Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 22, No.10, pp. 62~68 October 2008 논문 22-10-9

임펄스전류의 인가위치에 따른 심매설 봉상 접지전극의 과도접지임피던스 특성

(Transient Grounding Impedance Behaviors of Deeply-driven Ground Rods According to the Injection Point of Impulse Currents)

이수봉* · 이 풍 · 이승주 · 전병욱 · 이복희

(Su-Bong Lee · Feng Li · Seung-Ju Lee · Byung-Wook Jeon · Bok-Hee Lee)

요 약

본 논문은 임펄스전류의 인가위치에 따른 심매설 봉상 접지전극의 과도접지임피던스와 규약접지임피던스 특성에 관하여 기술하였다. 과도접지임피던스는 심매설 접지전극의 길이 및 임펄스전류의 상승시간과 인가위치에 강하게 의존하며, 접지전극의 자체 인덕턴스는 짧은 시간 영역에서 접지시스템의 과도접지임피던스에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 심매설 봉상 접지전극의 자체 인덕턴스의 저감은 과도접지임피던스 특성의 개선에 결정적인 역할을 한다. 접지도선의 길이는 최대한 짧게 하여 접지전극의 상단에 접속하는 것이 효과적이다.

Abstract

This paper presents the transient and conventional grounding impedance behaviors of deeply-driven ground rods associated with the injection point of impulse currents. The transient grounding impedance strongly depends on the length of deeply-driven ground rod and the rise time and injection point of impulse currents, and the intrinsic inductance of ground rod has a significant affect on the transient grounding impedance of grounding system in fast rise time ranges. The reduction of inductance is decisive to improve the impulse impedance behaviors of deeply-driven ground rods. It is effective that grounding conductor is connected to the top of the ground rod as short as possible.

Key Words : Deeply-driven ground rod, Transient grounding impedance, Conventional grounding impedance, Impulse current

1. 서 론

낙뢰에 대한 전기설비의 보호에 있어서 접지시스템의 접지임피던스는 중요한 역할을 하며, 피뢰설비와 정보통신설비용 접지시스템의 빠르게 변화하는 전류에 대한 성능을 접지임피던스로 분석하는 연구

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : lsbong1@naver.com
접수일자 : 2008년 7월 23일
1차심사 : 2008년 7월 28일
심사완료 : 2008년 8월 18일

가 이루어지고 있다. 접지전극에 뇌임펄스 전류와 같이 급격하게 변화하는 전류가 유입되면 낮은 주파수의 전류가 흐를 때와는 다르게 짧은 시간영역에서 높은 과도접지임피던스를 나타내게 된다. 즉, 상용주파수 영역에서 접지저항에 거의 영향을 주지 않던 접지도체의 인덕턴스가 높은 주파수 성분의 영향으로 큰 리액턴스를 갖게 된다. 그러므로 접지임피던스는 정상상태의 접지저항과 리액턴스의 백터적인 합으로 결정된다. 이러한 높은 주파수 영역의 접지임피던스 특성은 접지전극의 형상, 규모, 매설방법, 대지저항률, 유전율 등에 의하여 변화하며, 특히 접지에 사용하는 접지도체의 종류, 길이, 굵기, 배치방법 등이 큰 변수로 작용한다. 접지시스템의 임펄스 임피던스 특성에 관한 연구는 아직 부족하며, 특히 실제 접지시스템의 경우에 대한 특성은 더욱 미흡한 실정이다. 피뢰설비의 보호성능은 접지시스템의 임펄스임피던스와 밀접한 관련성을 가진다. 접지시스템의 과도임피던스가 너무 높으면 피뢰설비의 효과는 저감될 것이다. 그러므로 접지시스템의 과도임피던스특성에 대한 보다 면밀한 검토가 요구되며, 규약접지임피던스로 평가할 필요가 있다[1~4].

본 논문에서는 KS C IEC 62305-3규격에 제시되어 있는 심매설 봉상 접지전극의 시공방법에 대한 과도접지임피던스 성능의 분석을 주 대상으로 하였으며[5], 다양한 길이의 심매설 봉상 접지전극에서 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스의 변동특성을 연구하였다. 봉상 접지전극의 상단 및 하단을 통하여 임펄스전류가 인가되는 위치에 따른 접지전극의 전위상승과 과도접지임피던스를 측정하고, 규약접지임피던스를 산출하였으며, 각 실험조건에 대한 결과를 비교 · 검토하였다.

2. 실 험

2.1 측정계의 구성

측정대상 접지전극-전위보조전극-전류보조전극이 일직선상에 배치되는 전형적인 전위강하법은 상용 주파수 범위에서 접지저항을 측정하는 기본적인 방법이지만 임펄스전류와 같이 고주파수를 포함하는 전류를 측정전류로 하는 경우에는 전자유도작용에 의한 오차가 크므로 적절하지 않다. 즉, 측정대상 접지전극으로부터 전류보조전극을 연결하는 도선과 전위보조전극 사이에 발생하는 전자유도결합에 의해서 커다란 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 IEEE 81.2-1991에서 권고하고 있는 전류보조전극을 전위보조극과 90[°] 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하였다[4].

실증시험장에서 과도접지임피던스의 측정을 위한 측정회로의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 측정용 접지전극은 보링공법을 이용하여 직경 54[mm]이고, 길이 10[m], 30[m], 48[m]인 심매설 봉상 접지전극을 수직으로 매설하고, 단면적 100[㎟]인 나동선으로 봉상 접지전극의 상 · 하단에서 각각 인출하였다. 전류보조전극(C)은 인접한 심매설 봉상 접지전극을 이용하였으며, 전위보조전극(P)은 측정대상 접지전극(E)으로부터 64[m] 떨어진 지점에 설치하였다. 측정대상 접지전극과 전류보조전극 사이의 측정전류 인가용 전선은 인덕턴스의 영향을 줄이기 위하여 단면적 10[㎟]의 4심 케이블을 일괄 사용하였다.

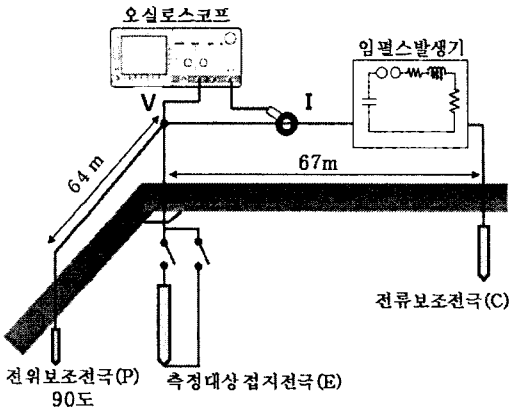


그림 1. 과도접지임피던스 측정을 위한 실험회로
Fig. 1. Experimental circuit of measuring the transient grounding impedance

심매설 봉상 접지전극의 임펄스전류의 인가위치를 그림 2에 나타내었다. 심매설 봉상 접지전극의 하단에 임펄스전류를 인가하기 위해 100[㎟]인 GV 전선을 사용하여 접지도선과 전기적으로 접속시켰다. 실증시험장에 설치된 직경 54[mm], 길이 각각

10[m], 30[m], 48[m]인 동관형 심매설 봉상 접지전극의 상단과 하단에서 측정한 정상상태 접지저항은 각각 9.2, 11.5, 5.8[Ω]으로 거의 차이가 없었다. 정상상태 접지저항은 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극이 가장 크게 나타났고, 48[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우가 가장 낮게 나타났다.

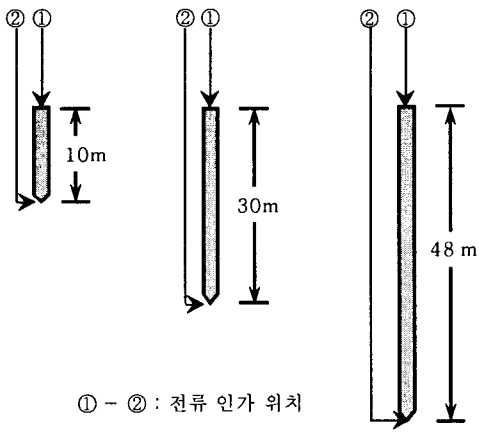


그림 2. 측정대상 접지전극의 배치
Fig. 2. Arrangement of the test ground rods

2.2 측정방법

임펄스전류는 조합형 파형발생장치(Combined wave generator)를 사용하여 인가하였다. 임펄스 전류의 상승시간을 4~20[㎲]로 조정시키면서 측정대상 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하였을 때 접지전위상승은 측정대상 접지전극(E)과 전위보조전극(P)간의 전위차로 측정하였다. 20[Hz]~100[kHz]의 주파수 대역을 갖는 변류기를 이용하여 전류를 측정하였으며, 접지전극의 전위는 75[MHz]의 주파수 대역을 갖는 능동성 차동프로브로 측정하였다. 인가전류와 접지전극의 전위 파형은 500[MHz], 2.5[GS/s] 분해능의 오실로스코프로 관측하였다. 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 접지전극의 전위 파형을 인가전류의 파형으로 나누어 과도접지임피던스를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

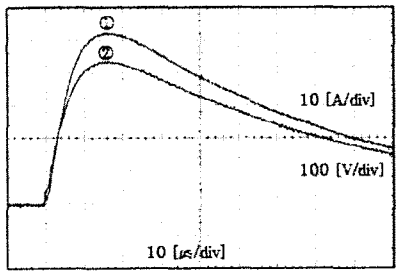
3.1 과도접지임피던스

임펄스전류를 심매설 봉상 접지전극의 상단과 하단에 인가하여 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스의 특성을 평가하였다. 심매설 봉상 접지전극의 임펄스전류 인가위치에 따른 인가전류와 전위상승의 전형적인 파형을 그림 3에 나타내었다.

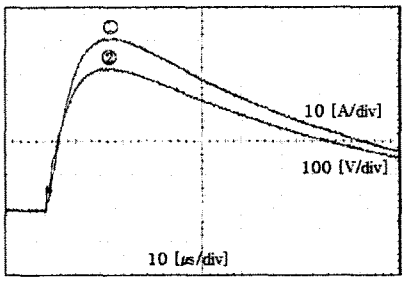
인가된 임펄스전류의 피크값은 약 50[A]이며, 상승시간은 측정대상 접지전극의 인가위치에 따라 다르게 나타났다. 전반적으로 심매설 봉상 접지전극에 유도된 전위 파형의 상승시간은 상단에 비해 하단에서 더 빠르게 나타났다.

길이 10[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우 봉상 접지전극 하단까지의 인하도선 길이가 짧고 길이 30[m]와 48[m]인 봉상 접지전극에 비해 접지전극 자체의 인덕턴스 영향이 작기 때문에 상단과 하단에 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 길이 30[m] 심매설 봉상 접지전극은 상단에 비해 하단에 임펄스전류를 인가시킨 경우 전위파형의 상승시간이 인가전류에 비하여 빠르게 나타났으며, 길이 48[m]인 심매설 봉상 접지전극에서 전위 파형의 상승시간이 가장 빠르게 나타났다. 이러한 인가전류와 전위의 상승시간의 차이는 실험용 접지전극의 회로요소가 저항과 인덕턴스로 이루어졌기 때문이며, 길이 30[m]와 48[m]인 심매설 봉상 접지전극의 하단에 임펄스 전류를 인가시킨 경우 인하도선의 길이가 증가함에 따라 인가전류와의 위상차가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이는 접지전극 자체의 저항성분에 비해 봉상 접지전극 도체의 인덕턴스와 GV전선의 인덕턴스가 합해져서 인덕턴스의 영향이 더 크게 나타나기 때문이다. 길이 30[m]와 48[m]인 심매설 봉상 접지전극의 전위상승 파형에 봉상 접지전극과 인하도선의 인덕턴스 성분에 의한 진동성 성분을 볼 수 있는데 이는 측정대상 접지전극과 전류보조전극 사이 측정상의 노이즈 성분으로 데이터의 분석에 큰 영향을 주지는 않았다.

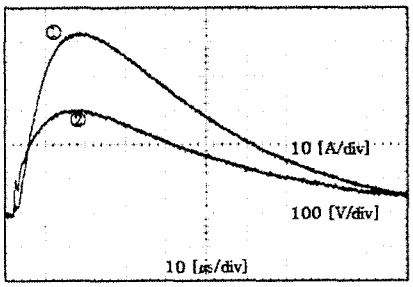
심매설 봉상 접지전극의 임펄스전류 인가위치에 따른 과도접지임피던스곡선(Z-t곡선)를 그림 4에 나타내었다. 일반적으로 과도접지임피던스는 접지전



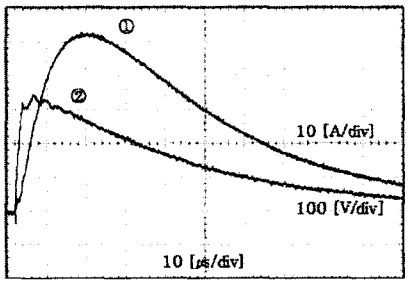
(a) 10[m] 봉상 접지전극 상단에 인가한 경우



(b) 10[m] 봉상 접지전극 하단에 인가한 경우



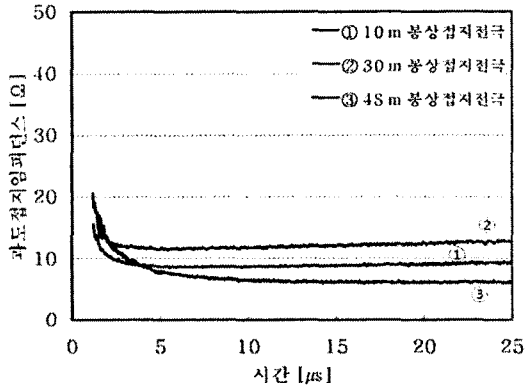
(c) 48[m] 봉상 접지전극 상단에 인가한 경우



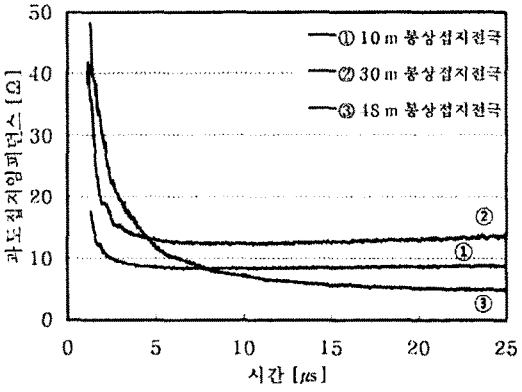
(d) 48[m] 봉상 접지전극 하단에 인가한 경우

①: 인가전류 ②: 전위상승

그림 3. 임펄스전류 인가위치에 따른 심매설 봉상접지전극의 인가전류 및 전위상승 파형
Fig. 3. Typical waveforms of the injected current and potential rise of deeply-driven ground rod according to injection point of impulse current



(a) 접지전극의 상단에 인가한 경우



(b) 접지전극의 하단에 인가한 경우

그림 4. 임펄스전류 인가위치에 따른 심매설 봉상 접지전극별 과도접지임피던스
Fig. 4. Transient grounding impedances by deeply- driven ground rods against the injection point of impulse current

극의 형상과 크기, 접지도체의 인덕턴스, 대지저항률, 인가전류의 크기와 형태 등 여러 가지 요인의 복합적 효과에 의존한다. 과도접지임피던스는 인가된 임펄스전류 피크값까지는 지수 함수적으로 감소하

였다. 임펄스전류 피크값에서의 접지임피던스는 접지저항과 같으며, 인덕턴스의 영향이 없는 것으로 볼 수 있다. 임펄스전류의 피크 이후 과도접지임피던스는 지속적으로 감소하지만 이는 측정회로 자체의 회로적 특성이며, 접지전극 자체의 과도접지임피던스의 특성을 나타내지는 않는다. 즉, 임펄스전류에 의한 접지전극의 과도적 특성은 인가전류인 임펄스전류의 파두부에서 나타나게 된다.

임펄스전류를 접지전극 상단에 인가한 경우 길이 30[m] 심매설 봉상 접지전극의 과도접지임피던스는 길이 10[m] 심매설 봉상 접지전극에 비해 다소 높게 나타났으며, 이는 접지전극 도체의 인덕턴스에 의한 영향보다는 접지저항에 의한 영향이 강하게 작용한 결과로 볼 수 있다. 하지만 길이 48[m]인 봉상 접지전극의 경우 빠른 상승시간에서의 과도접지임피던스가 가장 크게 나타났다. 이러한 현상은 과도접지임피던스의 인덕턴스 성분이 우세하게 작용한 것이며, 전류 피크값에서 접지임피던스는 접지저항과 거의 같아진다.

길이 10[m]인 심매설 봉상 접지전극의 과도접지임피던스는 하단에 임펄스전류를 인가했을 경우가 상단에 인가했을 경우보다 다소 높게 나타났지만 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 길이 30[m]와 48[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우 상단에 임펄스전류를 인가시킨 경우에 비해 하단에 임펄스전류를 인가시킨 경우가 과도접지임피던스가 더 크게 나타났다. 임펄스전류 피크 이전의 시간 범위에서 과도접지임피던스는 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 심매설 봉상 접지전극의 자체 인덕턴스 성분과 인하도선으로 사용된 GV전선의 인덕턴스가 우세하게 작용한 것이며, 전류 피크값 이후에서 접지임피던스는 접지저항과 거의 같아진다. 상단에 임펄스전류를 인가시킨 경우 길이 48[m]인 심매설 봉상 접지전극은 길이 30[m]와 10[m]인 심매설 봉상 접지전극에서의 각각 3[㎲]와 4[㎲]를 전후로 서로 교차하는 것을 볼 수 있다. 또한 하단에 임펄스 전류를 인가시킨 경우 길이 48[m]인 심매설 봉상 접지전극은 상단과 마찬가지로 길이 30[m]와 10[m]인 심매설 봉상 접지전극은 각각 6[㎲]와 9[㎲]를 전후로 서로 교차하는 것을 볼 수 있다. 이는 길이 30[m]와 48[m] 심매설 봉상 접지전극의 경우 자체 인덕턴스와 인하도선의 길이에 따른 인덕턴스의 영향이 빠른 상승시간에서 뚜렷이 나타나며, 길이 10[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우는 주로 인덕턴스의 영향보다는 저항 성분의 영향이 지배적으로 나타났기 때문이다.

3.2 규약접지임피던스

접지전극에 임펄스전류 $i(t)$가 유입된 때에는 단순히 저항만이 아니라 인덕턴스 (L)나 정전용량 (C)의 영향 때문에 일반적으로 접지전극과 무한원점 사이에는 그림 5에 나타낸 바와 같은 전압 $v(t)$가 나타나며, 일반적으로 피크가 동시에 나타나지 않는다. 이 때 전압과 전류의 피크값의 비 즉,

$$Z = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \tag{1}$$

를 규약접지임피던스(Conventional grounding impedance)라 한다[6-7]. 접지시스템의 임펄스전류에 대한 과도적인 특성을 간이적으로 나타낸 것으로 규약접지임피던스가 낮은 것이 뇌격전류가 흐를 때 전위상승이 낮으므로 피뢰설비용으로 성능이 양호한 접지시스템이라고 볼 수 있다. 접지시스템의 과도임피던스를 결정하는 중요한 요소들은 접지저항, 접지전극 자체의 저항 및 인덕턴스 그리고 토양의 정전용량 등이다[8].

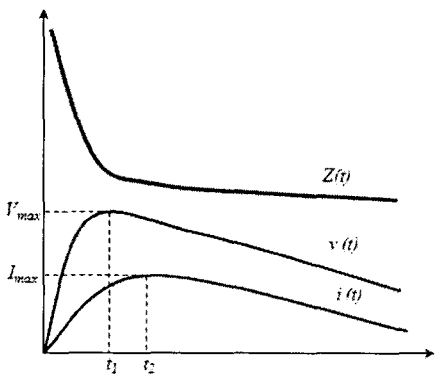


그림 5. 규약접지임피던스의 정의
Fig. 5. Definition of the conventional grounding impedance

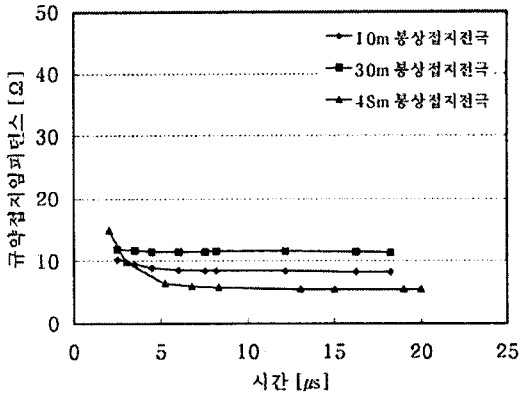
특히 규약접지임피던스는 접지전극의 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 영향을 받으므로 동봉을 접지전극으로 사용한 경우 저항과 인덕턴스의 조합으로 전기적 등가회로를 구성할 수 있다. 특히 낮은 대지저항률을 가지는 토양에 접지전극을 시설하는 경우 대지의 커패시턴스성분은 무시되기도 한다. 임펄스전류에 대한 접지전극의 전위상승은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

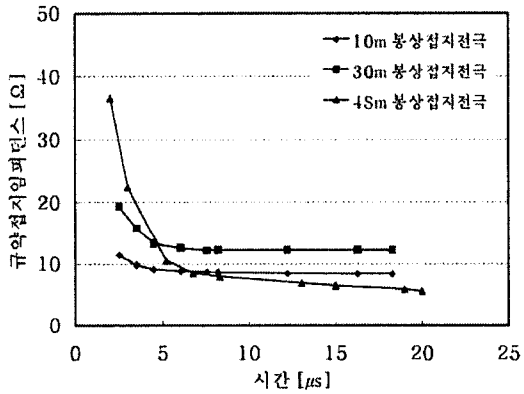
R은 접지저항과 접지전극의 저항의 합이고, L은 접지전극의 인덕턴스이다. 일반적으로 접지전극의 길이가 길어지면 접지저항 R은 감소하고 인덕턴스 L은 증가한다. 접지저항은 기본적으로 대지저항률과 접지전극의 치수에 의해 결정된다. 접지전극의 길이가 길어지면 접지저항은 감소하고, 과도접지임피던스는 접지전극의 인덕턴스의 영향으로 증가한다. 또한 인가하는 임펄스전류의 파형에 의존하게 된다. 임펄스전류의 변화율에 의한 전위강하 때문에 접지임피던스는 접지저항보다 크게 된다[9]. 임펄스전류의 인가위치에 따른 심매설 봉상 접지전극의 규약접지임피던스를 측정하여 접지전극의 길이별로 도시한 결과를 그림 6에 나타내었다.

규약접지임피던스는 인가전류의 상승시간과 접지전극의 크기, 인가위치에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 봉상 접지전극의 상단에 임펄스전류를 인가한 경우 길이 48[m]인 심매설 봉상 접지전극의 규약접지임피던스는 5[㎲] 이전의 빠른 상승시간에서는 길이 10[m]와 30[m]인 심매설 봉상 접지전극에 비해 크게 나타났지만, 5[㎲] 이후의 시간에는 반전된 특성을 나타내고 있다. 이것은 빠른 상승시간에서 규약접지임피던스는 주로 길이 48[m]인 심매설 봉상 접지전극의 낮은 접지저항과 상대적으로 높은 인덕턴스 성분의 영향이 지배적으로 작용한 결과이며, 느린 상승시간에서는 길이 10[m]와 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 높은 접지저항의 영향이 지배적으로 나타났기 때문이다.

본 연구에서 길이 30[m]인 심매설 봉상 접지전극의 경우가 인가전류의 상승시간에 따른 영향이 길이



(a) 접지전극의 상단에 인가한 경우



(b) 접지전극의 하단에 인가한 경우

그림 6. 임펄스전류의 인가위치에 따른 심매설 봉상접지전극별 규약접지임피던스

Fig. 6. Conventional grounding impedance by deeply-driven ground rods against the injection point of impulse currents

10[m]와 48[m]인 심매설 봉상 접지전극에 비해 상대적으로 적게 나타났다. 하지만 봉상 접지전극의 하단에 임펄스전류를 인가한 경우 5[㎲] 이전의 빠른 상승시간에서 3종류의 심매설 봉상 접지전극 모두 봉상 접지전극 도체의 인덕턴스와 전류 인가선으로 연결된 GV전선의 인덕턴스 영향이 상단에 인가한 경우에 비해 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 길이 10[m]와 30[m]인 봉상 접지전극은 10[㎲] 이후에서 접지저항에 수렴해 가는데 반해 약 길이 50[m]에 가까운 GV전선이 연결된 길이 48[m]인 봉상 접지전극은 GV전선의 인덕턴스와 봉상전극 자체의 인덕턴스에 의해 20[㎲] 이후의 시간에서 접지저항에 수

럼해 가는 것을 볼 수 있다. 따라서 심매설 봉상 접지전극을 설치할 경우 인덕턴스의 영향을 고려하여 접지전극의 크기를 산정하고 접지도선의 길이는 최대한 짧게 설치하여야 할 것이다. 이와 더불어 접지저항 또한 고려해야 할 중요한 요소가 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

심매설 봉상 접지전극의 길이와 임펄스전류의 인가위치에 따른 과도접지임피던스와 규약접지임피던스의 특성을 실험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

심매설 봉상 접지전극의 적절한 과도접지임피던스를 얻기 위한 최선의 방법은 접지저항과 인덴턴스를 동시에 감소시키는 것이며, 규약접지임피던스는 임펄스전류의 상승시간이 짧아짐에 따라 접지저항에 비해 큰 값을 나타내었다. 심매설 봉상 접지전극을 설치할 경우 인덴턴스의 영향을 고려하여 접지전극의 크기를 산정하고 접지도선의 길이는 최대한 짧게 하여 접지도체의 상단에서 인출하는 것이 보다 효과적이다. KS C IEC 62305규격군에 제시된 시공방법이라도 접지전극의 길이를 고려하는 적합한 시공방법의 선정이 바람직한 것으로 판단되다.

References

[1] J. H. Bogensperger, J. Frei and S. Pack, "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behavior", Proc. 9th international Symposium on High Voltage Engineering, pp.6715-1~4, 1995.9.

[2] S. Karaki, et al, "Transient Impedance of GIS Grounding Grid", IEEE Trans., Vol.PD-10, No.2, pp.723~738, 1995.

[3] Bok-Hee Lee,Dong-Cheol Jeong, Su-Bong Lee and Keun-Chul Chang, "Effective Impulse Impedances of Deeply Driven Grounding Electrodes", KIEE International Trans on EA, vol. 4-C, no. 5, pp. 207~214, 2004.

[4] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE Inc., pp.1731, 1991.

[5] KS C IEC 62305-3, 피뢰시스템-제3부: 구조물의 물리적 손상 및 인명위험, pp.148~159, 2007.

[6] KS C IEC 62305-1, 피뢰시스템-제1부: 일반원칙, pp.3~15, 2007.

[7] B. R. Gupta and B. Thapar, "Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Trans. Vol.PAS-99, No.6, pp.214~218, 1980.

[8] M. Ramamoorty, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran and D. Mukhedkar, "Transient Performance of Grounding Grids", IEEE Trans. Vol.PD-4, pp.2053~2058, No.4, 1989.

[9] 이복희 外, "조합형 써지전압·전류발생기의 제작과 특성", '96 대한전기학회 하계학술대회 논문지, Vol.C, pp1876~1878, 1996.7.

◇ 저자소개 ◇

이수봉 (李守俸)
1979년 4월 13일생. 2002년 2월 경남대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032) 863-5822
E-mail : lsbong1@naver.com

이 봉 (李 峰)
1978년 9월 5일생. 2001년 7월 중국 하얼빈이공대학교 전기공학과 졸업. 2006년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : lifeng197895@hanmail.net

이승주 (李承柱)
1981년 4월 9일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : cloudwise@naver.com

전병욱 (全炳昱)
1984년 1월 6일생. 2007년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : junbw2@naver.com

이복희 (李福熙)
1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinati대학 방문교수. 현재 인하대공대 전자전기공학부 교수.
본 학회 부회장.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr