

간이 저압 전력계통에서의 계통 접지대책에 관한 연구

위원석 김정훈  
홍익대학교

조규덕 류보혁  
한국산업안전공단

A Study on the Portable and Vehicle-Mounted Generators Grounding of Low-Voltage Systems

Wee, Won-Seok Kim, Jung-Hoon  
Hongik University

Cho, Gyu-deok Ryu, Bo-Hyuk  
KOSHA (Korea Occupational Safety & Health Agency)

**Abstract** - In this paper, portable and vehicle-mounted generators grounding methods of low-voltage systems is compared to each other. Ungrounded system is better for the safety operation than solidly grounding system. This paper also determined the magnitude and duration of the permissible body current limit and step voltage for the solidly-grounding and ungrounded system.

1. 서 론

전력계통에서 발생 할 수 있는 전압이나 부하의 불평형 또는 계통에서 일어날 수 있는 지락이나 단락사고에 대비하여, 계통을 비접지, 직접접지, 저항접지, 소호리액터 접지 등의 여러 가지 방식 중에서 적절한 방법으로 접지시키고 있다. 접지 방식의 결정은 IEEE에서 권고하는 (1), (2) 문헌등에 결정방법 및 권고사항이 자세히 수록되어 있다.

각 산업현장, 특히 건설현장에서 사용하고 있는 이동형 발전기의 경우, 독립전원으로서 조명 및 그라인더, 전기드릴, 컴프레서 등의 소규모 부하용 전용으로 사용되고 있는데, 부하설비가 노후되거나 가혹한 조건으로 사용되고 있어, 충전부분의 지락, 누출 등으로 인한 각종 감전재해가 빈번하게 발생하고 있다. 이동형 발전기 중에서 가장 많이 사용되고 있는 접지방식은 Y-결선의 중성점 직접접지 방식으로, 이는 발전기 주위에서 보호기기가 없는 채로 지락사고가 난다고 가정하였을 때, 인체를 통하여 발전기 중성선으로 귀로가 형성되어 비교적 큰 전류로 감전될 수 있다. 또한 발전기가 공사현장에 그대로 노출되어 있고, 운용 및 유지보수 인력의 교육문제, 작업장 환경의 가변성 등이 상시 존재하기 때문에 적절한 작업환경 지침이 마련되어 시행되지 않는다면 그 위험성은 더욱 증가할 것이다. 현재 저압전력계통의 접지방식에 관한 문제는 그 위험성(3)과 특수산업에 필요한 계통의 접지방식(4)(5)(10), 실제 사용되는 각 접지 방식에 대한 보호계전문제(2) 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 저압계통에서 이동형 발전기의 접지방식을 결정하기 위한 연구는 거의 이루어진 바 없으며, 우리나라의 전기설비 기술기준 등 관련 규정에서는 이에 대한 구체적인 지침이 없는 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 이동형 발전기가 사용되는 간이 저압 전력계통에서 안전에 영향을 미칠 수 있는 계통접지방식, 인체의 감전 메카니즘 등에 대하여 고찰하고 이에 대한 시뮬레이션 등을 통하여 가장 가혹한 조건에서의 허용위험전압을 결정하고, 사고 조건에 따라 인체의 안전여부를 판단하여 적절한 접지방식을 결정하였다.

2. 계통접지

2.1 발전기의 중성점접지

전력계통에서의 중성점 접지는 계통접지라고 하며, 3상 전원축이 Y-결선 되었다면, 그 중성점은 접지 또는, 비접지인 채로 운전할 수도 있으며, 저항이나 리액터를 통해서 접지되면, 그렇지 않은 경우와 또 다른 설비 특성을 나타내게 된다. 정상상태의 운전은 접지방식에 아무런 상관이 없으나, 고장시에 그 특성이 나타나게 된다. 고장의 결과는 정상운전을 위협할 수 있는 이상전압이나

대전류의 형태로 나타나, 계통의 정상운전이 정지될 수도 있다. 따라서 계통 접지는 계통과도현상에 대한 발전기 주변의 안전전압유지, 낮은 임피던스의 지락 전류의 귀로 확보, 과도상태동안 발전기 구조물의 안전전압유지, 기구 사용으로 인한 계통의 노이즈 간섭 최소화, 기구, 장치, 구조물에 대한 낙뢰 썬지의 영향 최소화 등을 목적으로 한다. 그러나 이들 목표를 동시에 모두 만족시키는 것은 매우 곤란하므로, 타협점을 찾거나 보완조치를 강구하고 있다.

2.2 저압계통의 접지방식과 영향인자

저압전력계통은 600(V)이하의 전압을 사용하는 계통으로, 다양한 접지방식을 사용할 수 있다. 직접접지와 고저항 접지 계통을 가장 널리 사용하고 있으며, 각 접지 방식은 장·단점이 있고, 문헌(2)에서는 방식을 선정하기 전에 고려할 영향인자들을 전력계통의 전압 수준, 계통에서 사용하는 전기기계 기구의 특성, 전기공급의 연속성의 요구수준, 운용 및 유지보수 인력의 교육수준, 각종법령 및 기준, 보호기와 보수비용 등의 설비비용, 안전, 고장 허용범위, 고장중의 전압 변동의 영향 등의 12가지로 분류하여 제시하고 있다. 전력계통의 각기 다른 환경에 대하여 접지 방식을 결정하기 위해서는 위와 같이 많은 영향인자들을 충분히 고려하여야 하며, 각 접지방식에 따라 안전, 서비스의 신뢰도, 초기투자비용, 보수비용등을 고려하여 각 상황에 적합한 접지방식을 채택하여야 한다.

2.3 이동형 발전기의 접지 관련 실태

우리 나라의 산업현장, 특히 건설현장에서 사용하고 있는 이동형 발전기는 380(V)나 440(V)를 주류로 하는 저압형태의 발전기이며, 3.3(kV) 또는 6.6(kV)로 건물 내부에 설치되어 정전시에 사용되는 비상용 발전기와 더불어 대형전력계통과는 분리되어 운용되는 독립전력계통의 전원으로 사용되고 있다. 이러한 이동형 발전기는 단상과 3상의 전원을 모두 사용용기가 쉽기 때문에 Y-결선 발전기가 대부분이다. 실제 Y-결선의 발전기는 통상 중성점을 접지하여 사용하거나, 발전기의 외함은 접지시키고, 중성점은 외함이나 대지로부터 절연을 한 비접지방식을 사용할 수도 있다. 이동형 발전기의 접지방식에 관한 전기설비 기술기준이나 산업안전보건법에서의 구체적인 지침은 마련되어 있지 않은 상태이며, 해외의 NEC, HSE, JIS 등의 기술기준에도 이동형 발전기에 관한 항목은 마련되어 있지 않다. 중성점 접지방식을 결정할 때 필요한 세부적인 지침은 없는 실정이다. 또한, 사용되는 부하설비도 접지하도록 되어 있으나 그 방법이 나 기준도 명확히 마련되어있지 않아 경우에 따라서는 규정된대로 접지하는 것이 더욱 큰 위험을 초래할 수도 있는 것으로 판단되고 있다.

3. 인체의 감전 메카니즘 및 위험 전압

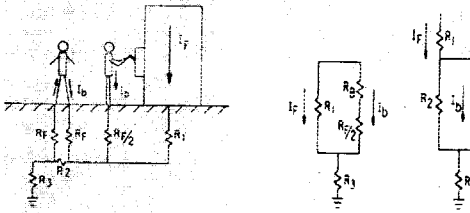
3.1 인체의 전기적 위험

인체는 상용주파수의 교류와 단기간동안의 전류 충격파에 의해서도 감전의 위험이 있는 것으로 밝혀져 있으나, 전격의 정도에 의한 인체의 생리학적 반응은 충분히 분석되지 않은 상태여서 예견하기가 아주 어렵다. 직류와 교류 상용 주파수에서 인체는 단순한 저항으로 표현

한다. 인체를 표현하기 위해서는 전형적으로 1000(Ω)을 이용(일부는 800(Ω)을 주장하기도 함.)한다. 100mA의 전류가 인체의 한쪽 손에서 다른 쪽 팔단을 통해 3초동안 경로를 형성하여 흐르게 되면 심장마비가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(3). 필스파와 같이 비연속적인 전류는 충격시간동안에 인체에 흡수되는 에너지에 따라 심장 마비의 여부가 결정된다. 그러므로 인체에 치명적인 마비에 대한 가능성 분석을 위해서는 전압이나 전류의 크기와 충격의 지속시간이 함께 고려되어야 한다. 실제적으로, 지락고장이 발생하면 지락전류는 인체가 접촉하였다더라도 대부분이 금속 충전부를 통하여 접지도체를 따라 계통의 중성점으로 흐른다. 저압계통에서 위험전압은 인체의 전기적 경로의 임피던스를 통한 분배된 지락전류의 전압 강하를 나타낸다.

### 3.2. 위험전압

인체의 발과 대지 표면사이의 저항은 대지 표면의 저항률을  $\rho_s(\Omega \cdot m)$ 라 할 때,  $3\rho_s(\Omega \cdot m)$ 로 근사화한다(6)[11].



단,  $R_1, R_2, R_3$ : 대지 저항을 구성하는 저항값  
 $R_p$ : 발과 대지의 저항  $R_b$ : 인체 저항  
 $I_b$ : 인체를 따라 흐르는 전류  $I_f$ : 고장 전류  
 그림 1. 접촉 및 보폭전위

인체와 인체의 발부터 대지까지의 저항으로 구성된 병렬가지는 인체를 따라 흐르는 전류를 결정하며 접촉전위의 경우에 대해서  $R=(1000+1.5\rho_s)(\Omega)$ 로 나타낼 수 있으며, 보폭전위의 경우에 대해서는  $R=(1000+6\rho_s)(\Omega)$ 로 나타낼 수 있다. 신발을 신지 않았을 때나 대지 표면이 젖었을 경우를 고려해야 하므로,  $\rho_s$ 를 0으로 가정하여  $R=1000(\Omega)$ 으로 가정하기도 한다. 그러므로 심장마비를 일으키지 않을 만큼의 짧은 기간동안의 인체 허용 감전전류는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$I_b = 0.116/\sqrt{T} [A] \quad (1)$$

여기서,  $I_b = T$ 초 동안 심장마비없이 흐르는 최대 인체 허용 감전전류 [A]이며,  $T = T_0$ 고장제거시간이다. 이 방정식은 3초동안까지만 유효하다.

전류보다는 전위가 계산이나 측정이 용이하므로, 최대 허용 접촉전압 및 보폭전압을 식(1)을 이용하여 얻을 수 있으며, 그 식은 다음과 같다. 이 경우, 50kg의 인체에 대한 위험전압은 다음과 같다.

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5\rho_s)(0.116)/\sqrt{T} [V] \quad (2)$$

$$E_{step50} = (1000 + 6\rho_s)(0.116)/\sqrt{T} [V] \quad (3)$$

실제로, 표면의 저항률은 0이 아닌 매우 작은 값으로 허용 전압은 E보다는 조금 큰 값이 될 것이다. 그러면 고장제거시간 T에 따른 최악의 조건에서의 허용전압(위험전압 또는 안전전압)의 크기가 결정된다.

### 4. 사례 연구

실제 이동형 발전기를 이용하고 있는 건설현장의 대지 저항률과, 이동형 발전기의 대지, 외함, 중성선 상호간의 전기적 접촉상태를 측정하여 발전기 주변에서 지락사고가 일어났을 경우, 인체가 외함에 접촉되었을 경우에 인체에 흐르는 전류를 접지방식에 따라 비교하였다.

### 4.1. 현장측정값

표 1은 발전기가 설치된 공사현장 부지에 대한 Wenner 측정법에 의한 겔보기대지저항 값이다.

표 1. 이동형발전기 사용대지의 대지저항률 측정값

간격(a)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	10	15	20	30
겔 보 기 대지저항(Ω)	177	81.3	25.6	14.0 8	10.6 9	6.38	4.89	4.24	3.01	-	1.58	-

이 값들을 이용하여 대지고유저항률을 계산한 결과는 다음과 같다. 대지를 2층으로 보았을 경우

$$\rho_1 = 542.045(\Omega \cdot m) \quad h_1 = 1.269(m)$$

$$\rho_2 = 178.874(\Omega \cdot m) \quad h_2 = \infty$$

$$k(\text{반사계수}) = -0.50376(\text{p.u.})$$

등가대지고유저항률(등가깊이 30m)은 다음과 같다.

$$\rho_{eq(30m)} = \frac{d}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{d-h_1}{\rho_2}} = 184.0913(\Omega \cdot m) \quad (4)$$

설치된 이동형 발전기에서 측정된 상-외함, 상-대지, 중성점-대지 간의 절연저항값은 각각 10(MΩ)였다.

### 4.2. 저압전력 접지계통의 모형

단선지락사고의 사고전류의 크기  $I_{CF}$ 는 다음의 식으로부터 계산할 수 있다.

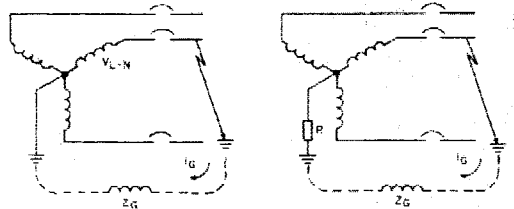


그림 2. 직접접지 방식의 1선 지락고장

그림 3. 저항접지 방식의 1선지락고장

$$I_{CF} = \frac{3V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3(Z_G + R)} \quad (5)$$

단,  $Z_1$ 과  $Z_2$ : 정상 및 역상 임피던스

$Z_0 + 3(Z_G + R)$ : 영상임피던스

$Z_G$ : 접지 저항

$R$ : 중성점 삽입저항

3상단락회로는 인체와 대지를 연결하는 귀로를 형성하지 않으므로, 인체에 영향을 제일 많이 미치는 1선지락고장을 고려할 수 있다. 지락전류가 크게 변화함을 나타내기 위해 1선지락이 발전기 단자와 매우 가까운 곳에서 일어난다고 가정하면, 선로의 임피던스는 0으로 가정할 수 있고, 비접지 방식에서는 중성점을 접지하지 않은 상태로 유지하므로, 중성점과 대지 표면간의 절연저항 측정값  $R$ 을 이용하여 절연저항으로 저항접지 되어있다고 가정하였다.  $Z_1 = Z_2 = Z_0$ 은 매우 작은 값이라고 가정한다. 그러면 1선지락고장전류는

$$I_{CF} = \frac{V_{L-N}}{Z_1 + (Z_G + R)} \approx \frac{V_{L-N}}{(Z_G + R)} \quad (6)$$

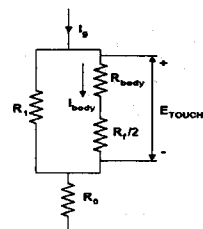


그림 4. 대지 및 인체저항의 모델

과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $Z_c$ 는 그림 4의 모델을 사용하는 것이다. 위의 모형에서  $E_{touch}$ 는 사람이 없을 때 미리 존재하는 전압으로서 그림 4로부터 유도된 식을 사용하여 인체를 통하는 전류를 계산할 때 사용한다.

$$I_{body} = \frac{E_{touch}}{R_b + R_f/2} \quad (7)$$

단,  $R_b$  : 인체의 저항,  $I_{body}$  : 인체를 통하는 전류  
 $R_f$  : 발에서 발아래의 대지까지의 대지저항  
 $R_0 + R_1$  : 접지저항

여기서, 인체의 저항은 1000[Ω], 토양과 발사이의 접촉저항은 0[Ω]으로 가정하였다.  $R_f$ 는 발에서 발아래의 대지까지의 대지저항값으로  $3\rho_s$ 로 가정한다. 여기서  $\rho_s$ 는 대지표면의 저항률 값이다.

$$R_0 + R_1 = 100[\Omega]$$

$$R_1 = \frac{\rho_s}{2\pi r} = \frac{542.045}{2\pi} = 86.269[\Omega], \quad R_0 = 13.731[\Omega]$$

으로 가정하였다. 따라서,  $Z_c$ 는 순수하게 저항만으로 이루어졌으며 그 값은 96.85[Ω]이다. 비접지 방식에서는 절연저항 기준값인  $R = 0.1[M\Omega]$ 의 측정값을 이용하였으며, 고장회로에 참여하는 대지의 구조는 다르겠으나, 계산의 편의상 직접접지 방식과 같게 놓았다.

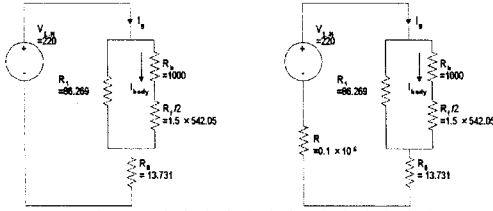


그림 5. 직접접지방식과 비접지방식의 3상단락고장 등가회로

1선지락고장시의 고장전류와 이 때 인체에 흐르는 전류는 표 2와 같다.

표 2. 고장전류, 인체전류와 접촉전압 결과

접지 방식	1선지락 전류 $I_g$	인체전류 $I_b$	접촉전압
직접접지 방식	2.289 A	104 mA	104 V
비접지 방식	1.570 mA	0.0998 mA	0.0998 V

이 경우, 50kg과 70kg의 인체에 대한 IEEE Guide에서 권고하는 허용전압은 다음과 같다.

$$E_{touch(50)} = (1000 + 1.5\rho_s)(0.116)/\sqrt{T} [V] \quad (8)$$

$$E_{touch(70)} = (1000 + 1.5\rho_s)(0.157)/\sqrt{T} [V]$$

여기서,  $\rho_s$ 는 표면 물질의 저항률이나, 전통적으로 젖은 대지표면과 맨발을 가정하여 0으로 둔다. 위의 허용전압을 이용하여 고장제거시간에 대한 허용전압은 표 3과 같다.

직접접지 방식에서는 접촉전압이 104[V]로 50[kg] 신체에 대해서는 1.24초안에 전격이 차단되어야 하며, 70[kg] 신체에 대해서는 2.28초안에 전격이 차단되어야 한다. 그러나 단일 고장에 대해서 비접지 방식은 중성점과 대지간의 절연만 잘 확보되어 있다면, 외함 접지가 되어있지 않다고 해도, 고장전류가 작고, 접촉전압도 낮아서, 인체에 대하여 심장마비의 위험이 거의 없다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

건설현장에서 사용하고 있는 이동형 발전기와 같은 독립전원에 대하여 중성부분의 지락, 누출 등으로 인한 각종 감전재해의 발생을 막기 위하여, 이동형 발전기중에서 가장 많이 사용되고 있는 Y결선의 중성점 직접접지 방식과 비접지 방식을 비교하여 직접접지방식이 위험전압이나, 인체에 흐르는 전류의 크기로 보았을 때, 인체

를 통하여 발전기 중성선으로 귀로가 형성되어 비교적 큰 전류로 감전될 수 있음을 보였다. 이동형 발전기가 사용되는 간이 저압 전력계통에서 가장 가혹한 조건에서의 허용위험전압을 결정하였으며, 사고 조건에 따라 인체의 안전 여부를 판단하여 비접지 방식이 직접접지 방식보다 훨씬 우수한 것으로 나타났다. 이 결과는 이동형 발전기에 관한 국내 관련 규정의 제정에 활용되리라 기대된다.

표 3. 고장제거시간과 허용전압의 크기

시간(초)	cycle	안전전압(90kg)	안전전압(70kg)
0.05	3	518.77	702.13
0.0584	3.504	480.01	649.67
0.1	6	366.82	496.48
0.175	10.5	277.29	375.30
0.2	12	259.38	351.06
0.25	15	232.00	314.00
0.5	30	164.05	222.03
0.75	45	133.95	181.29
1.0	60	116.00	157.00
2.0	120	82.02	111.02
3.0	180	66.97	90.64

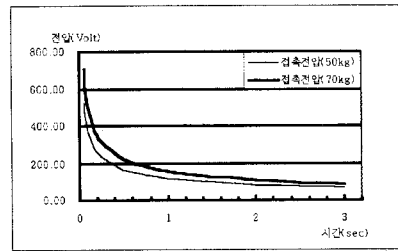


그림 6. 접촉전압과 전격지속시간과의 관계

### [참고 문헌]

- (1) IEEE Std. 142-1991, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems."
- (2) IEEE Std. 242-1975, "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems."
- (3) Dr. Luke Yu, Roy T. Beck, "Evaluation of Electric Hazards in AC Low Voltage Systems", IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, 1988, Record of Conference Papers., Industrial Applications Society 35th Annual, 1988 pp. 213-218
- (4) Nelson, J.P., Sen, P.K., "High-resistance grounding of low-voltage systems: a standard for the petroleum and chemical industry", Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 35 Issue 4, pp. 941-948, July-Aug. 1999
- (5) Robertson, W.F., Das, J.C., "NEC requirements of isolated safety ground for medium voltage mobile or portable equipment in industrial environment", Pulp and Paper, 1999, IEEE Industry Technical Conference Record of 1999 Annual, pp.216-223, 1999
- (6) Dawalibi, F.P., Southey, R.D., Baishiki, R.S., "Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol.5 Issue 2, pp. 613-626, April 1990
- (7) Lee, C.H., Sakis Meliopoulos, A.P., "Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479-1", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, Vol. 146 Issue: 6, pp. 593-601, Nov. 1999
- (8) Sverak, J.G., "Progress in step and touch voltage equations of ANSI/IEEE Std 80-historical perspective", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol.13 Issue: 3, pp. 762-767, July 1998
- (9) Chow, Y.L., Salama, M.M.A., Djogo, G., "Thevenin source resistances of the touch, transferred and step voltages of a grounding system", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, Vol.146 Issue: 2, pp. 107-114, March 1999
- (10) IEEE, "IEEE guide for the safe installation of mobile substation equipment", IEEE Std 1268-1997, 26 Sept. 1997
- (11) American National Standards Institutes, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", ANSI/IEEE Std 80-1986, Grounding, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., July 26, 1986