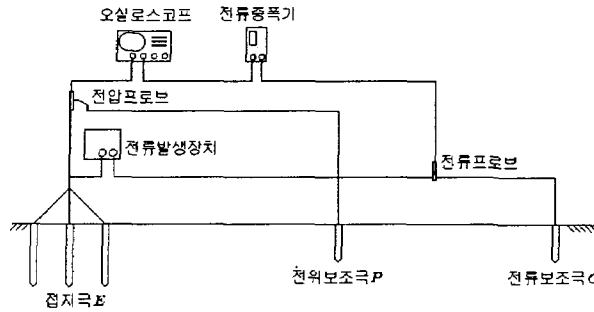
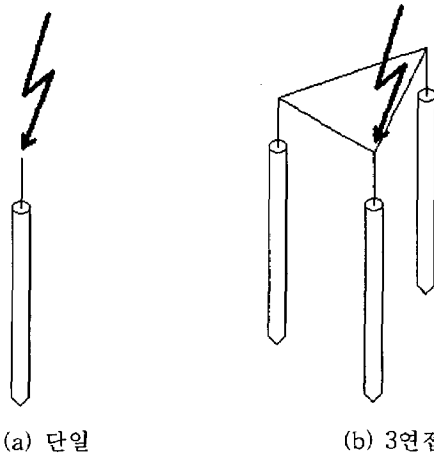


그림 6 과도접지임피던스 측정계

Fig. 6 Transient impedance measuring system

봉상접지극은 이론적인 해석이 쉬울 뿐만 아니라 경제적이며 설치가 용이하기 때문에 상용 규격화되어 실제 전력계통이나 설비에 사용된다. 접지시스템 설계시 접지저항치를 낮추기 위한 방법으로 전극을 여러 개 설치한 후 이들을 연결하여 사용하는데, 이는 접지저항의 병렬연결로써 전류의 경로를 분산시켜 전위상승을 억제하는 효과가 있다.

본 연구에서는 접지극을 그림 7과 같이 구성하여 과도접지임피던스 특성을 비교·분석하였다. 접지극과 피접지체를 연결하는 접지리드선의 길이에 따라 과도접지임피던스 특성이 달라지기 때문에 각각의 접지극에 따라 접지리드선의 길이를 5~50[m]로 변화시키면서 접지리드선 길이에 대한 변화특성도 검토하였다.



(a) 단일

(b) 3연접

그림 7 접지계의 구성

Fig. 7 Configuration of the ground systems

단일 접지극의 크기는 직경 10[mm], 길이 1[m]이며 3연접의 경우 같은 크기의 접지극을 저항구역을 고려하여 각 전극간의 거리를 5[m]로 유지한 정삼각형으로 배치하였다. 측정계를 이루는 모든 리드선은 도선의 인덕턴스 성분을 줄이기 위하여 가능한 겹치거나 루프를 형성하지 못하게 하였다[11]. 접지극 시설기준에 따르면 모든 접지극은 지표면으로부터 0.75[m] 깊이에 매설을 하도록 규정하였으나 이는 지표면에 전위상승에 의한 전위경도를 줄이기 위한 것으로 측정장치를 접지극의 저항구역을 고려한 일정거리 이상으로 간격을 유지하면 규정에 따른 매설깊이를 고려하지 않아도 된다.

그림 8은 Wenner의 4전극법을 이용한 대지저항률 측정계를 나타낸 것으로, 7[m]의 간격을 두고 보조극을 배치하였으며, 575[Hz]의 교류전류를 외부 2개의 전류보조극에 인가하여 평균대지저항률 11.9[Ω · m]를 측정하였다.

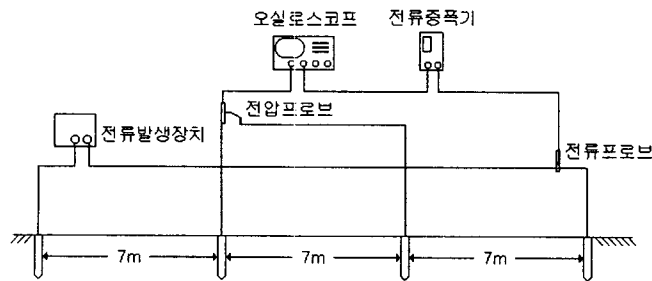


그림 8 대지저항률 측정계

Fig. 8 Ground resistivity measuring system

4. 실험결과 및 고찰

표 1은 접지저항계를 이용하여 측정한 각 접지극의 정상접지저항을 나타낸 것이다.

표 1 접지계의 정상접지저항

Table 1 Stationary resistance of the grounding systems

접지계의 구성	정상접지저항[Ω]
단일 접지극	10.8
3연접 접지극	4.4

3연접의 정상접지저항은 단일 접지극에 비하여 40.7[%]의 값을 나타내었다. 만일 3연접 접지극을 이루고 있는 개개의 접지극이 무한거리에 설치된다면, 단일 접지극의 정상접지저항값에 1/3을 나타내겠지만 이는 실제에 있어 불가능하며 저항구역을 고려한 유한거리에 설치된 경우 단일 접지극의 대략 40[%]의 정상접지저항값을 나타내므로 수치적인 계산으로도 상당히 일치하고 있다[12].

본 실험에서는 뇌충격 전류에 대한 전위상승과 과도임피던스를 표 1에 나타낸 정상접지저항과 비교하여 정상상태와 과도상태의 특성을 비교·분석하였다.

4.1 뇌충격 전류에 대한 과도접지임피던스

본 실험에서는 단일, 3연접 접지극의 시간에 대한 전류, 전위, 접지임피던스 특성을 측정·분석하고 실험 결과로부터 각 접지극에 대한 임피던스 파라미터를 결정하였다. 실제 접지계에서 접지리드선의 영향을 파악하기 위하여 각 접지극에 대한 접지리드선 길이의 변화에 대한 특성도 측정·분석하였다.

그림 9는 8/20[μ s] 뇌충격 전류에 대한 단일, 3연접 접지극의 과도응답 파형이다. 전압, 전류의 파형은 초기 급준한 상승을 하다가 최대값을 지나 점차 감소하였다. 전압, 전류파형 초기부분의 진동성분은 접지계의 인덕턴스 L과, 대지와 접지극간에 존재하는 캐패시턴스 C에 의한 고유 진동, 토양에서의 비선형적인 전류의 전도와 뇌충격 전류 발생장치, 접지리드선, 접지극 등의 임피던스가 서로 정합되지 않았기 때문이라고 판단된다.

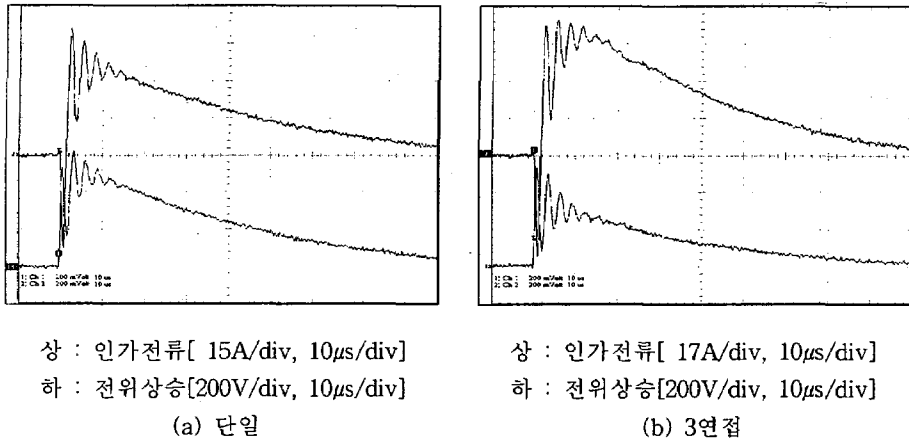
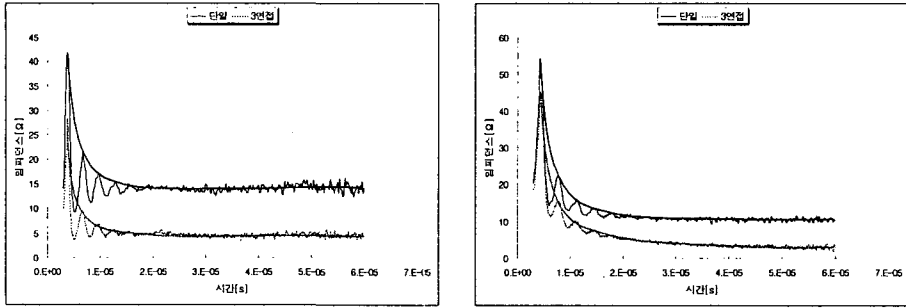


그림 9 뇌충격 전류에 대한 응답파형

Fig. 9 Response waveforms to the lightning impulse current

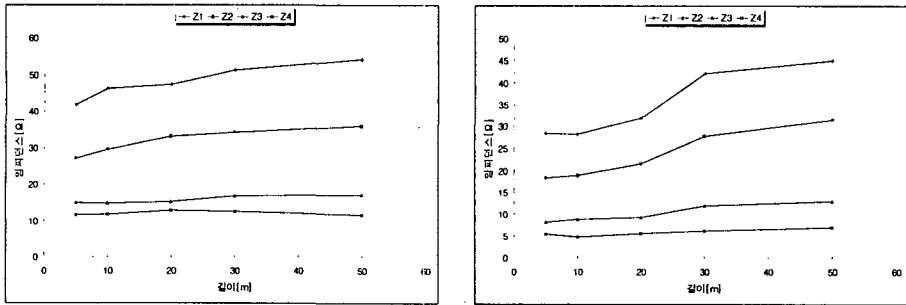
접지리드선의 길이가 5[m]와 50[m]일 경우 시간에 따른 각 접지극의 과도임피던스 변화를 그림 10에 나타내었다. 뇌충격 전류에 대한 접지극의 과도임피던스 특성은 모두 유도성 특성을 나타내었으며, 접지리드선의 길이가 5[m]보다 50[m]일 경우에 과도임피던스의 값이 더 높고 정상상태에 도달하기 위해 더 긴 시간이 걸렸다. 이는 접지리드선의 길이가 증가함에 따라 인덕턴스 성분이 증가했기 때문이라고 판단된다.

그림 11은 뇌충격 전류에 대한 접지극의 임피던스 파라미터를 접지리드선의 길이에 대하여 나타내었다. 크기를 볼 때, $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$ 의 순서로 임피던스 파라미터간의 일반적인 관계와 일치하였으며, 그 크기는 단일 접지극보다 3연접 접지극으로 구성했을 때 전체적으로 감소함을 보였다. 또한 접지리드선의 길이가 길어질수록 증가하는 경향을 나타내어 접지계의 인덕턴스 증가에 따른 임피던스 파라미터의 상승을 확인하였다.



(a) 접지리드선이 5[m]일 경우 (b) 접지리드선이 50[m]일 경우
 그림 10 뇌충격 전류에 대한 과도임피던스

Fig. 10 Transient impedance to the lightning impulse current



(a) 단일 (b) 3연접

그림 11 접지리드선의 길이에 따른 임피던스 파라미터 변화

Fig. 11 Changes of the impedance parameters with the length of grounding leads

접지리드선에 대한 임피던스 파라미터와 정상접지저항의 관계를 명확히 하기 위하여 임피던스의 최대값 Z_1 , 실효서지임피던스 Z_3 , 정상접지저항 및 각각의 비율을 표 2와 3에 나타내어 비교·분석하였다.

표 2 뇌충격 전류에 대한 임피던스 파라미터(접지리드선 = 5[m])

Table 2 Impedance parameters to the lightning impulse current
 (grounding leads = 5[m])

구분	접지계의 구성		비율[%] (3연접/단일)	
	단일 접지극	3연접 접지극		
임피던스[Ω]	Z_1	41.8	28.3	67.7
	Z_3	14.9	8.2	55.0
	정상접지저항	10.8	4.4	40.7
비율[%] (Z_1 /정상접지저항)		387.0	643.2	
비율[%] (Z_3 /정상접지저항)		138.0	186.4	

표 3 뇌충격 전류에 대한 임피던스 파라미터(접지리드선 = 50[m])
 Table 3 Impedance parameters to the lightning impulse current
 (grounding leads = 50[m])

구분		접지계의 구성		비율[%] (3연접/단일)
		단일 접지극	3연접 접지극	
임피던스[Ω]	Z_1	54.0	44.9	83.1
	Z_3	16.9	12.9	76.3
	정상접지저항	10.8	4.4	40.7
비율[%] (Z_1 /정상접지저항)		500.0	1020.5	
비율[%] (Z_3 /정상접지저항)		156.5	293.2	

표 2를 보면, 단일 접지극의 경우 정상접지저항에 대한 실효서지임피던스 Z_3 는 138.0[%]의 값을 나타내었으며 3연접 접지극의 경우 정상접지저항에 대한 실효서지임피던스 Z_3 는 186.4[%]로 정상접지저항보다 약간 높은 임피던스값을 나타내었다. 그러나 임피던스 최대값 Z_1 은 단일 접지극의 경우 정상접지저항에 대하여 387.0[%], 3연접 접지극의 경우 643.2[%]의 높은 임피던스값을 나타내었다. 이러한 임피던스 파라미터는 표 3에서와 같이 접지리드선의 길이가 길어질 경우 더욱 증가하게 된다.

접지리드선이 연접에 의한 임피던스 파라미터의 감소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 접지극의 Z_3 를 접지리드선의 길이 5[m]와 50[m]일 경우에 대하여 비교하였다. 접지리드선의 길이가 5[m]일 경우 3연접을 했을 때의 Z_3 는 단일 접지극의 Z_3 에 비하여 55.0[%]로 45.0[%]가 감소된 값을 나타내었지만, 접지리드선의 길이가 50[m]일 경우 3연접을 했을 때의 Z_3 는 단일 접지극의 Z_3 에 비하여 76.3[%]로 23.7[%]가 감소된 값을 나타내어 접지리드선의 길이가 길어질수록 연접에 대한 효과가 줄어들게 되었다. 이는 연접에 대한 임피던스의 감소보다는 접지리드선의 길이에 대한 임피던스의 증가가 더욱 우세한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 연접을 통한 임피던스의 감소를 위해서는 가능한 접지리드선의 길이를 줄이는 것이 좋다.

5. 결 론

본 연구에서는 접지계의 과도특성을 파악하기 위하여 봉상접지극을 단일 및 3연접으로 구성하고, 8/20[μs] 뇌충격 전류를 인가하여 전위상승 및 임피던스에 대한 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 뇌충격 전류에 대한 단일 및 3연접 접지극의 실효서지임피던스 Z_3 는 정상접지저항에 비하여 각각 138.0[%], 186.4[%], 최대임피던스 Z_1 은 각각 387.0[%], 643.2[%]의 높은 값을 나타내었다.

2) 단일에 대한 3연접 접지극의 연접효과를 고려해 볼 때, 실효서지임피던스 Z_3 가 45.0[%] 감소하였다. 전체적으로 연접에 대한 접지임피던스의 감소효과를 나타내고 있으나 정상접지저항의 감소효과 59.3[%]에 비하여 낮게 나타났다. 특히 접지리드선의 길이가 길어질수록 연접에 따른 임피던스의 감소효과는 더욱 낮아졌다. 이는 연접에 의한 접지저항 및 인덕턴스의 감소보다 접지계를 이루는 리드선의 인덕턴스 성분과 접속부의 접촉저항의 증가가 우세하기 때문이다.

접지계는 뇌충격 전류에 대하여 각기 다른 비선형 특성을 나타내며 일반적으로 정상접지저항보다 큰 값을 나타낸다. 따라서 접지설계시 직류 및 상용주파수에 상당하는 정상접지저항뿐만 아니라 뇌충격 전류에 의한 과도접지임피던스를 고려해야 뇌격에 의한 효과적인 접지대책을 수립할 수 있다.

향후 봉상접지극의 형상과 대지저항률을 감안한 접지계의 과도임피던스 특성을 측정·분석하고 여러 가지 접지극에 대하여 지속적인 연구를 수행한다면, 뇌격에 대한 접지임피던스의 저감대책을 확립할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김세동, "첨단정보빌딩에서의 접지기술", 전기저널, pp. 15~23, 1999. 12.
- [2] 川瀬 太郎, 高橋 健彦, "ドホワイトの接地抵抗公式の導出過程", 日本電氣設備學會誌, pp. 342~344, 1987.
- [3] M. Abdel-Salam, A. El-Morshedy et al., "High-Voltage Engineering", Marcel Dekker, pp. 419~428, 2000.
- [4] 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, pp. 871~877, 1990.
- [5] I.F.Gonos, F.V.Topalis, I.A.Stathopoulos, "Transient Impedance of Grounding Rods", High Voltage Engineering Symposium, No. 467, 1999.
- [6] 關岡昇三, 林田 弘, 原 武久, 雨谷昭弘, "インパルス大電流に對する非線型接地抵抗モデルの開発", JIEE, Vol. 118-B, No. 1, 1998.
- [7] Ronald B. Standler, "Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", Wiley, pp. 86~91, 1989.
- [8] M. S. Naidu, V. Kamaraju, "High Voltage Engineering", McGraw-Hill, pp. 143~147, 1995.
- [9] 宅間, 柳父, "高電壓大電流工學", 電氣學會, pp. 4~7, 1988.
- [10] IEEE Std 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, pp. 17~24, 1983.
- [11] Henry W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", Wiley, pp. 93~96, 1988.
- [12] V. Prasad Kodali, "Engineering Electromagnetic Compatibility", IEEE Press, pp. 185~196, 1996.