
봉상접지극의 과도임피던스 특성

김일권*, 송재용*, 길경석*, 권장우**

Transient Impedance Characteristics of Grounding Rods

Il-Kwon Kim, Jae-Yong Song, Gyung-Suk Kil, Jang-Woo Kwon

요 약

본 논문은 직각파 및 뇌충격전류에 대한 봉상접지극의 과도임피던스 특성을 정상접지저항과 비교·분석하였다. 접지계는 단일($\phi 10[\text{mm}]$, 1[m])과 5[m]의 간격을 두고 서로 연결한 3연접 봉상접지극으로 구성하였으며, 과도임피던스 특성을 분석하기 위하여 상승시간 30[ns], 펄스폭 20[μs]의 직각파전류 발생장치를 설계 제작하였다.

실제 낙뢰에 의한 접지임피던스의 변화를 관찰하기 위하여, 국제규격 ANSI/IEEE, IEC에 규정되어 있는 뇌충격전류를 인가하여 이에 따른 특성변화를 측정·분석하였다. 접지계로 유입된 과도전류는 접지계의 전위를 상승시키며, 이 때의 전위상승과 유입전류의 비로써 접지임피던스를 산출하며, 뇌격전류에 대한 경제적인 보호수준을 평가·예측하기 위하여 임피던스 파라미터를 측정결과로부터 산출하였다. 또한 연결에 따른 접지임피던스의 감소와 접지리드선이 미치는 영향도 분석하였다.

ABSTRACT

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

In the experiment, the grounding system consists of a single grounding rod($\phi 10[\text{mm}]$, 1[m]) and/or a triple-grounding rods of equilateral triangles with 5[m] spacing for operation.

To analyze the transient impedance characteristics of the grounding system, a pulse generator which can produce square wave of a 30[ns] rise-time and a 20[μs] pulse duration is designed and fabricated.

The injected current in the grounding system and the developed potential were recorded, and the time variation of the transient impedance were calculated as the ratio of the potential rising to the injected current at each time.

The transient impedance and the effective surge impedance Z_3 which defines economic protection level in power system were quite higher than the stationary resistance. The grounding impedance is decreased by the application of the triple-rods grounding system, and its effect is decreased as the frequency of the current is increased due to the inductance of the grounding leads.

* 한국해양대학교 전기공학과

** 동명정보대학교 컴퓨터공학과

접수일자: 2000. 11. 9

I. 서론

전력수요의 급증으로 전력계통이 복잡·다단화 되고 전력공급에 고신뢰성이 요구되면서 효율적인 운용을 위하여 전자·제어장비를 이용한 무인시스템의 구축이 활발히 진행되고 있다. 이들 운용설비는 물론 산업사회에 사용되는 모든 전기·전자기기는 뇌격이나 지락, 단락사고 등에 의해 발생하는 이상전압·전류에 매우 취약하여 기기의 오동작, 파손 및 정보의 손실을 가져오며 인체의 안전에도 위협 요인이 된다.

이에 대해 접지는 이상전압·전류를 대지로 흘려보내 전위상승을 억제함으로써 각종 기기의 절연파괴와 감진 등 재해를 방지할 수 있으므로 이에 대한 적절한 대책과 연구가 필요하다[1].

수 년 전까지만 해도 접지성능 즉, 접지저항은 직류 또는 상용주파수와 같은 저주파 전압으로 평가하였다. 그러나 실제 운용조건에서 발생하는 이상전압·전류는 수 십 [kV] 이상의 주파수 성분이 포함되므로, 이러한 과도전류가 접지계를 통하여 유입될 때는 도전성 전류뿐만 아니라 접지계의 인덕턴스에 의한 유도성 전류와 접지극과 대지간의 정전용량에 의한 용량성 전류가 흐르게 된다. 따라서 접지설계시 이러한 특성을 고려하여 직류 및 상용주파수에 상당하는 정상상태의 접지저항은 물론 이보다 높은 과도상태의 접지임피던스로 해석해야 한다.

과도전류에 의해 접지임피던스의 값이 커지면 접지극의 전위가 높아지게 되며, 과도전압에 대한 내성이 약한 전자기기에 침입하여 절연파괴를 일으키거나 연결되어 있는 전기·전자기기를 파손시키는 등 심각한 장애를 초래하게 된다. 그러나 국내에서는 과도접지임피던스에 대한 해석은 아직도 초보단계이며, 이를 측정하기 위한 계측장비마저 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 이와 같이 접지로부터 유입되는 과도전류에 대한 효과적인 보호대책 수립에 필요한 기초적 자료를 제공하기 위하여, 봉상접지극에 대한 접지임피던스의 과도특성을 측정·분석하였으며, 주요 연구내용은 다음과 같다.

과도전류에 대한 봉상접지극의 과도접지임피던스의 특성을 파악하기 위해 급준한 상승시간을 갖는 직각파 전류를 단일, 3연접 접지극에 인가하여 이 때의 대지전위상승과 과도접지임피던스 특성변화를 정상상태와

비교하여 측정·분석하였다.

실제 낙뢰에 의한 뇌격전류가 접지극에 유입되었을 때의 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하기 위해 국제규격 ANSI/IEEE, IEC에 규정되어 있는 뇌충격전류를 인가하여 이에 따른 과도접지임피던스의 특성변화를 측정·분석하였다. 연접에 의한 접지임피던스의 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.

II. 이론

2.1 봉상접지극의 등가회로

접지계의 과도접지임피던스에 대한 분석은 접지계를 통한 과도전류의 유입시 접지극의 전위상승을 예측하여 합리적인 대책 수립과 보호수준을 정할 수 있다. 그림 1은 대지에 타입된 봉상접지극을 R-L-C 집중정수회로로 나타낸 등가회로이다[2].

이 때의 정상접지저항 R은 dwight에 의해 유도된 식 (1)에 의해 주어진다[3].

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

여기서 ρ 는 대지저항률, l은 접지봉의 길이, d는 접지봉의 직경이다.

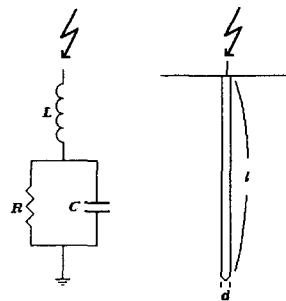


그림 1. 봉상접지극의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of a grounding rod

전극에 인가된 전압이 시간에 따라 변할 때, 도전성 전류뿐만 아니라 유도성, 용량성 전류도 나타나게 되

며 봉상접지극의 인덕턴스 L과 캐패시턴스 C는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

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

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

여기서; ϵ_r = 토양의 유전상수

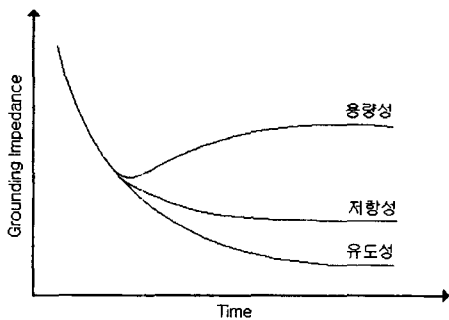


그림 2 접지임피던스의 과도특성
Fig. 2 Transient characteristics of a grounding impedance

급준한 상승시간을 갖는 직각파 전류에 대한 봉상 접지극의 과도접지임피던스는 이러한 회로정수에 의하여 저항성, 유도성, 용량성 특성을 나타내며, 접지극의 고유한 시정수에 따라 전위상승 정도와 임피던스 변화 형태가 결정된다. 그림 2는 이러한 접지계의 과도특성 예를 개략적으로 나타낸 것이다[4].

2.2 임피던스 파라미터

접지계의 임피던스 파라미터는 뇌충격전류가 유입할 때 접지계의 보호종류와 보호수준 결정에 필요하다. Z로 정의되는 임피던스 파라미터는 뇌충격전압과 뇌충격전류의 비($Z(t) = V(t)/i(t)$)로 정의된다. 또한 임피던스 파라미터는 그림 3과 같이 뇌충격전압과 뇌충격전류의 각 최대값을 기준으로 다음과 같이 정의한다[5].

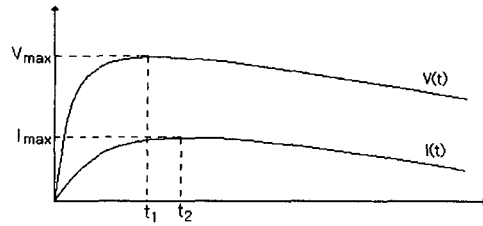


그림 3 임피던스 파라미터의 정의
Fig. 3 Definition of impedance parameters

$$Z_1 = \max(Z(t)) \quad [\Omega] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Z_2 = \frac{V(t_1)}{i(t_1)} \quad [\Omega] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Z_3 = \frac{V(t_1)}{i(t_2)} \quad [\Omega] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Z_4 = \frac{V(t_2)}{i(t_2)} \quad [\Omega] \quad \dots\dots\dots (7)$$

- 여기서; Z1 = 뇌충격전압과 전류 비의 최대값
- Z2 = 전압이 최대값에 도달할 때 전압의 최대값과 전류값의 비
- Z3 = 최대전압과 최대전류의 비
- Z4 = 전류가 최대값에 도달할 때 전압과 전류값의 비

특히 Z3는 실효서지임피던스(effective surge impedance)라고 하며, 뇌충격전류에 대하여 경제성을 고려한 보호수준으로써 접지설계시 중요한 파라미터이다.

III. 실험장치 및 방법

인가전류의 상승시간에 따라 접지극의 과도응답 특성은 현저하게 달라지기 때문에 상승시간이 완전한 전류를 인가하여 산출한 결과는 올바른 접지극의 과도임피던스 특성이라 할 수 없다. 급준한 과도전류에 대한 접지극의 과도특성을 측정·분석하기 위해서는 상승시간이 빠른 직각파 전류가 요구된다. 따라서 과도전류의 상승시간보다 빠른 전류를 발생시키는 직각파 전류 발생장치를 제작하여 접지극의 과도임피던스 측정에 이용하였다. 또한 접지계를 통하여 유입하는 과도전류는 낙뢰의 영향으로 뇌충격전류의 형태를 나타내

며 접지계의 보호종류 및 보호수준을 선정하기 위해서는 낙뢰의 파형과 동일한 전류가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 국제규격에 따른 8/20[μs] 뇌충격전류를 인가하여 실제 뇌격에 의한 과도접지임피던스 특성을 측정·분석하였다.

3.1 직각파 전류 발생장치

접지극의 과도임피던스 특성을 측정하기 위한 전류는 이상적으로 상승시간이 빠르고, 피측정전극의 전파 시간 이상의 펄스폭을 갖는 직각파 전류가 가장 바람직하다. 상승시간이 직각파에 가까운 전류파형을 기존의 과도전류발생장치로는 얻기가 힘들기 때문에 인위적으로 원하는 인가전류파형을 만들어주는 펄스성형회로가 필요하다[4].

펄스성형회로(PFN; pulse forming network)는 집중정수인 인덕턴스 L, 캐패시턴스 C를 직·병렬로 여러 개를 접속하여 구성함으로써 전송선로와 같은 동작 원리로 적용할 수 있다. 또한, 펄스의 상승시간과 펄스폭의 조정이 편리하기 때문에 과도접지임피던스 특성을 측정하기에 적합하다.

그림 4는 N단의 캐패시턴스 C와 인덕턴스 L의 조합으로, 부하 R에서 원하는 직각파 출력파형을 얻기 위한 일반적인 펄스성형회로의 구성이다. 출력파형의 기본적인 특성은 다음과 같다.

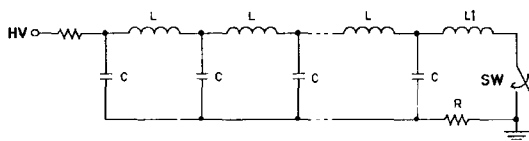


그림 4. 펄스성형회로
Fig. 4 A pulse forming network

- 여기서; N = 펄스성형회로의 단수
- Z = 펄스성형회로의 특성 임피던스
($Z = \sqrt{L/C}$)
- V0 = 충전전압
- R = 부하 임피던스
- L = 한 단의 인덕턴스
- C = 한 단의 캐패시턴스

펄스폭은 다음 식에 의하여 결정된다[6]~[8].

$$\tau \approx 2N\sqrt{LC} \quad [s] \dots\dots\dots (8)$$

부하의 출력전압은 식 (9)와 같이 결정되며, 출력전류는 식 (10)에 의하여 결정된다[6]~[8].

$$V = \frac{R}{Z+R} V_0 \quad [V] \dots\dots\dots (9)$$

$$I = \frac{V_0}{Z+R} \quad [A] \dots\dots\dots (10)$$

주어진 부하 임피던스 R과 펄스성형회로의 특성 임피던스 Z의 정합관계(R=Z)로 단수 N이 주어지면, C와 L은 다음 식으로 결정된다[6]~[8].

$$C = \frac{\tau}{2NZ} (R=Z) [F], L = \frac{\tau Z}{2N} [H] \dots\dots (11)$$

$$\tau_r \approx \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{L_1C} - \frac{R^2}{4L_1^2}}} \quad [s] \dots\dots (12)$$

제 1단의 인덕턴스 L1은 출력스위치와 부하의 인덕턴스를 포함한 것으로 출력파형에서 상승시간을 결정하는 중요한 요소이다. 펄스성형회로의 제 1단의 R, L1, C로 구성된 폐회로에 의해 출력파형의 상승시간은 식 (12)에 의해 결정된다.

그림 5는 본 연구에서 제작한 직각파 전류 발생장치의 사진으로 상단은 충전을 위한 직류전압 발생장치를 나타내며, 하단은 펄스성형회로로서 8.2[μH]의 인덕턴스 L과 3.3[nF]의 캐패시턴스 C를 61단으로 구성하였다.

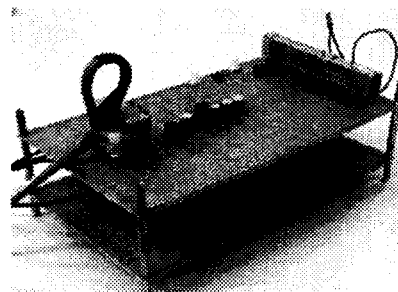
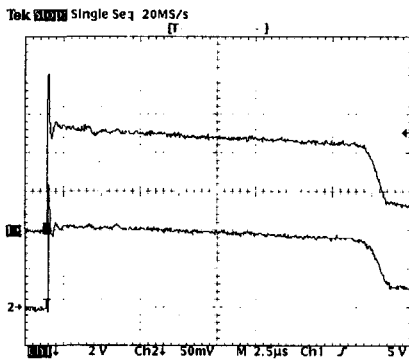


그림 5. 직각파 전류 발생장치의 사진
Fig. 5 Photograph of the square pulse current generator

그림 6은 직각파 전류 발생장치의 출력전압, 전류파형을 나타낸다. 초기부분에 낮은 L1과 단수 N에 의한 진동성분과 전체적으로 L, C의 누설저항으로 인하여 감쇠되는 파형을 나타내지만, 30[ns]이하의 상승시간과 20[μs]의 펄스폭을 갖는 직각파 전류를 발생하므로 접지계의 과도특성을 측정·분석하기에 적합함을 알 수 있다.



상: 출력전압[2V/div, 2.5μs/div]
하: 출력전류[50mA/div, 2.5μs/div]

그림 6. 직각파 전류 발생장치의 출력파형
Fig. 6 Output waveforms of the square pulse current generator

3.2 측정계의 구성

제한된 구역 안에서 전위강하법을 이용한 접지저항 측정계를 구성하기 위해 접지계의 저항구역과 보조극의 위치를 선정할 필요가 있다. 접지저항분포는 접지극 E로부터 20[m]의 간격을 두고 전류보조극 C를 설치한 후, 전위보조극 P를 접지극 E로부터 0.5[m]의 간격으로 11[m]까지 이동하며 측정하여 그림 7에 나타내었다.

그림 7에서와 같이 접지저항의 분포곡선이 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 고려할때 전저항의 97.7[%]인 5[m]를 저항구역으로 하였다.

그림 8은 전위강하법을 이용한 정상접지저항 및 과도접지임피던스의 측정계를 나타낸 것이다. 메쉬전극과 같은 대규모 접지체의 과도접지임피던스를 측정할 때에는 대지에 유입되는 전류에 의한 유도전압 때문에

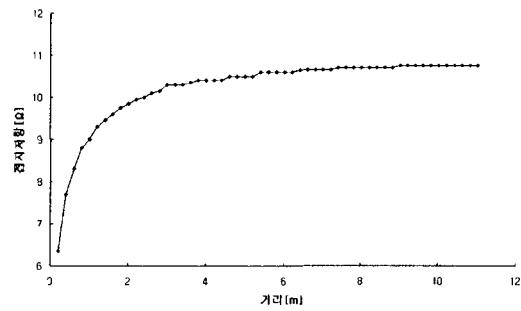


그림 7. 정상접지저항의 분포곡선
Fig. 7 Distribution curve of the stationary grounding resistance

전위보조극 P를 정상접지저항을 측정할 때와는 다른 위치에 설치해야 하지만, 고임피던스 접지계의 경우는 접지저항 분포곡선에서 접지저항의 참값을 얻을 수 있는 평탄한 부분이 나타나기 때문에 정상접지저항을 측정할 때와 같은 방법으로 하는 것이 바람직하다[9].

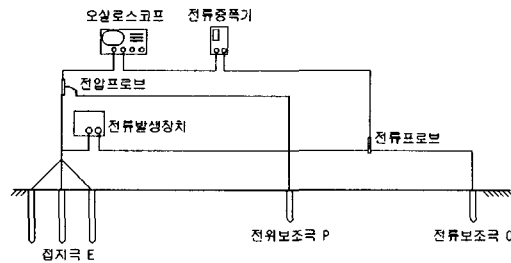
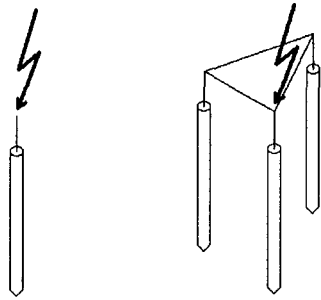


그림 8. 과도접지임피던스 측정계
Fig. 8 Transient impedance measurement system

본 연구에서는 접지극을 그림 9와 같이 구성하여 정상접지저항과 과도접지임피던스 특성을 비교·검토하였다. 또한, 접지극과 피접지체를 연결하는 접지리드선의 길이에 따라 과도접지임피던스 특성이 달라지기 때문에 각각의 접지극에 따라 접지리드선의 길이를 5[m]~50[m]로 변화시키면서 접지리드선 길이에 대한 특성도 검토하였다.

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 인덕턴스를 줄이기 위하여 가능한 겹치거나 루프를 형성하지 못하게 하였다.

접지극 시설기준에 따르면 모든 접지극은 지표면으로부터 0.75[m] 깊이에 매설을 하도록 규정하고 있지만 이는 지표면에 전위상승에 의한 전위경도를 줄이기 위한 것으로 측정장치를 접지극의 저항구역 이상의 간격을 유지하면 규정에 따른 매설깊이를 고려하지 않아도 된다.



(a) 단일 (b) 3연접

그림 9. 접지계의 구성

Fig. 9 Configuration of the grounding systems

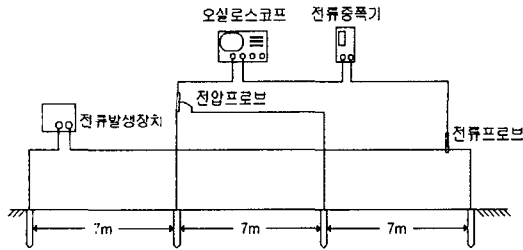


그림 10. 대지저항률 측정계

Fig. 10 Grounding resistivity measurement system

그림 10은 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.

IV. 실험 결과 및 고찰

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

3연접의 정상접지저항은 단일 접지극에 비하여 40.7[%]의 값을 나타내었다. 만일 3연접 접지극을 이

루고 있는 개개의 접지극이 무한거리에 설치된다면, 단일 접지극의 정상접지저항값에 1/3을 나타내겠지만 이는 실제에 있어 불가능하며 저항구역을 고려한 유한 거리에 설치된 경우, 단일 접지극의 대략 40[%]의 정상접지저항값을 나타내므로 수치적인 계산으로도 상당히 일치하고 있다[10].

본 실험에서는 직각파 전류 및 뇌충격전류에 대한 전위상승과 과도임피던스를 표 1의 정상접지저항과 비교하여 정상상태와 과도상태의 임피던스와 그 특성을 비교·분석하였다.

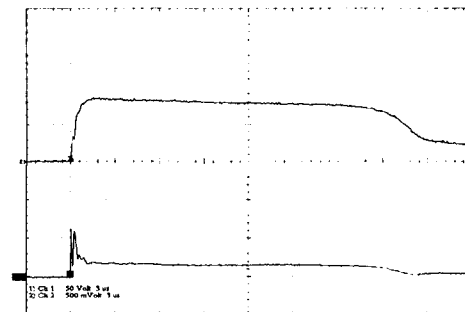
표 1. 정상접지저항
Table 1. Stationary resistance

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

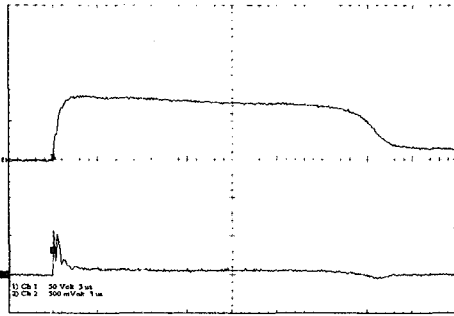
4.1 직각파 전류에 대한 과도접지임피던스

접지극의 과도특성을 측정하기 위하여 펄스형회로(PFN; Pulse Forming Network) 이론을 적용한 직각파 전류 발생장치를 설계·제작하였으며, 상승시간 30[ns], 펄스폭 20[μs], 크기 2[A]를 갖는 직각파 전류를 접지극에 인가하였다.

그림 11은 직각파 전류에 대한 단일, 3연접 접지극의 인가전류 및 전위상승파형을 나타낸 것으로, 전위상승파형은 접지극 모두 250[ns]부근에서 최대값을 나타낸 후 점차 진동 감쇠하여 1.2[μs] 이후에는 정상상태를 유지하였다.



상: 인가전류[1A/div, 3μs/div]
하: 전위상승[50V/div, 3μs/div]
(a) 단일



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

그림 11. 직각파 전류에 대한 응답파형
Fig. 11 Response waveforms to the square pulse current

표 2는 직각파 전류에 대한 전위상승을 과도상태와 정상상태, 단일 접지극과 3연접 접지극으로 분류하여 나타낸 것이다.

단일 접지극의 경우 과도상태시의 최대전위상승은 정상상태시의 전위상승에 비하여 421.3[%]의 높은 값을 나타내었으며, 3연접 접지극의 경우 과도상태시의 최대전위상승은 정상상태시의 전위상승에 비하여 900.0[%]의 높은 값을 나타내었다. 또한 정상상태시 3연접 접지극의 전위상승은 단일 접지극의 전위상승에 비하여 37.3[%]의 값을 나타내어 62.7[%]가 감소한 반면 과도상태시의 최대전위상승은 79.7[%]로 20.3[%]가 감소한 값을 나타내었다. 이처럼 과도상태시 연접효과가 정상상태에 비하여 낮게 나타나는 것은 연접을 했을 때 접지저항이나 접지임피던스는 감소하지만 각 전극을 연결하는 리드선의 인덕턴스 성분과 접속부의 접촉저항에 의한 전위상승이 더해지기 때문이다.

표 2. 직각파 전류에 대한 전위상승
Table 2. Potential rising to the square pulse current

구 분	접지계의 구성		비 율[%] (3연접/단일)	
	단일 접지극	3연접 접지극		
전위상승 [V]	과도상태	63.2	50.4	79.7
	정상상태	15.0	5.6	37.3
비 율[%] (과도상태/정상상태)		421.3	900.0	

그림 12는 시간에 따른 접지극의 과도임피던스 변화를 나타낸 것이다. 단일, 3연접 접지극의 과도임피던스의 특성은 시간이 경과함에 따라 250[ns] 부근에서 최대값을 나타낸 후 500[ns]까지 급격히 감소하다가 그 이후 완만한 감쇠를 하여 1.2[μ s] 이후에는 정상상태로 안정되는 전형적인 유도성 특성을 보였다.

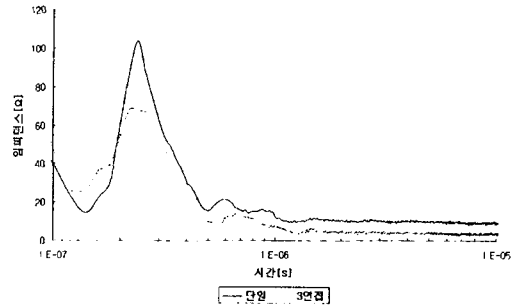


그림 12. 직각파 전류에 대한 과도임피던스
Fig. 12. Transient impedance to the square pulse current

표 3은 각 접지극의 정상접지저항과 최대임피던스의 값 그리고 이들의 비율을 나타낸 것이다.

단일 접지극의 경우 최대임피던스는 정상접지저항에 비하여 962.0[%]의 높은 임피던스 상승을 나타내었으며, 3연접 접지극의 경우 최대임피던스는 정상접지저항에 비하여 1552.3[%]의 높은 임피던스 상승을 나타내었다. 또한 연접에 따른 정상접지저항의 감소비율을 보면, 3연접을 했을 경우 단일 접지극에 비하여 40.7[%]의 값으로 단일 접지극에 비하여 59.3[%]가 감소된 값을 나타내었다. 반면에 최대임피던스의 비율을 보면, 3연접을 했을 경우 단일 접지극에 비하여 65.7[%]의 값으로 단일 접지극에 비하여 34.3[%]가 감소된 값을 나타내었다.

표 3. 직각파 전류에 대한 임피던스
Table 3. Impedance to the square pulse current

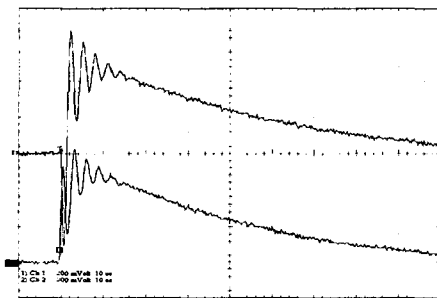
구 분	접지계의 구성		비 율[%] (3연접/단일)	
	단일 접지극	3연접 접지극		
임피던스 [Ω]	최대임피던스	103.9	68.3	65.7
	정상접지저항	10.8	4.4	40.7
비 율[%] (최대임피던스/ 정상접지저항)		962.0	1552.3	

본 실험을 통하여 봉상접지극의 과도접지임피던스 특성은 모두 유도성 특성을 나타내었고, 과도상태의 높은 전위상승 및 임피던스는 접지설계시 반드시 고려되어야 할 것이다. 또한 과도상태시 3연접 접지극의 최대전위상승 및 최대임피던스는 단일 접지극에 비하여 감소된 값을 나타내었지만, 정상상태만큼의 감소된 값을 얻기 위해서는 3연접 접지극을 이루는 리드선과 접속부의 접촉저항을 고려해야 한다.

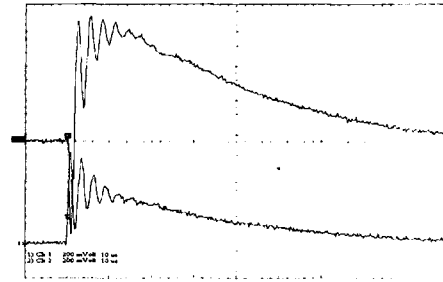
4.2 뇌충격전류에 대한 과도접지임피던스 특성

본 실험에서는 실제 뇌격에 의한 접지계의 과도접지임피던스 특성을 분석하기 위하여 접지극에 뇌충격전류를 인가하여 이에 따른 단일, 3연접 접지극의 전류, 전위, 접지임피던스 특성을 측정·분석하고 실험 결과로부터 각 접지극에 대한 임피던스 파라미터를 결정하였다. 실제 접지계의 구성요소인 접지리드선의 영향을 파악하기 위하여 각 접지극에 대한 접지리드선 길이의 변화에 대한 특성도 측정·분석하였다.

그림 13은 8/20[μ s] 뇌충격전류에 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 고유진동 때문이다.



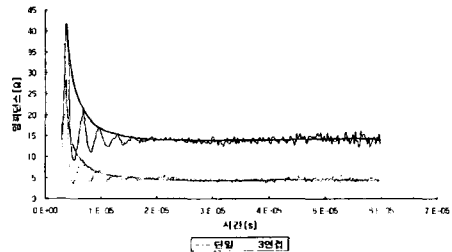
상: 인가전류[15A/div, 10 μ s/div]
하: 전위상승[200V/div, 10 μ s/div]
(a) 단일



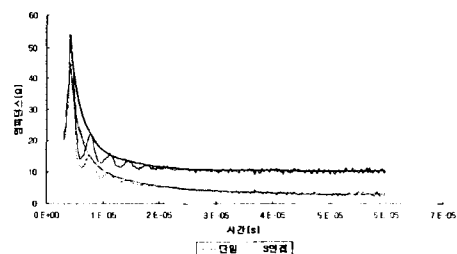
상: 인가전류[17A/div, 10 μ s/div]
하: 전위상승[200V/div, 10 μ s/div]
(b) 3연접

그림 13. 뇌충격전류에 대한 과도응답 파형
Fig. 13 Response waveforms to the lightning impulse current

접지리드선의 길이가 5[m]와 50[m]일 경우 시간에 따른 각 접지극의 과도임피던스 변화를 그림 14에 나타내었다. 뇌충격전류에 대한 접지극의 과도임피던스 특성은 모두 유도성 특성을 보였으며, 접지리드선의 길이가 5[m]보다 50[m]일 경우 인덕턴스 성분이 증가하여 과도접지임피던스의 값이 더 높았으며, 긴 시간을 통하여 정상상태에 도달하였다.



(a) 접지리드선이 5[m]일 경우

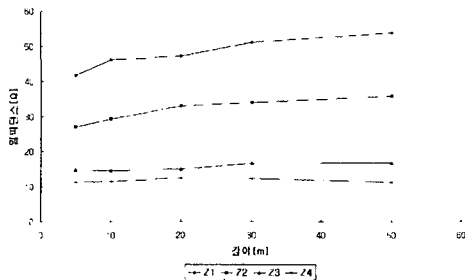


(b) 접지리드선이 50[m]일 경우

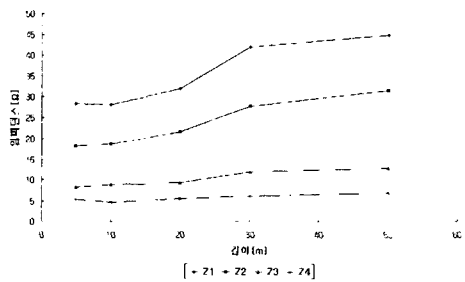
그림 14. 뇌충격전류에 대한 과도임피던스
Fig. 14 Transient impedance to the lightning impulse current

그림 15는 뇌충격전류에 대한 접지극의 임피던스 파라미터를 접지리드선의 길이에 대하여 나타낸 것이다. 크기를 볼 때, $Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4$ 의 순서로써 임피던스 파라미터간의 일반적인 관계와 일치하며, 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.

접지리드선에 대한 임피던스 파라미터와 정상접지저항의 관계를 명확히 하기 위하여 임피던스의 최대값 Z_1 , 실효저지임피던스 Z_3 , 정상접지저항 및 각각의 비율을 표 4, 5에 나타내어 비교·분석하였다.



(a) 단일



(b) 3연접

그림 15. 접지리드선의 길이에 따른 임피던스 파라미터 변화

Fig. 15 Changes of the impedance parameters as the length of the grounding leads

표 4를 보면, 단일 접지극의 경우 정상접지저항에 대한 실효저지임피던스 Z_3 는 138.0[%], 3연접 접지극의 경우 정상접지저항에 대한 실효저지임피던스 Z_3 는 186.4[%]로 정상접지저항보다 약간 높은 임피던스값

을 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 5와 같이 접지리드선의 길이가 길어질 경우 더욱 증가하였다.

표 4. 뇌충격전류에 대한 임피던스 파라미터 (접지리드선 = 5[m])

Table 4. 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	

접지리드선이 연접에 의한 임피던스 파라미터 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 줄어들었다. 이는 연접에 의한 임피던스의 감소보다는 접지리드선의 길이에 대한 임피던스의 증가가 더욱 우세한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 연접을 통하여 과도접지임피던스를 감소시키기 위해서는 가능한 접지리드선의 길이를 줄이는 것이 좋다.

표 5. 뇌충격전류에 대한 임피던스 파라미터(접지리드선 = 50[m])
Table 5. 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	

V. 결론

본 연구에서는 접지계의 과도특성을 파악하기 위하여 봉상접지극을 단일 및 3연접으로 구성하고, 직각파 전류와 뇌충격전류를 인가하여 전위상승 및 임피던스에 대한 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 접지계의 과도특성 분석에 필요한 빠른 상승시간을 갖는 전류원은 펄스형회로(PFN;pulse forming network) 이론을 적용하여 상승시간 30[ns], 펄스폭 20[μs]을 갖는 직각파 전류 발생장치를 설계·제작하였다.

2) 직각파 전류에 대한 단일 및 3연접 접지극의 과도임피던스는 정상접지저항에 비하여 각각 962.0[%], 1552.3[%]의 대단히 높은 값을 나타내었다.

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

4) 단일에 대한 3연접 접지극의 연접효과를 고려해 볼 때, 직각파 전류 인가실험에서는 최대임피던스가 34.3[%], 뇌충격전류 인가실험에서는 실험서지임피던스 Z_3 가 45.0[%] 감소하였다. 전체적으로 연접에 대한 접지임피던스의 감소효과를 나타내고 있으나 정상접지 저항의 감소효과 59.3[%]에 비하여 낮게 나타났다. 특히 접지리드선의 길이가 길어질수록 연접에 따른 임피던스의 감소효과는 더욱 낮아졌다. 이는 연

접에 의한 접지저항 및 인덕턴스의 감소보다 접지계를 이루는 리드선의 인덕턴스 성분과 접속부의 접촉저항의 증가가 지배적이기 때문이다.

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

참고문헌

- [1] 高橋 健彦, 金聖模, 李炯秀 "接地技術入門", 오ーム社, 34~35, 1997.
- [2] M. Abdel-Salam, A. El-Morshedy et al., "High-Voltage Engineering", Marcel Dekker, 419~428, 2000.
- [3] 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.
- [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, 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] 京都-ハイパワーテクノロヅ-研究會, "パルズパワー工學の基礎と應用", 京都-ハイパワーテクノロヅ-研究會, 78~80, 1992.
- [7] Antonino Musolino, Marco Raugi, Bernardo Tellini, "Pulse Forming Network Optimal Design for the Power Supply of Eml Launchers", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 1, 480~483, 1997.
- [8] 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.
- [9] IEEE Std 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, 17~24, 1983.
- [10] M. S. Naidu, V. Kamaraju, "High Voltage Engineering", McGraw-Hill, 143~147, 1995.



김 일 권(II-Kwon Kim)
1997년: 한국해양대학교 전기공학
학과 졸업(공학사)
2001년: 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학석사)
현재: 동 대학원 전기공학과 박사
과정



송 재 용(Jae-Yong Song)
1997년: 한국해양대학교 전기공학
과 졸업(공학사)
1999년: 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학석사)
1999년~현재: 동 대학원 전기공
학과 박사과정

1999년~현재 : (주)신동아전기 연구원



길 경 석(Gyung-Suk Kil)
1984년: 인하대학교 전기공학과 졸업
(공학사)
1987년: 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학석사)
1996년: 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학박사)

1996년 4월~현재 : 한국해양대학교 전기전자공학부
조교수

* 주관심분야: 고전압·방진, EMI/EMC

권 장 우(Jang-Woo Kwon)

1990년: 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1992년: 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
1996년: 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
1998년~현재: 동명정보대학교 컴퓨터공학과 조교수