

접지임피던스의 주파수 의존성 측정기법

엄주홍¹, 이복희²

¹ 기초전력연구원, ² 인하대학교

Measurement Method of the Frequency Dependent Characteristics of Ground Impedance

Ju-Hong Eom, Bok-Hee Lee
KESRI, INHA University

Abstract - The measurement system of ground impedance is based on a computer aided technique. The magnitude and phase of ground impedance were determined by the novel measurement and analysis using the revised fall-of-potential method. The ground impedances of the ground rod of 30 m long are considerably dependent on the frequency. The ground impedance is mainly resistive in the frequency range of 3-20 kHz. At higher frequencies, the reactive components of the ground impedances are no longer negligible and the inductance of the ground rod was found to be the core factor deciding the ground impedance.

1. 서 론

접지시스템의 성능은 접지저항을 측정하는 방법과 접지 저항 이외의 접촉전압이나 보폭전압 등과 같은 위험전압을 측정하는 방법으로 평가한다. 전력설비에서는 접지전극과 대지사이의 접속이 양호한지 또는 양호하지 않은지를 접지 저항으로 나타내는 방법이 많이 사용되고 있다. 접지저항은 상용주파수 접지전류가 흐를 때 적용되며, 용도에 따라서는 접지시스템에 고장서지나 뇌서지전류와 같이 높은 주파수 성분을 가지는 전류가 흐르게 된다. [1]-[4]

접지시스템이 소규모이거나 시설하는 장소의 대지저항률이 큰 경우에 접지임피던스는 저항 성분이 큰 값을 가지므로 상용의 접지저항측정기로 측정된 접지저항과 거의 동일하다. 하지만 접지시스템의 규모가 크거나 접지저항이 대단히 작은 경우 접지전극 자체의 인덕턴스의 영향 때문에 단순한 접지저항으로 접지시스템의 성능을 평가하는 방법은 정확성이 떨어진다. 접지전류가 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지거나 고주파수 성분을 포함하는 경우에는 접지저항 보다는 접지임피던스를 접지시스템의 성능지표로 하는 것이 바람직하다. [5],[6]

최근 접지전극을 시설할 수 있는 장소가 제한되는 도심지 건물의 접지전극으로 대형 봉상접지전극이 많이 사용되고 있다. 대형 봉상접지전극은 보령머신을 사용하여 깊게 굴토한 후 시설하므로 길이가 길어짐에 따라 높은 주파수에서 접지임피던스가 크게 변동할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 뇌보호용 접지시스템에 적용될 수 있는 대형 봉상접지전극의 뇌서지와 같은 고주파 영역에서의 접지임피던스 특성을 분석하기 위해서 접지임피던스의 주파수 의존성을 측정하고 분석하였다.

2. 본 론

2.1 수정된 전위강하법

대형 봉상접지전극시스템에 대하여 수정된 전위강하법(revised fall-of-potential method)을 이용한 접지임피던스의 측정회로를 그림 1에 나타낸다. 수정된 전위강하법은 피측정 접지전극을 중심으로 하여 전위보조전극과 전류보조전극을 반대 방향으로 시설함으로써 측정선의 전자유도결합에 의한 오차를 줄일 수 있는 측정방법이다.

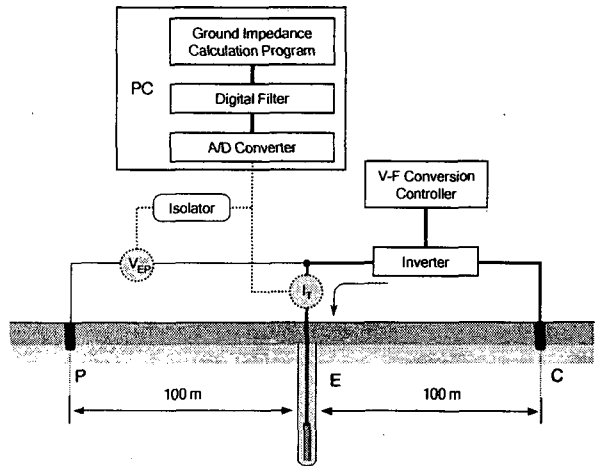


그림 1. 수정된 전위강하법을 이용한 접지임피던스의 측정회로
Fig. 1. Circuit diagram for measuring the ground impedance using the revised fall-of potential method

전위보조전극으로는 측정대상의 접지전극으로부터 100 m 떨어진 지점에 길이 1 m의 접지전극을 사용하여 시설하였으며, 전류보조전극은 전위보조전극 반대 방향으로 100 m 지점에 봉상접지전극을 시설하여 사용하였다. 측정전류는 설정된 시간동안 주파수 제어 가 선형적으로 이루어지는 인버터를 사용하여 인가하였다. 측정전류의 주파수를 3~300 kHz의 범위에서 가변시키면서 측정대상인 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하여 기준전위전극인 전위보조전극(P)에 대한 피측정 접지전극의 전위상승을 검출하였다. 시험전류원, 측정장치의 특성에 대해서는 문헌 [7]에 상세하게 기술하였다.

2.2 실험에 사용된 접지전극

봉상접지전극은 구조가 간단하고 시설하기가 용이하여 접지전극으로 많이 사용된다. 수직으로 매설하는 봉상접지전극은 대지구조에 따라 그 길이를 적절히 선택하여 시공하는데, 대규모 접지시스템에서 일반적으로 계절에 따른 온도의 변화나 토양의 습도 등

이 일정해지도록 심매설 접지전극으로 많이 사용된다. 또한 접지전극을 시설하는 장소의 제약이 많은 도심지에서는 깊게 굴토한 후 접지전극을 시설하는 경우가 많으며, 이 때 봉상접지전극은 그 효율성이 매우 크다. 국내에서 소규모 접지전극으로 사용되는 1 m, 1.8 m, 2.4 m 봉상접지전극 외에 최근에는 대형 봉상접지전극을 사용하는 사례가 많으며, 지반이 연약한 곳에서는 강관파일을 접지전극 대용으로 사용하기도 한다. 이러한 봉상접지전극 특성의 분석은 용도가 다양하며, 망상접지전극과 더불어 접지전극의 기본이 되는 형태로서 매우 중요하다.

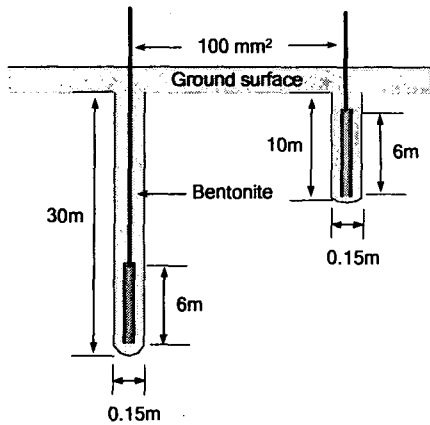


그림 2. 실험에 사용된 봉상접지전극
Fig. 2. Ground rods used in this work

실험에 사용된 접지전극은 그림 2에 나타낸 바와 같이 봉상전극이다. 접지저감제를 사용한 10 m, 30 m 봉상접지전극은 T사에서 접지공사에 시공하는 형태로 필요한 깊이만큼 굴토한 후에 길이 6 m의 특수 동봉을 시설한 후 나동연선을 접속하는 구조이다. 굴토한 토양과 전극사이의 틈새는 접지저감제를 사용하여 되메움하여 동일한 규모의 접지전극에 비하여 향상된 접지임피던스 저감효과를 기대할 수 있는 구조로 시설되었다.

봉상접지전극을 기본형태로 여러 접지시공회사에서 많은 형태의 신기술 봉상접지전극을 제시하고 있으며, 접지저감제를 적극 도입하여 사용하고 있다. 접지저감제로는 우선 전기적으로 도전성이 우수하며 지속적으로 성능을 유지할 수 있어야 한다. 또한 부식작용이 매우 작아서 접지전극을 오래 사용할 수 있는 화학적 특성도 요구된다. [8] 접지저감제의 원료로는 포틀랜드 시멘트, 석회 등이 기본적으로 사용되며, 각각의 회사마다 특정 첨가제를 사용하여 효과를 증대시키고 있다.

2.3 접지임피던스 측정 및 분석

최근 사용이 증가하고 있는 접지저감제를 봉상접지전극과 함께 사용할 경우 접지임피던스의 특성을 측정하고 분석하였다. 그림 3에는 길이 10 m의 저감제를 사용한 봉상접지전극에 대한 접지임피던스 측정결과를 나타내었다. 60 Hz에서의 접지임피던스는 7.9 Ω으로 측정되었다. 접지임피던스 크기는 그림 3 (a)에서 알 수 있듯이 약 60 kHz까지 미소하게

감소하나 거의 일정한 값을 가지며, 이후 급격히 증가하는 양상으로 측정되었다.

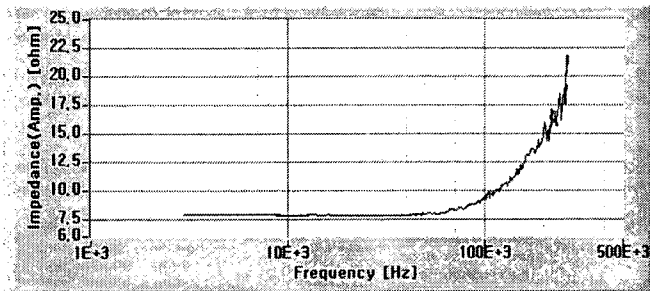
측정결과에서 접지저감제를 처리한 10 m 길이의 봉상접지전극은 일반적인 봉상접지전극에 비하여 접지임피던스의 주파수 의존성이 매우 작게 나타남을 알 수 있다. 약 100 kHz에서의 접지임피던스 크기는 9.3 Ω으로 정상상태의 접지저항에 비하여 증가한 정도가 비교적 낮다. 이러한 양상은 접지전극의 구조에서 그 원인을 찾을 수가 있는데, 지하 약 1 m 깊이 이하에서 접지도선은 피복이 없는 나동선 형태이다. 따라서 접지도선은 접지저감제와 직접 접촉하게 되며, 주위토양에 비하여 상대적으로 도전율이 좋은 접지저감제가 접지도선과 더불어 접지전극으로 작용하기 때문이다. 즉, 접지전극의 단면적이 증가하는 효과를 얻을 수 있으므로 약 60 kHz 이하에서는 접지임피던스의 크기가 거의 일정한 양상을 보이고 있다.

이 전극의 접지임피던스 특성에서는 한 가지 중요한 부분이 나타나는데 바로 그림 3(b)의 위상곡선이다. 위상곡선의 초기부분은 (-)값에서 시작하고 있음을 알 수 있다. 즉, 접지임피던스 위상이 3 kHz에서 -1.7°의 값을 가지고 있으며, 이는 접지임피던스를 측정하기 위하여 흘려준 인가전류의 위상이 접지전위상승의 위상보다 진상임을 의미한다. 진상전류는 약 5 kHz 정도까지 흐르며, 보다 높은 주파수에서는 위상이 지상으로 변화한다. 위상이 (-)값을 가지는 주파수 영역에서는 접지임피던스의 리액턴스 성분이 (-)값으로 나타나게 되며, 용량성 접지임피던스를 가진다. 단순히 접지임피던스의 크기만을 고려하면 접지임피던스는 허수부의 부호와는 무관하다. 하지만 주파수의 증가에 따라 용량성에서 허수부가 (+)값을 가지는 유도성으로 변화한다.

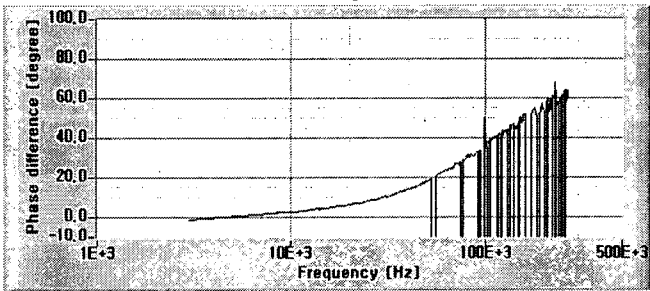
이 때 접지임피던스 곡선은 허수부가 영(0)이 되는 주파수가 존재하며, 이론적으로 허수부가 영(0)이 되는 지점에서 접지임피던스 크기는 가장 작다. 하지만 3(a)에서 확인할 수 있듯이 접지임피던스의 크기는 약 50 kHz 지점에서 최저값이 나타나지 않고 약 30 kHz 지점에서 나타났다. 그림 3(c)에서 저항 성분의 주파수에 대한 변동곡선에서 이에 대한 원인을 찾을 수 있다. 접지임피던스의 저항 성분은 상수로 고정되는 값이 아닌 변동하는 값으로 약 100 kHz까지 지속적으로 감소한다. 결국 접지임피던스의 주파수 의존성에서 저항 성분이 감소하여 접지임피던스의 크기는 위상의 허수부가 0이 되는 주파수가 아닌 약 30 kHz에서 나타난다. 저항 성분이 최저가 되는 100 kHz에서는 그림 3 (d)에서 알 수 있듯이 접지임피던스의 리액턴스 성분이 급격히 증가하기 때문에 저항 성분보다 리액턴스 성분이 접지임피던스의 크기에 지배적으로 영향을 준다.

10 m 봉상전극의 경우 전극 주위의 토양보다 도전율이 좋은 접지저감제가 도체주변을 넓게 감싸고 있으므로 접지전극의 인덕턴스가 크게 저감되어 접지임피던스는 약 60 kHz 정도까지 거의 접지저항과 유사한 크기로 측정되었다. 이러한 성질은 빠른 상승시간을 가지는 임펄스 형태의 전류나 높은 주파수의 전류가 통과할 때 보다 효과적이며, 접지전위상승을

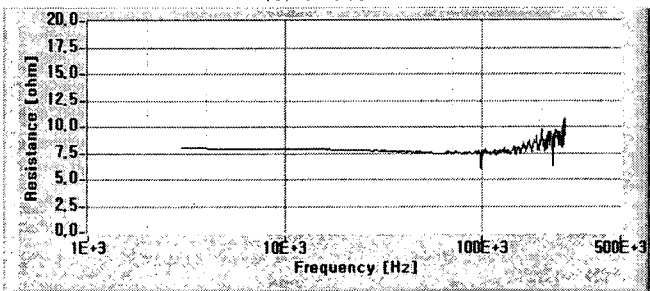
억제할 수 있으므로 저감제를 사용한 봉상접지전극이 뇌서지 보호용 접지전극으로 적합한 형태임을 알 수 있다.



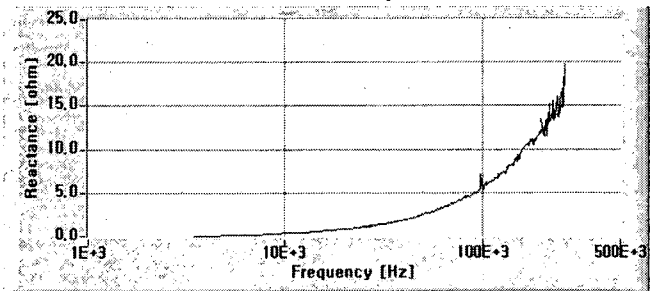
(a) Ground impedance



(b) Phase



(c) Resistive component



(d) Reactive component

그림 3. 접지저감제를 사용한 10 m 봉상접지전극의 접지임피던스
Fig. 3. Ground impedance of 10 m ground rod installed with ground reducing agents

접지저감제를 사용한 30 m 봉상접지전극의 접지임피던스 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 사용된 접지전극은 10 m 봉상접지전극과 동일한 형상이며, 전극의 길이가 30 m이다. 접지임피던스의 크기는 증가한 전극길이의 영향으로 크게 저감되었으며, 낮은 주파수에서 3.8 Ω 으로 측정되었다. 접지임피던스는 주파수가 증가함에 따라 10 m 봉상접지전극의 경우보다 급격히 상승하는 그래프로 나타났다. 접지

임피던스의 증가는 약 20 kHz부터 나타나기 시작하여 50 kHz에서 7.0 Ω , 100 kHz에서 11.8 Ω 으로 측정되었다. 초기에는 그림 3 (a)에 나타난 10 m 봉상접지전극의 경우보다 훨씬 작은 접지임피던스를 나타내고 있으나 약 60 kHz를 넘어서면서 오히려 큰 값을 나타내고 있다. 낮은 저항 성분과 상대적으로 큰 리액턴스 성분으로 인하여 접지임피던스의 위상곡선은 낮은 주파수에서 큰 값으로 증가하고 있다. 결과적으로 접지전극의 길이가 길어짐에 따라 접지저항의 저감효과는 월등하나 높은 주파수에서의 접지임피던스는 오히려 커지는 양상을 보이고 있다.

접지임피던스의 주파수 의존성을 분석한 결과 봉상접지전극에서는 낮은 주파수 영역의 측정전류를 발생시키는 기존의 접지저항을 측정하는 방법을 이용하면 높은 주파수에서의 접지임피던스 양상을 정확하게 평가할 수 없으므로 접지성능평가가 제한적이다. 이에 반하여 본 연구에서 적용한 가변주파수 인버터와 같이 높은 주파수의 측정전류를 발생시키는 기법은 접지임피던스의 주파수 의존성을 뇌서지 주파수의 대역 이상까지 면밀히 검토할 수 있다. 일반적으로 낮은 접지저항을 가지기 때문에 성능이 우수한 것으로 평가된 길이가 긴 봉상접지전극이 높은 주파수 영역에서 오히려 접지임피던스가 큰 결과를 나타낼 수도 있기 때문에 본 연구에서 제시하는 측정기법을 이용하여 접지임피던스의 주파수 의존성을 분석하는 것은 접지성능평가에서 매우 중요한 부분이 된다. 물론 보호하고자 하는 기기나 설비의 사용주파수가 매우 낮거나 주로 전력주파수 대역에서 지락사고시 누전차단기의 동작확보를 위한 접지시스템이라고 한다면 접지저항이 낮은 경우가 유리할 수도 있다. 기기의 외함 접지와 같이 인체보호용 접지시스템에서도 접지저항이 낮은 경우가 유리하다. 하지만 이러한 접지시스템도 항상 전력주파수의 과전압이나 고장전류가 유출하는 경우만 존재하는 것은 아니다. 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 과도과전압이 침입하기도 하고, 최근의 접지기술이 등전위접지화 됨에 따라서 다른 접지시스템과 접속되어 하나의 거대한 접지시스템을 이루기도 한다.

길이가 긴 봉상접지전극의 접지임피던스 측정결과에서 알 수 있는 사실은 접지저항이 낮은 접지전극이 뇌서지 보호용 접지전극으로서 반드시 성능이 우수하지는 않으며, 접지임피던스의 주파수 의존성을 확인하는 과정이 필요하다는 것이다. 낮은 접지저항을 가지나 과도하게 길게 시설된 형상으로 자체 인덕턴스가 증가하게 되고, 높은 주파수 대역으로 갈수록 접지임피던스가 급격히 커지기 때문에 매우 긴 봉상접지전극은 뇌서지 보호용 접지시스템으로는 주파수 응답특성이 좋지 않다. 이러한 견지에서 보면 단일의 긴 봉상접지전극 보다는 여러 개의 봉상접지전극을 병렬로 접속하여 시공하는 방법이 뇌서지 보호에 보다 효과적인 방법이라고 예측할 수 있다.

이상의 결과로부터 알 수 있는 사실로써, 뇌서지 보호용 접지시스템에서는 주파수에 대한 접지임피던스 곡선을 통하여 접지임피던스의 주파수 의존성을 분석하고, 접지임피던스의 크기가 피보호 시스템의 접지전위상승을 보호범위 이내로 제한할 수 있는 크

기인가를 확인하여야 한다. 정상상태의 접지저항은 접지시스템의 성능을 평가하는 지표로서 취약점이 분명히 존재하므로 접지임피던스의 측정과 주파수 의존성의 분석을 통한 접지시스템의 성능을 평가할 필요가 있다.

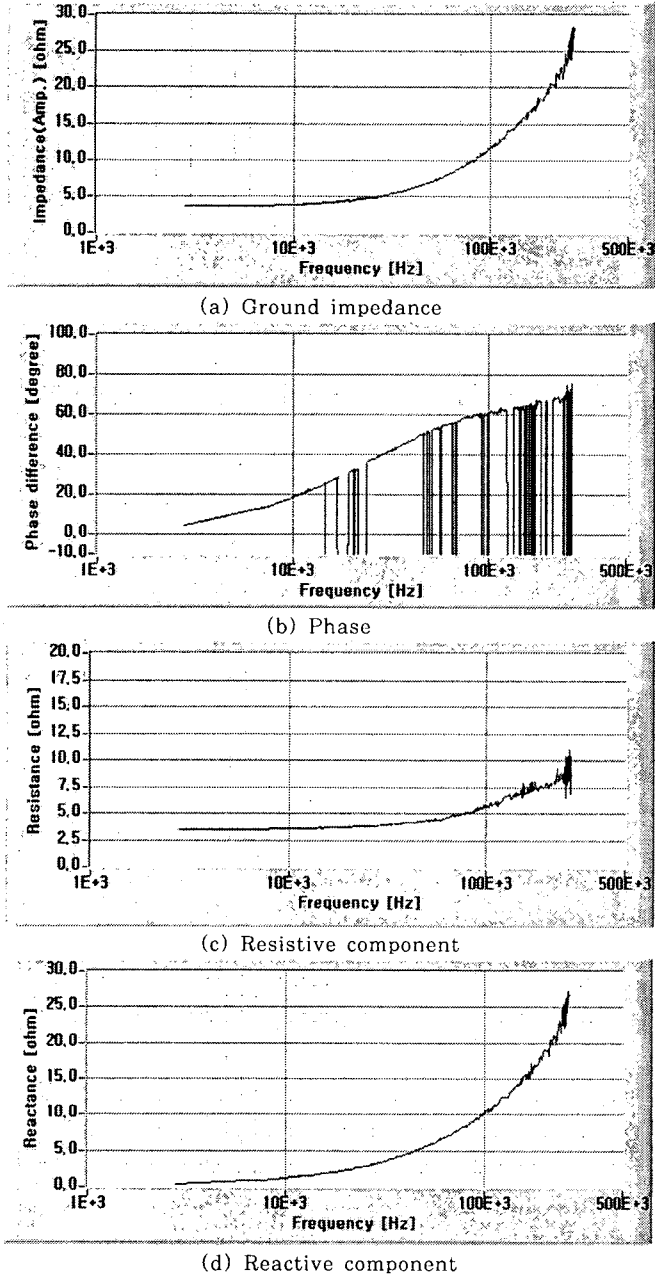


그림 4. 접지저감제를 사용한 30 m 봉상접지전극의 접지임피던스
 Fig. 4. Ground impedance of 30 m ground rod installed with ground reducing agents

3. 결 론

접지저항이 7.9 Ω과 3.8 Ω인 길이 10 m와 30 m인 봉상접지전극의 경우 주파수 100 kHz에서 접지임피던스는 각각 9.3 Ω과 11.8 Ω으로 30 m 봉

전극의 경우 현저한 주파수 의존성을 나타내었다. 길이 30 m인 봉상접지전극의 경우 정상상태 접지저항은 작지만 높은 주파수에서의 접지임피던스는 매우 증가하는 결과를 나타내었다. 즉, 접지임피던스는 약 10 kHz 이하의 주파수 영역에서 저항 성분이 주를 이루었으나 10 kHz를 넘어서면서 유도성 리액턴스의 특성이 주로 나타났으며 전극의 길이가 길수록 더욱 심하게 나타났다. 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 고장전류에서 접지성능평가는 접지임피던스의 주파수 의존성을 고려한 측정과 분석기법을 적용하는 것이 보다 효과적인 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] I. D. Lu and R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.100, no. 4, pp.1918~1922, 1981.
- [2] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.PWRD-2, no.4, pp.1073~1081, 1987.
- [3] 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.
- [4] 이복희, 이승철, 정보통신설비의 뇌보호, 인하대학교 출판부, pp.197~202, 2004.
- [5] M. Mardiguian, Grounding and Bonding, Interference Control Technologies, Inc., pp.2-59~2-61, 1988.
- [6] 이복희, 이승철, 접지의 핵심기초기술, 도서출판 의계, pp.65~69, 1999.
- [7] 이복희, 엄주홍, "가변주파수 인버터를 이용한 접지임피던스의 새로운 측정기법", 전기학회 논문지, vol.53C, no.5, pp.253~257, 2004.
- [8] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, p49, pp.3~8, p114, pp.113~114, p68, 2000.
- [9] S. Bourg, B. Sacepe and T. Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour", in Proc. IEEE Int. Symp. EMC, pp.584~589, 1995.
- [10] M. Nayel, A. Ametani, Y. Baba, N. Nagaoka and S. Sekioka, "A study on a mutual grounding impedance and its transient characteristic", in Conf. Transmission and Distribution, Asia Pacific, IEEE/PES, vol. 2, pp.1270~1275, 2002.
- [11] M. I. Jambak and H. Ahmad, "Measurement of Grounding System Resistance Based on Ground High Frequency Behavior for Different Soil Type", Proc. TENCON 2000, vol.3, pp.207~211, 2000.
- [12] R. Verma and D. Mukhedkar, "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Groundings", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.100, no.3, pp.1023~1030, 1981.