

변전소 접지설계를 위한 대지저항을 측정시 전극간 최대간격이 접지해석에 미치는 영향

論 文
50C-8-4

Effects of Maximum Probe Spacing of Soil Resistivity Survey on Substation Grounding Analysis

鄭吉朝* · 郭熙魯** · 崔鍾基***
(G. J. Jung · H. R. Kwak · J. K. Choi)

Abstract - Presently, typical maximum probe spacing of soil resistivity survey(Wenner's 4 pin method) is 20 m in case of 154 kV substation grounding design of KEPCO. This paper examined the effects of maximum probe spacing of wenner method on the equivalent soil modelling and the accuracy of grounding resistance measurement by comparing the calculated FOP(Fall-of-Potential) curves of various soil models with the measured one at 154kV H substation. The comparison results showed that the inaccurate estimation of deep soil resistivity, which is caused from the short probe spacing of soil resistivity survey, can produce large errors on measurement of grounding resistance. In this paper a quantitative analysis of FOP at H substation has been presented.

Key Words : substation, grounding, wenner method, resistivity

1. 서 론

변전소의 접지저항은 접지망의 접지성능을 나타내는 대표적인 성능지수이다. 이러한 관점에서 볼 때, 접지설계 단계의 접지저항 예측은 충분한 접지성능을 갖는 접지망을 설계하는데 반드시 필요하며, 접지시공 후에는 접지저항을 측정함으로써 접지망의 성능이 만족할만한 수준인가를 검증하게 된다.

변전소의 접지면적이 정해진 경우, 접지저항은 토양의 전기적 특성에 의해 거의 좌우된다. 따라서 실제 토양의 구조와 전기적 특성에 얼마나 근접한 토양모델을 가정하였는가는 변전소 접지저항의 예측결과에 결정적 영향을 미치게 될 뿐만 아니라 전위강하법에 의하여 수행되는 변전소의 접지저항 측정의 정확성에도 큰 영향을 미친다. 토양모델이 접지저항 측정에도 큰 영향을 주는 이유는, 만일 토양을 균일매질로 가정할 경우에 이론적으로 전위강하법 측정선 총 길이의 61.8% 되는 지점에서 측정값(겉보기저항)이 측정대상 접지저항값과 같아지지만, 이 위치는 토양모델에 따라서 위치가 변하기 때문이다. 2층토양을 예로 들자면 이 위치는 토양모델에 따라 전위강하법 측정선의 50~90% 지점사이에서 변하게 된다[1].

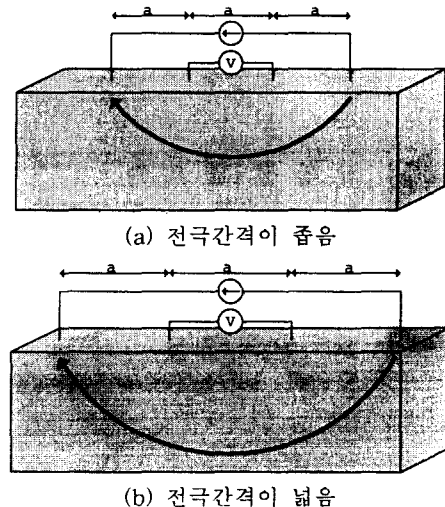
우리나라 토양은 대개 심층으로 갈수록 대지저항율이 높아지기 때문에[2], 토양을 균일매질로 가정할 수 있는 경우는 많지 않으며 따라서 대지의 등가모델은 2층이상의 다층토양구조로 표현하여야만 정확히 모델링할 수 있다. 토양구조가 3층이상의 다층구조로 표현되는 경우, 전위강하법 측정선상의 어느 위치에서의 측정값이 변전소 접지저항과 같아지는가는 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 알아낼 수 있으며 따라서 실제토양구조에 최대

한 근사한 토양모델링은 정확한 시뮬레이션의 필수적 조건이다.

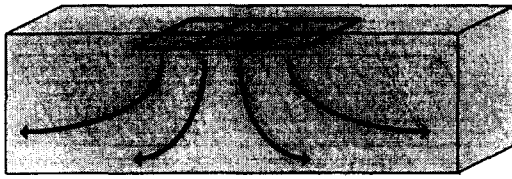
현재 154 kV 변전소 건설시, 접지설계를 위하여 변전소 부지에서 수행되는 대지저항을 측정은 Wenner 4전극법이 사용되며, 이때 전극간 최대 거리(그림1a의 a)는 관례적으로 20m(총 측정선길이는 $20m \times 3 = 60m$)가 적용되고 있다. 2장에서 보다 자세히 기술하겠지만 전극간격이 넓어질수록 측정결과는 심층토양 저항율에 대한 정보를 많이 포함하게 되므로 정확한 토양모델링이 가능해진다. 이 논문에서는 154 kV 변전소 접지저항 측정결과를 사례로 하여, Wenner 4전극법의 최대 전극간격이 토양모델링과 접지저항 측정의 정확성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 겉보기저항을 측정과 등가토양모델의 추정

그림 1은 Wenner 4전극법에 의한 겉보기저항을 측정작업시 전극간격에 커짐에 따라 주입되는 시험전류는 심층토양을 통과하게 되고, 따라서 지표면에서 측정되는 전압은 심층토양의 저항율에 관한 정보를 더 많이 포함하게 된다는 것을 개념적으로 보여주기 위한 그림이다.



* 正 會 員 : 電力研究員 송배전기술그룹 그룹장 工博
 ** 正 會 員 : 숭실대 電氣工學科 教授
 *** 正 會 員 : 電力研究員 電力系統研究室 先任研究員 工博
 接受日字 : 2000年 7月 10日
 最終完了 : 2001年 6月 13日



(c) 대규모 변전소의 접지전류

그림 1. Wenner 4전극법에 의한 겉보기저항률의 측정

Fig 1. Measurement of apparent resistivity

Wenner 4전극법에 의하여 측정된 저항값은, 대지구조가 균일하다고 가정함으로써 겉보기 대지저항률로 환산된다[3].

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (1)$$

(ρ_a :저항률[ohm-m], a:전극간격[m], R:측정값[ohm])

측정된 겉보기저항률은 미리 가정한 토양의 등가모델로부터 계산한 겉보기저항률과의 비교를 통해, 실측값과 가장 유사한 겉보기저항률이 계산되는 등가토양모델의 각종 파라메타(층저항률, 층두께)를 찾게 된다(최적화문제의 목적함수의 예는 식 (2) 참조)

$$\text{minimize } \left\| \vec{\rho}_{\text{실측치}} - \vec{\rho}_{\text{계산치}} \right\|^2 \quad (2)$$

단, 수평 n층 토양모델에서 겉보기저항률 계산치는 $\rho_{\text{계산치}} = f(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, a)$ 의 함수로 표현된다. (ρ_i : i번째층의 저항률, h_i : i번째층의 두께, a: 전극간격)

표1과 그림2는 154 kV H변전소 부지에서의 Wenner전극법 측정선과 측정결과를 보인 것이다. 부지를 십자형으로 가로질러 2개의 측정선을 따라 측정하였다. 최대 전극간격은 120m, 측정선의 총 길이는 360m(=3x120m)이다.

만일, 대지가 일정한 저항률을 갖는 균일매질이라면 측정선의 위치와 전극간격에 관계없이 일정한 겉보기저항률이 측정될 것이다. 그러나 실제토양은 복잡한 구조를 갖는 비균질의 매질이므로 표1과 그림 3와 같이 전극간격과 측정선에 따라 겉보기 저항률이 변하게 된다.

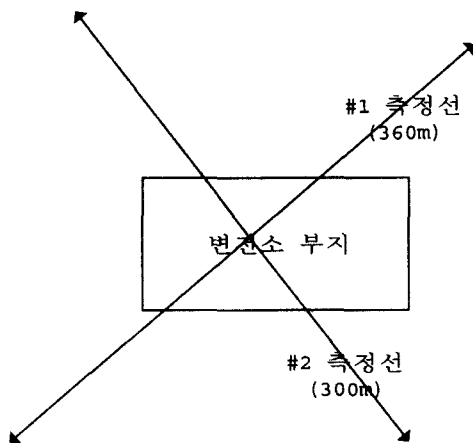


그림 2. 겉보기 대지저항률 측정선

Fig 2. Measurement lines of apparent soil resistivity

표 1. H 변전소 대지저항률 측정치

Tab. 1 apparent resistance measurement result at H substation

전극간격 [m]	측정선#1		측정선#2	
	저항 [ohm]	저항률 [ohm-m]	저항 [ohm]	저항률 [ohm-m]
0.5	52.38	164.57	39.10	122.84
1.0	26.20	164.62	21.20	133.20
2.0	13.14	165.09	11.65	146.40
3.0	8.82	166.25	8.38	157.96
4.0	6.70	168.45	7.14	179.45
5.0	5.47	171.89	5.88	184.73
6.0	4.68	176.60	5.28	199.05
7.0	4.15	182.59	6.10	268.29
10.0	3.30	207.64	3.97	249.44
15.0	2.82	265.76	2.48	233.73
20.0	2.64	332.19	1.75	219.28
30.0	2.47	464.80	2.31	435.42
50.0	2.22	698.73	1.65	518.36
70.0	2.03	893.70	1.70	747.70
100.0	1.80	1131.78	1.34	841.32
120.0	1.67	1262.85		

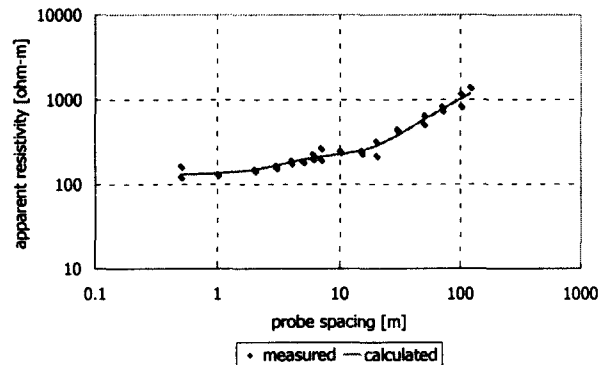


그림 3. 겉보기저항률 측정치와 계산치 비교

Fig 3. comparison of apparent resistivity curves

그림 3는 겉보기 대지저항률 측정값과, H변전소 부지를 수평4층구조의 토양모델로 가정하여 계산한 저항률값을 서로 비교한 것이다. 수평4층구조의 토양모델의 각 층의 두께와 저항률은 식2의 최적화문제의 해로서, 토양구조해석 프로그램인 RESAP[3,4]을 이용하여 구하였다. 식2와 같은 비선형 최적화문제의 해는 유일하지 않으며, 따라서 등가토양의 층수나 저항률은 해석하는 사람의 경험과 판단 또는 초기해에 따라 달라질 수 있다. 그림 3을 보면 변전소 부지를 십자가 형태로 가로지르는 두 개의 측정선을 따라서 측정된 겉보기 대지저항률의 경향이 매우 유사함을 볼 수 있다. 이것은 두 개의 측정선을 따라 수평방향으로는 대지저항률의 변화가 거의 없는, 즉 그림4에서처럼 각 층은 저항률이 일정한 균일매질로 가정할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 이상적인 수평다층구조 토양에서 겉보기저항률 측정값은 수평적인 측정위치 변동에 상관없이 전극간격, 즉 수직적 저항률변화만의 함수로 나타나기 때문이다. 그림3의 측정치와 계산치가 유사하므로, 수평4층구조로의 토양등가화는 잘 되었다고 볼 수 있다.

그림 4와 표 2~4는 수평4층의 등가토양모델과 표1의 측정치로 식별한 토양모델의 파라메타(대지저항률, 층두께)를 보인 것이다. 표 3의 토양모델#2는 표 1 중에서 전극간격 70m~120m의 측정치를 제외한 결과이며, 표 4의 토양모델#3

는 전극간격 50~120m의 측정치를 제외시키고 식별한 토양모델이다. 이렇게 식별한 이유는 Wenner 4전극법의 최대전극간격에 따라 식2의 최적화 해, 즉 등가 토양모델이 달라지는 것과 그에 따라 전위강하측정선에서 변전소 접지저항값과 같은 저항값이 측정되는 위치의 변동을 비교하기 위해서이다.

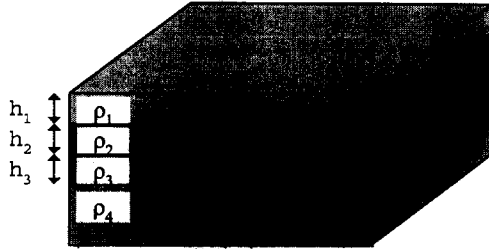


그림 4. 수평4층 토양모델

Fig. 4 Horizontally 4 layered soil model

표2. 토양모델 #1 (최대 전극간격은 120 [m])
Tab. 2 Soil model #1 (Max. probe spacing : 120m)

층	대지저항률[ohm-m]	층두께[m]
표토층	131.8	2.0
중간층1	284.2	4.2
중간층2	176.5	12.8
심층	3837.1	-

표3. 토양모델 #2 (최대 전극간격은 50 [m])
Tab. 3 Soil model #2 (Max. probe spacing : 50m)

층	대지저항률[ohm-m]	층두께[m]
표토층	131.7	2.1
중간층1	288.8	4.4
중간층2	144.2	8.5
심층	1725.0	-

표4. 토양모델 #3 (최대 전극간격은 30 [m])
Tab. 4 Soil model #3 (Max. probe spacing : 30m)

층	대지저항률[ohm-m]	층두께[m]
표토층	132.6	2.4
중간층1	398.0	2.3
중간층2	168.5	11.3
심층	1578.0	-

3. 전위강하법에 의한 접지저항 측정

그림 5는 H변전소 접지망의 제원을 대략적으로 보인 것이다. 면적은 70m x 49m 이고, 수직방향의 접지봉을 6개(봉길이는 12~33m) 포설하였다. 그림 6는 전위강하법 측정선과 변전소 주변지역을 보인 것이다. 전위강하법 측정선의 최대 총길이는 560m였다.

전위강하법은 접지저항 측정대상(그림7 상단 E전극)과 보조전극(그림7 상단 C전극)사이에서 전류(I)를 주입하고, 전압전극(그림7 상단 P전극)을 이동시키면서 E전극과 P전극사이의 전위차(V)를 측정하여 겐보기저항값(=V/I)을 측정함으로써 수행된다.

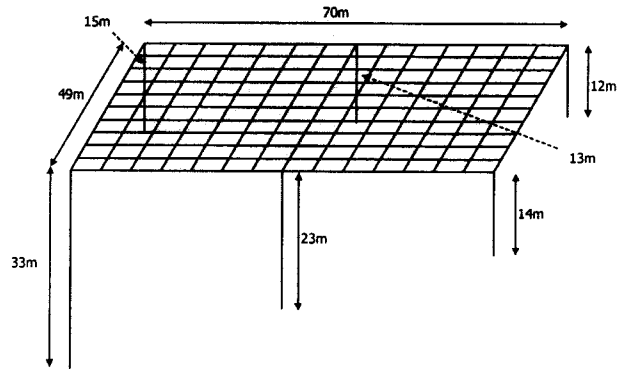


그림 5. 접지망 제원

Fig. 5 configuration of grounding grid

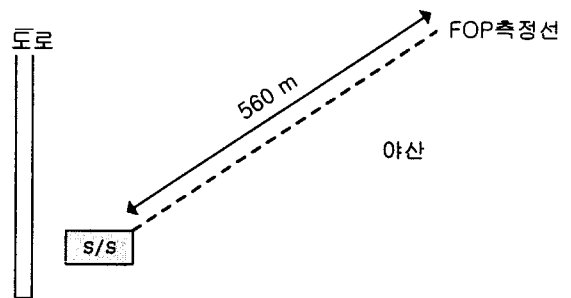


그림 6. 전위강하법 측정선

Fig. 6 Measurement line of Fall-Of-Potential Method

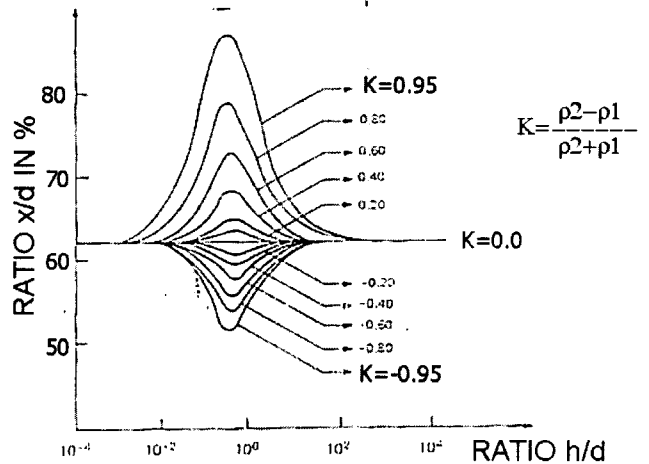
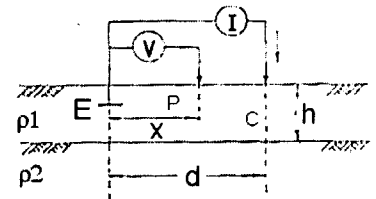


그림 7. 2층토양모델에서 접지저항 참값을 읽는 위치[1]

Fig. 7 Required potential electrode position in a 2 layered earth

그림 7는 전위강하법 측정선에서 수평2층 토양모델에서 접지저항의 참값을 읽을 수 있는 전위전극의 위치를 나타낸 그림이다[2]. 토양모델이 균일한 경우(K=0)에 이 위치는 전위강하법 측정선의 61.8%되는 지점이 되지만, 표토층이나 심층토

양의 저항율과 두께가 달라짐에 따라 이 위치는 50~90% 사이에서 변동한다. 그림 7는 2층 토양모델에 적용할 수 있으나 H변전소와 같은 다층토양에서는 적용할 수 없으므로, 다층토양모델링이 가능한 유한요소 해석법[5,6,7]으로 계산한다. 이 논문에서는 F.P.Dawalibi가 제안한 알고리즘과 계산코드 [7]를 이용하여 계산하였으며, 계산절차는 아래와 같다.

1) 토양모델 #1,2,3를 가정했을 때 그림5의 접지망의 접지저항을 계산한다.

2) 토양모델 #1,2,3을 가정했을 때 전위강하법 측정절차를 컴퓨터 모델내에서 실측상황과 똑같이 재현하고 각각의 토양모델에서 전위강하곡선 계산치를 얻는다.

3) 2)에서 계산된 전위강하법 측정곡선 위에서 1)에서 계산된 접지저항값과 동일한 값이 나타나는 위치를 식별한다. 이 위치가 전위강하법 측정선상에서 접지저항값이 측정되는 위치이며, 토양모델에 따라 달라진다. 계산결과는 표5에 요약하였다.

표5. 계산결과 요약

Tab.5 calculations summary

최대전극간격	30m (토양모델3)	50m (토양모델2)	120m (토양모델1)
1) 각각의 토양에서 접지저항 계산값	3.42 ohm	3.59 ohm	4.42 ohm
2) 전위강하법 계산곡선의 걸보기저항값과 상기 접지저항값이 같아지는 위치	326 m (58.2%)	348 m (62.1%)	380 m (67.9%)
3) 전위강하법 측정곡선 위의 상기 위치에서의 걸보기저항값	4.17 ohm	4.36 ohm	4.80 ohm
4) 전위강하법 계산곡선 위의 상기 위치에서의 걸보기저항값	3.32 ohm	3.58 ohm	4.43 ohm
3)과 4)의 오차	20.4%	17.8%	7.8%

그림 8, 9은 각각의 토양모델을 가정한 컴퓨터 모델에서 재현된 전위강하법 계산치와 실측치를 비교한 것이다. 토양모델 #2,3에 비하여 토양모델#1을 가정한 계산치가 실측치와 가까워짐을 볼 수 있다.

그림 9에서 변전소 접지망에 가까운 곳(그래프 왼쪽)과 먼 곳(그래프 오른쪽) 오차가 많이 발생하였으나, 두 부분의 사이에서는 비교적 작은 오차가 발생한다. 이 오차는 걸보기 대지저항을 측정과정(ex. 평탄하지 않은 부지, 거리측정의 부정확성 등)이나 토양을 수평다층모델로 근사화하는 과정(변전소 주변의 부지공사로 인한 토양구조, 저항율변화 등)에서 발생하는 것으로서, 부지공사를 하는 변전소 접지망 부근과 접지저항이 매설깊이나 접지극 주변토양의 저항율변화에 민감한 소규모 접지봉 부근에서 오차가 커짐을 볼 수 있다.

표5와 그림8에 의하면 접지저항은 약 4.8 ohm으로 볼 수 있으며 이 때 계산치와의 오차는 7.8%이다. 그러나 최대 전극간격이 30m, 50m로 좁은 경우는 계산치와 실측치의 오차가 각각 20.4%, 17.8%로 커진다. 이는 wenner 4전극법에 의한 대지저항을 측정시 상대적으로 짧은 측정선으로 인하여 심층저항의 추정값이 부정확해지기 때문이다.

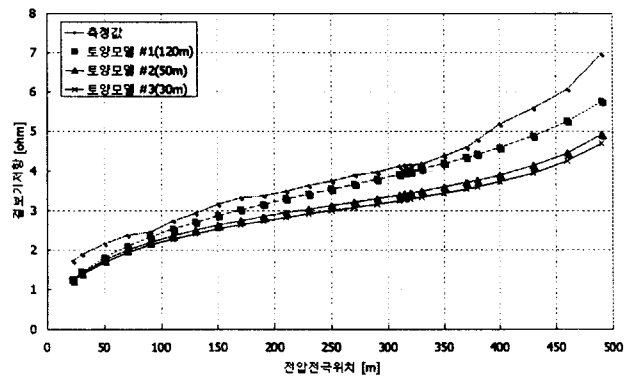


그림 8. 토양모델별 전위강하 해석곡선

Fig 8. Fall-of-Potential Curve of various soil models

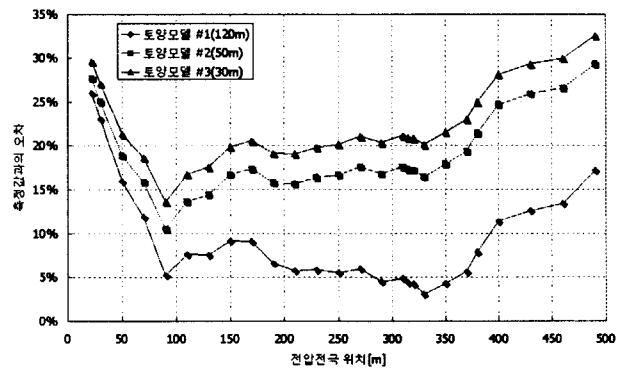


그림 9. 토양모델별 측정, 계산값 오차

Fig 9. difference between measured and calculated resistance

4. 결 론

이 논문에서는 Wenner 4전극법에 의한 걸보기 대지저항의 측정시에 충분히 긴 전극간격을 확보하지 않았을 때 등가 토양모델의 선정, 접지저항 측정을 위한 전위강하법 측정곡선의 해석의 정확도에 미치는 영향을 고찰하였다.

H변전소 접지설계 단계부터 접지시공 후 전위강하법에 의한 접지저항의 측정까지의 결과 고찰을 통하여 Wenner 4전극법의 최대전극간격이 작을수록 토양모델링에 오차가 많이 포함되어 접지저항 예측치와 전위강하법에 의한 접지저항 해석치가 과소평가 즉, 접지성능이 과대평가되는 경향이 있음을 보였다. 그러나 토양구조와 특성은 지역마다 차이가 있으므로, 이러한 경향을 일반적이라고 단정할 수는 없을 것이다.

H변전소의 사례에서 보였듯이 현재 154 kV 변전소 접지설계시 Wenner 4전극법 측정의 일반적인 최대 전극간격 20 m는 정확한 접지저항을 예측 또는 측정하기에는 너무 짧은 거리이다. 참고문헌[1](pp.14)에서는 Wenner 4전극법 전극간격을 접지면적의 최대 대각선길이만큼 확보하는 것을 권고하고 있으나, 우리나라의 경우 현장 여건상 대각선길이만큼의 측정선 확보도 어려운 경우가 많다. 따라서 접지설계시 접지저항의 예측과 접지저항 측정시의 오차를 최소화하기 위해서는 참고문헌[1]에서 권고하는 측정선 범위내에서 가능한 한 길게 측정선을 펼칠 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System(IEEE Std 81), IEEE Inc., pp.23, 1983
- [2] 한국전기안전공사, 전기안전(제4호), pp.54-62, 1999
- [3] F.P.Dawalibi 외 1인, "Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 2, pp. 374-382, Feb. 1984
- [4] Safe Engineering Services & technologies ltd., RESAP Users' Manual, 2000
- [5] F.P.Dawalibi 외 1인, "Measurements and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilayer Soils", IEEE Trans. on PD, Vol. 6, No. 4, pp. 1483-1490, October 1991
- [6] F.P.Dawalibi 외 2인, "Behaviour of Grounding Systems in Multilayer Soils: a Parametric Analysis", IEEE Trans. on PD, Vol. 9, No. 1, pp. 334-342, January 1994
- [7] Safe Engineering Services & technologies ltd., MALT Users' Manual, 2000
- [8] G.F.Tagg, Earth Resistances, London George Newnes Limited, 1964
- [9] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (IEEE Std 80), IEEE Inc., 2000
- [10] 전력연구원, "축소형변전소 접지효과 증대방안 연구(최종 보고서)", 1998
- [11] 한전기술(주), "축소형변전소 접지효과 증대방안 연구(위탁분 최종보고서)", 1998

저 자 소 개



정길조 (鄭吉朝)

1949년 8월 16일 생. 1983년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1974년 한국전력공사 입사. 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 송변전기술그룹 그룹장

Tel : 042-865-5870, Fax : 042-865-5844

Email : jungkjo@kepri.re.kr



최종기 (崔鍾基)

1969년 2월 1일 생. 1992년 동국대 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대 전기제어공학과 졸업(석사). 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

Tel : 042-865-5876, Fax : 042-865-5844

Email : jkchoi@kepri.re.kr



곽희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 공대 전기공학과 졸. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(공학박). 1986년 M.I.T Visiting Scientist. 현재 숭실대

공대 전기공학과 교수.