

배전선로 작업안전을 위한 최적접지 방법 평가

이 형수\*, 최 상원, 유 보혁  
한국산업안전공단

창 상훈 김 정훈  
한국철도기술연구원, 홍익대학교

An Analysis of Grounding Methods for Safety of Linemen in Distribution Line

H. S. Lee\*, S. W. Choi, B. H. Ryu  
Korea Occupational Safety Agency

S. H. Chang  
Korea Railroad Research Institute

J. H. Kim  
Hongik University

**Abstract:** This paper presents an analysis which compares the effectiveness of different temporary safety grounding methods on working overhead distribution system. The analysis studied direct energization at fault conditions with seven scenarios. The results show that the scenario, single point safety grounding on the working pole with brackets pairs spaced 2 km apart on both side of a work site is safest grounding method. This can be used to evaluate lineman safety on a overhead distribution systems in Korea.

1. 서 론

가공 배전선로를 신설, 증설하거나 변경할 때 또는 선로의 유지보수나 고장 등으로 정전작업을 할 때 작업 중에 우발적인 재충전이나 정전회로와 활선회로의 접촉, 수용가의 자가용 발전기에 의한 역송전 등으로 선로 작업자가 감전되는 사고를 방지하기 위한 조치로 임시적인 안전접지를 시행하고 있다. 그러나, 지금까지 배전 작업에서 안전접지를 시행할 때 최적의 접지 방법에 대한 구체적인 검토가 없었다. 이 논문은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 배전선로의 작업구간에서 우발적인 선로의 충전으로 인하여 사고전류가 선로에 흐를 때 기존 시행되고 있는 작업구간 양단에 설치하는 브라켓 접지(단락접지)의 방법이 안전한가에 대하여 여러 상황을 설정하여 검토하였다. 이는 작업구간에 흐르는 고장전류의 분포와 작업자에게 걸리는 접촉전압과 보폭전압을 계산을 통하여 이루어졌으며 이를 토대로 배전선로의 안전접지에 대한 최적 방법을 제시하였다.

2. 배전선로 작업구간 모델

배전선로 정전 작업구간 내에서 도체가 충전되는 사고가 발생했을 때, 계통의 고장전류 분포 및 인체를 흐르는 전류를 평가하기 위하여, 접지/전자계해석용 소프트웨어인 CDEGS[1]를 사용하여, 배전계통을 간단히 모델링하고 해석하였다. 캐나다의 SES에 의해 개발한 CDEGS는 토양구조 해석모델인 RESAP, 지중 및 가공의 충전도체에 의한 전자계 계산모델인 MALT / MALZ / HIFREQ, 선로정수 계산모델인 TRALIN, 회로해석모델인 FCDIST / SPLITS 및 고속 푸리에 변환 모델인 FFTSES의 8개 계산모델로 이루어져 있다.

HIFREQ는 충전된 도체의 전자계응답을 주파수영역에서 해석하는 컴퓨터 코드로서, 적분형태의 맥스웰방정

식 해를 모멘트법에 의하여 계산하며, 모델링 대상은 가는 선(Thin wire)으로 재구성된다. 모델링 대상이 되는 계통의 회로정수를 구하고, 그에 따른 회로모델을 구성하여 해를 구하는 방법과는 달리, HIFREQ는 최소한의 가정을 전제한 맥스웰방정식의 해를 구하기 때문에 단 한번의 시뮬레이션만으로도 유도결합, 정전결합 및 회로 모델 시뮬레이션에서는 고려할 수 없는 토양과 같은 손실매질에서의 도전결합의 영향까지 동시에 모두 고려할 수 있다는 장점이 있다. 여기서는 근접한 콘크리트주(이하 CP라 함)중성선 접지 사이의 도전결합 및 상도체와 중성선간 유도결합의 영향을 고려하기 위하여 HIFREQ를 이용하여 작업구간을 비교적 상세하게 모델링하고, 관심대상이 아닌 전원단과 부하단은 도전결합의 영향을 배제하도록 작업구간으로부터 먼 거리에 전압원과 전원 임피던스 및 접지된 부하임피던스로만 간략히 모델링하였다. 이 논문에서는 안전측면에서 보다 직접적인 기준이 되는 인체를 흐르는 전류의 관점에서 사고영향을 평가하였기 때문에 위험전압 측면에서 검토할 때에는 정확한 고려가 어려운 문제들-예를 들어 인체로부터 계통을 바라보았을 때의 테브난 임피던스의 영향이나 CP접지간 도전결합의 영향 등이 모두 고려되었다.

2.1 배전선로 해석 모델

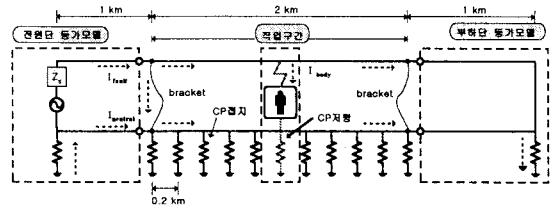


그림 1 작업구간 회로모델

그림 1은 배전선로에서 정전작업 중 사고상황의 회로모델이다. 전원단은 등가의 전압원과 전원임피던스로 구성되어 있으며, 전원단 접지저항은 작업구간의 CP접지저항에 비하여 작은 값을 갖도록 하였다. 부하단의 등가모델은 고장전류에 비하여 부하전류가 작으므로, 부하단의 접지저항만을 고려하여 모델링하였다. 전원단/부하단과 작업구간의 CP접지와와의 도전결합의 영향을 제거하기 위하여 전원과 부하(접지)단은 작업구간으로부터 1 km 떨어진 곳에 위치하도록 하였다.

### 2.1.1 작업구간내 주상 작업자의 감전사고 모델

그림 2는 작업구간에서 작업중인 작업자와 CP의 HIFREQ 모델을 보인 것이다. 토양은 저항을 100 Ω-m, 비유전율 36.0 및 비투수율이 1.0 인 균일매질로 가정하였다. CP는 이러한 균일매질에 약 2m 깊이에 묻혀있으며, 상도체는 6.45 m, 중성선은 5m 높이에 설치되어 있다고 가정하였다. 인체저항은 1000Ω, 신발저항은 4000Ω을 가정하였고 사고시 상도체와 인체간 단락회로를 형성함으로써 감전사고를 모델링하였다.

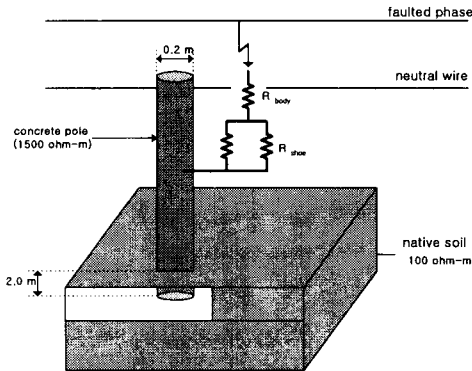


그림 2 주상작업자의 감전사고 모델

### 2.1.2 전원단과 부하단 모델

전원단은 13.22 kV의 전압원과 중성선과 상도체 사이에 1 또는 10Ω의 전원임피던스가 직렬로 연결되어 있고, 등가의 접지극이 중성선과 연결되어 있는 것으로 모델링하였다. 부하단인 경우에는 전압원과 전원임피던스가 없고, 상도체와 중성선은 도체로 단락되어 있다.

### 2.1.3 콘크리트주 접지 모델

본 모의에서는 콘크리트주의 접지만을 모의하므로 콘크리트주 접지는 200m마다 중성선이 접지되어 있는 것으로 가정하였다. 접지극은 한전의 배전설계기준에 근거하여 매설깊이 0.75m에 1m 접지봉이 매설되어 있고, 2m 떨어진 곳에 접지봉 하나가 병렬로 매설되어 있다고 가정하였다.

### 2.1.4 브라켓 모델

브라켓은 정전작업도중 의도적이지 않은 상도체의 충전시 상도체를 통해 작업구간으로 흐르는 전류를 차단하여 중성선과 대지로 고장전류를 귀환시킴으로써 작업구간에서 상도체를 접촉하고 있는 작업자를 보호하는 역할을 한다.

## 2.2 고장상황 시나리오

상기한 작업구간 사고 모델을 토대로 다음과 같은 고장

시나리오를 설정하여 각 시나리오 별 고장전류와 작업자 인체를 통과하는 통전전류를 구하였으며, 표 1은 그 시나리오를 나타낸 것이다.

표 1 시나리오별 고장전류 분포 계산결과(100 Ω-m)

시나리오	사고 상황
1	작업구간 양단 미접지+작업중인 전주 미접지
2	작업구간을 중심으로 2km구간 양단에 접지
3	작업구간을 중심으로 1.2km구간 양단에 접지
4	작업구간을 중심으로 0.4km구간 양단에 접지
5	작업구간만 접지(상도체-중성선-전주접지), 양단접지는 없음
6	시나리오1+작업중인 전주 접지 되어 있음
7	시나리오2+작업구간에서 접지(상도체-중성선-전주접지)됨.

## 2.3 해석결과

그림 3은 작업구간을 중심으로 1km거리에 상도체와 중성선 및 접지극간 연결시킨 경우에 전류분포 계산결과를 간략히 보인 것이다. 이 때 전원단 임피던스는 유도성 리액턴스로 1Ω의 크기를 갖으며, 전압크기는 상전압 22.9 kV을 중성선간 전압으로 환산한 13.22 kV이다. 대지저항율은 100Ω-m를 가정하였다. 화살표의 방향과 그 옆에 보인 값은 전류크기와 방향을 나타낸 것이다. 대부분의 고장전류는 전원단 쪽에 가까이 설치된 브라켓을 통해 전원단으로 되돌아가며 나머지 고장전류는 작업구간의 CP접지와 부하단 접지를 통해 전원단으로 귀환하는 것을 볼 수 있다.

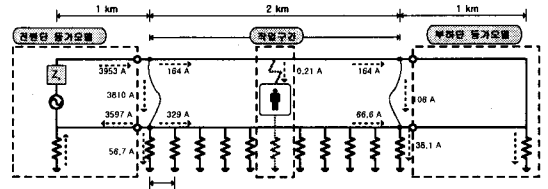


그림 3 시나리오 2 ( $\rho=100\Omega\text{-m}$ , 전원 $Z=1\Omega$ )에서 전류분포

해석결과와 전류분포를 표2와 표3에서 볼 때, 인체를 흐르는 전류를 최소화하는 시나리오는 7인 경우이다. 전원임피던스와 저항율이 동일하고 브라켓 사이의 거리만 달랐던 시나리오 2, 3, 4를 비교해볼 때, 브라켓간 거리가 가장 넓은(2km) 시나리오 2가 가장 인체전류가 작음을 볼 수 있다. 이는 브라켓이 고장전류를 상당부분을 차단하고 나머지 전류는 중성선과 콘크리트주 접지 또는 부하단 접지를 통해 전원단으로 귀환하게 되므로, 브라켓이 전원단에 가장 가까이 위치한 시나리오2가 가장 안전한 것이다.

표 3-2 시나리오별 고장전류분포 계산결과 (100Ω-m)

전원 Z	시나리오	인체통전 전류[A]	전원단 전류 분포		
			중성선 전류[A]	고장 전류[A]	접지 전류[A]
1 Ω	1	1.13	1579.24	1891.91	390.53
	2	0.21	3597.44	3953.28	125.06
	3	0.23	3264.99	3630.24	127.42
	4	0.25	2986.73	3357.17	541.33
	5	0.17	2860.57	3239.45	548.30
	6	1.13	1579.24	1891.91	390.46
	7	0.13	3593.00	3956.00	543.00
10 Ω	1	0.50	692.70	829.93	171.39
	2	0.06	976.24	1072.70	33.94
	3	0.07	942.43	1047.87	36.78
	4	0.08	911.12	1024.02	165.13
	5	0.05	894.40	1013.11	171.48
	6	0.50	692.80	829.93	171.33
	7	0.04	975.00	1073.00	147.00

표 3-3 시나리오별 고장전류분포 계산결과 (1000Ω-m)

전원 Z	시나리오	인체통전 전류[A]	전원단 전류분포		
			중성선 전류[A]	고장 전류[A]	접지 전류[A]
1 Ω	1	1.10	1737.26	1750.00	57.37
	2	0.22	3806.48	3821.24	16.54
	3	0.24	3474.92	3490.07	16.92
	4	0.26	3197.35	3212.73	72.97
	5	0.18	3075.01	3090.60	74.04
	6	1.11	1737.26	1750.00	57.28
	7	0.14	3806.00	3821.00	72.20
10 Ω	1	0.50	794.35	800.42	26.24
	2	0.06	1058.06	1062.45	4.60
	3	0.07	1031.08	1035.55	5.02
	4	0.08	1004.09	1009.64	22.93
	5	0.06	991.99	997.09	23.88
	6	0.51	794.35	800.42	26.20
	7	0.04	1058.00	1062.00	20.10

그림 4는 브라켓사이의 거리가 시나리오 2의 2km에서 400m로 좁아졌을 때의 전류분포를 계산한 결과이다. 전원단 모델은 시나리오2와 동일하다. 시나리오 2와 비교해 볼 때, 고장전류의 크기가 약 600 A정도 감소되었는데, 이는 고장전류를 전원단으로 되돌려주는 통로가 되는 브라켓이 전원단으로부터 더 멀어졌기 때문에 전원 쪽에서 본 시스템 임피던스가 더 증가하였기 때문이다. 주목할 것은 인체를 흐르는 전류가 0.25 A로 시나리오 2보다 오히려 증가하였는데, 이 또한 브라켓을 통한 고장전류의 차단이 작업자의 작업구간 가까이에서 이루어지기 때문으로 생각된다.

위 결과로 볼 때 CP위에서 작업하는 작업자의 안전관점에서는 시나리오7이 가장 안전하며, 작업자가 작업하는 CP주변에서 접촉, 보폭전압을 고려하면 시나리오 2가 더 안전하다고 볼 수 있다. 그러나, 보폭전압은 고장전류가 수 kA가 되어도 수십V에 지나지 않으며, 인체전류가 심장을 통과하지 않으므로 안전측면에서 큰 문제가

되지 않으며 접촉전압 또한 시나리오 7에서 상도체와 중성선을 연결하고, CP가 접지되어 있다고 할 때, 접지선을 사람이 접촉할 확률이 거의 없으므로 시나리오 7이 가장 안전한 것으로 생각된다.

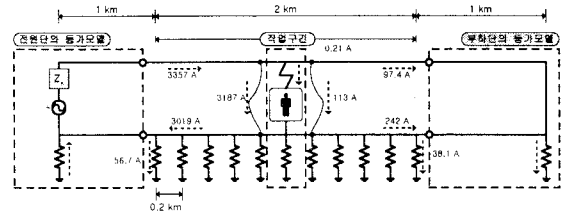


그림 4 시나리오4 ( $\rho=100\Omega\text{-m}$ , 전원Z=1Ω)에서 전류분포

### 3. 결 론

이 논문에서는 배전선로 작업에서 주상 작업자가 위험전압 발생으로 인하여 감전되는 위험을 방지하기 위하여 실시하고 있는 선로의 접지에 대한 최적방법과 가이드라인을 제시하고자 하였다.

이를 위하여 배전선로 작업구역 내에서 선로에 우발적인 재충전 등이 발생하였을 때 선로 접지방법별로 고장전류 분포와 접촉전압 및 보폭전압을 계산하여 최적접지 방법을 제시하였다.

연구결과 양단접지(단락접지) 시행 여부에 관계없이 작업구역에서 작업자가 승주한 전주에 일점접지를 하는 것이 더 안전한 것으로 밝혀졌다.

앞으로 배전선로 작업현장에서 이를 시행하도록 권고되어야 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 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
- [2] F. P. Dawalibi, R. D. Southey, P. W. Hotte, Safety Grounding for Personnel Working on Distribution Systems up to 86.6 kV, Report No. 101 D876, Canadian Electricity Association, November 1997
- [3] Abdul M. Mousa, "New Work Procedures for Work on De-energized Lines Eliminate the Need for Ground Switches", IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems, p. 2668, August, 1982
- [4] 한국전력공사, 안전작업수칙
- [5] 한국전력공사, 설계기준(배전분야)