

지표면전위 해석에 의한 접지저항 측정기법에 관한 연구

(A Study on the Measurement of Grounding Resistance based on the Earth Surface Potential Analysis)

윤장완* · 안용호 · 정길조 · 한병성

(Jang-Wan Yoon · Yong-Ho Ahn · Gil-Jo Jung · Byung-Sung Han)

요 약

접지저항의 측정은 접지시스템의 접지성능이 적정한가를 평가하기 위한 가장 기본적이고 중요한 작업이라고 할 수 있다. 그러나 실제 현장에서, 특히 접지극의 크기가 큰 경우일수록 접지저항을 정확히 측정하기란 쉽지 않은데, 이는 정확한 접지전위 측정을 위한 기준전위점을 찾기가 힘들기 때문이다. 본 논문에서는 접지극 주변에서 측정된 지표면전위를 분석하여 기준전위점의 위치를 정확히 식별하는 방법과 그 정당성을 제시하였다.

Abstract

Measurement of ground resistance is the basic and important procedure to evaluate the propriety of grounding systems performance. In the field, however, it is not an easy task to measure ground resistance accurately, because locating a right position of zero potential for accurate GPR(Ground Potential Rise) measurement is very difficult, especially in case of a grounding electrode with large dimension. In this paper, the estimation method of ground resistance by analysing earth surface potential distribution around the grounding electrodes has been described.

Key Words : ground resistance, Ground Potential Rise, Fall-Of-Potential Method

1. 서 론

접지저항 측정에는 전위강하법이 널리 사용되고 있으나, 변전소처럼 대규모 접지극의 측정에는 여러 가지 문제점이 따른다. 주된 어려움은 정확한 접지극

의 전위측정을 위한 기준전위 또는 영전위점을 찾기 어렵다는데 기인한다. 전위강하법 측정곡선을 해석하는 방법 중 하나는 61.8[%]의 법칙에 의한 것이다. 그러나 61.8[%] 법칙의 여러 가지 한계로 인해, 모든 경우에 접지저항을 정확히 측정할 수 있는 것은 아니다. 이러한 경우에는 지표면 전위분석에 의해 접지저항을 산정하는 방법을 생각할 수 있다[1].

이 논문에서는 실증시험과 컴퓨터 모의실험을 통해 접지극 주변의 지표면전위가 접지저항과 등가임을 확인함으로써, 지표면전위의 분석으로 접지저항을

* 주저자 : 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5814, Fax : 042-865-5804
E-mail : jwyun@kepri.re.kr
접수일자 : 2002년 5월 13일
1차심사 : 2002년 5월 15일
심사완료 : 2002년 6월 12일

지표면전위 예측에 의한 접지저항 측정기법에 관한 연구

추정할 수 있음을 보였다. 이로써 61.8%의 법칙을 적용할 수 없는 조건(ex. 접지극의 규모가 크거나 또는 토양이 균일구조가 아닌 경우 등)에서 접지저항을 정확히 추정할 수 있다.

2. 61.8% 법칙의 한계

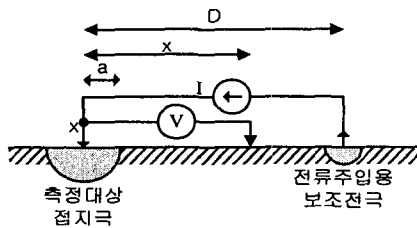


그림 1. 전위강하법 측정회로
Fig. 1. Fall-Of-Potential Test Circuit

전위강하법의 측정회로는 그림 1과 같으며, D의 61.8%되는 지점($x/D=0.618$)인 지점에서 측정한 겘보기저항(V/I)이 측정대상 접지극의 접지저항과 같아진다는 것이 “61.8%의 법칙”이다.

전위강하법 측정회로는 한 개의 측정선만 펼쳐서 측정할 수 있고, 전위강하곡선의 평평한 부분이 나타나지 않더라도 61.8% 법칙에 의해 기준전위점의 정확한 위치식별이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 전위강하법 또는 61.8%의 법칙에 의한 접지저항 측정방법에는 다음과 같은 몇가지 적용상 제한이 따른다.

첫째, 전위강하곡선 상의 평평한 부분이 나타나기 위해서는 측정대상 접지극과 전류주입용 보조전극 간 거리가 충분히 멀리 떨어져 있어야 한다(참고문헌 [2]에 측정대상 접지극 대각선 길이의 6.5배 이상을 권고하고 있음). 따라서 지형이나 현장여건상 충분한 길이의 측정선을 확보하기가 어려운 경우에는 정확한 측정이 곤란해진다.

둘째, 61.8%의 법칙이 적용되려면 토양은 일정한 저항율을 갖는 균일매질이어야 한다. 그러나 우리나라의 경우, 토양이 균일토양인 경우는 흔하지 않으며 대부분 등가토양구조는 2층 이상인 경우가 많다. 참고문헌 [3]에 의하면 62개소에서의 Wenner전극법에 의한 겘보기 대지저항을 측정결과, 토양구조가 균일

매질인 경우는 3.2%에 불과하였다(표 1 참조). 또한 Wenner법의 전극간격에 따른 겘보기저항을 변화로 보아 등가토양구조가 3층 이상인 경우도 66.1%에 달하였다. 이러한 토양구조에서는 61.8%의 법칙에 의한 기준전위점의 위치 식별이 부정확해지므로, 정확한 접지전위 측정 또는 접지저항의 측정이 곤란해진다.

표 1. 등가토양구조 요약 [3]
Table1. Summary of Equivalent Soil Structures

전극간격에 따른 겘보기 대지저항율	개소	점유율	비고 (토양 구조)
상승	11	17.8 %	수평2층 이상
감소	8	12.9 %	"
상승→감소	10	16.1 %	수평3층 이상
감소→상승	31	50.0 %	"
안정	2	3.2 %	균일토양
계	62	100.0 %	

셋째, 61.8%의 법칙이 적용되려면 측정선의 길이에 비해 측정대상 전극의 크기가 무시될 정도로 측정선의 길이가 커야하며(그림 1에서 $D \gg a$), 그렇지 않은 경우에는 측정대상 접지극의 크기 a 를 알고 있어야 한다(그림 1 참조). 따라서 측정선을 길게 펼치기 어려운 경우나 접지극 크기 a 를 모르는 경우에는 61.8%의 법칙에 의해 기준전위점의 위치(x)를 정확히 식별하는 것이 곤란해진다.

3. 전위강하곡선 계산모델

앞 절에서 기술한 바와 같이 전위강하법에 의해 측정된 전위강하곡선 상에 평평한 구간이 나타나지 않거나, 2층 이상의 복잡한 토양구조로 인해 61.8% 법칙의 신뢰성을 확인할 수 없는 경우에는 유한요소해석을 이용한 모의실험을 통해 정확한 접지전위(또는 접지저항)가 측정되는 기준전위점 위치를 식별하는 방법을 생각해 볼 수 있다.

F.P.Dawalibi[4], EPRU[5], R.J.Heppel[6] 등이 제시한 유한요소해석에 의한 계산 알고리즘은,

1단계, 접지전극을 여러개의 도체조각으로 분할하

여 모델링하고

2단계, 분할된 각 도체조각들 간의 상호작용을 기술하는 방정식을 수립하여

3단계, 이 방정식의 해(각 도체조각들의 누설전류와 접지전극의 전위)를 계산함으로써

4단계, 각 도체조각에서 누설되는 전류로 인한 임의 위치의 전위상승값을 계산한다.

이와 같은 계산과정은 그림 3과 식(1)~(10)에 간략히 기술하였으며, 본 논문에서는 Dawalibi의 알고리즘에 근거한 MALT를 이용하여 계산을 수행하였다.

그림 2의 접지전극 1, 2를 각각 m, n개의 도체조각으로 분할하고, 각각의 도체조각의 전위와 대지로 누설되는 전류벡터는 각각 V_1, V_2, I_1, I_2 로 표시한다(식 1, 2). 이 때 각 접지전극의 도체임피던스에 의한 전압강하를 무시하면, 접지전극 1, 2의 도체조각들은 각각 동전위로 생각할 수 있으므로 접지전극의 전위상승값은 V_1, V_2 로 나타낼 수 있다(식 1). 전위강하법 측정시 양 전극간 인가하는 접지전류 I_1, I_2 는 이미 알고 있는 값이다(식 3).

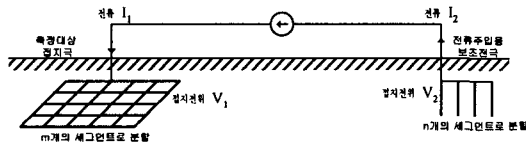


그림 2. 전위강하법의 전류주입 회로
Fig. 2. Current injecting circuit of FOP method

$$V_1 = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ \vdots \\ V_{1m} \end{bmatrix} = V_1 \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad V_2 = \begin{bmatrix} V_{21} \\ V_{22} \\ \vdots \\ V_{2n} \end{bmatrix} = V_2 \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ \vdots \\ I_{1m} \end{bmatrix}, \quad I_2 = \begin{bmatrix} I_{21} \\ I_{22} \\ \vdots \\ I_{2n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$I_1 = [1]^T \cdot I_1 = \sum_{j=1}^m I_{1j}, \quad I_2 = [1]^T \cdot I_2 = \sum_{j=1}^n I_{2j} \quad (3)$$

(단, $I_1 = I_2$)

각 도체조각들 사이에 대지를 매개로 한 도전결합은 식 4의 방정식으로 기술되며, 이를 I_1, I_2 에 대하여 정리하면 식 5, 6으로 나타낼 수 있다. 따라서 식 7과 8에 의해 식 6은 식 9, 10으로 표현되어 V_1, V_2 가 구해지고, 식 4에 의하여 I_1, I_2 도 구해진다.

조영 · 전기설비학회논문지 제16권 제4호, 2002년 7월

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Z_{11}' & Z_{12}' \\ Z_{12}' & Z_{22}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

$$I_1 = Z_{11}' V_1 + Z_{12}' V_2 = V_1 Z_{11}' [1] + V_2 Z_{12}' [1] \quad (5)$$

$$I_2 = Z_{21}' V_1 + Z_{22}' V_2 = V_1 Z_{21}' [1] + V_2 Z_{22}' [1] \quad (6)$$

$$k_1 = Z_{11}' [1], k_2 = Z_{12}' [1], k_3 = Z_{21}' [1], k_4 = Z_{22}' [1] \quad (7)$$

$$k_1 = [1]^T \cdot k_1, k_2 = [1]^T \cdot k_2, k_3 = [1]^T \cdot k_3, k_4 = [1]^T \cdot k_4 \quad (8)$$

$$I_1 = V_1 k_1 + V_2 k_2, \quad I_2 = V_1 k_3 + V_2 k_4 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

상기 과정을 거쳐 각 도체조각으로부터 대지로 누설되는 전류 I_1, I_2 를 알면, 지표면 임의 위치에서 전위상승은 각 도체조각에 의한 전위상승의 중첩으로써 구할 수 있게 된다. 따라서 전위강하법 측정선의 전위전극이 위치한 지표면 전위와 측정대상 접지극의 전위(V_1)의 차를 주입전류(I_1)로 나누어 걸보기저항, 즉 4절의 그림 4와 같은 전위강하곡선을 계산할 수 있다.

4. 사례연구

그림 3는 전위강하법 측정을 위한 시험접지망의 계획과 측정회로를 보인 것이다. 측정대상 접지망은 시공면적 27[m]×9[m], 도체간격 3[m], 매설깊이는 약 1.1[m]이었으며, 접지망으로부터 80[m] 떨어진 곳에 전류주입용 보조전극으로 접지봉 5개를 약 1[m] 간격으로 시공하였다. 그림 3의 회로에서 전위측정을 위한 전극을 보조전극쪽으로 이동시켜가면서 걸보기저항을 측정하였으며, 측정장비로는 스웨덴 A社의 측정장비를 이용하였다. 두 전극 사이에서 측정된 전위강하곡선은 그림 4와 같았다.

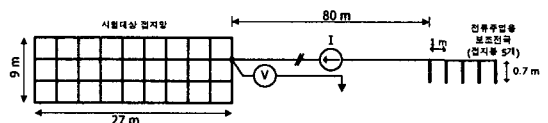


그림 3. 전위강하법 측정회로
Fig. 3. Configuration of FOP test

표 2. 전위강하곡선 측정결과
Table 2. FOP measurement result

접지망으로부터 거리[m]	겉보기 저항 [Ω]
0.5	3.56
1	4.45
2	5.24
3	5.59
5	5.92
10	6.16
20	6.20
30	6.24
40	6.35
50	6.45
60	6.69
70	7.40
75	9.00
79	18.35

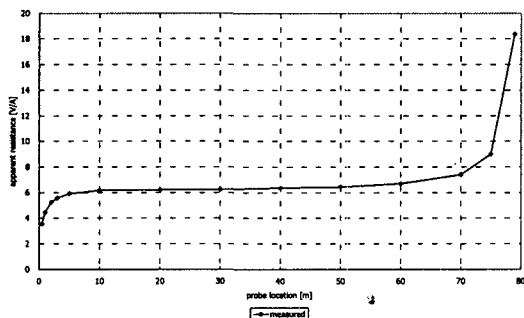


그림 4. 전위강하곡선
Fig. 4. Fall-of-potential curve

4.1 전위강하곡선 기울기에 의한 해석방법

2절에서 기술한 바와 같이 그림 5의 전위강하곡선 상의 평평한 구간은 두 전극간 간섭현상이 없다는 것을 의미하며, 따라서 이 구간에서 겉보기저항 측정값은 측정대상 접지극의 접지저항과 같아진다. 그림 4의 전위강하곡선 기울기가 가장 작아지는 구간의 겉보기 저항값은 약 6.2~6.4[Ω]으로 나타났다.

4.2 61.8 [%] 법칙의 적용에 의한 해석 방법

두 전극의 중심사이의 총 길이(그림 1의 D)는 95.5

[m](=13.5+80+2)이며, 61.8[%]가 되는 지점은 약 59[m] 지점이 된다. 여기서 측정대상 접지극의 크기 (13.5[m])를 뺀 위치는 그림 4에서 약 45[m] 지점이 되며, 이 때의 겉보기저항값은 약 6.4[Ω]으로 나타났다.

4.3 전위강하곡선에 등가인 컴퓨터 모델 식별에 의한 해석방법

전위강하곡선의 등가모델 식별을 위한 첫 번째 단계로서 접지저항에 등가인 토양모델 식별작업을 수행하였으며, 두 번째 단계에서는 식별된 접지저항에 등가인 토양모델에서 전위강하곡선을 계산하고 이를 측정값과 비교하는 방법으로 전위강하곡선에 등가인 모델을 식별하였다.

2절에서 기술한 컴퓨터 모델에서 토양모델은 수평 2층 구조를 가정하였으며, 반사계수(K)와 표토층 깊이를 달리하면서 전위강하곡선과 접지저항을 계산하였다. 표 2는 계산에 사용된 토양모델의 파라메타(표토층 저항율, 심층 저항율, 표토층 두께)를 나타낸 것이며, 총 105가지의 토양모델을 대상으로 계산을 수행하였다. 이로써 적절한 내삽 및 외삽에 의해, 반사계수가 0보다 작은 거의 모든 경우의 수평2층 토양구조 고려가 가능하였다.

표 3. 수평2층 토양모델의 심층저항율
Table 3. Bottom layer resistivity of 2 layered soil

(단위:Ωm)

표토층 저항율[Ωm]	반사계수(K)				
	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0
1000	111.1	250.0	428.6	666.7	1000.0
800	88.9	200.0	342.9	533.3	800.0
600	66.7	150.0	257.1	400.0	600.0
400	44.4	100.0	171.4	266.7	400.0
200	22.2	50.0	85.7	133.3	200.0

(단, 표토층의 두께는 각각 2, 4, 6, 8, 10[m]를 가정함. 반사계수 $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, ρ_1 : 표토층 저항율, ρ_2 : 심층 저항율)

각각의 토양모델에서 접지저항 계산결과를 표 4~8에 요약하였으며, 접지저항에 등가인 토양모델의 정확한 파라메타(표토층 두께, 반사계수 등)는 내삽 또는 외삽법에 의하여 식별하였다. 각각의 식별된 모델에서 계산된 전위강하곡선은 측정값과 비교결과는 그림 5~9에 나타냈다.

표 4. 접지저항 계산결과 (K=-0.2)
Table 4. Summary of ground resistance calculation (단위:Ω)

표토층 두께[m]	표토층 저항을 [Ωm]				
	200	400	600	800	1000
2	3.9	7.7	11.6	15.5	19.4
4	4.2	8.3	12.5	16.6	20.8
6	4.3	8.7	13.0	17.3	21.7
8	4.5	8.9	13.4	17.8	22.3
10	4.5	9.1	13.6	18.2	22.7

표 5. 접지저항 계산결과 (K=-0.4)
Table 5. Summary of ground resistance calculation (단위:Ω)

표토층 두께[m]	표토층 저항을 [Ωm]				
	200	400	600	800	1000
2	3.0	5.9	8.9	11.9	14.8
4	3.5	6.9	10.4	13.8	17.3
6	3.8	7.5	11.3	15.0	18.8
8	4.0	8.0	11.9	15.9	19.9
10	4.1	8.3	12.4	16.5	20.7

표 6. 접지저항 계산결과 (K=-0.6)
Table 6. Summary of ground resistance calculation (단위:Ω)

표토층 두께[m]	표토층 저항을 [Ωm]				
	200	400	600	800	1000
2	2.2	4.5	6.7	8.9	11.1
4	2.9	5.7	8.6	11.5	14.3
6	3.3	6.6	9.8	13.1	16.4
8	3.6	7.1	10.7	14.3	17.9
10	3.8	7.6	11.4	15.1	18.9

표 7. 접지저항 계산결과 (K=-0.8)
Table 7. Summary of ground resistance calculation (단위:Ω)

표토층 두께[m]	표토층 저항을 [Ωm]				
	200	400	600	800	1000
2	1.6	3.2	4.8	6.5	8.1
4	2.4	4.7	7.1	9.5	11.8
6	2.9	5.7	8.6	11.5	14.3
8	3.2	6.4	9.7	12.9	16.1
10	3.5	7.0	10.4	13.9	17.4

표 8. 접지저항 계산결과 (K=0)
Table 8. Summary of ground resistance calculation (단위:Ω)

대지저항을 [Ωm]	200	400	600	800	1000
접지저항	5.0	10.1	15.1	20.2	25.2

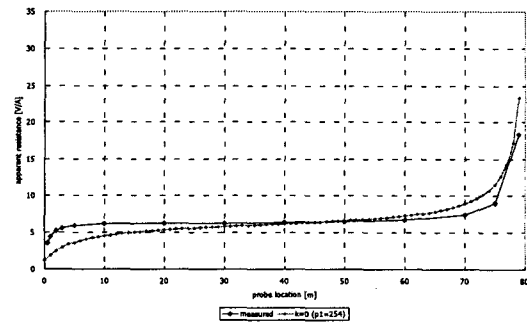


그림 5. 전위강하곡선 계산치와 실측치 비교 (균일토양구조, ρ=254 [Ωm])
Fig. 5. Comparison of measured & calculated FOP curve (uniform soil, ρ=254 [Ωm])

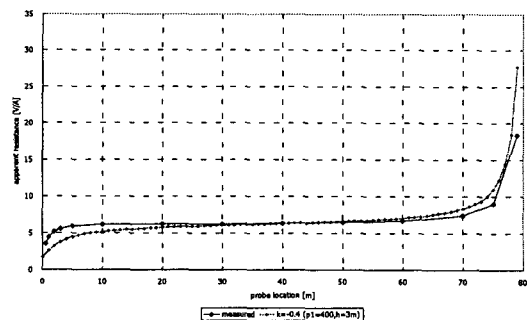


그림 6. 전위강하곡선 계산치와 실측치 비교 (수평2층 토양, K=-0.4, ρ1=400 [Ωm], h=3 (m))
Fig. 6. Comparison of measured & calculated FOP curve (2 layered soil, K=-0.4, ρ1=400 [Ωm], h=3 (m))

지표면전위 해석에 의한 접지저항 측정기법에 관한 연구

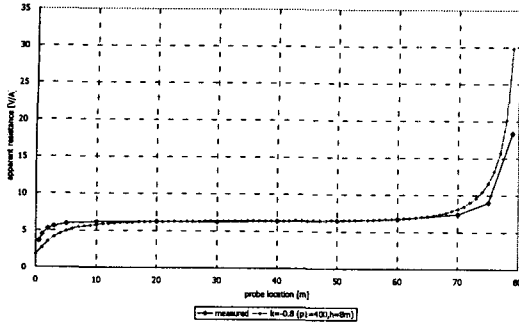


그림 7. 전위강하곡선 계산치와 실측치 비교 (수평2층 토양, $K=-0.8$, $\rho_1=400$ [Ωm], $h=8$ (m))
 Fig. 7. Comparison of measured & calculated FOP curve (2 layered soil, $K=-0.8$, $\rho_1=400$ [Ωm], $h=8$ (m))

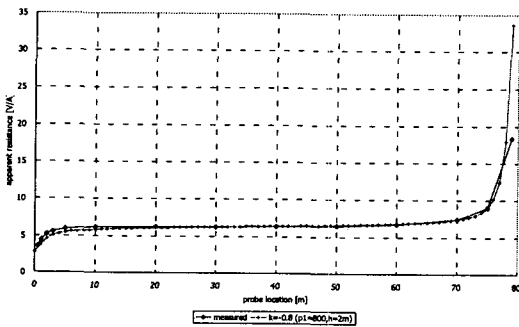


그림 8. 전위강하곡선 계산치와 실측치 비교 (수평2층 토양, $K=-0.8$, $\rho_1=800$ [Ωm], $h=2$ (m))
 Fig. 8. Comparison of measured & calculated FOP curve (2 layered soil, $K=-0.8$, $\rho_1=800$ [Ωm], $h=2$ (m))

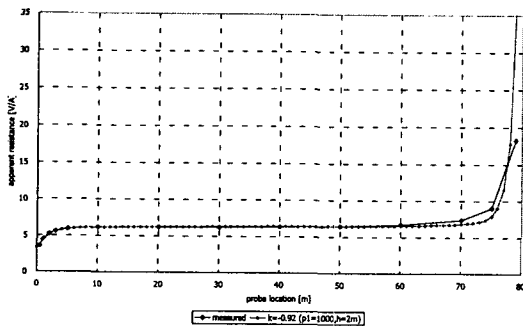


그림 9. 전위강하곡선 계산치와 실측치 비교 (수평2층 토양, $K=-0.92$, $\rho_1=1000$ [Ωm], $h=2$ (m))
 Fig. 9. Comparison of measured & calculated FOP curve (2 layered soil, $K=-0.92$, $\rho_1=1000$ [Ωm], $h=2$ (m))

그림 5~9의 컴퓨터 모델의 접지저항은 모두 6.4

[Ω]으로, 그림 9의 모델을 제외하고는 실측한 전위강하곡선과 계산한 곡선이 일치하지 않는다. 이는 그림 9의 모델은 접지저항과 전위강하곡선 모두가 실측치에 등가이지만, 그림 5~8의 모델은 접지저항 실측치에는 등가이지만, 전위강하곡선은 실측치와 등가가 아님을 보여준다. 따라서 그림 9과 같이 전위강하곡선 실측치에 등가인 컴퓨터 모델 식별을 통해 접지저항에 등가인 모델을 식별할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 접지저항에 등가인 계산모델이 반드시 지표면전위에 등가는 아니며, 접지저항에 등가인 여러 계산모델들 중에서 지표면전위에 등가인 모델은 하나밖에 존재하지 않음을 확인하였다. 이는 지표면전위해석, 즉 지표면전위에 등가인 모델의 식별을 통해 접지저항을 산정할 수 있음을 보여주는 것이다.

이처럼 지표면전위 또는 전위강하곡선의 해석에 의한 접지저항 추정방법은 61.8[%] 범칙의 적용범위를 벗어나는 경우, 즉 토양이 균일매질이 아니거나 접지극의 크기가 커서 영전위점을 찾기가 곤란한 경우에 사용될 수 있다.

References

- (1) 정길조 외 2 “변전소 접지설계를 위한 대지저항을 측정시 전극간 최대간격이 접지해석에 미치는 영향”, 대한전기학회 논문지 2001년8월 pp.382~386.
- (2) IEEE Std 81.2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, pp.14.
- (3) 한기봉, “지질별 접지시공의 최적화 방안”, 電氣安全(한국전기안전공사), 제4호, 1999, pp. 54~62.
- (4) F.P.Dawalibi, D.Mukhedkar, “Optimum Design of Substation Grounding in Two Layer Earth Structure; Part I-Analytical Study”, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94, No.2, Mar./Apr.,1975, pp.252~261.
- (5) EPRI TR-100622, “Substation Grounding Programs”, Vol. 1~5, May, 1992.
- (6) R.J.Heppe, “Computation of Potential at Surface above an Energized Grid or Other Electrode, allowing for Nonuniform Current Distribution”, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No.6, Nov./Dec., 1979, pp.1978~1989.
- (7) F. P. Dawalibi, F. Donoso, “Integrated Analysis Software

- for Grounding, EMF, and EMI", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, April 1993, pp. 19~24.
- [8] SES(Safe Engineering Services & Technologies Ltd.), MALT Users' Manual, 2001.
 - [9] IEEE Std 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding".
 - [10] AP.Sakis Meliopoulos, "Power System Grounding and Transient", Marcel Dekker Inc., Chap.5, 1988.
 - [11] IEEE Std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, pp.20~24.

◇ 저자소개 ◇

윤 장 완 (尹章完)

1959년 5월 1일 생. 1979년 원광대학교 전기공학과 졸업. 현재 전력연구원 선임연구원.

안 용 호 (安勇豪)

1961년 7월 10일 생. 1984년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2000년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전력연구원 선임연구원.

정 길 조 (鄭吉朝)

1949년 8월 16일 생. 1983년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1995년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사).

한 병 성 (韓秉誠)

1951년 12월 22일 생. 1988년 프랑스 파스퇴르대학 박사학위 취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스국립과학연구소)연구원. 현재 전북대학교 전자정보공학부 교수.