

수변전설비에서 접지시스템의 공결점의 위치에 따른 임펄스 응답특성

이복희, 엄주홍*, 김성원, 심판섭, 이승철
인하대학교 전기공학과

Impulse Response Characteristics of the Grounding Systems with respect to the Common-Connection Position in Power Utility System

B.H. Lee, J.H. Eom, S.W. Kim, P.S. Shim, S.C. Lee
Inha Univ. Electrical Engineering Dept.

Abstract - This paper describes the impulse response characteristics of the grounding systems in power utility system. Several regulations regarding to electric power equipments, services and managements require that the groundings of class 1 (E_1) and class 2 (E_2) must be connected at the common point in grounding systems. In addition, the grounding for arrester (E_{LA}), which belongs to the grounding of class 1, should be connected at the same point. However, there is no method and position of common-connection at anywhere. In this work, when the impulse current was injected through the grounding conductor for arrester, the investigations measuring and analyzing potential rises induced at the common connection point and other grounding conductors were conducted. The experiments were carried out in the conditions of the grounding conductor of 25m long and the near or remote common connection from ground electrode. The lightning impulse current was applied so as to simulate the on-set of arrester due to lightning and/or switching surges.

1. 서론

현재 우리 나라의 수변전설비의 접지공사를 시공할 때 접지종별로 분류하여 시공하고 있는 각종 접지의 공결시 과도상태의 임펄스 응답 특성은 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 「전기사업법」(검사업무 위탁)에 의한 '사용전 검사' 및 '정기검사'를 실시하는 기관에서는 피뢰기 접지(E_{LA})와 제 2종 접지(E_2), 제 1종 접지(E_1), 제 3종 접지(E_3), 발전기 접지 등을 독립하여 시공하고 제 1종 접지, 제 2종 접지, 피뢰기 접지를 공결하여 사용하도록 규정하고 있으나 공결점의 위치나 공결방법에 대한 규정이 명확하지 않으므로 이에 대한 검토가 필요하다. 전원 선로상에 뇌임펄스 또는 개폐임펄스가 유입되면 피뢰기가 동작하게 되고 피뢰기 접지를 통하여 임펄스 전류가 대지로 방류된다. 이 과정에서 피뢰기 접지에는 접지도선의 인덕턴스와 저항 및 접지전극의 인덕턴스와 저항에 의하여 전위상승이 발생하게 되며, 공결되어 있는 다른 종별의 접지에도 전위상승이 발생한다. 이러한 전위상승과 유도되는 전압은 각 종 접지를 공결하는 방법과 위치에 따라서 큰 차이를 보이며, 접지종별에 따라서 부작용이 발생할 수도 있다. 따라서 전력계통설비의 뇌해 방지대책과 전자기기의 뇌임펄스 보호대책을 효과적으로 수립하며, 동시에 수용가 측의 인명과 기기의 안전을 도모할 수 있도록 과도상태의 접지인덕턴스 특성을 평가하고, 각 종별 접지의 공결시 가장 양호한 공결위치를 제안하며, 전위파급 효과를 분석할 목적으로 실험적 연구를 중점적으로 수행하였다. 연구의 수행에 있어서 전기설비기술기준에 규정되어 있는 접지저항 및 시공기술기준을 만족시키는 범위도 하였으며, 낙뢰가 침입한 때 피뢰기가 동작한 경우를 모의하는 실험전압과 전류 파형을 사용하였다. 또한, 수변전설의 위치가 접지전극이 설치되어 있는 장소에서 멀리 떨어져 있는 경우도 흔히 있으므로 이를 가정하여 전류를 공결하는 위치를 접지전극의 근방 및 원방으로 분류하여 실험하였다.

2. 측정계 및 방법

그림 1에 각 종별 접지전극의 배치도를 나타내었다. 접지전극에 인가되는 임펄스 전류와 접지전극에서의 전위상승은 전위강화법에 의거하여 측정하였다. 전원 보조전극으로는 길이 1 [m]의 봉형 접지전극을 사용하였으며, 전류 보조전극으로는 길이 1 [m]의 봉형 접지전극 2조를 병렬 연결하여 사용하였다. 각 종별 접지전극으로부터 전류 보조전극의 이격거리는 30 [m]로 하였으며, 전위 보조전극은 18 [m]로 하였다. 이때 각 종별 접지전극과 전류 보조전극사이에는 충분한 전위분포의 수평부가 존재하며, 측정에 있어서 보조전극의 영향에 따른 오차는 거의 없도록 하였다. 임펄스 전류는 전류 보조전극과 각 종별 접지전극에 연결된 접지도선(GV전선)과의 사이에서 인가하였으며, 공결위치에 따라 임펄스 전류가 인가되어지는 접지도선 상부(접지전극 원방)의 전압과 접지도선 하부(접지전극 근방)의 전압, 제 2종 접지의 접지도선

상부(접지전극 원방)의 전압, 제 1종 접지의 접지도선 상부(접지전극 원방)의 전압 및 인가한 임펄스 전류를 측정하였다. 접지전극으로부터 근방공결(이하 근방공결)의 경우에는 피뢰기 접지의 접지도선을 통하여 임펄스 전류를 인가하였으며, 접지전극으로부터 원방공결(이하 원방공결)의 경우에는 피뢰기, 제 1종 접지, 제 2종 접지전극의 접지도선 전체에 인가하였다. 접지도선은 25 [m]길이를 하였다. 측정은 2차례에 걸쳐 수행하였으며, 각 회당 동일 파형에 대하여 3~5회 반복하여 저장하였다. 각각의 반복 측정값을 평균값으로 나타내었으며, 일기조건이 달라 두 차례의 측정값이 정확히 일치하지 않은 경우도 있었다.

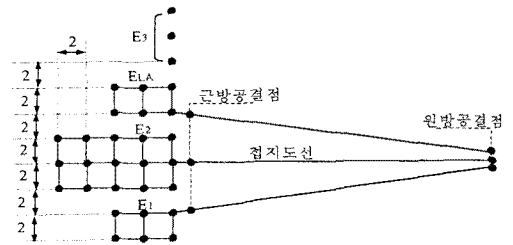


그림 1 각종 접지전극의 배치도
Fig. 1 Arrangements of the various ground electrodes

3. 실험결과

3-1. 실험조건

실험을 위하여 시제한 제 1종, 제 2종, 제 3종, 피뢰기 접지의 독립 접지 저항값 및 제 1종, 제 2종, 피뢰기 접지의 공통접지 저항값을 표 1에 나타내었다. 즉, 제 1종 접지저항값은 9 [Ω]이 되도록 하였으며, 제 2종은 4.7 [Ω], 피뢰기 접지는 8.6 [Ω]이 되도록 인위적으로 시설하였으며, 현행 법규가 제한하는 범위의 상한값을 가지도록 하였다. 실험에 사용된 전류 보조전극의 접지저항값은 18 [Ω]이다.

표 1 각 종별 접지의 접지저항 [Ω]
Table 1 Steady-state resistance of each groundings

$E_1+E_2+E_{LA}$	E_1	E_2	E_3	E_{LA}
3.4	9	4.7	30	8.6

본 실험은 인하대학교 정문 근처의 부지에서 실시하였으며, 측정이 이루어진 장소의 대지저항률을 측정용 전극간 거리에 대하여 2 [m]에서 12 [m]까지의 범위에서 측정하였으며, 실제로 접지전극이 포설된 깊이를 고려할 때 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 3 [m] 이하의 대지저항률은 약 50 [Ω·m]로 나타났다.

3-2. 25 [m] 접지도선으로의 근방공결

접지를 하여야 할 대상의 수변설비 및 기기가 접지전극으로부터 25 [m] 떨어진 경우를 가정하고, 접지전극의 근방에서 공결한 조건에서 실험하였다. 접지도선으로는 22 [mm] GV전선을 사용하였으며, 피측정용 접지전극과 전류 보조전극 사이에는 임펄스 전압을 인가하여 임펄스 전류가 흐르도록 하였다. 측정계에 인가된 임펄스 전압과 전류의 파형을 그림 2에 나타내었으며 인가전류 파형의 시작부분에는 트리거에 의한 외란이 포함되어 있다. 실험에 사용한 조합형 임펄스 전압·전류 발생장치 자체에는 표준 뇌임펄스 전압·전류가 발생되지만 부하 회로 즉, 피측정 회로의 회로소자값에 따라 임펄스 전압·전류의 파형이 다소 변화하였다. 인가전류의 최대값은 약 400 [A], 인가전압의 최대값은 약 8 [kV] 값을 가지며 임펄스 발생기의 충전량을 고정시킨 뒤 충전시간을 일정하게 유지하여, 거의 일정한 크기의 전압과 전류가 인

가되도록 하였다.

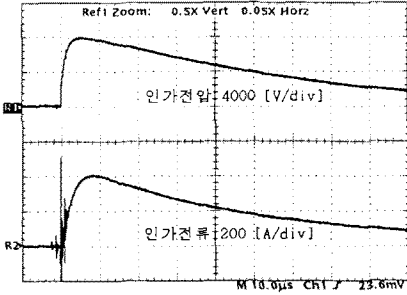


그림 2 인가전압 및 전류의 파형
Fig. 2 Waveforms of the applied voltage and current

3-2-1. 25 [m] 접지도선으로 근방공결한 경우 제 2종 접지체의 유도전압 특성

접지전극 근방에서의 공결이한 건축물의 경우 옥상에 수전실이 있는 경우 1층에 접지단차함을 시설하여 공결한 것과 동일한 특성을 나타내도록 측정계를 구성하였다는 것이다. 즉 5~7층 높이의 건물에 포설되는 GV전선의 길이를 25 [m]로 산정하여 적용하였으며, 각종 접지선의 포설은 나란한 방향으로 하였다. 표 2에 피뢰기 접지에 나타나는 전위상승과 제 2종 접지에 유도되는 전압을 피크치로 나타내었다.

표 2 제 2종 접지체의 유도전압 측정결과
Table 2 Measurement data of the induced voltages at E₂

측정 회수	인가전류 [A]	V_{R2L} [V] ($V_{R2L}/100A[V/100A]$)	V_{R2Z} [V] ($V_{R2Z}/100A[V/100A]$)	$V_{R2Z}/V_{R2L} \times 100$ [%]
1	410	3600 (878)	1280 (312)	36
2	420	3740 (890)	1320 (314)	35

- * ① V_{R2Z} : 근방공결시 제 2종 접지체의 유도전압
- ② V_{R2L} : 근방공결시 피뢰기 접지의 전위상승

근방공결시 제 2종 접지로 유도되는 전압은 피뢰기접지에서 접지도선을 포함한 전위상승의 약 35 [%] 값을 가진다. 피뢰기가 동작하였을 때 피뢰기 접지도선 전위상승의 약 35 [%] 전압이 공결점을 통하여 제 2종 접지로 유도된다고 볼 수 있다.

3-2-2. 25 [m] 접지도선으로 근방공결한 경우 제 1종 접지체의 유도전압 특성

근방공결시 피뢰기 접지에 나타나는 전위상승과 제 1종 접지에 유도되는 전압을 그림 3과 표 3에 나타내었다.

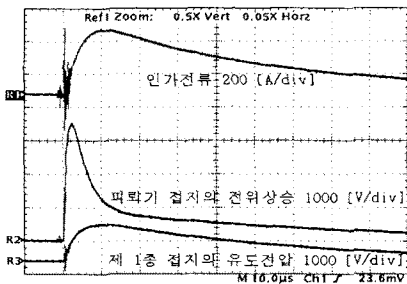


그림 3 제 1종 접지체의 유도전압
Fig. 3 Induced voltage at E₁

피뢰기 접지에 나타난 전위상승 파형과 제 1종(제 2종) 접지에 나타난 유도전압 파형은 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 이들 전위상승 및 유도전압 파형은 인가한 임펄스 전류파형과도 다르므로 각 종별 접지는 단지 접지 저항만이 아니라 인덕턴스의 영향이 포함되어 있는 임피던스 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 피뢰기 접지단차에는 접지 저항보다 접지도선의 인덕턴스에 의한 영향이 현저함을 알 수 있다. 제 1종 접지에 유도되는 전압은 제 2종 접지에 유도되는 전압보다 조금 낮은 약 32~33[%]를 가지는데 이는 접지극의 배지에 기인한 영향으로 볼 수 있다. 즉, 피뢰기 접지, 제 2종 접지, 제 1종 접지 순으

로 접지전극이 배치되어 있으며, 각 접지전극간의 연결은 4 [m] 길이의 GV전선을 이용하여 공결하였다. 그러므로 제 2종 접지에서 제 1종 접지로 연결되는 부분의 GV전선에 인덕턴스에 의한 전압강하가 어느 정도 발생했는 것으로 볼 수 있다.

표 3 제 1종 접지체의 유도전압
Table 3 Induced voltages at E₁

측정 회수	인가전류 [A]	V_{R1L} [V] ($V_{R1L}/100A[V/100A]$)	V_{R1Z} [V] ($V_{R1Z}/100A[V/100A]$)	$V_{R1Z}/V_{R1L} \times 100$ [%]
1	390	3500 (897)	1140 (292)	33
2	400	3620 (905)	1160 (290)	32

* V_{R1Z} : 근방공결시 제 1종 접지체의 유도전압

3-3. 25 [m] 접지도선으로 원방공결한 경우 피뢰기 접지전극의 유도전압 특성

25 [m] 접지도선을 원방에서 공결한 경우는 수전실이 건물의 옥상이나 중간층에 위치할 때 접지 단차반이나 공결점을 수전실에 설치하는 조건을 모의한 것이다. 이 조건에서는 전위상승 파형을 접지전극과 공결점에서 측정하여 결과를 검토하였다.

그림 4에 인가전류, 공결점과 피뢰기 접지전극에서 유도된 전위상승의 파형을 나타내었다. 피뢰기 접지, 제 2종 접지, 제 1종 접지를 접지전극으로부터 원방지점에서 공결하였으므로 공결점에서의 전위상승이 제 2종 및 제 1종 접지로 모두 동일하게 유도되어진다. 이때 피뢰기 접지전극의 전위라는 것은 접지도선에 의한 전위상승을 포함하지 않은 피뢰기용 접지전극 자체의 전위상승이라고 볼 수 있다.

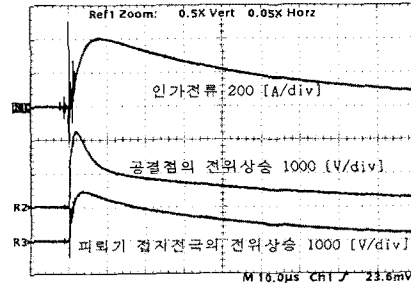


그림 4 공결점과 피뢰기 접지전극의 전위상승
Fig. 4 Potential rises at the common connection point and the grounding electrode for arrester

표 4 공결점과 피뢰기 접지전극의 전위상승
Table 4 Measured data of the potential rise at the common connection point and the electrode for arrester

측정 회수	인가전류 [A]	V_{R1} [V] ($V_{R1}/100A[V/100A]$)	V_{R1L} [V] ($V_{R1L}/100A[V/100A]$)	$V_{R1}/V_{R1L} \times 100$ [%]	$V_{R1L}/V_{R1} \times 100$ [%]	$V_{R1L}/V_{R1} \times 100$ [%]
1	416	2240 (538)	1520 (365)	61	41	68
2	420	2240 (533)	1500 (357)	60	40	67

- * ① V_{R1} : 원방공결시 공결점의 전위상승
- ② V_{R1L} : 근방공결시 피뢰기 접지의 전위상승
- ③ V_{R1L}/V_{R1} : 원방공결시 피뢰기 접지전극의 유도전압

표 4에 인가전류의 피크값에 대하여 규격화시킨 공결점의 전위상승 및 피뢰기 접지전극에서의 유도된 전위상승값을 나타내었다. 피뢰기용 접지전극의 유도전압은 원방공결점의 전위를 기준으로 할 때 약 67~68 [%] 값을 가진다. 그리고 근방공결시 피뢰기 접지의 전위상승값에 대해서는 40~41 [%] 값을 가진다. 원방공결은 공결점에서의 전위상승 측면에서 보면 유리하다. 즉, 이상전압이 일어난 경우 피뢰기의 동작에 의하여 발생하는 이상전압을 저감시키는 데는 유리한 공결방법이다. 임펄스 전류가 피뢰기의 동작에 의하여 흐른 경우 제 1종 및 제 2종 접지체의 유도전압은 접지전극 원방에서 공결하였으므로 공결점의 전위상승값과 동일하다. 이는 접지전극 근방공결시 피뢰기 접지의 전위상승을 기준으로 할 때 약 60 [%] 정도의 값이다. 원방공결의 경우 제 1종과 제 2종 접지도선에 나타나는 전위는 공결점의 전위와 동일하기 때문에 근방공결한 때 제 1종(32~33 [%])과 제 2종(35~36 [%]) 접지도선에 나타나는 전위보다 훨씬 높다.

3-4. 실험결과의 검토

그림 5는 근방공결시 피뢰기 접지의 전위상승(V_{R2L})을 기준으로 한

제 1종 및 제 2종 접지에의 유도전압을 100A당의 전압으로 나타내었다. 각각의 막대그래프의 값은 100A당의 전위상승 및 유도전압값이므로 GV전선의 공결위치에 따른 영향이 잘 나타나 있다. 원방공결의 경우 근방공결의 경우에 비하여 제 1종 접지에는 약 1.84배, 제 2종 접지에는 약 1.71배 높은 전위상승이 나타나게 된다. 이러한 결과로부터 공결되어 있는 다른 접지계통에 미치는 전위상승의 영향을 고려해 보면 원방공결보다는 근방공결하는 방법이 유리함을 알 수 있다. 이상전압이 일어난 경우 피뢰기가 동작하였을 때 전위상승을 억제하는 것이 요구되는 경우는 수전선이나 배전반이 위치한 원방지점에 접지단자반(공결점)을 설치하는 것이 효과적이며, 절연보호 측면에서도 유리하다. 그러나 공결되어 있는 다른 종별의 접지도선에 높은 전위상승을 유발하게 되므로 접지전극 근방에서 공결한 경우에 비하여 저압계통의 보호측면에서는 불리하다.

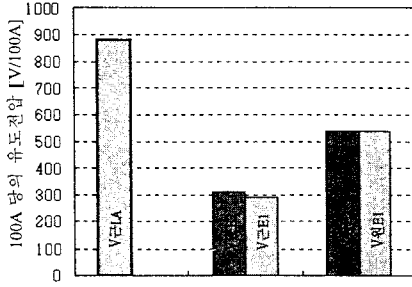


그림 5 공결시 피뢰기 접지(E_{1A}), 제 1종(E₁) 및 제 2종 접지(E₂)에서의 100A당의 전압
Fig. 5 Induced voltage per 100 [A] in E_{1A}, E₁ and E₂ groundings in the case of common connection

실험으로부터 얻은 결과의 정확성과 정성적인 분석 결과의 타당성을 검토하기 위해서 이론적 검토로서 Spice프로그램을 적용하여 시뮬레이션할 수 있었다. 즉, 25 [m] 접지도선을 접지전극의 근방에서 공결의 경우 임펄스전류를 인가시킨 피뢰기 접지도선, 제 1종 접지와 제 2종 접지의 접지도선에 유도되는 전압을 이론적으로 검토하기 위하여 그림 6 과 같이 실험계의 등가회로를 구성하였다. 접지전극은 R-L직렬형태의 등가회로를 적용하였으며, 대지중의 방전은 없는 것으로 가정하였다. 제 2종 접지의 경우 15개의 봉형 접지전극을 병렬로 접속하였으며, 제 1종 및 피뢰기 접지의 경우 6개의 봉형 접지전극을 병렬로 접속하였으며 접지전극 자체의 인덕턴스도 어느 정도 포함한 것으로 보는 것이 타당하다. 각각의 공결에 사용한 전선의 길이가 4 [m]이므로 공결용 전선의 인덕턴스도 고려하였다. 이러한 복잡한 회로의 임펄스전류에 대한 응답특성을 시뮬레이션하기란 쉽지 않으며, 각각의 인덕턴스 값의 정확한 산출이 어려우므로 그림 7과 같이 간략화된 등가회로를 적용하였다.

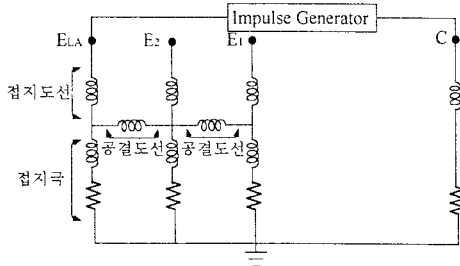


그림 6 실험계의 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit of the experimental systems

제 1종 접지전극의 인덕턴스 값은 피뢰기 접지도선과 제 2종 접지를 병렬로 연결하는 전선 및 공결용 전선의 인덕턴스에 비하여 현저히 작은 값을 가지므로 무시하였다. 접지저항은 표 1에 기술한 측정값을 적용하였으며, 각각의 인덕턴스 값은 AWG #4, AWG #8의 특성값을 기초로 하여 근사적으로 추정하여 적용하였다. AWG #4는 전선의 단면적이 21.1 [mm²]로서 접지도선의 굵기인 22 [mm²] GV전선에 사용하였으며, AWG #8은 8.4 [mm²]로서 병렬연결용 전선의 굵기인 8 [mm²] IV전선에 적용하였다.

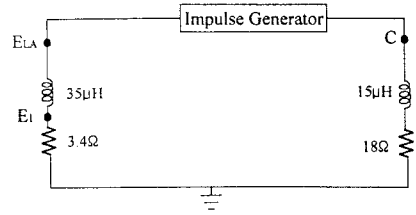


그림 7 간략화시킨 등가회로
Fig. 7 Simplified equivalent circuit

그림 8은 시뮬레이션결과와 파형으로 이론적으로 해석한 결과, 피크치가 약 370 [A]인 임펄스전류를 인가하였을 때 피뢰기 접지도선의 원방에 나타난 전위상승은 약 3.7 [kV], 제 1종 접지도선에는 약 1.25 [kV]의 전압이 유도되었다. 그림 3에 나타난 실험파형과 비교할 때 인가전류, 피뢰기의 접지도선 및 제 1종 또는 제 2종 접지도선에 유도된 전압의 파형은 실험결과로 나타난 파형과 거의 동일하였다. 또한, 인가전류의 피크값과 피뢰기 접지도선에 나타난 전위상승과 제 1종 또는 제 2종 접지도선에 유도된 전압의 값에 있어서 오차범위는 5 [%]이내 이었다. 이러한 오차는 이론적 해석에 간이등가회로를 적용하였기 때문인 것으로 판단되며, 본 연구에서 제안된 측정방법이 이론적 해석을 통하여 타당함을 알 수 있다.

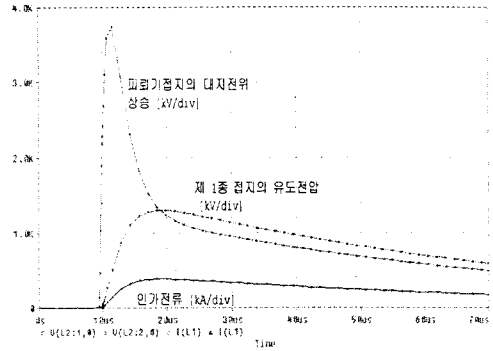


그림 8 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Simulation results

3. 결 론

본 연구에서는 공결된 접지에 임펄스전류가 인가된 경우 접지전극과 접지도선의 전위상승, 공결된 다른 접지에서의 유도전압 특성을 측정하고 분석하였다. 피뢰기 접지도선에 임펄스전류가 인가된 때 피뢰기의 접지도선, 접지전극, 공결되어 있는 다른 접지도선에 유도되는 전압을 공결위치, 접지도선의 길이를 파라미터로 하여 측정하고, 이론적으로 검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공결되어 있는 다른 접지도선에 유도되는 전위상승을 억제하는 데는 접지전극의 근방에서 공결하는 방법이 효과적이다.
- (2) 수변전설비에 이상전압이 일사하여 피뢰기가 동작한 경우 과도전압을 억제하여 계통 및 기기의 절연보호를 위해서는 수변전설비 가까운 위치에서 접지를 공결하는 방법이 훨씬 유효하다.
- (3) 제 2종 접지에 유도되는 전압의 저감을 위해서는 접지전극의 근방에서 공결하는 방법이 효과적이다.
- (4) 이론적 해석을 통하여 실험방법의 타당성을 입증하였으며, 본 연구에서 얻어진 결과, 등가회로와 시뮬레이션방법, 측정방법은 간편하므로 현장에서 널리 활용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Kosztaluk, M. Loboda, "Experimental study of transient ground impedance", IEEE Trans., on PAS, Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4653-4660, 1981.
- [2] Takahashi, "A Part of Grounding for Lightning Protection Technique", J. of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, Vol. 9, pp. 671-676, 1989.
- [3] IEEE Power Engineering society, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE Standard Board, pp 277-284, 1986.
- [4] Michel Mardiguian, "Grounding and Bonding", A Handbook on Electromagnetic Interference and Compatibility, Interference Control Technologies, Inc., 1988, pp. 1.6-2.27.