

## 다중접지계통의 접지저항 및 누설전류 자동측정장치 개발

손 수국\*  
수원대학교

정 영호.  
한국전력공사

최 상준  
(주)에디테크

### Development of a new Ground Resistance Tester for Power Electric Poles

Sugoog Shon  
Uni. of Suwon

Yeong-Ho Jeong  
KEPCO

Sang Joon Choi  
EDITECH

**Abstract** - This paper has proposed a new digital ground resistance tester for electrical systems. It features automatic operation with an injected current source. Without climbing electric power poles a worker can measure safely and quickly a ground resistance and current along the ground line.

### 1. 서 론

다중 접지된 중성 선은 전주 속에 들어가 있어 외부의 접촉에 의한 감전사고를 방지하기 위한 구조로 공사가 되어 있다. 접지저항을 측정할 수 있는 유일 한 곳은 전주의 상부에서 중성 선이 전주에 들어가는 곳이다. 따라서 측정을 위하여서는 전주에 승주 하여야 한다. 이는 승주의 불편함과 전기적 안전사고의 위험을 무릅써야 한다는 것을 의미한다. 전주 몸체 전체를 클램프하여 측정하는 접지저항계도 있지만 무겁고, 접지저항 측정하기가 무척 힘들어 전기공사 기술자들이 이를 회피하는 경향이 있으며 따라서 효율적인 접지 관리가 되지 못하고 있다. 다중 접지된 배전선로에서 접지저항을 쉽고 안전하게 측정할 수 있는 접지저항계의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 측정의 방법이나 절차가 더욱 체계화되고 소형화된 신 접지저항계 측정 방법을 제안하여 개발하였다. 클램프 부분에 대한 설계가 이미 다른 논문에서 발표되었었고[4], 본 논문에서는 마이크로 프로세서를 포함한 감지부, 제어부의 신호처리, 및 측정 알고리즘의 개발내용에 관하여 기술한다.

본 논문에서 제안한 자동측정 접지저항계는 COS 조작 봉의 끝 부분에 접지저항계를 장착하여 전주를 승주하지 않고 전주의 아래에서 전주의 상단에 위치한 접지선에 특수하게 제작 설계된 클램프를 밀어 넣고 측정을 자동으로 하게 하는 계측장비이다. 기존의 기기들이 누름 장치 등을 갖고 있는 클램프를 사용하나 개발제품은 지상에서 쉽게 측정지점의 접지 선에 쉽게 부착 할 수 있도록 하는 클램프의 구조를 설계하였다. 또한 접지저항의 측정이 활선 상태에서 이루어지며 과도한 누설전류가 접지 선을 통하여 흐르는지 여부를 판단하기 위하여 누설전류 값도 측정한다.

측정계기와 측정자의 사이에는 약 5m 정도(COS 조작 봉 거리)의 간격이 있어 측정에 관한 제반의 제어 명령을 입력하기가 어려워서 해결 방법으로 자동측정기능을 개발하였다. 클램프의 개폐상황을 측정계기가 자동으로 인식한 후 접지저항계는 자동으로 측정작업을 시작하도록 개발하였다. 휴대용 건전지에 의해 전력이 공급되기 때문에 절전형으로 설계하였다. 종전의 제품들이 누름식 버튼을 누르고 있는 동안 측정을 지속하여 전력손실이 많았으나[9], 개발측정기는 자동으로 측정을 종료하게 하여 측정계기의 전력손실을 상당히 줄일 수 있었다. 개발기술의 이론적 및 실험적 고찰이 설명된다.

### 2. 접지저항 측정기 개발

#### 2.1 기존의 접지저항 측정 원리 및 방법

최근의 22.9 kV 배전선로는 Y 결선이며 중성 선이 다중접지 되어 있다[1]. 예를 들어서 접지저항에 대해서는 전기사업법의 시행규칙에 제 3종 접지인 경우 100옴 이하의 접지저항을 갖도록 접지저항 공사를 하도록 규정하고 있다[2]. 배전선로의 접지저항을 측정하는 기존의 몇 가지 방법이 있다. 전압강화 방식이라 하여 접지 선을 분리하여 전기적으로 독립된 회로에서 접지저항을 측정하는 방법인데 보조전극을 사용하여야 한다. 보조전극의 사용 및 측정방법에 따라 2점법과 3점법으로 분류된다[8]. 문제점으로는 접지 선을 중성 선에서 분리해야 하고 또 측정 후 다시 결선을 해야 하는 불편한 점이 있다. 또한 보조 접지 봉의 주위에 수도관과 같은 도전성 매설물이 있을 경우 접지저항 측정 오차가 발생하는 등의 근본적인 문제점이 있다. 다음 중성선 다중접지 배전계통에서 중성 선에 연결된 접지 선을 분리하지 않고서도 접지저항을 측정하는 방법이 있다. 이러한 측정방식을 후크 온 방식이라고 한다. 이 방법은 접지 선을 중성 선에서 분리하지 않고 접지 선에 특수 주파수의 전류를 변성기(SCT)를 통하여 인가하고 또한 검출용 변성기(DCT)를 통하여 접지 선에 인가된 전류를 측정한 후, 전압과 전류의 비율로서 접지저항 값을 얻는 방법이다. 이 방식은 중성선 다중접지 계통이 주로 콘크리트나 아스팔트로 도로 포장이 되어 있는 상황에서 주로 사용하기에 적합하다.

#### 2.2 후크식 접지저항 측정의 원리

다중접지계통은 그림 1과 같이 등가회로로 표현이 된다. 후크식 접지저항계는 중성선 다중접지계통에서 중성 선과 대지사이에 접지 선을 통하여 폐회로가 구성이 되는 사실을 이용한다. 그림 1에서와 같이 꾀 접지 봉과 중성선의 사이에 전원을 인가하면 일정한 전류가 흐른다. 꾀 접지 극의 접지저항(Rx)은 다중 접지계의 다른 접지극과 아래와 같은 관계가 성립한다. 꾀 접지 극의 접지선에 후크식 전류주입용 변성기(SCT)로 전압(E)를 인가하면 꾀 접지 극에 전류(I)가 흐르게 되므로 다음과 같은 관계식이 성립된다.

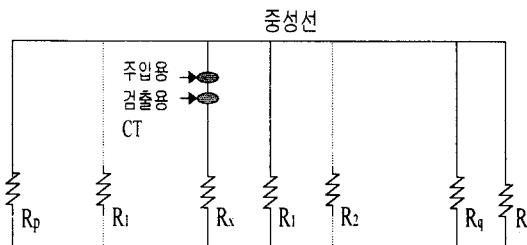


그림 1. 다중접지계통의 등가회로

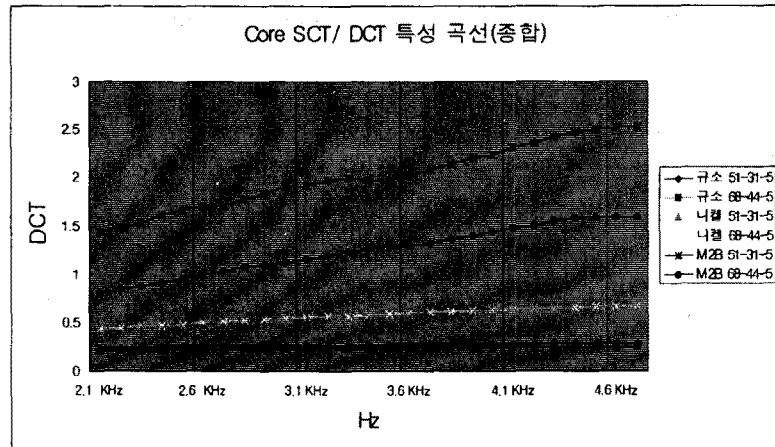


그림 2 Core별 주파수 특성

$$\frac{E}{I} = R_x + \frac{1}{\sum \frac{1}{R_n}}$$

증성선 다중접지계통에서는 접지전극 갯 수(N) 가 대단히 많기 때문에 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_x \gg \sum \frac{1}{R_n}$$

따라서 위의 식을 간단히 하면 다음과 같다.

$$\frac{E}{I} \approx R_x$$

즉, 회로 전류 I 와 인가전압 E 를 측정함으로써 접지저항 Rx 를 얻을 수 있게 된다[3].

### 2.3 신호 검출 및 전류신호주입 부 설계

접지저항의 측정을 위하여 전류주입용 변성기(SCT)를 통하여 발진신호를 인가한 후 접지 저항에 따른 발진신호의 전압 변화량을 검출용 변성기(DCT)를 통하여 측정하여 접지저항 값을 구한다.

접지 선에 전기신호를 인가하기 위하여 환형의 CT 코아에 코일을 권선하여 전압을 인가하면 SCT가 되고 이 SCT 코아에 형성된 자로내에 접지전선을 두면 접지 선에 전압이 유기된다.

물론, 환형의 코아에 접지 선을 절단하지 않고서는 전선을 넣을 수 없으므로 환형의 코아를 절반으로 절단한다.

절단된 코아의 구조를 개폐가 가능하도록 코일을 권선하고 접지 선이 SCT(Source CT) 코아의 내부에 들어올 수 있도록 한 다음 측정용 발진신호 4.4kHz를 SCT 코아의 코일에 인가하여 자로를 만들면 접지 선은 코아 내부의 자로에 의하여 전압이 유도된다.

접지 선에 유도된 전압은 대지의 접지저항과 구성된 회로에 인가되고 이 접지 선에는 접지저항에 따라 변하는 전류가 흐르게 되며 이 접지 선에 흐르는 전류를 검출하기 위한 방법으로 DCT(Detect CT)를 만든다. DCT의 구조는 변압기와 같은 방법으로 구성한다.

다시 말해 SCT에 발진신호를 인가하는 권선을 1차로 하고 접지 선을 SCT의 2차로 하며 동시에 DCT의 1차로 한다. DCT 코아에 권선된 코일을 2차로 하면 1차에 유기된 전압에 의해 DCT 2차 권선에 전압이 유도되어 이 유도된 전압의 크기는 접지 선에 흐르는 전류에 따라 결정된다.

이 전류는 접지저항 값이 낮으면 많이 흐르고 반대로 접지저항 값이 높으면 적게 흐르게 된다.

SCT의 1차 전력소모 범위 내에서 SCT 1차 전압을 일정하게 유지하면 SCT의 2차(접지선)에 유기되는 유도전압은 권선수 비율에 의한 전압이 유기되고 SCT의 1차

내부 임피던스가 일정하므로 SCT의 1차 권선에 인가되는 전압을 정전압으로 하면 SCT의 2차에 유기되는 전압은 권선 수 비에 따라 일정하다고 볼 수 있다. 접지저항 값에 따라 SCT의 2차 권선인 접지 선에 흐르는 전류는 접지저항에 따라 변화한다. SCT의 소비전력은 SCT 2차에 유도되는 전압과 DCT의 1차 전류의 곱으로서 나타나게 되며 SCT의 2차이며 동시에 DCT의 1차인 접지 선에 흐르는 전류는 접지저항 값에 의해서 결정되므로 접지 선에 흐르는 전류의 값을 이용하여 접지저항을 측정할 수가 있는데, 고주파 발진신호를 인가하여 SCT의 접지 선에 유도되는 전압(DCT 1차 전압)을 이용하여 DCT 2차에 유도되는 전압을 접지저항 값으로 환산하여 접지저항을 측정할 수 있다[10].

접지저항 값이 작으면 DCT에 검출된 전압이 높고, 접지저항 값이 높으면 DCT에 검출된 전압이 낮게 된다. SCT 와 DCT 조합으로 구성된 후크 온(HOOK ON)식 접지저항계는 측정용의 고주파 신호를 간접적으로 접지선에 공급하게 된다.

기존의 Hook On식 접지저항계는 Clamp 상태를 인위적으로 Open하여야만 측정이 가능하다. 접지 선에 접근하여 측정할 수 밖에 없으므로 전주에 승주해야 하는 위험부담이 있다. 전주에 승주하지 않고 지상에서 COS 조작봉에 접지저항계를 연결하여 측정이 가능하도록 클램프 기구구조와 자동측정 기능을 개발하였다.

그림 2는 클램프에 사용되는 코아의 특성을 나타내는 것으로서 주파수별 DCT 검출 레벨을 표시했다.

그림2의 결과를 보면 Si-Core는 주파수가 높을수록 소비전류만 증가하고 검출 레벨은 증가하지 않는다. 반면에 Ni, Fer-Core는 주파수가 높아지면 소비전류와 검출 레벨이 모두 증가하는 것을 알 수 있으나 Ni-Core는 Fer-Core에 비해 검출 레벨이 낮다. 위와 같은 특성을 고려하여 볼 때 Fer-Core(51Ω)가 가장 적합한 재질임이 증명된다. 반면 Fer-Core는 Si-Core, Ni-Core등의 코아에 비하여 나쁜 온도특성을 보이고 있어서 온도보상 회로를 추가하여 결점을 보완했다.

클램프의 개폐시 코아 단면 사이의 접촉율에 따른 검출 레벨 특성을 조사하였다. 결과는 Si-Core, Ni-Core는 단면 접촉율에 따라 소비전류와 DCT 검출 량이 급격히 변화하는 특성을 나타내었다. 그러나 Fer-Core는 코아 접촉율이 85%까지는 특성에 변화가 거의 없어, 결국에는 Fer를 코아 재질로 선택하였다. 본 개발의 주요 특징인 “크기가 작고 가벼운 계측기”를 위해서 검출 부의 유효 내경은 외경(51mm), 내경(31mm) 및 두께(5mm)인 코아에 대해서 20mm으로 설정하였다.

### 2.4 비 선형 특성

SCT에 인가해준 전류, 접지 선에 흐르는 전류, DCT

에 유기된 전압에 대한 관계식에서 접지저항 Rx를 측정할 수 있다. 접지저항은 DCT에 유기된 전압, DCT의 권선 수, SCT의 인가전류 등에 의해 결정되는 선형 함수이다. 그러나, 실제 측정값은 권선과 코아의 특성에 따라 다른데, 손실은 전류의 제곱에 비례하여 변화하였다. 코아에서 전압-전류 관련 특성이 비 선형적이어서 측정값을 재조정해 주어야 한다. 비 선형적 특성에 대한 보상방안으로 사전에 코아의 특성 곡선을 산출하여 측정 데이터를 lookup 테이블로 작성하였다. 그림3은 저항 변화에 따른 전압 특성 곡선의 한 예를 보여준다.

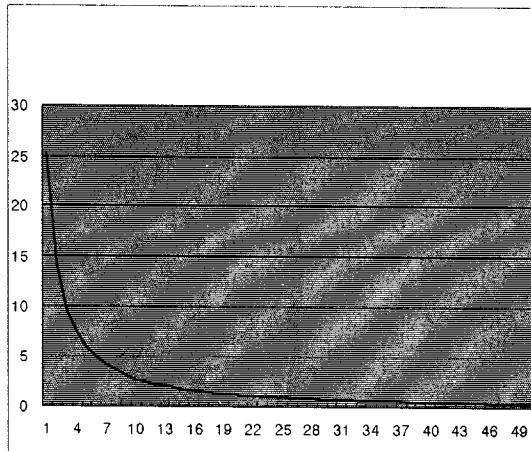


그림3. 비선형적 유기전압 특성

## 2.5 하드웨어 구성

현재 접지저항 측정기에서는 마이크로콘트롤러(MCU)를 채택하였는데 CPU, Memory, I/O, ADC, 타이머 등의 기능이 모두 갖추어져 있다. 현재 접지저항 측정기에 사용되는 MCU는 8bit용 CMOS PROCESS이며 아래와 같은 기능을 갖도록 회로를 구성하였다.

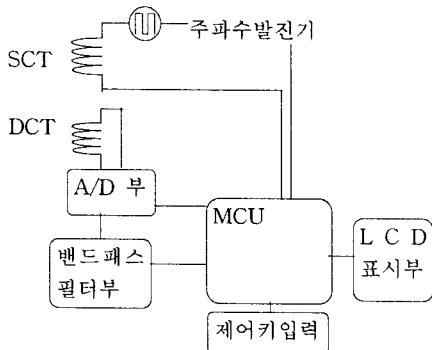


그림4 하드웨어 구성도

개폐 및 조작 단자의 누름 시 나타나는 멀림 및 동시에 다중의 단자 조작 상황에서 올바른 기능의 보장을 위하여 타이머 기능을 사용하였다. 측정의 정밀도 및 노이즈 제거 대책으로 평균값으로 접지저항 값을 나타내도록 했다. 측정값은 LCD에 표시한다. 이와 관련하여 사용자는 짧은 시간 동안 제어단자를 눌렀다고 생각하나, 실제로 Switch를 Check하는 시간은 극히 짧은 시간으로, 감지 후 적어도 2초의 시간을 주어 사용자 조작상의 오류를 피하고 있다.

초기에 전원을 작동하면, LCD상에 모든 문자를 점등하여 LCD의 이상유무를 사용자로 하여금 판단할 수 있도록 한다. LCD Driver에 Reset 신호를 주고, 다음에 최대의 데이터를 입력한 후에 점멸하게 만든다.

접지저항 측정기에 전원을 인가하면 CPU는 최저의 전원으로 대기하다가(Sleep Mode), 사용자가 Power Switch를 누를 때 초기화 상태로 작동한다. 접지저항 측정기는 미약하나마 항상 일정 전원을 소모하고 있으나 소비전력을 보다 더 감소시키기 위하여 CPU의 Clock 속도를 4 MHz에서 3.7 KHz로 변환하여 소비전력을 최소화한다.

측정완료 후에 사용자가 데이터 확인을 위해 전류값과 저항 값을 확인하여 데이터를 RAM에 저장하면 측정이 완료되며, 측정순서에 따라 ID 번호를 부여할 수 있어 여러 개소의 측정을 완료한 후에 사용자가 다시 ID 순으로 데이터를 검색해 볼 수 있다.

전체 측정 완료 후에 재 측정 시에는 RAM에 있는 데이터를 전부 지울 수 없도록 별도의 Switching 방법을 설정하여 사용자가 실수로 스위치를 눌러도 RAM의 데이터가 쉽게 지워지지 않도록 했다. Power버튼과 Function 버튼을 동시에 3초 이상을 눌러야 전체 데이터가 지워 지도록 했다. Switch를 눌렀을 때 시간을 기록하고, 1초단위로 검사하여 3초간 계속 눌러졌을 때 Memory Reset을 시키도록 했다.

접지저항을 측정하기 위해서는 우선 COS 조작 봉 위에 접지 저항 측정기를 탑재한다. 측정자는 접지 저항 측정기를 전주 위로 옮겨서 접지선에 정확히 클램프를 한다. 정확한 측정을 하기 위해서는 검출부의 정확한 체결 상태가 되어야 한다. 전원(전전지)상태, 접지 전류의 양, 접지저항 값, 검출부(SCT/DCT)의 체결 상태 등을 측정시 이상유무가 없는지를 측정기 자체에서 확인하게 했다. 그리하여 접지저항 측정원은 측정 기능의 이상유무를 알게된다.

주파수의 제어는 Custom CPU에서 제어된다. 주파수의 안정도를 높이기 위해 4 MHz X-tal를 분주해서 4.4 KHz의 구형파를 출력하게 하였다. 4.4 KHz의 주파수 대역은 코아의 특성에서 보는 바와 같이 본 개발의 특성을 충족 시켜주는 조건이다. 물론 상용 주파수 대역 및 제3고조파 등의 영향을 피하고 S/N 비율의 특성을 개선하였다.

접지 저항 측정에 정확성을 주기 위해  $0.7\Omega \sim 100\Omega$  측정범위는 측정 분해능(Resolution)을 보다 더 세분화 시켜  $0.1\Omega$  단위로 측정값이 지시하도록 하였고,  $100\Omega \sim 300\Omega$ 의 측정범위에서는  $1\Omega$  단위로 표시하도록 하였다. 이러한 측정 Range를 자동(Auto Range)으로 선택하게 하여 측정자가 조작하지 않아도 적정 Range에서 측정할 수 있도록 하였다.

접지저항을 측정하기 위해서 접지 선에 발진 신호를 공급하지만 접지 선에는 여러 가지 전기적 신호가 중첩되어 있어 이를 접지저항 측정 신호만을 검출해야 할 필요가 있다. 따라서 검출부(DCT) 자체에서 검출된 모든 신호 중에서 접지저항에 관계된 특정 주파수의 신호만을 검출하는 Band Pass Filter 회로 기능을 부가하였다.

## 2.6 측정 알고리즘

그림5에는 접지저항계의 측정 알고리즘에 대한 풀로우 차트를 나타냈다. 처음에 전원을 인가했을 때 마이크로콘트롤러 등을 포함한 회로의 전반에 대한 초기화 작업을 수행한다. 다음 전전지의 현재 전압 상태와, 검출부 회로의 이상유무를 판단하는 기본 테스트 과정을 거친다. 이때 정상일 경우 측정 준비 상태로 되어 메뉴화면을 구성하고 그렇지 않으면 경고 메세지를 보낸다.

사용자가 COS 봉으로 계측기를 옮겨서 접지 선을 계측기의 클램프 안에 넣으면 바로 측정 시작할 수 있도록 클램프의 열고 닫음의 신호를 감지하여 순차적으로

SCT 와 DCT를 짧은 시간으로 동작시켜서 유도된 데이터 값을 얻는다.

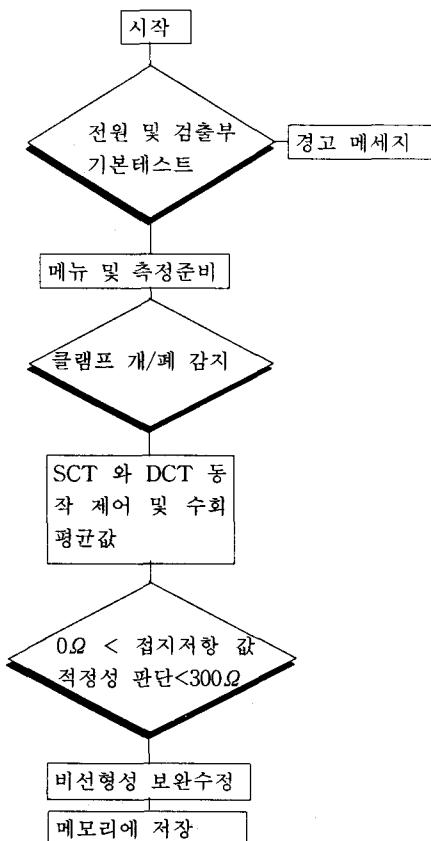


그림5 측정 알고리즘 플로우차트

얻어진 데이터는 코아의 비 선형 특성 때문에 데이터의 범위에 따라서 수치를 보정해 주어서 정확한 측정 저항 값을 갖도록 했다. 실현 값에 의한 데이터 값을 미리 작성하여 소프트웨어적으로 보정 되도록 하였다.

측정 중 클램프의 열고 닫힘 시에 또는 측정 데이터 값의 크기로 저항 값의 이상 유무를 판단하고, 이상 시에는 재 측정을 하도록 했다. 이때 LED를 사용하여 먼 거리(약 4~5m)에서도 알 수 있도록 깜박이는 신호를 보내게 한다. 측정 완료 시에는 정상 측정 완료 신호(LED)를 약 10초 동안 켜 있게 한다. 이 신호를 보고 사용자가 측정을 종료할 수 있도록 했다.

### 3. 결 론

소형화 및 자동측정 기능의 개발로 전주에 직접 승주하지 않고 배전계통 접지저항을 측정할 수 있는 자동접지측정기를 개발하였다. 이리하여 작업자의 안전성 증대 및 작업시간의 단축을 이룩할 수 있게 되었다. 그림6에는 기존제품과 신개발 제품의 크기 및 기구 차이가 비교되어 있다.

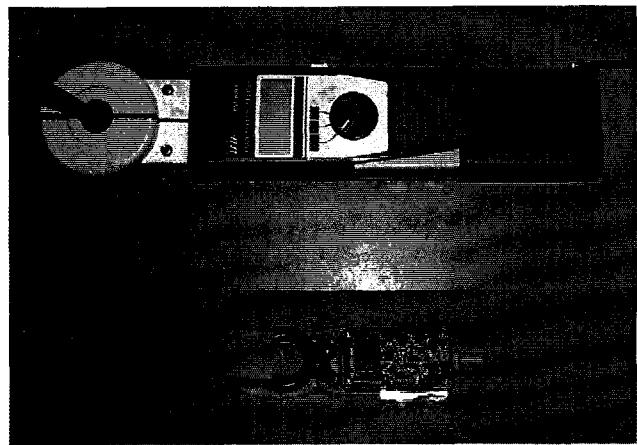


그림 6 기존제품(위)과 신개발 제품(아래) 크기 및 외관 비교

### (참 고 문 헌)

- [1] Power Distribution Engineering, James J. Burke. 1994.,
- [2] 배전설비 시공실무, 한국전력공사, 1998..
- [3] 도시화에 적용한 신 접지저항 측정 기술의 개발, 소화 55년, 전기학회, p.27 ~ 30.
- [4] “배전선로 변대주 원격자동 접지측정장치 설계”, 2000년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 최상준외 3인
- [5] IEEE Green Book ANSI 1983. 4
- [6] Roger R. Block, Polyphase Corporation “The Grounding for Lightning and EMP Protection”
- [7] Earthing HandBook ITU-T, 1992
- [8] “Electrolytic Earth Grounding” Lyncole XIT Grounding, 1987.9
- [9] LEM NORMA GmbH “Stakeless Grounding Testing”
- [10] Boam “Ferrite Charateristics ” 2000. 01