

접지전류의 주파수에 따른 대지표면전위 상승 및 위험전압의 분석

(An Analysis of the Ground Potential Rises and Dangerous Voltages Associated with the Frequency of Ground Currents)

최종혁* · 조용승 · 이복희

(Jong-Hyuk Choi · Yong-Sung Cho · Bok-Hee Lee)

Abstract

The most important object of grounding systems is to protect human being from electric shock. Touch and step voltages are measured to evaluate the performances of grounding systems. Dangerous voltages have been largely studied by the power frequency fault currents, on the other hand, the ground current containing the high frequency components and surge currents haven't been considered. Many attempts about the grounding impedances reported in these days show that the performance of the grounding systems in high frequency range is very different with the ground resistance. It is necessary to analyze the dangerous voltages formed by the ground currents containing high frequency components. In this paper, the ground surface potential rises near the vertical and horizontal grounding electrodes are measured at the frequency of 100[Hz], 30[kHz], and 100[kHz]. Dangerous voltages are investigated with the frequency-dependent grounding impedance. As a result, the ground surface potential rise is increased as the grounding impedance increases. Touch and step voltages near the grounding electrode whose impedance increases with the frequency are sharply raised.

Key Words : Ground Surface Potential Rise, Dangerous Voltage, Touch Voltage, Step Voltage, Grounding Impedance

1. 서 론

접지설비의 목적은 사람 또는 가축에 대한 감전의 방지와 전력설비나 정보·통신 설비, 건축물의 재해 방지, 전기설비 회로의 특성 및 기능의 향상,

이상전압 발생의 억제, 보호계전기의 동작확보, 전로의 대지전압의 저감과 같은 접지효과에 의한 전기적 특성의 향상이나 대지 귀로의 이용 등 매우 다양하다. 그 중 가장 중요한 역할은 낙뢰 또는 고저압의 혼축에 의한 과전압이나 누전 등에 의한 인축의 감전을 막는 것이라 할 수 있다[1]. 감전의 위험성 즉, 사람에게 위험한 전압(접촉전압 및 보폭전압)으로 접지성능을 평가하는 연구들이 많이 수행되었으며[2-3] 접지전극에 고장전류가 흘렀을 때

* 주저자 : 인하대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : chjohy80@naver.com
접수일자 : 2011년 1월 3일
1차심사 : 2011년 1월 6일
심사완료 : 2011년 1월 31일

접지전극의 전위상승 및 대지표면전위상승을 억제하여 위험전압을 감소시키는 방법들에 관한 연구들이 많이 수행되었다[4].

최근 고도정보화 사회로 발전되면서 각종 전력전자기기들의 사용이 빈번해 지면서 고주파수의 누설전류 및 고장전류들이 크게 증가하였다. 또한 기후의 변화로 인하여 고주파수의 큰 전류를 포함하고 있는 뇌 서지전류의 횡수가 증가하면서 접지전극에 이러한 고주파 고장전류들이 흘러들어갈 수 있는 확률이 매우 크게 증가하고 있다. 때문에 접지성능을 평가하기 위해서 상용주파수에서 측정된 접지저항이 아닌 고주파 및 임펄스전류에 의해 측정된 접지임피던스에 관한 많은 논문들이 발표되고 있으며[5-6], 그에 따라 접지임피던스에 관한 많은 기술적 발전들이 이루어졌다. 하지만 고주파 고장전류가 접지전극에 인가되었을 때 접지전극 주변의 전위 및 인체에 가해질 수 있는 위험전압에 대한 분석은 많은 연구가 수행되지 못하고 있는 실정이다. 접촉전압 및 보폭전압의 경우 접지임피던스 및 대지표면전위 상승 등에 따라 직접적으로 영향을 받기 때문에 접지임피던스와 마찬가지로 저주파수에서 측정된 결과만으로 고주파에 대한 성능에 대응할 수 없다. 또한 대부분의 대형 접지전극에 대한 접지임피던스의 측정에 관한 논문에서 접지전류의 주파수가 높아질수록 접지임피던스가 크게 증가하는 유도성 특성을 나타내며[7], 이러한 경우 그 위험성이 크게 증가될 수 있다는 판단을 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 고주파수에서 접지전극 주변에 발생하는 위험전압을 분석하고 대지표면전위상승을 분석하기 위해 수직 및 수평 접지전극들에 대하여 접지전류의 주파수에 따른 전위분포 및 접촉전압을 측정하였다. 고주파 접지전류가 접지전극에 인가되었을 때 접지전극 주변의 위험전압을 분석하기 위해 접지임피던스와 대지전위분포를 측정하였다. 접지전극은 30[m], 50[m] 수직접지전극과 50[m] 매설지선을 대상으로 분석하였다. 또한 접지임피던스의 주파수의존성을 측정하여 위험전압의 변화와 그 관계를 면밀히 분석하였다.

2. 측정회로 및 방법

접지임피던스와 대지표면전위상승의 측정계를 그림 1에 나타내었다. 접지전극 주변의 대지전위의 측정에 앞서 측정대상 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성을 1[MHz]까지 측정하였다. 접지임피던스의 측정은 IEEE Standard 81.2에서 제안하는 수정된 전위강하법을 이용하여 측정하였으며[8], 전류인가선의 영향을 고려하여 전류보조전극은 20[m] 거리에 설치하였으며, 도전유도에 의한 오차를 최소화 하기 위해 전위보조전극은 접지전극의 2배 이상인 100[m]에 설치하여 접지임피던스를 측정하였다[9-10]. 측정전류는 80[MHz]까지 인가할 수 있는 함수발생기와 전력증폭기를 사용하여 접지전극과 전류보조전극 사이에 인가하였으며, 70[MHz]의 주파수대역을 갖는 차동프로브와 전류프로브(Pearson 110)를 이용하여 접지전극의 전위와 전류를 측정하였다. 측정된 신호를 PC기반 접지임피던스 분석장치를 이용하여 접지임피던스를 산출하였다. 또한 접지전류의 주파수에 따른 대지표면전위상승의 측정을 위해 인가전류의 주파수를 100 [Hz], 30[kHz], 100[kHz]의 3가지로 하여 접지전류의 크기를 일정하게 한 후 접지전극의 전위와 접지전극과 전위측정전극과의 전위차를 측정하여 대지표면전위를 산출하였다. 대지표면전위는 측정대상 접지전극으로부터 30[m]까지 측정하였으며, 인가전류 1[A] 당 대지표면전위를 나타내었다.

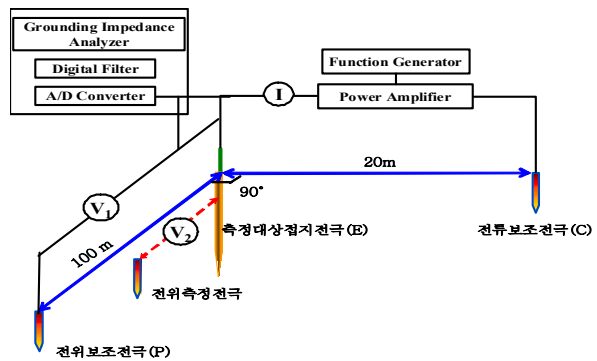


그림 1. 접지임피던스 및 대지표면전위상승의 측정계
Fig. 1. Measuring systems of the grounding impedance and ground surface potential rises

3. 결과 및 고찰

3.1 수직 접지전극 주변의 대지표면전위 분포 및 위험전압의 분석

접지임피던스의 측정을 위해 직경 54[mm], 길이 30[m] 와 50[m] 수직 접지전극을 대지표면에서 0.5[m]의 깊이에 설치하여 접지임피던스 및 접지전극 주변의 대지표면전위 분포를 측정하였다.

30[m] 수직접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성을 그림 2에 나타내었다. 100[Hz]에서 측정한 30[m] 접지전극의 접지저항은 11.1[Ω]이었으며, 주파수가 상승함에 따라 약 100[kHz]까지 접지임피던스가 약간 감소하는 것으로 나타났다. 30[kHz]에서 측정된 접지임피던스와 100[kHz]에서 측정된 접지임피던스 모두 10[Ω] 정도의 값을 나타내어 접지저항보다 작게 나타났다.

30[m] 수직 접지전극으로부터의 이격거리에 따른 접지전류 1[A]당 대지표면전위를 측정전류의 주파수를 파라미터로 측정한 결과를 그림 3에 나타내었다. 대지표면전위는 10[m] 이하의 이격거리에서 100[Hz], 30[kHz] 및 100[kHz]의 주파수 순서로 높게 나타났으며, 접지전극으로부터 거리가 멀어짐에 따라 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 주파수에 따른 30[m] 수직 접지전극 주변의 대지표면전위분포는 그림 2의 접지 임피던스의 측정결과에서 나타나듯이 측정주파수가 100[Hz]에서 100[kHz]까지 증가함에 따라 접지임피던스가 접지저항에 비해 감소하기 때문에 동일한 1[A]의 전류를 인가하였을 때 접지전극의 전위와 마찬가지로 대지표면의 전위 역시 감소하여 나타난 것이라 판단된다.

30[m] 수직 접지전극과 마찬가지로 50[m] 수직접지전극을 대상으로 하여 동일한 분석을 수행하였다. 50[m] 수직 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성을 그림 4에 나타내었다. 50[m] 수직 접지전극은 5.7[Ω]의 접지저항을 나타내었으며, 주파수가 상승함에 따라 30[kHz]에서는 접지저항보다 약간 감소한 5.3[Ω]의 접지임피던스를 나타내었고 100[kHz]의 주파수에서는 7.4[Ω]으로 접지저항보다 큰 값을 나타내었다.

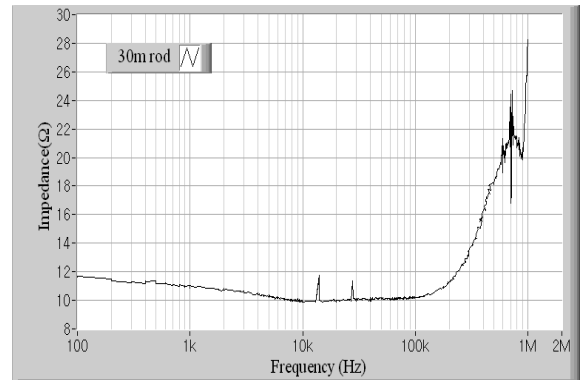


그림 2. 30[m] 수직접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성

Fig. 2. Frequency-dependent grounding impedance of the vertical ground rod of 30[m] long

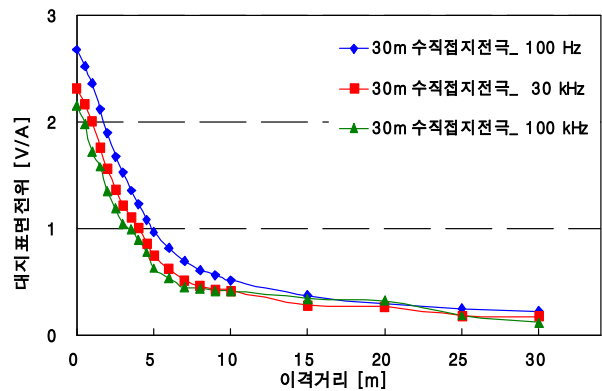


그림 3. 30[m] 수직 접지전극 주변의 대지표면전위 상승

Fig. 3. Ground surface potential rises near the vertical ground rod of 30[m] long

50[m] 수직 접지전극 근방의 1[A]당 대지표면전위를 인가전류의 주파수를 파라미터로 하여 측정한 결과를 그림 5에 나타내었다. 인가전류의 주파수가 높을수록 50[m] 수직 접지전극 근방의 대지표면전위가 높게 나타났다. 50[m] 수직 접지전극의 접지임피던스는 주파수가 상승함에 따라 약 30[kHz] 이상의 주파수에서 접지임피던스가 급격하게 증가하기 때문에 주파수가 높아짐에 따라 1[A]당의 대지표면전위가 높아진 것으로 판단된다. 접지전류의 주파수 증가에 따라 대지표면전위가 상승하는 50[m] 수직접지전극의 경우 30[m] 수직 접지전극과 달리 접촉전압과 보폭전압이 상용 주파수에서 측정된 결과에 비해 높게 나타나게

된다. 즉 주파수가 높아짐에 따라 접지전극의 전위가 높아지게 되고, 접지전극 주변의 전위경도가 가파르게 되어 보폭전압이 증가하게 된다. 접지전류의 주파수가 높을수록 대지표면전위가 높아지지만 그 이상 접지전극의 전위가 높게 나타나 접촉전압 역시 증가하리라 판단된다. 때문에 50[m] 수직 접지전극과 같이 접지임피던스가 증가하는 유도성 특성의 접지시스템의 경우 접지전류의 주파수가 높아질수록 그 위험성이 증가한다고 볼 수 있다.

또한 그림 3의 30[m] 수직 접지전극의 1[A]당 대지표면전위와 그림 5의 50[m] 수직 접지전극의 대지표면전위를 비교할 때 30[m] 수직 접지전극의 대지표면전위가 약 2.5배 정도 크게 나타났으며 이는 30[m] 수직 접지전극의 접지임피던스가 50[m] 접지전극에 비해 크기 때문이며, 이러한 경우 접지임피던스가 더 높은 30[m] 수직 접지전극에서의 대지표면전위가 높게 형성되어 보폭전압 및 접촉전압에 의한 위험성이 더 크게 나타나리라 판단된다.

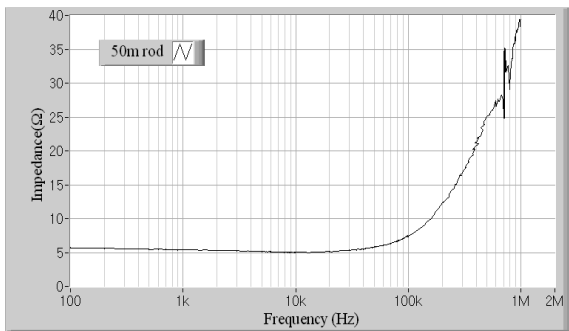


그림 4. 50[m] 수직접지전극의 접지임피던스의 주파수 의존성

Fig. 4. Frequency-dependent grounding impedance of the vertical ground rod of 50[m] long

각 주파수별 30[m]와 50[m] 수직 접지전극의 1[A] 전류에 대한 접촉전압, 최대보폭전압 및 접지임피던스를 표 1에 나타내었다. 30[m] 수직 접지전극의 경우 주파수가 높을수록 접지임피던스는 작게 나타났기 때문에 고주파수에서의 대지표면전위가 저주파수보다 작게 나타났다. 또한 고주파수에서 접지전극의 전위가 대지표면전위 감소에 비해 더 크게 작아지기 때문

에 주파수가 증가함에 따라 접촉전압도 감소하였다. 반면 50[m] 수직 접지전극의 경우 30[kHz]에서는 100[Hz]에 비해 접지임피던스가 약간 감소하였으며 접촉전압도 작게 나타난 반면 100[kHz]의 측정 주파수에서는 접지임피던스와 접촉전압이 모두 100[Hz]보다 크게 나타났다.

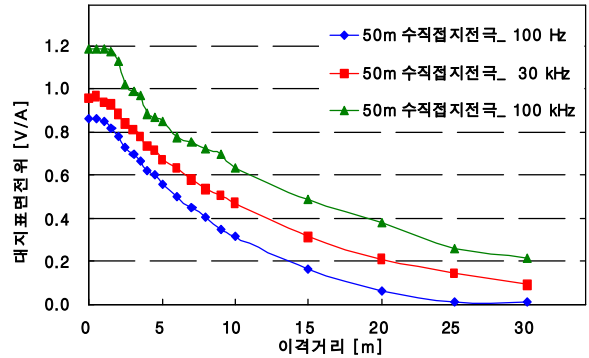


그림 5. 50[m] 수직 접지전극 주변의 대지표면전위상승
Fig. 5. Ground surface potential rises near the vertical ground rod of 50[m] long

표 1. 접지전류 1[A]에 대한 수직접지전극의 위험전압과 접지임피던스의 비교

Table 1. Comparison of the dangerous voltages for the ground current of 1[A] and the grounding impedances of the vertical grounding electrodes

주파수 ([kHz])	30[m] 수직 접지전극			50[m] 수직 접지전극		
	접촉전압 ([V])	최대 보폭전압 ([V])	접지임피 던스 ([Ω])	접촉전압 ([V])	최대 보폭전압 ([V])	접지임피 던스 ([Ω])
0.1	8.63	0.46	11.1	4.87	0.09	5.7
30	7.60	0.45	9.6	4.15	0.08	5.3
100	7.22	0.44	9.0	6.24	0.15	7.4

따라서 수직 접지전극의 접촉전압은 모두 측정주파수에서의 접지임피던스에 비례하여 나타나며, 이러한 현상은 접촉전압은 대지표면전위보다 접지전극의 전위인 접지임피던스에 크게 의존하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 최대보폭전압의 경우 대부분 대지표면 전위가 높을수록 크게 나타났으며 이러한 결과는 50[m] 수직 접지전극의 경우에서 100[kHz]의 측정결

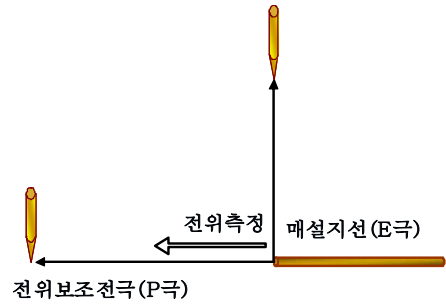
과가 100[Hz]에 비해 훨씬 크게 나타나는 것을 통해 입증된다. 따라서 접지임피던스가 증가하는 유도성 특성을 나타내는 수직 접지전극에서는 고주파수에서 접지전극 주변의 대지표면전위가 가파르게 상승하여 최대 보폭전압이 커지며, 대지표면전위에 비해 접지극의 전위가 더욱 크게 증가하기 때문에 접촉전압 또한 높아지는 것으로 판단된다. 또한 위험전압의 평가시 보폭전압에 비해 접촉전압이 훨씬 높게 나타나기 때문에 접촉전압을 우선적으로 평가해야 한다고 판단된다.

3.2 매설지선 주변의 대지표면전위 분포 및 위험전압의 분석

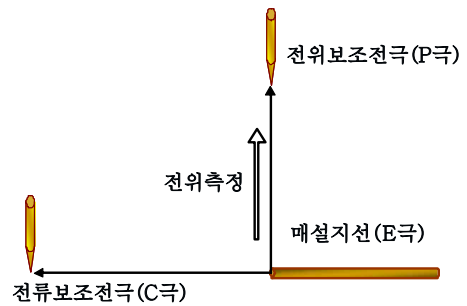
단면적 25[mm²]의 길이 50[m] 매설지선(수평 접지전극)을 깊이 0.5[m]에 설치하였으며 주파수에 따른 접지임피던스 및 위험전압을 측정하고 분석하였다. 매설지선의 경우 수직 접지전극과 달리 측정방향에 따라 그 결과가 달라질 수 있기 때문에 그림 6과 같이 측정방향을 2가지로 하여 대지표면전위를 측정하였으며 전류보조전극과 전위보조전극의 거리는 수직 접지전극과 동일하게 20[m]와 100[m]로 하였다.

50[m] 매설지선 주변의 대지표면전위 분포의 측정에 앞서 주파수에 따른 접지임피던스를 측정하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 50[m] 매설지선의 접지저항은 0.46[Ω]으로 매우 작았다. 매설지선의 접지저항이 매우 낮으므로 접지임피던스의 경우 약 1[kHz] 이상의 주파수에서부터 증가하는 것으로 나타났으며, 30[kHz]와 100[kHz]에서 접지저항에 비해 상당히 큰 접지임피던스를 나타내었다.

인가전류의 주파수를 파라미터로 하여 50[m] 매설지선 주변의 대지표면전위를 측정한 결과를 그림 8에 나타내었다. 매설지선의 측정결과 역시 방향에 상관없이 인가전류의 주파수가 높을수록 1[A]당 대지표면전위가 높게 나타났으며, 이러한 결과는 50[m] 수직 접지전극과 마찬가지로 주파수가 높아질수록 접지임피던스가 증가하므로 동일한 1[A]의 전류가 접지전극에 인가되었을 때 접지전극의 전위 및 대지표면의 전위가 높아지기 때문이다.



(a) 측 방향



(b) 수직방향

그림 6. 매설지선에 대한 대지전위분포의 측정위치
Fig. 6. Measuring position of the ground surface potential rises for the counterpoise

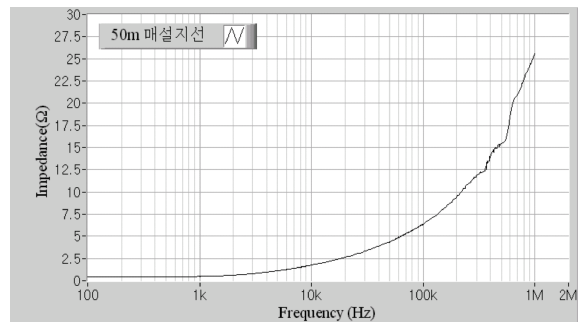
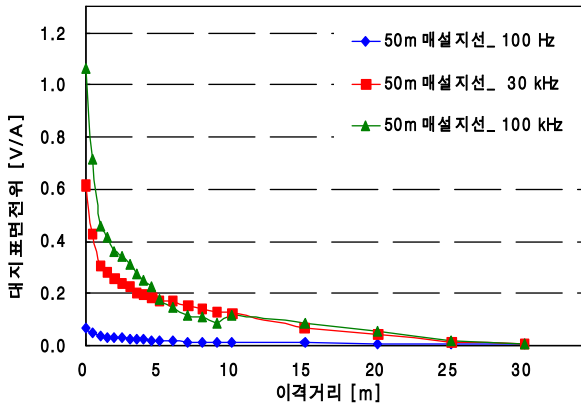


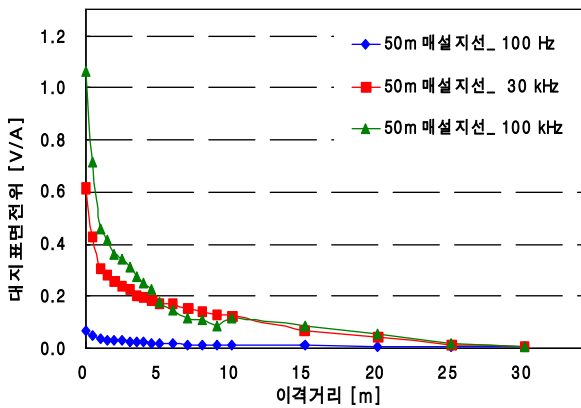
그림 7. 50[m] 매설지선의 접지임피던스의 주파수 의존성
Fig. 7. Frequency-dependent grounding impedance of the counterpoise of 50[m] long

50[m] 매설지선의 접촉전압, 최대 보폭전압 및 접지임피던스를 표 2에 나타내었다. 50[m] 매설지선은 30[kHz]와 100[kHz]의 접지임피던스 모두 100[Hz]에서 측정된 접지저항보다 크게 측정되었으며, 대지표면전위 역시 접지임피던스가 높을수록 크게 나타났다. 각 측정주파수에 따른 접촉전압 역시 접지임피던스의 결

과가 큰 순서로 높게 나타났으며 이는 대지표면전위 상승에 비해 접지전극의 전위가 더욱 크게 증가하기 때문이다. 30[kHz]에서의 접촉전압은 100[Hz]에 비해 5배 이상 크게 나타났으며, 100[kHz]에서의 접촉전압은 10배 이상 크게 나타났다. 최대 보폭전압의 크기는 접촉전압에 비해 상대적으로 매우 작게 나타났으나 접촉전압과 마찬가지로 접지임피던스에 비례 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 접지임피던스가 크게 증가하는 유도성 특성을 보이는 접지전극에 100[kHz] 이상 주파수를 포함하는 큰 서지전류가 인가되었을 때 저주파수에서 평가된 접촉전압 및 보폭전압보다 훨씬 큰 위험성이 따른다는 것을 나타낸다.



(a) 축방향



(b) 수직방향

그림 8. 50[m] 매설지선 주변의 대지표면전위분포
Fig. 8. Grounding surface potential rises near the counterpoise of 50[m] long

표 2. 접지전류 1[A]에 대한 50[m] 매설지선의 위험전압과 접지임피던스의 비교

Table 2. Comparison of the dangerous voltage for the ground current of 1[A] and grounding impedances of the counterpoise of 50[m] long

주파수 (kHz)	축방향			수직방향		
	접촉전압 (V)	최대 보폭전압 (V)	접지임피던스 (Ω)	접촉전압 (V)	최대 보폭전압 (V)	접지임피던스 (Ω)
0.1	0.42	0.03	0.46	0.41	0.03	0.46
30	3.00	0.31	3.32	2.94	0.24	3.32
100	5.92	0.61	6.37	5.86	0.66	6.37

4. 결 론

본 연구에서는 접지전극 주변의 대지표면전위분포와 위험전압을 접지전류의 주파수에 따라 측정하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고주파 고장전류가 접지전극에 인가된 경우 접지전극 주변의 대지표면전위분포는 접지임피던스에 비례하여 나타났다.

(2) 주파수에 따른 접촉전압은 보폭전압보다 훨씬 크게 나타나기 때문에 접촉전압을 우선적으로 고려해야 한다.

(3) 고주파수에서 측정된 접촉전압과 보폭전압은 접지임피던스가 감소하는 용량성인 경우 상용주파수에 비해 작아지는 것으로 나타났으나, 접지임피던스가 증가하는 유도성인 경우 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 인명에 대한 위험을 야기할 수 있는 접촉전압의 경우 접지임피던스의 특성과 관련되기 때문에 고주파수에서도 접지임피던스가 크게 증가하지 않는 접지시스템 설계가 요구된다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사 (과제번호:R-2007-1-014)주관으로 수행된 과제임.

References

[1] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술”, 도서출판 의

- 제, pp.84-87, 1999.
- [2] Kosztaluk, R., Mukhedkar, R. Gervais, Y., "Field Measurements of Touch and Step Voltages", IEEE Trans. on PAS, Vol 103, No. 11, pp.3286-3294, 1984.
 - [3] Chow, Y.L., Salama, M.M.A., Djogo, G., "Thevenin source resistances of the touch, transferred and step voltages of a grounding system", IEE PGTD, Vo. 146, No. 2, pp.107-114, 1999.
 - [4] IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", pp. 20~23, 2000.
 - [5] Silverio Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Trans. on P.D., Vol. 22 No. 1, January, 2007.
 - [6] Leonid Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes", IEEE Trans. on P.D. Vol. 24, No. 1, pp.441-451, 2009.
 - [7] Pedro Llovera, Juan Antonio Liso, Alfredo Quijano, Vicente Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", 28th ICLP, pp.727-729.
 - [8] IEEE Std. 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", pp.12~17, 1991.
 - [9] 최영철, 최종혁, 이복희, 전덕규 "수직 또는 수평으로 매설된 접지전극의 접지임피던스 측정시 보조전극 위치에 따른 전자유도의 영향", 조명 · 전기설비학회논문지, Vol. 23, No.8, pp.86-92, 2009.
 - [10] 최종혁, 최영철, 이복희, "수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가", 전기학회 논문지, Vol.58, No. 9, pp.1778~1783, 2009.

◇ 저자소개 ◇



최종혁(崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : chjohy80@naver.com



조용승(趙鏞承)

1986년 7월 9일생. 2010년 2월 평생교육진흥원 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : dreams86@nate.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 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대공대 전자전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr