

지중송전계통의 접지특성분석에 관한 연구

정 채균\*, 홍 동석, 이 중 범  
원광대학교

A Study on the Grounding Characteristics of Underground Transmission Power Cable Systems

Chae-Kyun Jung\*, Dong-Suk Hong, Jong-Beom Lee  
Wonkwang University

**Abstract** - Earth resistivity and changing of grounding electrode's shape are very important factor to reduce grounding resistance. Earth resistivity has different values according to property of soil and is effected by temperature, climate, and environment. This paper describes the effect of the grounding resistance according to the grounding type such as driven rod, counterpoise grounding and mesh grounding. And also grounding resistance values with earth resistivity and shape of grounding electrode were represented in this paper.

1. 서 론

최근 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요밀도가 급격히 증가하고 있으며, 여러 가지 환경적 요인에 따라 지중송전선로 건설은 해마다 증가함에 따라 지중송전계통에 설치된 접지 전극과 순환전류 저감을 위해 접지시스템 설계는 매우 중요하게 대두되고 있다. 접지저항은 임의의 크기와 형상을 가지는 접지전극에 전류 I가 유입되어 접지전극의 전위가 무한원점의 기준에 대해 V만큼 상승했다면 접지저항 R은 이론적으로 옴의 법칙에 따라 접지전극의 전위상승값과 전류의 비(V/I)로 정의된다. 접지전극의 접지저항은 접지도선과 접지전극이 가지는 자체의 전기적저항과 전극표면과 대지사이의 접촉저항, 그리고 접지전극 주위의 대지고유저항에 의해 정해지는 전기적저항으로 구분할 수 있으며, 접지점 부근의 대지저항률과 접지전극의 형상, 그리고 매설깊이는 접지저항 결정의 주요 요인으로 작용한다. 특히 접지전극 주변의 대지저항률은 접지저항 결정에 가장 크게 영향을 미치는 요소로 작용한다. [1][2]

본 논문에서는 대지저항률과 접지전극의 형상과 매설깊이에 따른 지중송전계통의 접지저항 저감효과를 분석하였다. 우리나라 전력구식 및 관로식 지중송전계통의 접지는 주로 대지저항률이 높은 특성을 가지고 있고, 협소한 공간에서 이루어지므로 유효 접지면적을 크게할 수 없기 때문에 낮은 접지저항을 얻기가 어려운 실정이다. 따라서 경제성과 신뢰성을 고려한 정확한 접지저항 예측은 접지시스템 설계에 매우 중요하다. 고로 본 논문에서는 봉형접지방식과 매설지선방식, 매쉬접지방식에서 각각 대지저항률과 접지전극 형상변화에 따른 접지저항 값을 계산하여 제시 함으로서 접지저항 저감효과를 분석하였다.

2. 모델계통 및 대지저항률

2.1 지중송전계통 모델링

본 논문에서는 지중송전계통에서 1선지락고장시 접지저항에 따른 시스유기전압을 분석하기 위해 우리나라 계통에서 운용중인 2000[mm] CV케이블로 총 선로공장이 6.12[km]인 전구방식의 계통을 ATPDraw를 이용하여 모델링하였다. 모델계통은 전체선로를 18구간으로 나누어 두 구간은 크로스본딩하였고, 세 번째 구간은 직접접지한 형태로 양단 중단접속합의 접지저항은 변전소의 매쉬접지에 연결되어 있는 것으로 하여 1[Ω]으로 하였고, 직접접지점에서는 각각 1[Ω], 5[Ω], 10[Ω], 20[Ω], 50[Ω], 100[Ω]의 접지저항으로 가정하여 시뮬레이션 하였다.

그림 1에서는 지중송전계통에서 1선지락고장시 접지저항별 케이블 시스유기전압을 구간별로 분석하였다. 그림에서 처럼 고장시 시스에서 유기되는 과전압을 접지저항값이 커짐에 따라 증가함을 알수 있으며 케이블 시스에 발생하는 과전압은 방직층의 파피의 주요 원인으로 작용하고 있다.

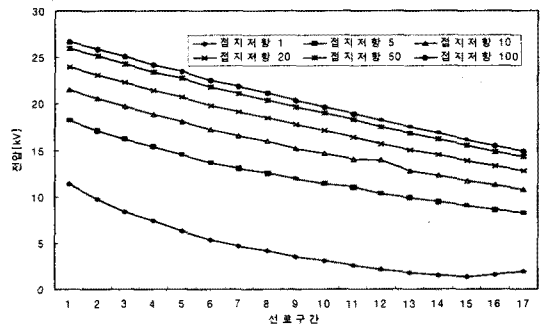


그림 1. 1선지락고장시 접지저항별 시스유기전압 분포

2.2 대지저항률

대지저항률은 일정부피의 토양의 전기저항을 말하며, 대지저항률은 지질의 구성과 지형등 장소에 따라 다른 값을 가지며 기후, 온도, 습도나 수분의 양, 그리고 주위환경에 따라 변화하므로 특정 토양에 대한 대지저항률을 명시할 수 없다. 또한 대지저항률은 그림 2에서처럼 접지전극 주변의 대지저항률은 접지저항에 크게 영향을 미치며, 대지저항률이 낮은 장소일수록 접지저항이 낮은 양호한 특성의 접지저항을 얻을 수 있다. [3]

그림 2에서는 각 접지방법에서 대지저항률에 따른 접지저항을 그래프로 나타내었다.

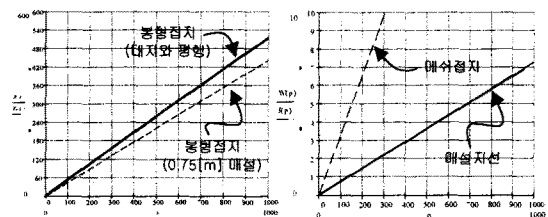


그림 2. 대지저항률과 접지저항과의 관계

대지저항률은 크게 저 저항률 지대(100[Ω.m]미만), 중 저항률지대(100~1000[Ω.m]), 고 저항률지대(1000[Ω.m]이상)로 구분하며, 대지저항률 측정을 위해 4개의 작은 전극을 등간격으로 배치하고 외부 2극을 통해 대지에 전류를 흘리고 내부 2극의 전위차를 측정해 전극간의 거리에 따른 대지저항률을 측정하는 Wenner의 4전극법이 주로 이용된다. 중 저항률과 고저항률지대에서는 접지저항값을 낮추기 위한 대지저항률 저감을 위해 수분공급과 염분, 목탄, 도전성 콘크리트에 의한 저감방법을 사용하고 있으며 전력구식이나 관로식의 지중송전계통에서는 토양보다 낮은 대지저항률을 가지는 콘크리트

를 이용해 대지저항률을 저감하는 방법을 사용하고 있다. 또한 접지저항은 접지전극의 형상과 크기 등에 관련되는 계수를 변화함으로써 저감할 수 있다. 본 논문에서는 단층구조의 대지에서 접지시스템 설계에 중요한 요소로 작용하는 접지전극 형상 변화에 따른 접지저항 저감방법을 검토하여 제시하였다.[4]

### 3 접지시스템 분석

#### 3.1 봉형접지방식

봉형 접지방식은 접지봉의 추가시공이 용이하고 다른 접지시스템과 연계성이 좋다는 장점이 있으나 대지저항률이 높은 지역에서는 접지성능이 크게 저하되며, 암반지역등에서는 시공이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 또한 뇌 썩지와 같은 대전류에 대해서는 접지봉이 파손되거나 부식되어 수명을 단축시키기도 한다.

본 논문에서는 표 1에서 식 (1)과 (2)를 이용하여 봉형 접지전극이 대지표면에 평행하게 매설된 경우(Type A)와 전기설비기술기준에의해 접지전극을 대지표면으로부터 0.75(m)깊이에 매설한 경우(Type B)의 단일접지봉에 대한 접지저항을 계산하였다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} [\ln \frac{4L}{r} - 1] \quad (1)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} [\frac{1}{L} \ln \frac{H(L+2r)}{r(L+2H)} + \frac{1}{L+H} \ln \frac{L+2H}{H}] \quad (2)$$

여기서, R은 접지저항 값, ρ는 대지저항률, L은 접지전극의 길이, a는 접지전극의 반지름, H는 접지전극의 매설깊이를 나타낸다.

표 1. 단일 접지동봉의 접지저항 계산 값 단위: [Ω]

접지방식	봉형접지방식									
	1m (봉지름 14mm)		1.5m (18mm)		1.8m (18mm)		2.4m (18mm)		3m (18mm)	
저항률 Type	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
10[Ω·m]	8.51	7.1	5.9	5.1	5.1	4.4	4.0	3.53	3.35	2.95
100[Ω·m]	85.1	70.9	59.6	50.7	51.3	44.1	40.3	35.3	33.5	29.5
300[Ω·m]	225	213	179	152	154	132	121	105	100	88.7
500[Ω·m]	425	355	298	253	256	220	202	176	167	148
1000[Ω·m]	851	709	596	507	513	441	404	352	335	296
10000[Ω·m]	8512	7098	5963	5074	5130	4411	4039	3527	3349	2957

표 1에서 처럼 단일 접지동봉의 접지저항값은 Type A와 B에 관계없이 대지저항률이 낮을수록 낮은 접지저항 값을 나타내며, 접지동봉 전극길이 길이가 길수록 그리고 접지저항이 저감됨을 알 수 있다. 그러나 접지동봉을 깊게 매설할 경우 대지 표면의 전위상승을 억제할 수 있으며 전위경도가 작아지는 장점이 있어 접지 시공시 Type B의 방법이 주로 사용된다.

봉형 접지방식의 경우 1본의 접지 전극으로 접지저항 기준 값을 얻지 못할 때 2본 이상을 설치하여 병렬로 접속하는 방법이 일반적으로 사용된다. 따라서 본 논문에서는 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 접지동봉을 병렬로 접속하는 경우 접지저항 저감효과에 대해 검토하였다.

$$\alpha = 1 + \frac{\ln[\frac{L}{S} + \sqrt{1 + (\frac{L}{S})^2}]}{\ln[\frac{L}{a} + \sqrt{1 + (\frac{L}{a})^2}]} \quad (3)$$

$$R_0 = \alpha \cdot \frac{R}{n} \quad (4)$$

여기서 R<sub>0</sub>는 병렬접지저항 값, α는 집합계수, n은 접지봉의 개수, S는 접지전극간의 거리, R은 단일봉의 접지저항치를 나타낸다.

표 2에서는 대지저항률이 100[Ω·m]인 지형에서 집합계수를 고려한 접지동봉 병렬접지시 접지저항 값을 나타내었다. 접지동봉 2본 병렬접지시 단일접지봉에 비해 59(%)의 저감율을 가장 큰 저감을 보였으며, 접지봉의 개수가 증가할수록 저감폭

을 줄어 들었다. 따라서 대지저항률이 높은 지형일수록 봉형접지 방식에 의한 접지저항 저감은 접지동봉의 개수를 증가해도 지중 송전계통에서의 적정 접지저항(10[Ω] 이하)을 얻기가 어려울 것으로 사료되어 접지시스템 설계시 다른 접지방식과 혼용하여 시공하는 방법을 채택해야 한다.

표 2. 접지동봉 병렬접속의 경우 접지저항 계산 값 단위: [Ω]

접지방식	병렬 연결된 봉형접지방식				
	1m (봉지름 14mm)	1.5m (18mm)	1.8m (18mm)	2.4m (18mm)	3m (18mm)
접지봉 개수 Type	B	B	B	B	B
2	42.37	30.29	26.34	21.053	17.65
3	33.076	23.65	20.56	16.433	13.78
5	26.765	18.42	16.01	12.801	10.73
8	21.693	15.51	13.48	10.778	9.307
10	20.328	14.53	12.63	10.01	8.469

대지저항률: 100[Ω·m]

#### 3.2 매설지선방식

매설지선 접지는 다층구조의 대지에서 상부지층의 대지저항률이 낮은 경우 주로 활용하는 방법으로 지표면에 대해 수평으로 매설하는 접지전극을 이용해 시공한다. 본 논문에서는 식 (5)를 통해 매설지선 접지방식의 접지도선 길이에 따른 저감 효과를 나타내었다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} [\ln(\frac{2L}{a}) + \ln(\frac{L}{H}) - 2 + \frac{2H}{L} - \frac{H^2}{L^2} + \frac{H^4}{2L^4}] \quad (5)$$

여기서 ρ는 대지저항률, L은 접지도선의 길이, a는 접지도선의 반경, H는 매설깊이를 나타낸다.

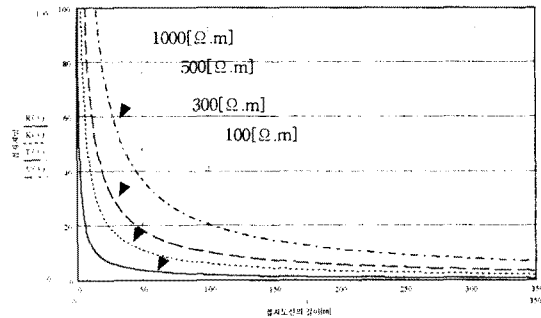


그림 3. 접지도선 변화에 따른 접지저항값 변화

그림 3은 각 대지저항률에서 접지도선 변화에 따른 접지저항값을 그래프로 나타내었다. 접지도선의 매설깊이는 0.75(m)이다. 접지도선이 증가함에 따라 접지저항값은 저감하였으나 1000[Ω·m]의 높은 대지저항률을 갖는 대지에서도 접지도선의 길이를 200(m)이상으로 시설하면 지중송전계통에서의 적정 접지저항값(10[Ω])을 얻을 수 있다. 그러나 약 300(m)마다 접속함으로 연결되어 있는 지중송전계통에서 매설지선 방식을 적용시 대부분의 선로구간에서 매설이 이루어져야 하므로 경제성면에서 부적절하다고 판단되며 병렬로 접속된 봉형접지방식이나 매수접지방식을 혼용한 방식을 채택하는 것이 효과적이라고 사료된다.

표 3. 매설지선 방식의 접지저항 계산 값 단위: [Ω]

접지방식	매설지선방식								
	10	20	30	40	50	60	100	200	300
접지도선길이	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
100[Ω·m]	13.4	7.76	5.59	4.42	3.67	3.16	2.05	1.13	0.8
300[Ω·m]	40.3	23.3	16.7	13.3	11	9.47	6.16	3.41	2.4
500[Ω·m]	67.1	38.8	27.9	22	18.3	15.7	10.2	5.68	4
1000[Ω·m]	134	77.6	55.9	44.2	36.7	31.5	20.5	11.3	8

표 4. 메쉬접지방식의 접지저항 계산 값

단위: [Ω]

접지방식	메쉬 접 지방식										
	설치면적[m <sup>2</sup> ]	5×5			10×10			20×20		30×30	
대지저항률	설치간격	1(m)	5(m)	2(m)	1(m)	5(m)	2(m)	5(m)	3(m)	5(m)	
100[Ω.m]		8.465	5.408	4.397	4.071	2.382	2.061	1.152	1.393	0.851	
300[Ω.m]		25.936	15.145	13.191	12.212	7.145	6.182	4.536	4.18	2.552	
500[Ω.m]		43.227	25.242	21.986	20.354	11.908	10.304	7.56	6.967	4.254	
1000[Ω.m]		86.455	50.485	43.971	40.708	23.817	20.868	15.12	13.93	8.508	
5000[Ω.m]		431.27	252.42	219.86	201.08	119.08	104.4	75.6	69.67	42.54	

3.3 메쉬(Mesh)접지방식

메쉬접지 방식은 그물모양으로 포설하는 접지방식으로 발전소나 변전소등에서 균등한 대지표면의 전위분포를 얻기위해 메쉬 접지전극을 사용하여 접지시스템을 구성하고 있다. 또한 메쉬접지방식은 높은 대지저항률을 가지는 대지에서도 포설면적에 따라 낮은 접지저항을 얻을 수 있고, 낮은 접촉전압이나 보폭전압을 얻기가 쉬우므로 신뢰성이 우수하다. 지중송전계통에서는 주로 작업구 혹은 맨홀내에서 접지가 이루어지므로 접지면적을 크게 할 수 없지만 낮은 접지저항을 얻기위해 공간이 허락되는데 까지 메쉬전극을 연결하고 메쉬전극내 전위경도를 균일하게 하기위해 각 메쉬의 모서리와 메쉬전극의 가장 자리에 접지동봉을 매설하기도 한다.

본 논문에서는 식 (6)을 이용하여 메쉬접지를 시공하는 경우 접지저항 저감효과에 대해 검토하였다.

$$R = \frac{\rho}{\pi L} [\ln(\frac{2L}{T}) + [K(\frac{L}{\sqrt{A}})] - Q] \quad (6)$$

여기서 ρ는 대지저항률, T는  $\sqrt{2at}$ 이며, a는 메쉬접지도선의 반경, t는 매설깊이, A는 메쉬접지 총 단면적, L은 메쉬접지선의 총길이, K와 Q는 메쉬접지의 설치 폭과 매설깊이를 고려한 상수이다.

표 4에서는 메쉬접지방식에서의 설치면적과 대지저항률에 따른 접지저항값을 나타내었다. 접지저항 계산 값에서 볼 수 있듯이 대지저항률이 높은 대지에서도 설치면적이 넓을수록 접지저항을 저감할 수 있고, 같은 설치면적에서도 메쉬전극의 설치간격이 좁을수록 접지저항이 저감함을 알 수 있다.

지중송전계통의 중단접속부는 주로 넓은 접지시공 면적이 확보되는 변전소의 메쉬접지에 연결되어 있어 1[Ω]정도의 양호한 접지저항 확보가 가능하나 장소가 협소할수록 비교적 중단접속부는 대지저항률이 높은 대지에서는 도전성 콘크리트 구조체등의 저감제를 이용한 접지공사를 시공함으로써 대지저항률 저감이 필요하며 경제성과 적정 접지저항값을 고려하여 메쉬전극의 설치면적과 설치간격을 결정하여 접지시스템을 설계해야 될 것으로 사료된다. 또한 유효접지면적이 확보가 어려운 지중송전계통의 현실을 고려한다면 병렬로 접속된 봉형접지방식이나, 중단접속부의 직접접지 지점에서 접지전까지의 매설지선방식을 적용하여 혼용하는 방식을 채택하는 것이 효과적이라고 사료된다.

3. 결 론

지중송전계통 및 주요 전기설비에 대한 접지는 인체의 감전사고 방지 및 이상전압 발생의 억제와 보호계전기 동작확보, 그리고 계통의 대지전압을 저감시켜 절연레벨을 낮추기위해 실시한다. 적정 접지저항 결정에 가장 직접적인 영향을 미치는 요소는 접지전극 주변의 대지저항률로 증가할수록 접지저항 또한 비례적으로 증가한다. 따라서 접지공사시 정확한 대지저항률 측정은 접지시스템 설계에 중요한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 봉형접지방식과 매설지선방식, 메쉬접지방식의 접지방식에서 각각 대지저항률과 접지전극 형상변화에 따른 접지저항 저감효과를 제시하였다.

봉형접지방식은 접지동봉을 매설할 경우 대지표면의 대위상승을 억제하며 전위경도가 작아지는 장점이 있으며 접지저항 저감 효과도 있었다. 또한 봉형접지방식은 접지동봉 전극길이 가 길수록 접지저항 저감효과가 있었으며 2분이상의 접지전극

을 병렬로 접속할 경우 접지저항 저감효과는 증가하였다. 그러나 봉형접지방식은 대지저항률이 낮은 지형특성에서만 효과적인 접지저항을 얻을 수 있으며 뇌서지와 같은 대전류 투입시 동봉의 파손과 부식등에 의해 수명이 짧아지는 단점을 가지고 있다.

매설지선 방식은 접지도선의 길이가 증가함에 따라 접지저항값이 현저하게 저감하였으나, 대지저항률이 높은 지형에서도 매설지선 길이를 길게함으로써 지중송전계통에서의 적정 접지저항값을 얻을 수 있었다. 그러나 공간이 협소한 지중계통에서 매설지선 길이가 길어질 경우 이에따른 굴착깊이가 깊어지므로 매설지선 방식으로 접지시공시 경제성면을 고려해야한다.

메쉬접지방식은 낮은 접촉전압과 보폭전압을 얻기가 용이하며 높은 대지저항률의 가지는 지형에서도 낮은 접지저항을 얻을 수 있어 신뢰성이 매우 우수하다. 또한 메쉬접지방식은 높은 설치면적이 넓을수록, 그리고 설치간격이 좁을수록 접지저항을 저감할 수 있었으나, 협소한 지중송전계통에 적용을 위해서는 보다 정확한 접지시스템 분석과 설계가 필요하다고 사료된다.

접지공사는 한번 시공하면 보수 및 점검이 어려우므로 경제성과 신뢰성, 보전성 등을 고려한 정확한 접지시스템 설계가 요구된다. 본 논문에서 제시한 접지방식별 접지저항 계산값은 접지전극 주변 토양의 대지저항률을 분석하면 적용이 가능하며 지중송전계통 뿐만 아니라 모든 전기설비의 접지설계에서도 적용이 가능하다. 또한 대지저항률에 따라 가장 많이 변화하는 접지저항의 특성을 고려할 때 높은 대지저항률을 가지는 지형에서는 저감제 등을 이용하여 대지저항률을 낮춘 후, 본 논문에서 제시한 각 접지방식에서 접지전극 형상 변화에 따른 접지저항 저감을 분석한 계산값을 고려한다면 정확한 접지시스템을 설계에 도움을 줄 것으로 사료되며 대지의 특성과 접지시스템 공간에 따라 각 접지방식을 혼용하여 사용하는 것도 효과적이라고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이복희, 이승철 "접지의 핵심기초 기술" 도서출판 의제.
- [2] 전력연구원, "지중송전계통의 접지기술 정립에 관한 연구 최종 보고서" 1998.
- [3] 한풍, 김재이, 최종기, 정길조, 김정부, "변전소 접지설계를 위한 대지저항의 측정과 해석" 대한전기학회 학계 학술대회 논문집, pp. 807-809, 1997
- [4] 오기봉, 심건보, 김민성, "접지저항 저감을 위한 도전성 물탈의 저감효과 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1293-1295, 1999
- [5] 신동호, 김용, 백수현, 이은영, 김필수, 조대훈, "3가지 접지방식에 대한 접지특성비교", 대한전기학회 논문지, Vol 49A, No. 6, pp. 289-296, 2000.6
- [6] 최세하, "알기쉬운 접지실무 기술" 진한도서.
- [7] 이복희, 이승철, 박종순, "봉상 접지극의 과도접지임피던스 특성", 대한전기학회 논문지, Vol 47, No. 5, pp. 659-665, 1998.5
- [8] Warren R. Jone, "Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation in Problem Soils", IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1343-1345, 1980