

대규모 접지전극 망의 접지성능 평가를 위한 결보기저항곡선의 해석에 관한 연구

(A Study on the Interpretation Technique of Fall-Of-Potential Curve for Grounding Performance Evaluation of a Large Grounding Electrode Network)

최종기* · 유희영 · 이동일 · 정길조 · 김경철

(Jong-Keel Choi · Hee-Young Ryu · Dongil Lee · Gil-Jo Jung · Kyung-Chul Kim)

요 약

접지저항의 측정은 접지극의 성능을 정량적으로 평가하는 가장 일반적인 방법이며, 여러 측정방법 중 전위강하법은 대형 접지극의 저항측정에 많이 이용되는 방법이다. 그러나 접지극의 크기에 비례하여 측정선 길이도 길어져야 하므로, 대규모 접지전극의 경우 현장여건상 충분한 길이의 측정선을 펼치기가 곤란한 경우가 있을 수 있다. 본 논문에서는 여러 개의 접지망이 상호 연결되어 대규모의 접지극 네트워크를 형성하고 있어 충분한 길이의 전위강하법 측정선을 펼치는 것이 현실적으로 어려운 경우에 전위강하법 측정결과 해석방법을 제시한다. 사례연구로서 상부댐 접지극과 약 2[km] 떨어져있는 스위치야드 접지극이 상호 연결된 대형 접지극망에서 전위강하법 측정곡선 및 해석사례를 기술하였다.

Abstract

Measuring ground resistance is a typical way of performance evaluation of a grounding electrode. Among various ground resistance measurement methods, FOP (Fall-Of-Potential) method has been widely used, especially in case of a relatively large grounding electrode, such as a substation grounding mesh grid. Since FOP measurement line has to be increased as the size of grounding electrode increases, however, it is often that securing long enough FOP-line is practically impossible. In this paper, a sophisticated interpretation method of FOP measurement curve, which is applicable to large grounding electrode networks, is presented.

Key Words : Ground resistance, Fall-Of-Potential Method, Ground electrode network

1. 서 론

* 주저자 : 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원
Tel : 042-865-5854, Fax : 042-865-5876
E-mail : jkchoi@kepco.co.kr
접수일자 : 2004년 10월 13일
1차심사 : 2004년 10월 15일
심사완료 : 2004년 11월 2일

접지저항은 접지극의 성능을 정량적으로 보여주는 가장 일반적인 지수(index)이며, 접지저항의 측정에는 여러 가지 방법이 있으나, 변전소와 같이 비교적 대형 접지극의 측정에는 전위강하법이 많이 사용

되고 있다[1]. 전위강하법에 의해 측정된 결보기저항 곡선의 해석방법으로는 측정곡선에서 평평한 구간의 결보기저항 또는 소위 “61.8%의 법칙”에 의하여 측정선 길이의 61.8% 지점의 결보기저항을 접지저항으로 산정하는 것이 일반적이다. 특히 후자의 방법은 측정된 결보기저항곡선에서 평평한 부분이 나타나지 않는 경우의 유일한 해석방법이라고 해도 지나치지 않다. 그러나 여러 개의 접지망이 상호 연결되어 대규모의 접지극 네트워크를 형성하는 경우에는 충분한 길이의 전위강하법 측정선을 펼치는 것이 현실적으로 어려워 측정곡선에 평평한 구간이 나타나지 않을 뿐만 아니라, 전체 접지극의 등가반경도 알 수 없으므로 “61.8%의 법칙”도 적용이 곤란해진다.

본 논문에서는 여러 개의 접지망이 상호 연결되어 대규모의 접지극 네트워크를 형성하고 있어 충분한 길이의 전위강하법 측정선을 펼치는 것이 현실적으로 어려운 경우에 전위강하법 측정결과의 해석방법을 제시한다.

우선 현장 여건상 가능한 범위에서 전위강하법 측정을 수행하여 결보기저항곡선을 얻는다. 이렇게 측정된 저항곡선에 등가인 컴퓨터 모델을 식별하고 이 모델로부터 접지극의 접지저항을 추정한다. 사례연구로서 상부망 접지극과 약 2[km] 떨어져있는 스위치야드 접지극이 상호 연결된 대형 접지극 망에서의 측정 및 해석결과를 제시하였다.

2. 전위강하법과 측정값의 해석

이 장에서는 전위강하법 측정방법과 측정대상 접지극의 크기가 커질 때의 결보기저항 측정곡선 해석의 문제점에 대하여 간략히 기술하였다.

그림 1은 전위강하법의 측정회로를 보인 것이다. 측정할 접지극은 반지름이 a 인 반구전극이며, 전극으로부터 D 거리에 전류귀환전극이 있고 이 두 전극 사이에 전류(I)를 순환시켜 반구전극과 거리 x 의 지표면의 전위차(V)를 측정한다. 결보기저항(R_a)은 측정된 전위차를 전류로 나눈 값이며, 거리 x 에 따라 달라진다.

이 때 전극크기, 즉 반구전극 반지름 a 에 비해 전

극간 거리 D 가 충분히 클 경우 x 가 일정한 거리를 넘어서면 두 전극의 간섭이 거의 없어지는 구간, 즉 거리 x 에 대한 결보기저항(R_a)의 변화가 거의 없는 구간에 위치하게 된다. 이 간의 지표면전위는 거의 0V이므로 등가의 무한원점이 된다. 따라서 이 때 측정된 결보기저항은 반구전극의 접지저항과 같다(그림 2).

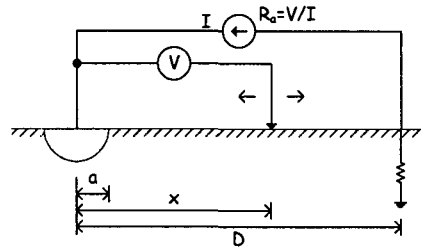


그림 1. 전위강하법 측정회로
Fig. 1. Fall-Of-Potential Test Circuit

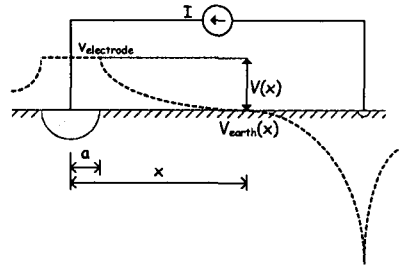


그림 2. 전위강하법 측정시 지표면전위
Fig. 2. Earth Surface Potential Curve during Fall-Of-Potential Test

그림 2의 반구전극 중심이 $x=0$ 이라면, 결보기저항($R_a=V(x)/I$)과 반구전극의 접지저항 참값($\rho/(2\pi a)$)이 같아지는 x 값은 식(1)의 해와 같으며, 식(2)와 (3)을 식(1)에 대입하여 x/D 로 정리하면 식(4)가 된다. 따라서 x/D 는 0.618 또는 -1.618이 되며 귀환전극방향의 해인 $x/D=0.618$ 일 때의 결보기저항이 접지저항과 같다는 것이 61.8%의 법칙이다[2] (단 ρ :대지저항률[Ωm]).

$$V(x) = V_{electrode} - V_{earth}(x) = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (1)$$

$$V_{electrode} = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{2\pi D} \quad (2)$$

$$V_{carth}(x) = \frac{\rho I}{2\pi x} - \frac{\rho I}{2\pi(D-x)} \quad (3)$$

$$\left(\frac{x}{D}\right)^2 + \frac{x}{D} - 1 = 0 \quad (4)$$

그러나 이상에 기술한 두 가지 전위강하법 측정곡선 해석방법 중, 전자의 방법은 결보기저항곡선의 평평한 부분을 얻기 위해서는 전극간 거리 D가 a보다 매우 커야하며, 61.8[%]의 법칙의 적용을 위해서는 전극의 반경 a를 미리 알고 있어야만 한다. 또한 측정대상 접지전극이 반구형상이 아닌 경우에는 일정거리 이상 떨어진 곳에서만 반구전극으로 등가화가 가능하다. 따라서 여러 개의 접지망이 상호 연결된 대규모 접지극 네트워크, 즉 등가 반구전극의 반지름이 매우 클 뿐만 아니라 정확한 크기를 알 수 없는 경우에는 상기 방법들은 적용하기가 곤란해진다.

3. 결보기저항곡선의 해석모델

본 장에서는 전위강하법 측정에 의해 얻어진 결보기저항곡선 해석모델에 대하여 기술한다.

우선 측정대상 접지전극(이하 주전극)을 m개의 도체세그먼트로 분할하고 전류전극(이하 보조전극)은 n개의 세그먼트로 분할한다. 주전극을 통해 누설되는 전류의 합을 I라고 하면, 보조전극을 통한 누설 전류는 -I가 된다. 전극의 i번째 세그먼트와 j번째 세그먼트 사이의 간섭저항을 r_{ij} , j번째 세그먼트들로부터 누설되는 전류와 전압을 각각 i_j , v_j 표시하고, 주전극과 보조전극의 전위는 각각 V_1 , V_2 로 표시하면 이들 사이의 전압전류의 관계식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$(V_1) = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{pmatrix}, (V_2) = \begin{pmatrix} v_{m+1} \\ \vdots \\ v_{m+n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$R_{11} = \begin{pmatrix} r_{1,1} & \dots & r_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,1} & \dots & r_{m,m} \end{pmatrix},$$

$$R_{12} = \begin{pmatrix} r_{1,m+1} & \dots & r_{1,m+n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,m+1} & \dots & r_{m,m+n} \end{pmatrix},$$

$$R_{21} = \begin{pmatrix} r_{m+1,1} & \dots & r_{m+1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m+n,1} & \dots & r_{m+n,m} \end{pmatrix},$$

$$R_{22} = \begin{pmatrix} r_{m+1,m+1} & \dots & r_{m+1,m+n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m+n,m+1} & \dots & r_{m+n,m+n} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$(I_1) = \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_m \end{pmatrix}, (I_2) = \begin{pmatrix} i_{m+1} \\ \vdots \\ i_{m+n} \end{pmatrix} \quad (8)$$

주접지극과 보조접지극을 통해 누설되는 전류 I를 미리 알고 있다고 하면 다음의 제약조건이 추가된다.

$$\sum_{j=1}^m i_j = I, \sum_{j=m+1}^{m+n} i_j = -I \quad (9)$$

만일 접지도체 내부의 전압강하를 무시할 수 있다면 주전극과 보조전극의 도체세그먼트들은 동전위로 생각할 수 있으므로 다음의 제약조건도 추가된다.

$$V_1 = v_1 = v_2 = \dots = v_m,$$

$$V_2 = v_{m+1} = v_{m+2} = \dots = v_{m+n} \quad (10)$$

이상에 기술한 대수방정식은 미지수와 (I_1, I_2, V_1, V_2) 와 방정식(식 5, 9)의 수가 같아 유일한 해로서 각 세그먼트들로부터 누설되는 전류와 주전극과 보조전극의 전압을 얻는다. 지표면상의 임의 위치 p점에서 전위값은 전류원으로서의 각 세그먼트들에 의해 생기는 전위의 대수합이며, 따라서 주전극 전위 V_1 과 전위강하법 측정선 위 p점의 전위 차를 주입전류 I로 나눔으로써 전위강하법 측정결과, 즉 결보기저항 곡선을 계산할 수 있게 된다.

만일 접지극의 형상과 전위강하법 측정선 위치를 이미 알고 있다고 가정한다면, 결보기저항곡선은 대지저항을만의 함수가 된다. 따라서 이상에서 기술한 방정식으로부터 계산한 결보기저항곡선과 실측한 결보기저항곡선이 가장 잘 일치하는 대지저항을 값을 식별함으로써 접지극의 접지저항을 추정할 수 있다[3].

4. 사례연구

4.1 결보기저항곡선의 측정

Y양수발전소의 상부댐 접지망과 스위치야드 접지망사이의 거리는 약 2[km]로, 두 접지망은 150[sq] 접지선 2조로 상호 연결되어서 대규모의 접지극을 형성하고 있다. 접지극의 유효면적이 워낙 크기 때문에, 이 면적에 상당하는 대지저항을 또는 전위강하법 측정선을 펼친다는 것은 현실적으로 불가능한 상황이었다. 따라서 일단 현장여건이 허락하는 범위에서 전위강하법에 의해 결보기저항곡선을 측정하고, 2장에서 기술한 방법에 의해 측정곡선에 등가인 계산모델을 식별하는 방법으로 접지저항을 추정하였다.

전위강하법 측정은 상부댐 인근에서 수행하였다. 일단 상부댐 중간에 위치한 맨홀로부터 접지선을 인출하여 상부댐을 따라 약 233[m] 끌어온 후, 여기서부터 218[m] 거리에 전류 보조전극을 시공하고 상부댐 부분을 제외한 218[m] 구간에서 24회에 걸쳐 전위강하법에 의한 결보기저항을 측정하였다.

전위강하법 측정시작점까지 거리가 멀기 때문에 접지선 인출을 위해 전선릴 2개를 사용하였으므로 결보기저항 실측치에는 전선의 저항이 포함되게 된다. 따라서 측정 후 전선릴의 저항을 측정하여 실측치에서 제외하였다. 그림 3은 결보기저항곡선 실측치와 전선의 저항(14.0726[Ω])을 보정 후의 저항곡선을 보인 것이다.

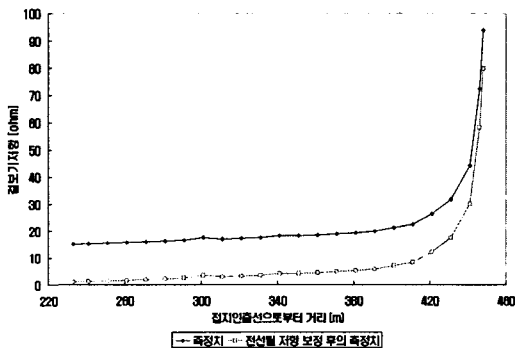
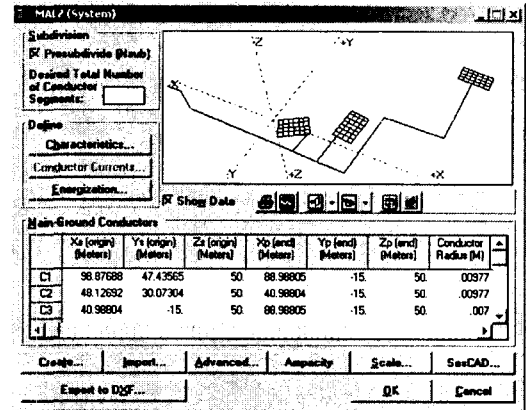


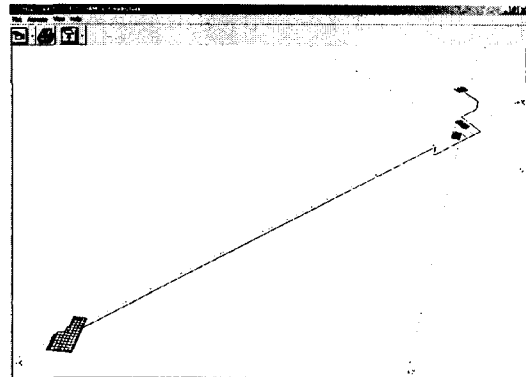
그림 3. 전위강하법 측정결과
Fig. 3. Fall-Of-Potential Test Results

4.2 결보기저항곡선의 해석

그림 4는 Y발전소에서 제공한 접지도면만을 바탕으로 구성된 접지네트워크의 모델을 보인 것이다. 이 모델로부터 도체세그먼트의 누설전류, 주/보조전극의 접지저항 및 전위강하곡선을 계산하기 위하여 SES社의 접지해석 프로그램인 CDEGS[4, 5]를 이용하였다.



(a) 상부댐 부근의 접지망
(a) ground electrode at upper dam



(b) 전체 접지극 망
(b) overall grounding network

그림 4. 발전소 접지계통 모델링
Fig. 4. Computer modeling of Power Plant Grounding System

그림 5는 컴퓨터 모델에서 대지저항율의 변화에 따른 결보기저항곡선 계산치와 실측치 일부를 비교한 것이며, 대지저항율을 약 1700[Ωm]로 했을 때가

실측곡선과 계산곡선이 가장 잘 일치하는 것으로 판단되었다. 각 그림의 대지저항을 옆 괄호 안의 수치는 접지저항 계산치이다.

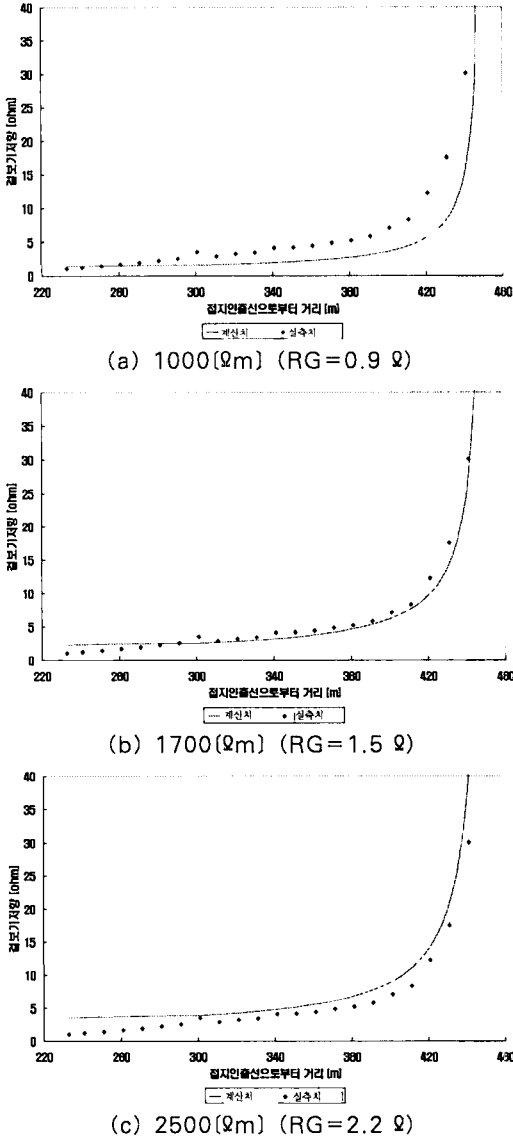


그림 5. 토양저항률에 따른 측정치-계산치 비교
Fig. 5. Measure and Calculated FOP curves according to Soil Resistivity

그림 6은 그림 5(b)에서 전위강하법에 의해 겘보기저항 실측치 전부와 계산곡선을 비교한 것이며,

두 곡선이 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 Y발전소 접지망의 겘보기저항곡선에 등가인 컴퓨터 모델로부터 계산된 1.5[Ω]으로 산정할 수 있다.

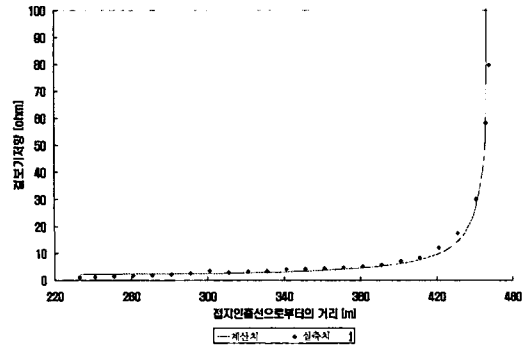


그림 6. 저항곡선 측정/계산치 비교 (최종)
Fig 6. Complete Measured and Calculated FOP curves

5. 결 론

본 논문에서는 1) 기존의 반구전극모델보다 상세한 수치해석모델에 이용하여 유효면적이 넓은 대규모 접지극 망에서의 겘보기저항곡선의 해석방법을 제시하였고, 2) 제시한 방법을 이용한 Y양수발전소의 전위강하법 측정 및 해석의 실적용 사례를 보였다.

본 논문에서 제시한 겘보기저항곡선 해석방법은 여러 개의 접지극이 상호 연결된 대규모의 접지극 망처럼 접지극의 유효면적이 크고 등가반경을 산정하기가 어려워 기존의 방법으로는 접지저항 산정이 불가능한 경우의 대안으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Bouchard, F. P. Dawalibi, and D. Mukhedkar, "Survey on Ground Resistance and Earth Resistivity Measurements," IEEE Winter Power Meeting, 30 - February 4, 1977.
- [2] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Std 81-1983.
- [3] 한국전력공사 전력연구원, 운전중인 변전소의 접지계통 진단기술 개발연구, 2002.4.

대규모 접지전극 망의 접지성능 평가를 위한 곁보기저항곡선의 해석에 관한 연구

- [4] F. P. Dawalibi, F. Donoso, "Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EM", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, April 1993, pp. 19-24.
- [5] SES, CDEGS Users' Guide, 2000.

◇ 저자소개 ◇

최종기 (崔鍾基)

1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기제어과 졸업(석사). 1995~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

유희영 (柳熙榮)

1970년 3월 3일생. 1995년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 한국전력공사 입사. 2003~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

이동일 (李東一)

1958년 3월 15일생. 1979년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1983년 인하대학교 졸업(석사). 1992 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1978년 한국전력공사 입사. 현재 한전 전력연구원 송전기술그룹 그룹장

정길조 (鄭吉朝)

1949년 8월 16일생. 1983년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 연세대 공학대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년 숭실대학교 전기공학과 졸업(박사). 1974년 한국전력공사 입사. 1996년~현재 한전 전력연구원 차세대전력기술그룹 그룹장

김경철 (金庚哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988년 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991년 한국 전기연구소 선임 연구원. 1991~현재 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수.