

배전계통에서 낙뢰보호용 피뢰기의 접지저항 영향에 관한 연구

(A Study on the Grounding Resistance Effects of Lightning Arrester for Lightning Stroke Protection in Electric Distribution Systems)

김경철* · 정지원 · 이규진**

(Kyung-Chul Kim · Ji-Won Jung · Kyu-Jin Lee)

요 약

낙뢰는 구름이 가진 높은 전압이 대지로 방출되는 현상이다. 낙뢰 보호 접지는 낙뢰로부터 건물, 배전선로와 전기설비를 보호하는 중요한 역할을 한다. 기기 접지는 제한된 중성점 전위상승을 위한 목적으로 한다. 기기 접지는 제한된 중성점 전위상승을 위한 목적으로 한다. 본 논문에서는 낙뢰가 배전선로에 급습했을 때 중성점 전위와 피뢰기의 제한 전압을 분석하여 피뢰기 접지저항의 영향을 심도 있게 조사하였다. 사례연구는 EDSA 프로그램으로 수치와 그래프로 시뮬레이션하였다.

Abstract

Lightning is the discharging of high-voltage charged cells within clouds to earth other or to the earth. Lightning protection grounding is essential for the protection of buildings, distribution lines, and electrical equipment from lightning surges. Equipment grounding is for the purpose of controlling the voltage to earth within predictable limits. This paper investigates the effects of lightning arrester grounding resistance by analysing the neutral to earth voltages and arrester break down voltages when the lightning strike hits the distribution line. The case study was simulated numerically and graphically through the use of the EDSA software program.

Key Words : Lightning surge, Lightning arrester, Lightning arrester grounding resistance, Neutral to earth voltage

1. 서 론

배전계통에 나타나는 이상전압의 원인은 뇌가 배전선로를 내습할 때 발생하는 직격뢰와 전하를 가진 구름 밑에 있는 배전선로에 유도되는 유도뢰가 있다. 직격되는 과고 값이 높아서 계통절연과 인체에 위험을

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2010년 2월 24일
1차심사 : 2010년 3월 2일
심사완료 : 2010년 4월 15일

준다. 직격뢰의 방지대책으로는 가공지선과 피뢰기가 널리 사용되고 있다[1-4].

피뢰기는 내습하는 이상전압의 파고 값을 저감시켜서 기기를 보호하기 위하여 설치되고 있다. 이상전압이 내습해서 피뢰기의 단자전압이 어느 일정 값 이상으로 올라가면 즉시 방전해서 전압상승을 억제한다. 이상전압이 없어져서 단자전압이 일정 값 이하가 되면 즉시 방전을 정지해서 원래의 송전상태로 되돌아가게 한다.

피뢰기는 접지저항을 통하여 대지에 접속하는데, 피뢰기 접지저항은 낙뢰 시 방전전류를 대지로 흘려보내고, 인체 접촉 위험이 있으므로 전위 상승을 일정 수준 이하로 유지하도록 설계되어야 한다.

피뢰기는 접지저항 크기는 전기설비기술기준의 판단기준 제43조에는 제1종 접지로 10[Ω]이하로 규정하고 있으며, 배전설계 기준에는 다른 접지와는 별도로 접지하고 중성선에 접속 후 접지해야 하고 일반 주는 25[Ω]이하, 입상주는 10[Ω]이하로 규정하고 있다.

피뢰기의 접지저항 설정 근거로는 피뢰기 접지저항에 걸리는 전압, 즉 중성점 전위상승 한도가 있다. 중성점전위상승 한도가 일본은 750[V]이하, CCITT[5]는 1,000[V]이하, IEC 60364[6]에서는 상전압+1,200[V] (5초 이하 차단시)이하로 규정 하고 있으며 국내에서는 1,000[V]이하로 규정하고 있다.

본 논문에서는 사례연구 배전시스템을 구성하고, 모델링하여 배전선로에 낙뢰가 급습했을 때, 피뢰기 접지저항을 변화시키면서 중성점 전위상승, 모선전압, 피뢰기 제한전압, 피뢰기 방전전류 등을 구하여 피뢰기 접지저항 영향을 심도있게 분석하고자 한다.

2. 사례연구

2.1 사례연구 계통도

그림 1은 사례연구 배전시스템의 계통도이다. 배전변전소는 공급전압이 22.9[kV], 단락용량이 281[MVA], 단락임피던스는 100[MVA] 기준으로 0.114+j35.61[%] 이다. 전력회사는 부하가 30[MVA], 역률 90[%]이다.

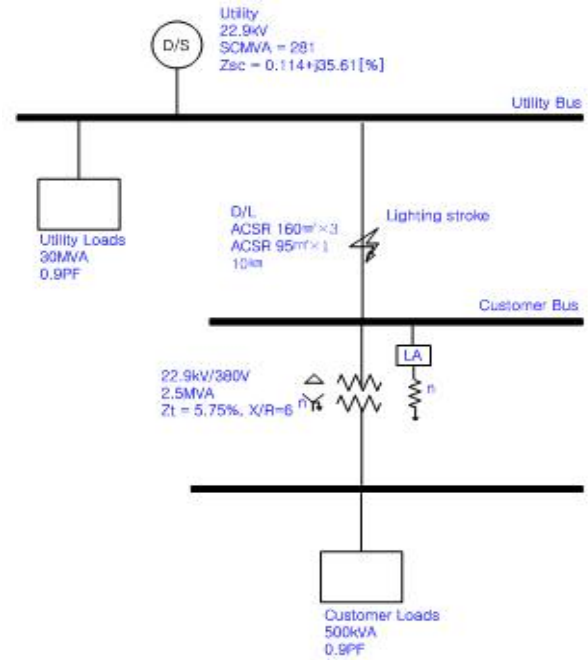


그림 1. 사례연구 배전시스템
Fig. 1. Distribution system under study

배전선로는 ACSR 160[mm]×3이고, 100[MVA] 기준으로 선로 임피던스는 3.47+j7.46 [%/km]이다. 중성선은 ACSR 95[mm]×1이고, 선로 임피던스는 5.8+j8.41 [%/km]이다. 배전선로와 중성선의 영상 임피던스는 11.99+j29.26 [%/km]이고, 선로길이는 10[km]이다.

수용가 변압기는 조명부하용 1,000[kVA], 동력부하용 1,500[kVA] 2대가 있다. 편의상 한 대로 등가 변환하여 22.9[kV]/380[V], 2,500[kVA], 임피던스 Zt=5.75[%], X/R=6이라 한다. 수용가는 부하가 500[kVA], 역률 90[%]이다.

수용가 모선에는 모선과 변압기 보호용으로 피뢰기가 설치되어 있다. 피뢰기는 비선형 전압 - 전류 특성을 가진 소자로 나타낼 수 있고, 아날로그 피뢰기의 경우는

$$V = k_1 I^{k_2} \quad (1)$$

으로 표시된다. 여기서 V는 전압(Volts), I는 전류(Amps), k1과 k2는 상수이다.

사례 연구에서는 피뢰기는 아날로그 형이고,

$k1=0.75$, $k2=0.75$, 회복전압은 $0.85[pu]$, 충격방전 전압을 $2.0[pu]$ 로 설정했다.

가공선로에 낙뢰가 급습했을 때, 피뢰기의 접지저항 영향을 분석하기로 한다. 낙뢰는 매우 큰 전류를 포함하고 있으므로 전류원으로 나타낸다. 낙뢰는 최대크기(Amps), Rise time(msec), Peak time(msec), Half-peak time(msec)으로 표현한다. 낙뢰는 배전계통에서 널리 적용되는 $8 \times 20[\mu s]$, $10[kA]$ 임펄스 전류로 $5[msec]$ 에 발생했다고 가정한다.

2.2 등가변환

배전계통의 전자과도 현상을 분석하기 위해서는 적절한 모델로 등가변환 하여야 한다[7]. 실제시스템은 여러 계급의 전압으로 이루어져 있고, 선로 정수 또한 불평형으로 3상으로 해석해야 하나 사례연구 시스템(그림 1)을 등가회로로 변환시키면 그림 2가 된다. 편의상 평형 3상으로 취급하여 단상으로 등가회로로 화 시킨다. 모든 단위는 백분율로 환산한 값을 쓴다.

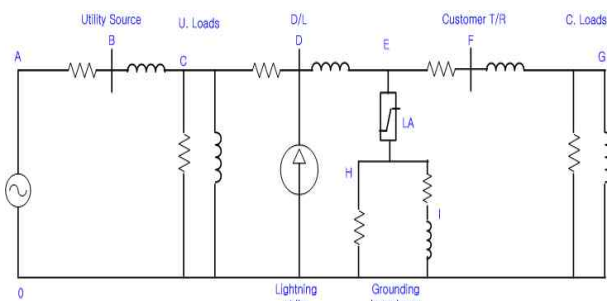


그림 2. 등가변환 회로
Fig. 2. Equivalent diagram

전압원은 크기(Volts), 위상(Phase), 주파수(Hertz)로 표현한다. 인덕턴스(Henry)는 초기조건으로 초기 전류 크기(Amps), 위상 값(Degrees)이 필요하다. 부하는 저항 R(Ohms)과 리액턴스 XL(Ohms)가 병렬로 연결된 임피던스로 등가화 시킨다. 부하전압 V[kV], 부하전력 S[MVA], 부하역률 $\cos\theta$ 가 주어지면, 부하 임피던스는 다음과 같이 계산한다.

$$Z = \frac{V^2}{S} [Ohms] \tag{2}$$

$$R = Z \cdot \cos\theta [Ohms] \tag{3}$$

$$X_L = Z \cdot \sqrt{1 - \cos^2\theta} [Ohms] \tag{4}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} [Henry] \tag{5}$$

여기서 f =주파수[Hz], Z =임피던스[Ohms], R =저항[ohms], X_L =유도성 리액턴스[Ohms], L =인덕턴스[Henry]이다.

변압기 모델은 간소화 된 것으로 저항과 리액턴스가 직렬로 연결된 임피던스를 나타낸다.

각 소자는 다음과 같이 구한다. 먼저 백분율로 하기 위하여 기준을 설정한다.

$$S_b = 10 [MVA]$$

$$V_{bs} = 22.9 [kV]$$

$$V_{bl} = 380 [V]$$

$$Z_{bs} = \frac{(V_{bs})^2}{S_b} = 52.441 [Ohms]$$

$$Z_{bl} = \frac{(V_{bl})^2}{S_b} = 0.01444 [Ohms]$$

전력회사 측의 데이터를 구한다.

$$V_{Ao} = 22.9 [kV] = 1.0 \angle 0^\circ [pu]$$

$$Z_A = 0.0114 + j3.561 [\%]$$

$$R_{AB} = 0.000114 [pu]$$

$$X_A = 0.03561 [pu]$$

$$L_{BC} = \frac{X_A}{w} = 0.00009446 [pu]$$

전력회사의 부하 임피던스를 구한다.

배전계통에서 낙뢰보호용 피뢰기의 접지저항 영향에 관한 연구

$$S = 30[MVA]$$

$$PF = 90[\%]$$

$$V = 22.9[kV]$$

$$P = 30 \times 0.9 = 27[MW]$$

$$Q = 30 \times \sqrt{1 - 0.9^2} = 13.0767[MVAR]$$

$$R = \frac{V^2}{P} = 19.4226[Ohms]$$

$$R_{co} = \frac{R}{Z_{bs}} = 0.3704[pu]$$

$$X = \frac{V^2}{Q} = 40.1026[Ohms]$$

$$L_{co} = \frac{X}{w} \cdot \frac{1}{Z_{bs}} = 0.002028[pu]$$

배전선로의 임피던스를 구한다.

$$Z = 3.47 + j7.46[\%]$$

$$R_{CD} = 0.0347[pu]$$

$$L_{DE} = \frac{X}{w} = 0.0001979[pu]$$

수용가 변압기의 임피던스를 구한다.

$$Z_t = 5.75[\%]$$

$$X/R = 6$$

$$Z_{tn} = 0.0575 \times \frac{10}{2.5} = 0.23[pu]$$

$$R_{EF} = \frac{Z_{tn}}{\sqrt{1 + (\frac{R}{X})^2}} = 0.03731[pu]$$

$$X = \frac{Z_{tn}}{\sqrt{1 + (\frac{X}{R})^2}} = 0.2269[pu]$$

$$L_{FG} = \frac{X}{w} = 0.0006018[pu]$$

수용가의 부하 임피던스를 구한다.

$$S = 500[MVA]$$

$$PF = 90[\%]$$

$$V = 380[V]$$

$$P = 500 \times 0.9 = 450[kW]$$

$$Q = 500 \times \sqrt{1 - 0.9^2} = 217.9449[KVAR]$$

$$R = \frac{V^2}{P} = 0.3209[Ohms]$$

$$R_{G0} = \frac{R}{Z_{Gd}} = 22.2222[pu]$$

$$X = \frac{V^2}{Q} = 0.6626[Ohms]$$

$$L_{G0} = \frac{X}{w} \cdot \frac{1}{Z_{Gd}} = 0.1217[pu]$$

낙뢰 데이터를 구한다.

8×20[μs], 10[kA] 임펄스 전류
Current source type=Impulse

Rise time=5[ms]

Peak time=5.008[ms]

Half peak time=5.02[ms]

Peak current=40[Amp(pu)]

$$I_n = \frac{10MVA}{\sqrt{3} \times 22.9kV} = 252.12[A]$$

$$I_{peak} = \frac{10kA}{I_n} = 40[pu]$$

피뢰기의 데이터를 구한다.

Arrester type=Analog

Breakdown voltage=2.0[Volt(pu)]

Recovery voltage=0.85[Volt(pu)]

Factor=0.75

Exponent=0.75

일반적으로 피뢰기의 상용주파 방전개시전압은 1.5[pu] 이상이다. 피뢰기 정격은 0.75-0.9[pu]이다. 피뢰기 접지저항 R_g 는 0-100[Ohms] 사이로 변화시키면서 피뢰기 제한전압과 중성점 전위상승을 분석한다. 중성선은 그림 3과 같이 간략히 표현한다.

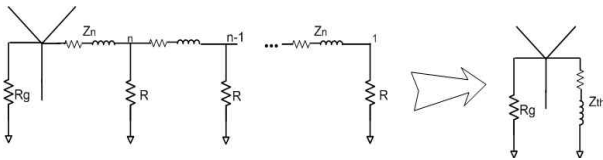


그림 3. 중성선 등가회로
Fig. 3. Neutral line equivalent circuit

그림 3에서 R_g 는 피뢰기 접지저항이고, R 는 배전 주의 접지저항, Z_n 는 단위 경간당 중성선의 임피던스이다. 이와 같은 사다리꼴 회로의 등가임피던스(Z_{th})는 아래와 같이 구할 수 있다. 일반적으로 중성선이 2[km] 이상이면 아래의 중성선 등가임피던스 식이 성립한다 [7-8].

$$Z_{th} = Z_n + \frac{Z_{th} R}{Z_{th} + R} \quad (6)$$

$$Z_{th} = \frac{Z_n + \sqrt{Z_n^2 + 4Z_n R}}{2}$$

중성선의 데이터를 구한다.
전극간격 50[m], 전극 접지저항 50[Ohms]이라 한다.

$$Z_{th} = \frac{Z_n + \sqrt{Z_n^2 + 4Z_n R}}{2} = 1.0323 + j0.5491 [Ohms]$$

$$R_{HI} = \frac{R}{Z_{th}} = 0.01968 [pu]$$

$$L_{I0} = \frac{X}{w} \cdot \frac{1}{Z_{th}} = 0.00002777 [pu]$$

등가회로의 입력데이터를 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 등가회로의 입력데이터
Table 1. Input data for equivalent circuit

Component	Value[pu]	Remark
V_{0A}	1.0	Utility 공급전원
R_{AB}	0.000114	Utility 단락저항
L_{BC}	0.00009446	Utility 단락 임피던스
R_{C0}	0.3704	Utility Load(저항)
L_{C0}	0.002028	Utility Load(인덕턴스)
R_{CD}	0.0347	배전선로 저항
L_{DE}	0.0001979	배전선로 인덕턴스
R_{EF}	0.03731	Customer TR 저항
L_{FG}	0.0006018	Customer TR 인덕턴스
R_{G0}	22.2222	Customer Load(저항)
L_{G0}	0.1217	Customer Load(인덕턴스)
R_{H0}	0~1.9069	LA 접지저항 (0-100[Ω])
R_{HI}	0.01968	중성선 등가저항
L_{I0}	0.00002777	중성선 등가 임피던스

2.3 피뢰기 접지저항 영향 분석

EDSA[9] 시뮬레이션 결과를 분석하기로 한다. $8 \times 20[\mu s]$, 10[kA] 임펄스 전류가 배전선로에 급속하면, 피뢰기가 설치되지 않을 경우 수용가 모선에 걸리는 과도 전압은 최대 5.468[pu], 125.2[kV]가 된다. 그림 4는 수용가 모선의 전압 파형이다.

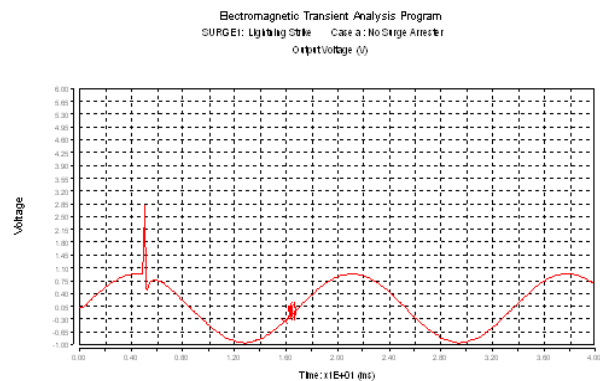


그림 4. 낙뢰 시 수용가 모선 전압(피뢰기 미설치)
Fig. 4. Customer bus voltage at lightning stroke (without lightning arrester)

피뢰기를 수용가 모선 즉, 수용가 변압기 앞에 설치한 경우에 $8 \times 20[\mu s]$, $10[kA]$ 임펄스 전류가 배전선로에 급습하면, 수용가 모선에 걸리는 과도 전압은 최대 $1.198[pu]$, $27.4[kV]$ 가 된다. 이때의 피뢰기 접지저항 $R_g=0[\Omega]$ 이다. 그림 5는 낙뢰 시 수용가의 모선전압 파형이고, 그림 6은 피뢰기 방전전류 파형을 나타낸다.

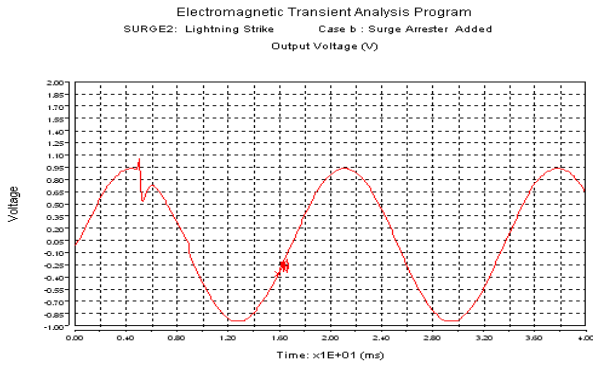


그림 5. 낙뢰 시 수용가 모선전압(피뢰기 설치)
Fig. 5. Customer bus voltage at lightning stroke (with lightning arrester)

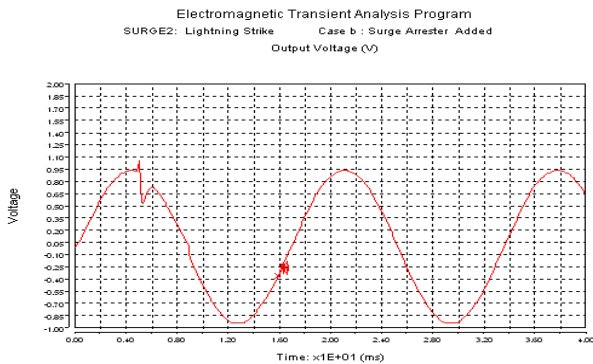


그림 6. 낙뢰 시 피뢰기 방전전류
Fig. 6. Lightning arrester discharging current at lightning stroke

표 2는 $8 \times 20[\mu s]$, $10[kA]$ 의 낙뢰가 배전선로에 급습했을 때, 피뢰기 접지저항을 $0 \sim 100[\Omega]$ 까지 변화시키면서 수용가 모선전압(최고전압)과 피뢰기 방전전류(최고전압이 발생했을 때의 전류)값을 간추려 놓았다. 피뢰기 접지저항만 있을 경우(without Z_{th})와 피뢰기 접지저항과 중성선 등가임피던스가 병렬로 연결되어 있는 경우(with Z_{th})이다.

표 2. 피뢰기 접지저항 영향 - 모선최고전압과 피뢰기 방전전류

Table 2. Lightning arrester grounding resistance effects - bus peak voltage and discharging current

$R_g(\Omega)$	without Z_{th}		with Z_{th}	
	$V_{peak}(pu)$	$I_{LA}(pu)$	$V_{peak}(pu)$	$I_{LA}(pu)$
0	1.198	0.9511	1.198	0.9511
1	1.210	0.9469	1.210	1.007
2	1.223	0.9428	1.222	1.004
3	1.235	0.9387	1.233	1.0
4	1.247	0.9346	1.243	0.9969
5	1.259	0.9305	1.253	0.9937
10	1.319	0.9104	1.296	0.9792
15	1.376	0.8907	1.333	0.9669
20	1.432	0.8716	1.364	0.9564
25	1.486	0.8529	1.389	0.9475
30	1.540	0.8346	1.408	0.94
40	1.645	0.7994	1.436	0.9283
50	1.744	0.7658	1.459	0.92
100	2.178	0.6203	1.519	0.9046

피뢰기 접지저항이 $0 \sim 100[\Omega]$ 까지 변화시키면, 피뢰기 접지저항만 있는 경우는 모선 최고전압이 $1.198 \sim 2.178[pu]$ 까지 상승하였다. 접지저항이 커지면 피뢰기 성능(제한전압)이 떨어짐을 알 수 있다. 또한 피뢰기 접지저항을 중성선에 연결하면, 모선 최고전압이 $1.198 \sim 1.519[pu]$ 가 되어 피뢰기 성능이 약간 개선되었다.

그림 7은 표 2의 데이터를 그래프로 나타내었다.

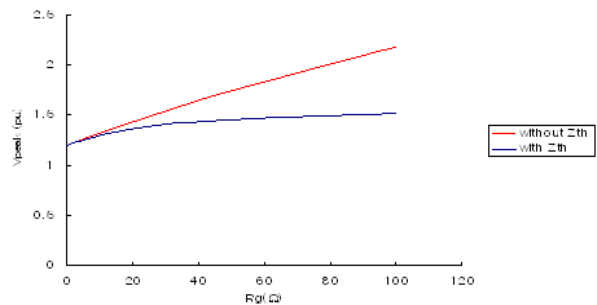


그림 7. 피뢰기 접지저항 영향 - 모선 최고전압
Fig. 7. Lightning arrester grounding resistance effects - bus peak voltage

피뢰기 접지저항 영향으로 낙뢰가 급습했을 때, 피뢰기 접지저항에 걸리는 전압(중성점 전위상승)을 분석하고자 한다.

피뢰기 접지저항이 중성선에 접속되지 않은 경우의 중성점 전위 V_{ng} 는,

$$V_{ng} = R_g \times I_{LAg} [V]$$

여기서 R_g 는 피뢰기 접지저항[Ω]이고, I_{LAg} 는 낙뢰가 급습했을 때의 피뢰기 방전전류[A]이다.

피뢰기 접지저항이 중성선에 접속된 경우의 중성점 전위 V_{ne} 는,

$$V_{ne} = Z_{eq} \times I_{LAe} [V]$$

$$Z_{eq} = \frac{R_g Z_{th}}{R_g + Z_{th}} [\Omega]$$

여기서 Z_{th} 는 중성선 등가임피던스[Ω]이고, I_{LAe} 는 모선최고 전압이 발생했을 때의 피뢰기 방전전류[A]이다.

표 3은 피뢰기 접지저항의 영향으로 중성점 전위와 방전전류를 간추려 놓은 것이고, 그림 8은 그래프로 나타내었다.

표 3. 피뢰기 접지저항 영향 - 중성점 전위와 피뢰기 방전전류

Table 3. Lightning arrester grounding resistance effects - neutral voltage and discharging current

$R_g (\Omega)$	without Z_{th}		with Z_{th}	
	$I_{LAg} (A)$	$V_{ng} (V)$	$I_{LAe} (A)$	$V_{ne} (V)$
0	239.79	0	239.79	0
1	238.73	238.7	253.88	141.0
2	237.70	475.4	253.13	192.1
3	236.66	710.0	252.12	217.3
4	235.63	942.5	251.34	232.2
5	234.60	1173.0	250.53	241.8
10	229.53	2295.3	246.87	261.3
15	224.56	3368.4	243.77	266.5

$R_g (\Omega)$	without Z_{th}		with Z_{th}	
	$I_{LAg} (A)$	$V_{ng} (V)$	$I_{LAe} (A)$	$V_{ne} (V)$
20	219.75	4394.9	241.13	268.0
25	215.03	5375.8	238.88	268.2
30	210.42	6312.5	236.99	267.8
40	201.54	8061.7	234.04	266.7
50	193.07	9653.6	231.95	265.7
100	156.39	15639.0	228.07	263.9

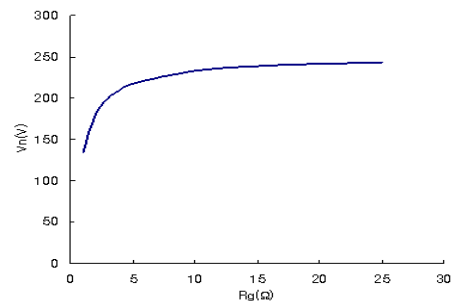
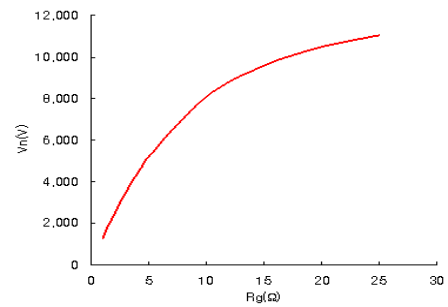


그림 8. 피뢰기 접지저항 영향 - 중성점 전위
Fig. 8. Lightning arrester grounding resistance effects - neutral voltage

피뢰기 접지저항이 중성선에 접속되지 않은 경우, 피뢰기 접지저항이 1~100[Ω]으로 증가되면 중성점 전위는 239~15,639[V]까지 급격하게 증가한다. 국제기준 IEC 60364의 한계치는 상전압+1,200[V]이므로, 피뢰기 접지저항은 5[Ω]이내 이어야 한다. 즉, 피뢰기 접지저항이 5[Ω]일 때 중성점 전위는 1,173[V]이다.

피뢰기 접지저항이 중성선에 접속되는 경우, 피뢰기 접지저항이 1~100[Ω]으로 증가되면 중성점 전위는 141~264[V]까지 조금씩 증가하지만 거의 260[V]에 수렴한다. 즉, 피뢰기 접지저항의 크기에는 민감하지 않다. 따라서 피뢰기 접지저항을 중성선에 접속시

키면 국내의 중성점 전위 상승한도 이내로 유지시킬 수 있다.

3. 결 론

피뢰기는 내습하는 이상전압의 파고 값을 제한 전압으로 저감시켜서 기기를 보호하는 설비이다. 피뢰접지저항은 낙뢰 시 방전전류를 대지로 흘려 보내고, 중성점(접지저항에 걸리는 전압) 전위상승을 억제하는 중요한 역할을 한다. 피뢰기 접지저항의 크기에 따라 변하는 중성점 전위상승과 피뢰기 제한전압을 사례연구 시스템을 통하여 확인하였다.

사례연구시스템의 배전선로에 $8 \times 20[\mu s]$, $10[kA]$ 의 낙뢰가 급습하면, $22.9[kV]$ 수용가 모선에 걸리는 전압은 $125.2[kV]$ 가 되지만, 적용한 피뢰기를 설치하면 수용가 모선 전압은 $27.4[kV]$ 로 저감된다. 단, 피뢰기 접지저항을 $0[\Omega]$ 으로 가정한 경우이다.

피뢰기 접지저항이 $0 \sim 100[\Omega]$ 까지 변화시키면, 피뢰기 접지저항만 단독으로 설치된 경우는 모선 최고 전압이 $1.198 \sim 2.178[pu]$ 까지 상승하였다. 접지저항이 커지면 피뢰기 제한전압이 높아졌다. 또한 피뢰기 접지저항을 중성선에 연결시키면 모선최고전압이 $1.198 \sim 1.519[pu]$ 가 되어 피뢰기 성능이 개선되었다.

피뢰기 접지저항이 $1 \sim 100[\Omega]$ 까지 변화시키면, 피뢰기 접지저항만 단독으로 설치된 경우는 중성점 전위는 $239 \sim 15,639[V]$ 까지 급격하게 증가하였다. 국제기준 IEC를 적용할 경우는 피뢰기 접지저항이 $5[\Omega]$ 이하이어야 한계치 $1,580[V]$ 를 유지한다. 반면에 피뢰기 접지저항을 중성선에 접속하면 중성점 전위는 $141 \sim 264[V]$ 까지 약간 증가하지만 한계치 내로 유지되었다.

피뢰기 접지저항의 크기는 낙뢰 시 중성점 전위상승을 억제하는 중요한 역할을 하므로, 피뢰기 접지는 설비기준에 따라 중성선에 접속해야 하고 접지저항 값은 중성점 전위상승 한계치 이내로 설계 되어야 한다고 사료된다.

이 논문은 2010학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- [1] IEEE Std 142-2007, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [2] IEEE Std 1100-2005, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment.
- [3] G. Vijayaraghavan, M. Brown and M. Barnes, Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection, Elsevier book co., 20004.
- [4] National Electrical Safety Code, 2006 Edition.
- [5] CCITT(International Telegraph and Telephone Consultative Committee) Recommendation, 1993.
- [6] IEC 60364, The International Electrotechnical Commission.
- [7] J. Endrenyi, "Analysis of transmission tower potentials during ground faults," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, no.10, pp. 1274-1283, Oct. 1967.
- [8] Ljubivoje M. Popovic, "Practical Method for Evaluation Ground fault Current Distribution in Station, Towers and Ground Wire," IEEE Transaction on power Delivery vol. 13, pp 123-128, Jan. 1998.
- [9] EDSA User's Guide, "Electromagnetic Transient Analysis Program", EDSA micro co., 2009.

◆ 저자소개 ◆



김경철(金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988년 UTA 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.



정지원(鄭地元)

1984년 3월 18일생. 2010년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2010년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



이규진(李圭珍)

1984년 6월 22일생. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2009년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.