

변전소 접지설계를 위한 대지고유저항의 측정과 해석

한 풍*, 김 재이**, 최 종기, 정 길조, 김 정부
 한국전력기술(주)*, 동신대학교**, 한국전력공사 전력연구원

Measurement and Analysis of Earth Resistivity for the Substation Grounding Design

P. Han*, J.Y. Kim**, J.K. Choi, G.J. Jung, J.B. Kim
 KOPEC*, Dongshin University**, KEPRI

[Abstract]

For an equivalent uniform soil model to multiple-layered soil structure, ground depth, which is used in the calculation of equivalent resistivity, should be varied according to the size of grounding area. In case of 154 kV substation grounding design, 15 m of ground depth has been used and 25 m for 345 kV. But applying these ground depths can lead to errors in grounding resistance calculation, and these errors are coming from the poor representation of those depths to real soil resistivities.

In this paper, the soil resistivity measurement techniques by Wenner method and grounding resistance calculation results by computer simulation were presented. Case studies contain the area from 3,000 to 30,000 m² and measuring space from 0.5 m to 100 ~ 250 m. Based on the computation results, 50 m, 60 m and 80 m of ground depth for less than 30, 40 and 70 m of equivalent hemispherical radius were proposed respectively.

1. 서 론

변전소 접지설계에 가장 중요한 설계자료가 바로 대지고유저항이다. 더욱이 전력계통이 확대되어 사고전류가 증대되어 가는 추세이나 국내 GIS 변전소가 건설됨에 따라 변전소 건설면적이 좁아져서 접지망 포설면적이 줄어들고 야산을 절토하여 변전소 건설부지로 사용하므로써 대지고유저항값이 접지설계에 미치는 영향이 한층 커지게 되었다. 정확한 대지고유저항값을 파악하지 않고 접지계통을 설계하면 설계대로 정확히 시공하더라도 실측할 경우에 설계접지저항을 얻지 못하는 사태가 발생할 우려가 있다. 따라서 접지계통을 완벽하게 설계할 수 있도록 변전소 접지설계를 위한 대지고유저항의 측정과 해석에 관하여 심도있게 검토하고자 한다.

접지저항을 계산할 때에 전산 프로그램을 이용할 수 있으나 전산 프로그램의 활용이 그렇게 일반화 되어 있지 않으므로 주로 IEEE Std. 80-1986[1]에서 추천하는 공식(1)을 사용하는 경우가 많다. 이 식에서 변전소 건설면적이 주어지면 접지망 포설면적이 결정되고 접지계통을 설계하면 접지도체의 총 길이가 결정되기 때문에 접지저항은 대지고유저항 값에 정비례하게 된다. 그러나 이 표준규격은 대지고유저항 값을 측정 또는 산정하는 방법에 대하여 설명하고 있지 않다.

$$R = \rho \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ρ : 대지고유저항 [$\Omega \cdot m$]
 A : 접지망 포설면적 [m^2]
 L : 접지도체(접지망+접지봉)의 길이 [m]

지금까지 관행적으로 변전소 접지설계에 Wenner 전극법에 의하여 대지고유저항을 측정하고, 그래픽에 의한 방법에 의하여

대지고유저항을 해석하며, 철탑 접지설계시에는 5m 대지심도물, 154kV 변전소 접지설계시에는 15m 대지심도물, 345kV 변전소 설계시에는 25m 대지심도물 고려한 등가 대지고유저항을 계산하여 활용하고 있는 실정이다.

2. 대지고유저항의 측정과 해석

2.1 대지고유저항 측정

대지고유저항을 측정할 때에는 Wenner와 Schlumberger 전극 배열법 등이 사용되고 있는데 변전설계에서는 주로 Wenner 전극법이 사용되어 왔다. 본 논문에서는 (그림-1)과 같은 Wenner 전극법에 관해서 검토한다. C₁ 및 C₂ 전극은 전류주입 전극이고, P₁ 및 P₂ 전극은 전위측정용 전극이다. Schlumberger 전극배열법에서도 이와 유사하게 적용할 수 있을 것이다.[2]

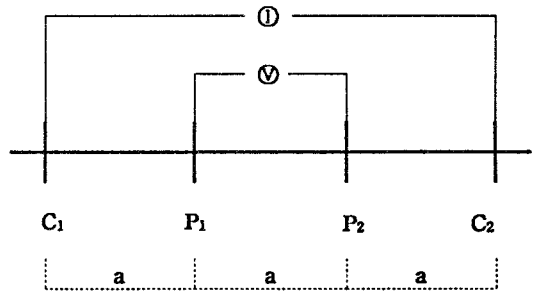


그림-1 Wenner 전극배열법

2.2 측정선의 배열

수평탐사방법은 (그림-2)에서와 같이 대지고유저항을 측정하는 측정선을 대략 직경 50m 단위로 2점을 측정하도록 결정하며 [4], 일차적으로 얇은 층의 대지고유저항을 파악하여 수직탐사 등 정밀조사를 시행하는 기초자료로 활용하기 위하여 시행된다.

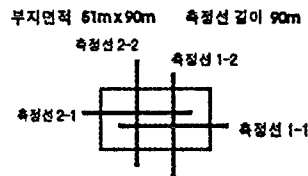


그림-2 측정선 배열 - 수평탐사

수직탐사방법은 (그림-3)에서와 같이 측정선을 대략 접지망 주변의 3배이상으로 결정하여 변전소 부지내의 1점에서의 수직적인 대지고유저항 분포를 파악하기 위하여 시행한다.

현재까지 변전소 접지설계시에 수평탐사방법이 많이 사용되어 왔으나 변전소 부지가 결정되면 곧 바로 수직탐사를 시행할 수 있으며, 보다 근본적으로는 접지망의 크기에 따라 지하 깊은 곳의 대지고유저항을 파악하여야 대전류 분포를 정확하게 해석할 수 있으므로 본 논문에서는 대지고유저항 측정방법으로 수직탐사방법을 택할 것을 제안하며 그 이유를 검토하기로 한다. 심해설 전극의 시설 등 지하 깊은 층의 대지고유저항을 알 필요가 있을 때에는 수직 탐사점을 늘릴 수 있다.

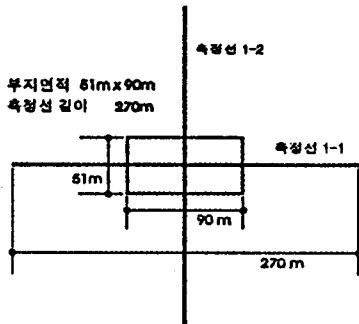


그림-3 측정선 배열 - 수직탐사

2.3 전극간격

지금까지의 수평탐사 방법에서 전극간격을 2, 4, 6, 10, 15, 20 m로 하고 특별한 경우 30m를 택하는 경우가 있었다. 그러나 수직탐사방법에서는 지하 깊은 층의 대지고유저항을 측정하여야 하기 때문에 최소한으로 접지망 긴변정도까지 전극간격을 확장하고, 측정오차를 줄이기 위하여 가능한 한 많은 점을 측정할 것을 권장한다. 접지망 도체가 지하 0.5~1m에 매설되고 접지망 도체가 접촉하는 부분의 대지고유저항이 대전류 흐름에 많은 영향을 주기 때문에 전극간격을 0.5m부터 시작하는 것이 필요하다.

2.4 대지고유저항의 해석

대지고유저항의 해석은 Sundberg의 표준곡선과 Hummel의 보조곡선을 이용하는 방법이 현재까지 사용되어 왔으나[2][5], 사용자의 경험과 능력에 따라 오차가 많이 발생하므로 전산 프로그램을 활용하는 방안을 권장한다. 본 논문에서는 CDEGS 프로그램[6]을 활용하였다.

3. 154kV HG 변전소 대지고유저항의 측정과 해석

3.1 대지저항 측정결과

표-1 154kV HG 변전소 대지저항 측정기록표

측정점 번호	전극간격 [m]	제1측정선 대지저항 [Ω]	제2측정선 대지저항 [Ω]
R1	0.5	52.400	39.100
R2	1.0	20.900	21.200
R3	2.0	12.050	11.650
R4	3.0	8.910	8.380
R5	4.0	7.710	7.140
R6	5.0	6.000	5.880
R7	6.0	6.070	5.280
R8	7.0	4.450	6.100
R9	10.0	3.840	3.970
R10	15.0	2.690	2.480
R11	20.0	2.570	1.745
R12	30.0	2.390	2.310
R13	50.0	2.080	1.650
R14	70.0	1.892	1.700
R15	100.0	1.867	1.339
R16	120.0	1.870	-

(표-1)은 154kV HG 변전소의 대지저항을 Wenner 전극법으로

로 스웨덴의 ABEM사 제품인 SAS 300C로 1996. 5. 22 측정된 기록이다.[2]

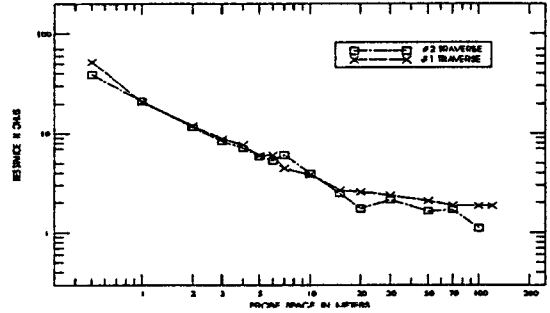


그림-4 측정선별 대지저항 곡선

(그림-4)는 각 측정선의 대지저항을 그린 것으로서 수평·수직 방향의 지형이 비교적 비슷하며, 제2측정선의 끝부분은 작은 개울이 있어 낮은 대지저항을 나타내고 있다.

3.2 대지고유저항의 해석결과

(표-1)의 대지저항을 2층, 3층 및 5층 구조로 해석하여 (표-2)에 수록하였다. 제1측정선의 2층구조 해석에서의 RMS 오차가 상당히 크게 나왔는데 이는 2층구조로 해석하는 것이 타당하지 않음을 나타내고 있다. 제1측정선의 3층 및 5층구조 해석결과를 보면 대지고유저항이 3,300~3,800 $\Omega \cdot m$ 에 상당한 암반의 위치가 약 17~21m에 존재함을 나타내고 있으며, 변전소 건물 기초공사를 위한 시추조사 결과에 의하면 암반의 위치가 거의 정확하였다.[7]

제1측정선의 측정값과 3층구조로 해석하였을 때의 해석결과를 도시하면 (그림-5)과 같다. 전극간격 0.5, 1, 2m에서 오차가 크게 발생하였는데, 이는 3층구조 해석이 불합리하거나 측정오차가 발생했기 때문으로 풀이될 수 있다.

표-2 대지고유저항 해석결과

구분	2층구조		3층구조		5층구조	
	고유저항 [$\Omega \cdot m$]	지층 두께 [m]	고유저항 [$\Omega \cdot m$]	지층 두께 [m]	고유저항 [$\Omega \cdot m$]	지층 두께 [m]
제1측정선	194	27.88	164	2.39	165	0.62
			212	14.79	125	1.52
	2,454	∞	3,308	∞	251	7.58
RMS 오차	27.9%		9.0%		6.6%	
제2측정선	155	13.76	122	2.17	122	0.93
			297	15.28	138	1.91
	1,627	∞	895	∞	375	7.06
RMS 오차	17.8%		17.7%		16.2%	

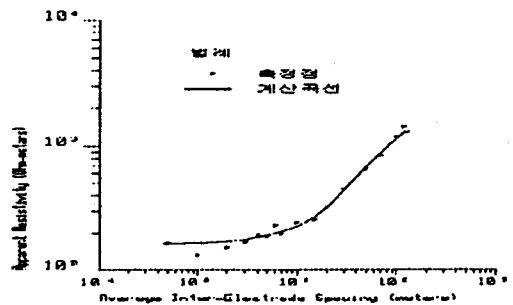


그림-5 대지고유저항 측정 및 3층구조 해석 곡선

3.3 다층구조 토양모델의 등가 변환

다층구조 토양모델을 단일균질 토양모델로 변환하는 방법이 알려져 있지 않기 때문에, 봉상전극이 있는 지층의 대지 고유저항을 환산할 때 사용하는 공식(2)를 준용한다.[1][2][8] 지층까지 검토대상 지층의 두께 또는 등가 대지심도는 철타 매설지선의 경우 2.5~5m[9], 변전소 접지망의 설계시에 154kV 이하에서는 15m, 345kV에서는 20~25m 정도[3], 접지망 포설면적 50×50m²에서는 15m, 100×100m²에서는 20m, 200×200m²에서는 25m[4] 등으로 되어 있다.

$$\rho = \frac{d}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} [\Omega \cdot m] \dots (2)$$

여기서 ρ_n : n지층의 대지고유저항 [$\Omega \cdot m$]
 h_n : n지층의 두께 [m]
 d : 검토대상 지층의 두께(접지봉의 길이) ($d = h_1 + h_2 + \dots + h_n$) [m]

3.4 대지고유저항 측정시의 최대 전극간격의 영향

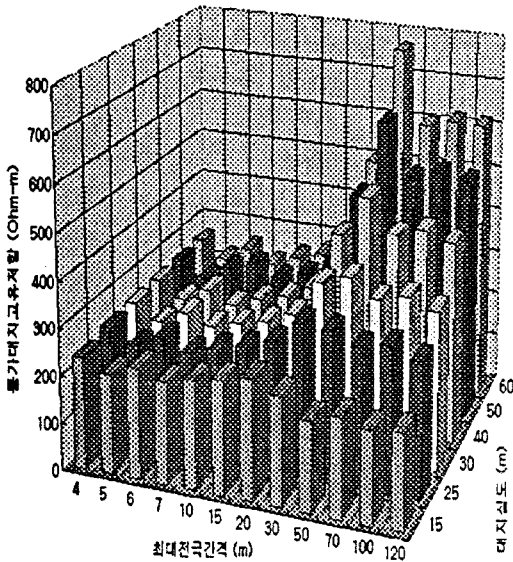


그림-6 최대 전극간격과 대지심도에 대한 등가 대지고유저항 현황

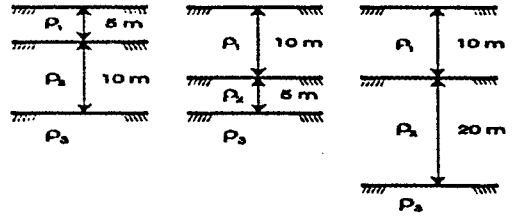
(표-1)에서 전극간격 0.5m에서 4m까지의 측정자료를 이용하여 대지고유저항을 해석한 후 공식(2)를 이용하여 15, 25, 30, 40, 50, 60 m 대지심도를 고려한 등가 대지고유저항을 계산하고, 최대 전극간격을 넓혀가며 앞에서와 같이 반복·계산하여 그래프를 그리면 (그림-6)과 같다. 3.2항에서 예상 암반의 위치가 17~21m라고 하였는데 최대 전극간격을 20m 이하로 측정하였을 때에는 암반의 존재가 측정되지 않아 암반의 영향이 (그림-6)에 나타나지 않았으며 최대 전극간격 50m에서 120m까지의 측정치에서는 유사한 등가 대지고유저항 추이를 보여주고 있다. 이 결과를 유추하여 Wenner 전극배열법의 최대 전극간격은 해당 깊이의 대지고유저항을 측정하는 것이라고 말할 수 있으며, 최대 전극간격의 결정은 접지설계시 굉장히 중요한 요소임을 알 수 있다.

우리나라 지층구조로 보아 변전소 접지설계시에 Wenner 전극법의 최대 전극간격은 최소 50m 이상이어야 한다.

4. 등가 대지고유저항 검토를 위한 토양모델

4.1 대지 지층모델

등가 대지고유저항을 검토하기 위한 대지 지층은 (그림-7)에서와 같이 3종류로 정한다. 대지고유저항은 다음항에서 정의한다.



모델-1 모델-2 모델-3

그림-7 대지 지층 모델

4.2 대지고유저항 모델

대지고유저항은 (표-3)에서와 같이 6종류로 정한다.

표-3 대지고유저항 모델

[단위 : $\Omega \cdot m$]

지 층	대지고유저항 모델					
	B	C	G	L	M	H
제1지층	200	200	150	300	500	1,000
제2지층	200	200	500	1,000	1,500	300
제3지층	1,000	3,000	1,500	3,000	3,000	3,000

4.3 접지망 모델

등가 대지고유저항 검토를 위한 접지망은 (그림-8)~(그림-10)에서와 같이 5종류로 하고 제한은 (표-4)와 같다. 접지망 모델 ② 및 ③은 검토목적을 위하여 변전소가 아닌 소규모 접지망을 택하였다.

접지망을 반구상으로 등가화시킬 때의 반구상 등가반경(r)은 접지망 면적을 A라 할 때 다음과 같이 구한다.

$$A = 2\pi r^2 \text{ 에서 } r = \sqrt{\frac{A}{2\pi}} [m] \dots (3)$$

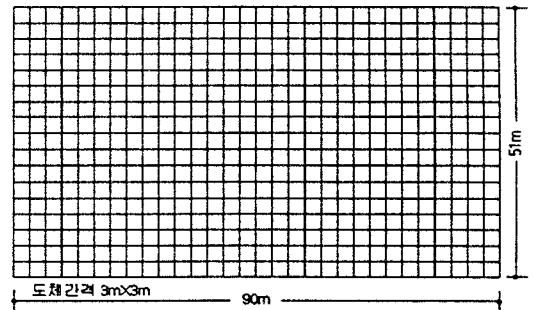
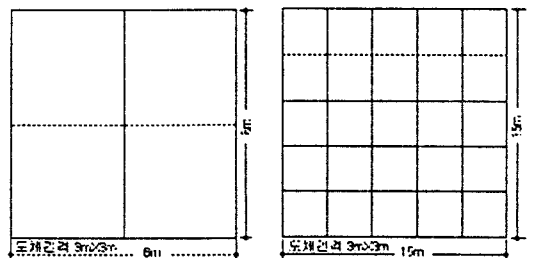


그림-8 표본접지망 - ① : 51m×90m



② : 6m×6m ③ : 15m×15m

그림-9 표본접지망 - ② 및 ③

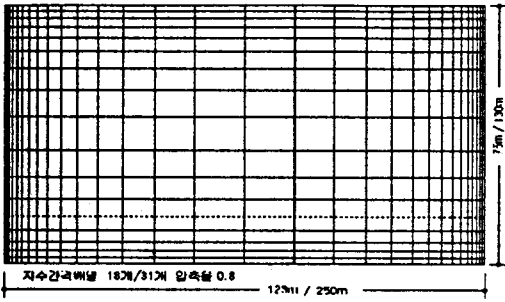


그림-10 표본접지망-④ : 75m×123m, ⑤ : 130m×250m

표-4 접지망 제원

구 분	모델-2	모델-3	모델-1	모델-4	모델-5
포설면적[m ²]	6×6	15×15	51×90	75×123	130×250
도체간격	등간격 배열		3m	지수간격 배열 압축율 0.8	
접지도체수	3, 3	6, 6	세로 : 18, 가로 : 31		
도체길이	36m	145m	3,201m	4,539m	8,530m
도체굵기	200mm ²				
등가반경	2.4m	6.0m	27.8m	38.3m	71.9m

4.4 접지봉 모델

접지봉은 굵기 200mm², 단위길이 15m 6조로 하고, 접지망 모델-1, 4 및 5의 네 모서리와 긴변의 중심점에 매설하는 것으로 한다.

5. 표본모델의 등가 대지고유저항과 접지저항

5.1 토양모델 대지심도별 등가 대지고유저항

토양모델 D1B는 (그림-7)의 지층모델-1과 (표-3)의 대지고유저항 모델-B를 조합한 것으로서 공식(2)을 이용하여 대지심도별로 등가 대지고유저항을 계산하면 (표-5)와 같다. 15m 대지심도를 고려한 등가 대지고유저항을 50m 대지심도를 고려한 것과 비교하면 D3H 토양모델을 제외하고 35~51%에 불과하며 공식(1)을 이용하여 접지저항을 계산하면 접지저항이 그만큼 작게 계산될 것이다.

표-5 토양모델 대지심도별 등가 대지고유저항

[단위: Ω·m]

토양 모델	지층 모델	저항 모델	대 지 심 도						
			5m	15m	25m	40m	50m	60m	70m
D1B	1	B	200	200	294	400	454	500	538
D1C	1	C	200	200	319	480	577	667	750
D1G	1	G	150	281	417	571	652	720	778
D1L	1	L	300	563	833	1,143	1,304	1,440	1,556
	D2H	2	H						
D1H	1	H	1,000	391	600	857	1,000	1,125	1,235
	D2L	2	L						
D1M	1	M	500	900	1,250	1,600	1,765	1,894	2,000
D2M	2	M	500	643	938	1,263	1,429	1,565	1,680
D3L	3	L	300	391	517	706	833	947	1,050
D3M	3	M	500	643	833	1,091	1,250	1,384	1,500
D3H	3	H	1,000	563	417	500	600	692	778

5.2 51m×90m 접지망 접지저항 계산

(표-4)의 접지망 모델-1(51×90m²)을 각종 토양모델별로 접지저항을 계산하면 (표-6)과 같다. 수계산 접지저항은 (표-5)의 15m, 50m 대지심도를 고려한 등가 대지고유저항과 (표-4)의 접지망 제원을 공식(1)에 대입하여 계산한 것이다. 앞

에서 설명한 바와 같이 등가 대지고유저항 값에 비례하여 접지저항 값이 변화함을 보여주고 있다. 즉 D1C 모델에서 15m 대지심도일 경우의 접지저항 1.4Ω은 50m 대지심도일 경우의 접지저항 4.0Ω의 35%에 불과하며, 3층구조 토양모델을 적용하여 전산처리한 경우의 접지저항 4.7Ω에 대하여는 30% 정도이다.

50m 대지심도를 고려한 등가 대지고유저항을 적용한 수계산 접지저항은 3층구조 토양모델을 적용한 전산처리 접지저항값과 대략 10% 내외의 오차를 나타내고 있다.

전산처리 접지저항은 CDEGS 프로그램[6]을 이용하여 3층구조 토양모델과 단일균질 토양모델인 경우를 계산하였다.

표-6 51m×90m 접지망 접지저항

[단위: Ω]

토양 모델 번호	수 계 산		전 산 처 리					3층 구조 토양	
	대지심도로 계산한 단일 균질토양								
	15m	50m	15m	40m	50m	60m	70m		
D1B	1.4	3.1	1.3	2.5	2.9	3.2	3.4	2.9	
D1C	1.4	4.0	1.3	3.0	3.7	4.2	4.5	4.7	
D1G	1.9	4.5	1.8	3.6	4.1	4.6	4.9	4.0	
D1L	3.9	8.9	3.6	7.2	8.3	9.1	9.9	8.1	
D1M	6.2	12.1	5.7	10.1	11.2	12.0	12.7	10.3	
D1H	2.7	6.9	2.5	5.4	6.3	7.1	7.5	7.6	
D2L	2.7	6.9	2.5	5.4	6.3	7.1	7.8	6.8	
D2M	4.4	9.8	4.1	8.0	9.1	9.9	10.7	8.5	
D2H	3.9	8.9	3.6	7.2	8.2	9.1	9.9	8.2	
D3L	2.7	5.7	2.5	4.5	5.3	6.0	6.7	6.0	
D3M	4.4	8.9	4.1	6.9	7.9	8.8	9.5	8.1	
D3H	3.9	4.1	3.6	2.5	3.8	4.4	4.9	6.2	

D1B와 D1C 토양모델에서 제 1 및 2 지층은 동일하고 제 3 지층의 대지고유저항이 1,000 및 3,000 Ω·m로 상이할 뿐인데 접지저항은 3층구조 토양모델일 때 2.9, 4.7Ω으로 계산되었다. 51m×90m 접지망의 반구상 등가반경이 (표-4)에서 27.8m 이므로 제 1 및 2 지층의 두께 15m 보다 훨씬 커서 제 3지층의 대지고유저항에 따라 접지저항값이 영향을 받고, 3층구조 토양을 접지저항이 동일한 단일균질 토양으로 변환할 때 고려해야 할 대지심도가 각각 50m, 70m로서 상이함을 나타내고 있다. D1C 토양모델은 앞에서 설명한 154kV HG 변전소 토양과 유사하게 설정된 것이다.

D1G 토양모델은 D1L 토양모델의 대지고유저항 값을 절반으로 줄인 것인데 접지저항 값도 절반으로 감소된 결과를 보여주며 등가 대지심도는 동일하게 나타났다.

D2L과 D1H, D1L과 D2H 토양모델은 제 1지층과 제 2지층의 내용을 서로 바꾼 것이다. (표-6)에서 밝혀한 내용을 (표-7)에 정리하였다. 접지망이 지하 1m에 매설되었기 때문에 접지도체 주위 토양의 대지고유저항이 낮을수록, 접지망의 반구상 등가반경 범위내의 대지고유저항 값이 낮을수록 접지저항이 낮게 계산되었음을 알 수 있다.

표-7 51m×90m 접지망도체 주위의 토양 영향

토양 모델	제1지층		제2지층		제3지층	접지 저항 [Ω]	등가 대지심도
D2L	10m	300Ω·m	5m	1,000Ω·m	3,000Ω·m	6.8	60m
D1H	5m	1,000Ω·m	10m	300Ω·m	3,000Ω·m	7.6	70m
D1L	5m	300Ω·m	10m	1,000Ω·m	3,000Ω·m	8.1	50m
D2H	10m	1,000Ω·m	5m	300Ω·m	3,000Ω·m	9.2	60m

(표-8)은 반구상 등가반경이 6.0m인 15m×15m 접지망에 대한 계산결과인데 51m×90m 접지망에서의 결과와 반대로 D1L 토양에서의 접지저항이 D1H 토양에서의 접지저항보다

낮은 결과를 보여주고 있다.

표-8 15m×15m 접지망도체 주위의 토양 영향

토양 모델	제1지층	제2지층	제3지층	접지 저항 [Ω]	등가 대지심도
D2L	10m 300Ω·m	5m 1,000Ω·m	3,000Ω·m	15.3	25m
D1H	5m 1,000Ω·m	10m 300Ω·m	3,000Ω·m	25.0	5m
D1L	5m 300Ω·m	10m 1,000Ω·m	3,000Ω·m	18.8	15m
D2H	10m 1,000Ω·m	5m 300Ω·m	3,000Ω·m	30.5	5m

5.3 지층모델-3의 접지저항 계산

제3지층모델은 제1 또는 제2 지층모델의 두께를 두배로 확장시켜 제1지층을 10m, 제2지층을 20m로 하고, D3L과 D3H 토양모델은 제1 및 제2지층의 대지고유저항을 상호 바꾼 것으로서 각종 접지망의 접지저항을 전산처리한 결과를 (표-9)에 나타내었다. 접지망이 작을 때는 접지도체 주위의 토양의 영향을 많이 받지만 접지망이 커짐에 따라 접지망 도체의 주위 토양, 그 이후의 토양조건 등이 복합적으로 작용하여 표본 모델에서는 접지저항의 변화가 둔화되는 것으로 나타났다.

표-9 지층모델-3의 접지저항

[단위 : Ω]

구분	D3L	D3H	D3M	
제 1 지 층	10m 300Ω·m	10m 1,000Ω·m	10m 500Ω·m	
제 2 지 층	20m 1,000Ω·m	20m 300Ω·m	20m 1,500Ω·m	
제 3 지 층	∞ 3,000Ω·m	∞ 3,000Ω·m	∞ 3,000Ω·m	
접지망 면적 m ²	5×5	26.9Ω	66.5Ω	42.5Ω
	15×15	14.1Ω	25.5Ω	21.3Ω
	51×90	6.0Ω	6.2Ω	8.1Ω
	75×123	4.9Ω	4.8Ω	6.4Ω
	130×250	3.4Ω	3.2Ω	4.2Ω

5.4 표본 접지망에 대한 접지저항과 등가 대지심도

각종 표본 접지망의 접지저항을 3층구조 토양모델을 적용하여 전산처리한 결과를 (표-10)에, 이와 동일한 접지저항을 얻기위하여 단일균질 토양모델로 변환하기 위한 등가 대지심도를 (표-11)에 수록하였다.

표-10 3층구조 토양을 고려한 접지저항

토양 모델 번호	접 지 망 포 설 면 적 [m ²]				
	6×6	15×15	51×90	75×123	130×250
D1B	16.3Ω	7.9Ω	2.9Ω	2.3Ω	1.5Ω
D1C	18.3Ω	9.9Ω	4.7Ω	3.9Ω	2.8Ω
D1G	16.2Ω	9.4Ω	4.0Ω	3.2Ω	2.1Ω
D1L	32.4Ω	18.8Ω	8.1Ω	6.5Ω	4.2Ω
D1M	49.6Ω	26.9Ω	10.3Ω	8.0Ω	4.9Ω
D1H	64.1Ω	25.0Ω	7.6Ω	6.0Ω	3.9Ω
D2L	28.1Ω	15.3Ω	6.8Ω	5.5Ω	3.7Ω
D2M	43.1Ω	22.5Ω	8.8Ω	7.0Ω	4.5Ω
D2H	71.9Ω	30.5Ω	9.2Ω	7.2Ω	4.5Ω
D3L	26.9Ω	14.1Ω	6.0Ω	4.9Ω	3.4Ω
D3M	42.5Ω	21.3Ω	8.1Ω	6.4Ω	4.2Ω
D3H	66.5Ω	25.5Ω	6.2Ω	4.8Ω	3.2Ω

(표-10)에서 모든 접지망의 접지저항이 D1B 모델에서 가장 낮게 계산되었고, 소규모 접지망인 경우에 D2H, 대규모 접지망인 경우 D1M 토양모델에서 가장 높은 저항값이 계산되었다. 이는 바로 접지도체 주위의 토양의 영향과 접지망의 반구상 등가반경과의 관계에서 비롯된 것이며, (표-11)의 등가 대지심도에서도 같은 결과를 보여주고 있다. 접지망도체 주위의 토양의 고유저항이 높으면 접지저항이 높아지고 등가 대지심도가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

이 계산결과로부터 3층구조 토양모델을 단일균질 토양모델로 변환하여 개략적인 접지저항 계산에 활용하고자 할 경우에는 접지망의 반구상 등가반경이 30m 이하인 경우 대지심도를 50m, 반구상 등가반경이 40m 이하인 경우 60m, 반구상 등가반경이 70m 이하인 경우 80m를 적용하여야 할 것으로 유추된다. 이 결과는 전산처리 시간을 줄이기 위하여 간이로 계산할 경우에 다층구조 토양모델을 단일균질 토양모델로 등가화시킬 때도 사용가능하다.

표-11 등가변환을 위한 대지심도

토양 모델 번호	접 지 망 포 설 면 적 [m ²]				
	6×6	15×15	51×90	75×123	130×250
등가 반경	2.4m	6.0m	27.8m	38.3m	71.9m
D1B	15m	25m	50m	60m	80m
D1C	25m	25m	70m	80m	> 80m
D1G	10m	15m	50m	60m	80m
D1L	10m	15m	50m	60m	80m
D1M	10m	15m	40m	50m	70m
D1H	5m	5m	70m	80m	> 80m
D2L	15m	25m	60m	70m	> 80m
D2M	15m	15m	50m	60m	> 80m
D2H	5m	5m	60m	70m	> 80m
D3L	15m	25m	60m	70m	> 80m
D3M	15m	25m	50m	60m	> 80m
D3H	5m	10m	> 80m	> 80m	> 80m

5.5 접지봉에 대한 접지저항과 등가 대지심도

3층구조 토양모델과 등가 대지고유저항을 적용하여 접지봉의 접지저항을 계산한 결과를 (표-12)에 나타내었다. 공식(2)가 봉상전극으로부터 유도된 식이기 때문에 접지망의 경우와는 달리 등가 대지심도가 25~30m에 분포되어 있음을 알 수 있다. 변전소 접지계통에서는 접지봉이 보조접지로 사용되고 있으므로 접지망과의 관계를 다음항에서 검토한다.

표-12 15m 접지봉 6개의 접지저항

[단위 : Ω]

토양 모델 번호	접 지 봉 포 설 면 적 [m ²]	대지심도로 계산한 단일균질토양						3층 구조 토양
		15m	25m	30m	40m	50m	60m	
D1L	51×90	9.3	13.2	15.7	19.0	21.6	23.9	14.4
	75×123	0.9	11.3	15.2	18.3	20.9	23.0	13.5
	130×250	8.6	12.7	14.5	17.5	19.9	22.0	12.1
D1M	51×90	14.9	20.8	23.0	26.6	29.3	31.4	20.4
	75×123	14.4	20.0	22.2	25.6	28.2	30.3	19.2
	130×250	13.8	19.3	21.2	24.4	27.0	28.9	17.4
D2L	51×90	6.5	10.0	11.5	14.2	16.6	18.7	10.9
	75×123	6.3	9.6	11.1	13.7	16.0	18.0	10.2
	130×250	6.0	9.2	10.6	13.1	15.3	17.2	9.0
D2M	51×90	10.7	15.6	17.6	21.0	23.7	26.0	15.7
	75×123	10.3	15.0	16.9	20.2	22.9	25.0	14.7
	130×250	9.8	14.3	16.2	19.3	21.8	23.9	13.2
D3L	51×90	6.5	8.6	9.3	11.7	13.8	15.7	10.2
	75×123	6.3	8.3	9.0	11.3	13.3	15.2	9.6
	130×250	6.0	7.9	8.6	10.8	12.7	14.5	8.6
D3M	51×90	10.7	13.8	14.9	18.1	20.8	23.0	15.0
	75×123	10.3	13.3	14.4	17.5	20.0	22.1	14.1
	130×250	9.8	12.7	13.8	16.7	19.1	21.1	12.8

5.6 접지망과 접지봉의 합성 접지저항

3층구조 토양모델과 등가 대지고유저항을 적용하여 접지망과 접지봉의 합성 접지저항을 전산처리한 결과물 (표-13)에 나타났다. 계산결과는 (표-6), (표-10), (표-11)과 유사한 추이를 보여주고 있다. 접지망과 접지봉 타설시 각각의 접지저항 값이 차이가 있는 경우에는, 접지망과 접지봉의 합성저항은 각각의 접지저항 중 낮은 쪽의 접지저항값을 유지한다. 본 논문에서 사용한 모델의 경우에는 접지저항이 낮은 대규모 접지망이 포설되어 있기 때문에 접지봉을 시공하여도 접지저항이 미세하게 변동하였다.

표-13 접지망 및 접지봉의 합성 접지저항
[단위 : Ω]

토양 모델 번호	접지망 [m]	대지심도로 계산한 단일 균질도양						3층 구조 토양
		30m	40m	50m	60m	70m	80m	
D1L	51×90	5.7	6.9	7.9	8.7	9.4	10.0	7.9
	75×123	4.1	5.0	5.7	6.3	6.8	7.2	6.3
	130×250	2.3	2.7	3.1	3.4	3.7	3.9	4.2
D1M	51×90	8.3	9.6	10.6	11.4	12.1	12.6	10.0
	75×123	6.0	7.0	7.7	8.2	8.7	9.1	7.9
	130×250	3.3	3.8	4.2	4.5	4.8	5.0	4.9
D2L	51×90	4.2	5.2	6.0	6.8	7.4	8.0	6.5
	75×123	3.0	3.7	4.4	4.9	5.4	5.8	5.4
	130×250	1.6	2.0	2.4	2.7	2.9	3.2	3.7
D2M	51×90	6.4	7.6	8.6	9.4	10.1	10.7	8.5
	75×123	4.6	5.5	6.2	6.8	7.3	7.7	6.9
	130×250	2.5	3.0	3.4	3.7	4.0	4.2	4.4

표-14 합성 접지저항의 수계산 및 전산처리 결과 비교
[단위 : Ω]

토양 모델	접지망	전산처리			수계산 MESH	대 비	
		MESH	ROD	M+R		④/①	⑤/①
D1L	①	8.1	14.4	7.9	8.9	1.10	1.13
	④	6.5	13.5	6.4	7.1	1.09	1.11
	⑤	4.2	12.1	4.2	4.3	1.02	1.02
D1M	①	10.3	20.4	10.0	12.1	1.17	1.21
	④	8.0	19.2	7.9	9.2	1.15	1.16
	⑤	4.9	17.4	4.9	5.4	1.10	1.10
D2L	①	6.8	10.9	6.6	6.9	1.01	1.05
	④	5.5	10.2	5.4	5.4	0.98	1.00
	⑤	3.7	9.0	3.7	3.4	0.92	0.92
D2M	①	8.8	15.7	8.6	9.8	1.11	1.14
	④	7.0	14.7	6.9	7.6	1.09	1.10
	⑤	4.5	13.2	4.4	4.6	1.02	1.05

(표-14)에서는 전산처리한 결과와 수계산한 값을 비교하였다. 단위길이 15m인 접지봉 6개를 시공하면 접지도체길이가 90m 증가하나 기존의 도체길이가 3,201~8,530m로 상당히 커서 공식(1)에 대입할 경우 대략 0.1% 정도의 영향이 나타난다. 그러므로 수계산 접지저항은 접지봉을 무시하여 접지망 단독일 때의 것을 인용하였다. 접지저항을 공식(1)에 대입하여 계산할 경우에 5.4함에서 검토된 바와 같이 접지망이 51m×90m일 경우에 50m, 접지망이 75m×123m일 경우에 60m, 130m×250m일 경우에 80m 등가 대지고유저항을 적용하였다.

수계산 접지저항이 전산처리한 경우보다 DIM 토양모델의 51m×90m 접지망에서 최대 17 또는 21%까지 더 크게 계산되었지만 가혹한 경우이므로 실용상, 지장이 없을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 대지고유저항을 정확히 측정하고 해석하므로서 변전소 접지계통을 현실성있게 설계할 수 있도록 대지고유저항의 측정과 해석 방법을 다음과 같이 제안한다.

대지고유저항을 Wenner 전극법으로 측정할 때

- 1) 접지도체가 매설되는 지하 0.5~1m 대역의 대지고유저항을 정확히 파악하기 위하여 최소 전극간격을 0.5m로 한다.
- 2) 최대 전극간격은 주위 여건이 허락하는 한 접지망 길변의 길이 이상으로 할 것을 권장한다.
- 3) 주위여건이 적합하지 아니하면 최대 전압 전극간격을 가능한 한 50m 이상으로 한다.
- 4) 측정오차를 줄이기 위하여 가능하면 많은 점을 측정하거나 측정선을 증가시킨다.
- 5) 토양의 수분함량에 따라 대지고유저항이 크게 달라지기 때문에 대지고유저항은 가끔적 비가 오지 않은 맑은 날에 측정한다.

대지고유저항을 해석할 경우에는

- 1) 사용자의 경험과 능력에 따라 오차발생이 많은 그래픽에 의한 수작업 방법을 지양하고 전산 프로그램의 사용을 권장하며
- 2) 다층구조 토양을 단일균질 토양모델로 변화시킬 때 대지심도를 접지망의 반구상 등가반경이 30m 이하에서는 50m, 등가반경이 40m 이하에서는 60m, 등가반경이 70m 이하에서는 80m로 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] IEEE Std. 80-1986, Guide for Safety in AC Substation Grounding
- [2] 한국전력공사 전력연구원, 축소형 변전소 접지효과 증대 방안 연구(중간보고서), KEPRI-95Y-J12, 1996, 9
- [3] 한국전력공사, 설계기준 변전편 설계기준-2602 접지계설계지침, 1968. 4 제정, 1984. 3. 12 개정
- [4] 接地工事 設計-施工 マニュアル(第2版), 電気設備工事技術研究會編, オーム社, 昭和54年
- [5] 接地技術入門, 高橋健彦著, 金聖模·李炯秀 共譯, オーム社/東逸出版社
- [6] SES(Safe Engineering Services & technologies ltd.), CDEGS(Current Distribution, Electromagnetic fields, Grounding and Soil structure analysis) 사용자 지침서, Program Version 2.1 for Windows, 1996
- [7] 한국전력기술주식회사, 축소형 변전소 접지효과 증대방안 연구(제5차 분기 진도 보고서), 1997. 2
- [8] 接地設計入門, 高橋健彦著, 李鳳容 監修, 李炯秀 譯, オーム社/東逸出版社, 1993년
- [9] 김영수, Fy-1981 대지도전을 MAP 작성 연구, 한전 시험소보 Vol.16, 1982, pp. 89~170