

국내 배전계통의 가공지선 접지조건에 따른 뇌서지 영향 분석

Analysis of Effect on Lightning Surge according to the Grounding Condition of Overhead Ground Wire in Distribution System

한 준* · 김 철 환[†] · 서 훈 철^{**} · 최 선 규^{***} · 이 병 성^{***}

(Joon Han · Chul-Hwan Kim · Hun-Chul Seo · Sun-Kyu Choi · Byung-Sung Lee)

Abstract - The Korean distribution system consists of overhead ground wire (OHGW), phase conductors and neutral wire. Especially, OHGW is installed over the phase conductors to protect distribution system from the lightning surge. The flashover rate and the magnitude of lightning overvoltage on distribution system can be affected by grounding condition of OHGW such as grounding resistance and grounding interval. In this paper, we conduct an analysis of lightning overvoltage and flashover rate according to the grounding condition of OHGW. The distribution system and lightning surge are modeled by using ElectroMagnetic Transient Program (EMTP). Also, the Monte Carlo method is applied to consider random characteristics of lightning, and the flashover rate is calculated based on IEEE std. 1410. The simulations are performed by changing the grounding resistance and interval of OHGW and the simulation results are analyzed.

Key Words : EMTP, Flashover rate, Grounding condition, Lightning surge, Overhead ground wire, Overvoltage

1. 서 론

전력계통을 구성하는 송배전선로는 다양한 위험 요소들에 노출되어 있으며, 이 중 빈번하게 발생하는 낙뢰로 인한 피해는 심각하다고 볼 수 있다. 국내의 배전계통은 주로 도심지 부근에 밀집되어 있으며, 가공지선의 높이를 포함해 주변 구조물의 높이가 높기 때문에 뇌격 침입 시 대부분의 서지는 건물에 의해 차폐되거나 흡인되어 실제로 계통에 미치는 영향은 약화된다. 그러나 도심지 외곽이나 산간, 해안지역에서의 배전계통은 도심지와는 달리 선로 주변에 서지를 흡수할 수 있는 구조물이 적기 때문에 가공지선에 직격뢰가 침입할 가능성이 높다[1]. 직격되는 선로 주변, 수목, 대지 등에 침입한 뇌격의 간접적인 영향으로 인한 정전유도나 전자유도에 의해 발생하는 유도뢰와는 달리 선로 및 지지물을 직접 가격하는 형태의 낙뢰이다. 직격뢰의 발생 빈도는 유도뢰에 비해 적으나 직격뢰로 인하여 배전계통에서 발생하는 과전압은 애자의 섬락 또는 절연과피 등의 위험을 야기시킬 뿐만 아니라 전력계통 내에 설치된 장비들에 치명적인 피해를 입힐 수 있기 때문에 전력품질 및 전력계통 보호 측면에서 상당한 이슈가 되고 있다[2-5].

현재, 한국전력공사의 규격을 따른 국내 배전계통에는 내뢰보호를 위한 설비로써 가공지선 및 피뢰기가 설치되어 있다. 이 중 가공지선은 가능한 한 직격뢰의 침입을 방지하기 위하여 차폐각이 45[°]가 되도록 설치하고 있으며, 가공지선의 접지간격과 접지저항은 한전의 설비기준에 따른 값을 적용하고 있다[6]. 하지만 가공지선의 설치로 인한 직격뢰의 차폐효과에도 불구하고, 낙뢰 발생 시 선로에 발생하는 과전압 및 섬락의 발생 유무는 전력계통의 보호와 직결되는 중요한 요소이기 때문에 다양한 가공지선 접지조건을 고려하여 뇌서지에 의한 영향을 분석하는 것은 전력계통의 보호 및 절연설계 측면에 있어 매우 중요하다고 볼 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 주변에 건물이 존재하지 않는 배전계통에서 직격뢰 발생 시 가공지선의 접지조건에 따른 뇌과전압 및 섬락률을 분석하였다. 우선 국내 한국전력 배전계통의 설비기준 및 가공지선의 역할을 설명하고, EMTP를 이용하여 국내 배전선로 및 낙뢰 모델링에 관한 내용을 제시하였다. 또한, 가공지선의 접지조건으로써 접지저항과 접지간격에 따른 뇌과전압을 분석하기 위해 뇌서지 전달특성의 이론적 분석을 제안하였으며, 몬테카를로 기법을 도입하여 IEEE std. 1410에서 제시한 방법을 기반으로 가공지선의 접지조건에 따른 섬락률을 계산하고 그 결과의 비교 및 분석을 수행하였다.

2. 국내 배전계통 설비기준 및 가공지선의 역할

2.1 국내 배전선로 구성

국내 배전 시스템은 22.9[kV] Y결선의 3상 4선식 고압선로를 통해 수용가 측에 전기를 공급하는 형태이다. 한국전력공사의 기준에 따르면, 현재 국내의 배전선로는 중성점 다중 접지계통으로 구성되어 있다. 중성선과 가공지선은 매

[†] Corresponding Author : College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

E-mail : hmwkim@hanmail.net

* College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

** School of IT Engineering, Yonam Institute Digital Technology

*** Korea Electric Power Research Institute

Received : October 15, 2013; Accepted : January 27, 2014

전주마다 상호 접속되어 있으며, 접지저항은 300[Ω]이고 전주 사이의 표준 경간은 50[m]이다. 또한 가공지선의 접지 간격은 200[m]이며, 중성선과 공용하여 접지하고 접지저항은 50[Ω]으로 규정되어 있다. 피뢰기의 경우는 기본적으로 500[m] 간격마다 설치되어 있으며, 이 때 피뢰기의 접지저항 값은 25[Ω]을 적용하고 있다[6-7].

2.2 국내 배전선로 구성

배전선로에 직격뢰가 침입한 경우, 가공지선이 배전선로를 보호하는 원리는 유도뢰의 경우와 유사한 상도체와의 전자 결합에 의한 것이다. 가공지선은 1차적으로 뇌격 전류를 분류하여 접지 측으로 흐르는 전류를 감소시키고, 대지전위의 상승을 저감함으로써 애자간 전압을 억제하여 접지 측에서 상도체로의 역섬락을 방지한다[7].

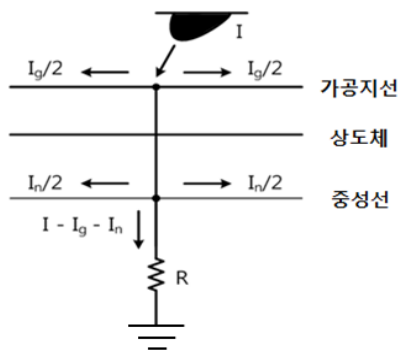


그림 1 가공지선의 뇌격 차폐 효과
Fig. 1 Lightning shielding effect of OHGW

그림 1은 가공지선이 접지된 전주에 뇌격이 가해진 경우의 직격뢰 차폐 원리를 나타낸 것이다. 만약에 가공지선이 존재하지 않는 배전선로에 뇌격이 침입할 경우, 뇌격 전류는 전주의 접지 측으로 흐르기 때문에 대지전위 상승은 $(I \times R)$ 이 된다. 또한 배전선을 지지하고 있는 애자의 단자 간에는 $-(I \times R)$ 만큼의 전압이 유기된다. 이 때, 이 전압이 절연 내력을 초과하면 섬락이 발생한다.

그러나, 가공지선이 설치된 배전선로에서는 뇌격 전류가 가공지선과 중성선의 양측으로 분류되며, 접지 측에는 $(I - I_g - I_n)$ 의 전류가 흐른다. 따라서 가공지선이 없는 경우와 비교하여 애자간의 전위는 $R \times (I_g + I_n)$ 만큼의 전압이 감소하게 되어 애자간의 전압도 억제된다. 만약, 가공지선이 접지되어 있지 않은 전주에 뇌격이 침입할 경우에는 콘크리트 전주 접지에 의해 접지저항 R이 커지게 되므로 대지전위 억제 효과는 감소하고, 그 결과로 애자간 전압의 억제 효과 또한 접지가 이루어진 경우에 비해 감소하게 되는 원리이다.

3. 직격뢰 해석을 위한 배전계통 및 뇌격 모델링

3.1 배전계통 모델링

2.1절에서 설명한 한전의 배전계통 설계 기준을 바탕으로 EMTP를 이용하여 22.9[kV]의 배전선로 모델링을 수행하였다. 본 논문에서 검토한 선로 모델은 주변에 건물이 존재하지 않는 경우를 고려하여 총 선로의 길이가 2[km]인 기본선

로를 구현하였으며, 배전선로를 구성하는 선종의 구성은 다음 표 1과 같다.

표 1 배전선로 파라미터
Table 1 Parameter of distribution line

구분	선종	내반경 [cm]	외반경 [cm]	지상고 [m]	전기저항 [Ω/km DC]
가공지선	ACSR 32mm ²	0.13	0.39	14.8	0.899
상도체	ACSR 160mm ²	0.39	0.91	13.3	0.182
중성선	ACSR 95mm ²	0.225	0.675	12.1	0.301

3.2 뇌격 모델링

본 논문에서 낙뢰에 의한 배전계통의 영향을 분석하기 위해 적용한 뇌격 전류의 파형은 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 국내·외 연구를 근거로 하여 파두장과 파미장은 2/70[μs]로 선정하였다[8-10]. 또한 EMTP는 뇌격을 모의하기 위한 다양한 모델을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 직격뢰의 파형을 모의하기 위하여 Heidler type source를 기반으로 모델링을 수행하였다. 모델링 된 뇌격 파형은 가공지선에 인가되며, 본 논문에서는 2005년~2010년간 국내의 KLDNet (Kepeco Lightning Detection Network)에 의하여 측정된 국내 뇌격 전류의 median 값인 20[kA]의 뇌격 크기를 고려하였다.

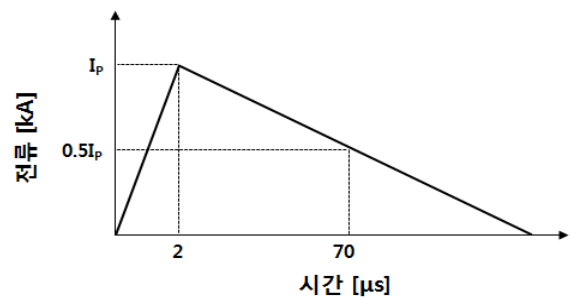


그림 2 뇌격 전류 파형
Fig. 2 Waveform of lightning current

4. 가공지선 접지저항에 따른 과전압 분석

4.1 가공지선 접지저항 변화에 따른 뇌서지 전달 특성의 이론적 분석

가공지선이 존재하는 배전선로에 뇌서지 침입 시, 가공지선의 접지저항 크기에 따라 발생하는 과전압의 크기가 달라질 수 있다. 우선, 가공지선의 접지저항 크기에 따른 뇌서지의 전달 특성을 해석하기 위한 이론적 분석을 수행하였으며, 이를 검토하기 위한 배전선로의 등가회로는 그림 3과 같이 표현할 수 있다. 또한, 그림 3에서 각 파라미터의 의미는 다음과 같이 정의된다.

- Z_{ch} : 뇌 채널의 임피던스 [Ω]
- Z_{GWeq} : 해석대상 전주를 제외한 가공지선의 테브난 등가 임피던스 [Ω]
- Z_{Peq} : 해석대상 전주를 제외한 상도체의 테브난 등가 임피던스 [Ω]
- Z_{Neq} : 해석대상 전주를 제외한 중성선의 테브난 등가 임피던스 [Ω]
- Z_{pole} : 전주 임피던스 [Ω]
- Z_{d1} : 가공지선과 중성선 사이의 접지인하선의 임피던스 [Ω]
- Z_{d2} : 중성선과 대지 사이의 접지인하선의 임피던스 및 접지저항의 합 [Ω]
- Z_M : 가공지선과 상도체 사이의 상호 임피던스 [Ω]
- I_{light} : 뇌격 전류 [A]
- I_{GWeq} : 가공지선의 등가 임피던스에 흐르는 전류 [A]
- I_{Peq} : 상도체의 등가 임피던스에 흐르는 전류 [A]
- I_{Neq} : 중성선의 등가 임피던스에 흐르는 전류 [A]
- I_{pole} : 전주를 통하여 대지로 흐르는 전류 [A]
- I_{d1} : 가공지선과 중성선 사이의 접지인하선에 흐르는 전류 [A]
- I_{d2} : 중성선과 대지 사이의 접지인하선에 흐르는 전류 [A]
- I_M : 상호 임피던스에 흐르는 전류 [A]
- V_{PN} : 상도체와 중성선 사이의 전압 [V]
- V_{PG} : 상도체와 대지 사이의 전압 [V]
- V_{NG} : 중성선과 대지 사이의 전압 [V]

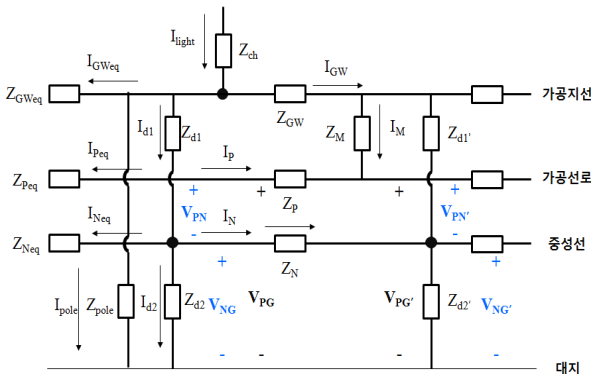


그림 3 배전선로 전주의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of distribution line's pole

그림 3을 바탕으로 뇌서지가 배전선로에 침입할 경우 상도체와 중성선 사이에 걸리는 전압은 다음 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{PG} = Z_{ch}I_{light} - Z_{pole}I_{pole} - Z_M I_M = Z_{Peq}I_{Peq} \quad (1)$$

$$V_{NG} = (Z_{ch}I_{light} - Z_{pole}I_{pole} - Z_{GW}I_{GW}) - Z_{d1}I_{d1} = Z_{d2}I_{d2} \quad (2)$$

$$V_{PN} = V_{PG} - V_{NG} = Z_{Peq}I_{Peq} - Z_{d2}I_{d2} \quad (3)$$

배전선로에 뇌서지 침입 시 뇌격 전류는 1차적으로 가공지선의 양측으로 분류되며, 나머지 전류는 접지인하선을 따라 중성선과 접지 측으로 흐르게 된다. 이 때 가공지선과

상도체 사이의 상호 임피던스에 의해 상도체에 흐르는 전류 보다는 중성선과 접지 측으로 흐르는 전류가 더욱 크기 때문에 위의 식 (3)에서 $I_{Peq} < I_{d2}$ 의 관계가 성립한다. 따라서 $Z_{Peq}I_{Peq} < Z_{d2}I_{d2}$ 의 관계가 성립되는 것이다. 만약에 가공지선의 접지저항이 증가하게 되면, Z_{d2} 가 증가하게 되고 $Z_{d2}I_{d2}$ 의 값이 증가하여 V_{PN} 의 전체 값은 감소하게 된다. 그러나 V_{PN} 의 부호는 (-)이므로 (-)에 대한 최대값은 더욱 커지게 된다. 즉, V_{PN} 의 절대값의 크기가 커지므로 가공지선 접지저항의 크기가 증가하면 대지전위 상승에 의해 과전압의 크기 또한 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 가공지선 접지저항에 따른 시뮬레이션

4.2.1 시뮬레이션 조건

직격뢰 발생 시 가공지선의 접지저항 크기에 따른 뇌 과전압을 분석하기 위한 조건은 표 2에 나타내었다. 가공지선의 접지저항은 현행 기준인 50[Ω] 및 중성선의 접지저항인 300[Ω]을 포함하여 10[Ω]~300[Ω] 범위 내에서 다양하게 고려하였으며, 가공지선의 접지간격은 현행 기준과 동일한 200[m]이다.

표 2 시뮬레이션 조건
Table 2 Simulation conditions

가공지선 접지저항 [Ω]	가공지선 접지간격 [m]	뇌격 전류 [kA]	과전압 측정위치 [m]
10~300	200	20	뇌격 전주, 200, 400, 800

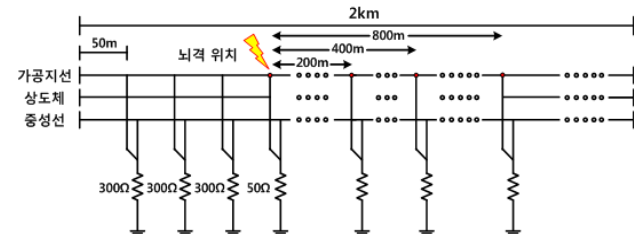


그림 4 뇌격 위치와 과전압 측정 지점
Fig. 4 Lightning position and overvoltage's observation points

또한, 가공지선의 접지저항 크기에 따른 영향을 직접적으로 살펴보기 위하여 뇌격의 위치는 그림 4와 같이 선로 시작점으로부터 최초로 가공지선 접지가 이루어진 200[m] 지점을 선정하였다. 또한 과전압 측정 지점은 뇌격이 발생한 뇌격 전주를 비롯하여 뇌격 지점으로부터 근거리에서 위치한 200[m] 지점, 뇌격 위치 이후에 피뢰기가 설치된 전주와 100[m] 이격된 400[m] 지점, 그리고 뇌격 지점으로부터 장 거리에 위치한 800[m]로 선정하였으며, 뇌격 발생 시 상도체와 중성선 사이의 과전압을 측정하여 과전압의 측정 거리에 따른 뇌서지 전달 특성 또한 검토하였다.

4.2.2 시뮬레이션 결과

다음 표 3은 가공지선의 접지저항 크기에 따른 직격뢰 침

입 시의 뇌 과전압을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과를 통해 가공지선의 접지저항의 크기가 증가할수록 과전압의 크기가 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 4.1절에서 제시한 이론적 분석의 결과와 동일한 경향을 보인다.

표 3 시뮬레이션 결과

Table 3 Simulation results

가공지선 접지저항 [Ω]	과전압 크기 [kV]			
	과전압 측정위치			
	뇌격 전주	200 [m]	400 [m]	800 [m]
10	264.01	83.188	41.925	39.945
30	282.06	103.38	45.917	40.416
50	298.52	133.43	48.413	40.747
100	327.48	176.73	51.237	41.196
200	352.12	193.62	52.249	42.279
300	382.89	206.35	53.38	43.116

표 3을 통하여 뇌격이 가해진 뇌격 전주 및 뇌격 전주와 근접한 200[m] 범위 내에서는 가공지선의 접지저항 크기에 관계없이 대부분 CFO 값인 180[kV]를 초과하는 상당한 크기의 뇌 과전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 뇌격 전주 및 200[m]의 측정 위치에서는 접지저항 크기에 따른 뇌 과전압의 변동폭이 매우 큰 경향을 보인다.

반면에, 뇌격 전주와 400[m] 이격된 지점부터는 가공지선의 접지저항 크기에 따른 뇌 과전압의 크기 및 변동폭이 크게 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 200[m] 지점과 400[m] 지점 사이에 설치된 피뢰기의 동작으로 인해 뇌서지의 일부를 대지로 흘려보냄으로써 뇌 과전압의 크기를 피뢰기의 제한전압 이하로 감소시키기 때문이다.

즉, 뇌 과전압의 측정 위치가 뇌격 지점으로부터 멀어질수록 주기적으로 이루어진 가공지선의 접지와 피뢰기 설치의 영향으로 인해 뇌서지가 대지로 흡인되므로 뇌서지의 전달 특성이 감소되어 뇌 과전압은 점점 낮아지게 되는 것이다.

또한, 위의 시뮬레이션 결과를 통하여 가공지선 접지저항에 따른 뇌 과전압의 크기는 일정한 비율로 변동하는 것은 아니며, 본 논문에서 고려한 시뮬레이션 조건에 대해서는 현행 기준인 50[Ω]을 초과하는 가공지선 접지가 이루어진 경우에는 평균적으로 8.6[%]의 전압변동을 보이고 있으며, 50 [Ω] 이하의 가공지선 접지가 이루어진 경우에는 약 14.2[%]의 전압변동을 나타내고 있다. 결론적으로, 현행 기준보다 낮은 크기의 접지저항이 고려된 경우에 과전압 감소 측면에서 더욱 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 가공지선 접지간격에 따른 과전압 분석

5.1 가공지선 접지간격에 따른 뇌서지 전달 특성의 이론적 분석

가공지선의 접지간격에 따른 영향은 앞선 4.1절에서 제안

한 식 (3)을 통하여 분석할 수 있다. 식 (3)에서 Z_{d2} 항은 가공지선 접지저항의 크기와 관련된 항으로써, 가공지선의 접지간격에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 우선, 가공지선의 접지간격에 따른 영향을 분석하기 위해서 일정한 길이를 갖는 배전선로 구간을 가정하였으며, 다음과 같은 파라미터들을 정의하였다

X : 전체 배전선로의 길이 [km]

N : X [km] 내 모든 접지의 수

N₁ : X [km] 내 가공지선 접지의 수

Z_g : 가공지선의 접지 임피던스 [Ω]

Z_c : 가공지선과 중성선의 공통접지 임피던스 [Ω]

Z_{geq} : 가공지선의 접지 등가 임피던스 [Ω]

Z_{ceq} : 가공지선과 중성선 공통접지의 등가 임피던스 [Ω]

Z_{d2eq} : 일정한 구간 X [km] 내 전체 접지의 등가 임피던스 [Ω]

$$Z_{geq} = (Z_{g1} // Z_{g2} // Z_{g3} // \dots // Z_{gn}) = \frac{Z_g}{N_1} \tag{4}$$

$$Z_{ceq} = (Z_{c1} // Z_{c2} // Z_{c3} // \dots // Z_{cn}) = \frac{Z_c}{N - N_1} \tag{5}$$

$$Z_{d2eq} = \left(\frac{Z_g}{N_1} // \frac{Z_c}{N - N_1} \right) = \frac{Z_g Z_c}{N_1 (Z_c - Z_g) + Z_g N} \tag{6}$$

Z_{d2eq} 크기의 변화를 고려하여 그림 3과 식 (3)에 적용하면, Z_{d2eq}는 Z_{d2}와 관련된 파라미터로 볼 수 있다. 그러므로 식 (6)에서, 가공지선의 접지간격이 증가하게 되면 가공지선의 접지 수 N₁은 감소하게 되고, 따라서 전체 등가 임피던스 Z_{d2eq}는 증가한다. 또한, 전체 등가 임피던스 Z_{d2eq}는 식 (3)에서 전체 등가 임피던스 Z_{d2}와 동일하다고 볼 수 있다. 만약 Z_{d2}가 증가하게 되면 식 (3)에서 V_{PN}이 감소하게 되지만, V_{PN}의 부호는 (-)이므로 (-) peak 값은 더욱 증가한다. 즉, V_{PN}의 절대값의 크기는 증가한다.

반면에, 가공지선의 접지간격이 감소하게 되면 가공지선의 접지 수 N₁은 증가하고, 따라서 전체 등가 임피던스 Z_{d2eq}는 감소하게 된다. 위와 동일하게 Z_{d2eq}를 식 (3)에서 전체 등가 임피던스 Z_{d2}로 고려한다면, Z_{d2}가 감소할 경우 식 (3)에서 V_{PN}이 증가하게 된다. 그러나, V_{PN}의 부호가 (-)이므로 (-) peak 값은 감소한다. 즉, V_{PN}의 절대값의 크기는 감소한다.

5.2 가공지선 접지간격에 따른 시뮬레이션

5.2.1 시뮬레이션 조건

직격뢰 발생 시 가공지선의 접지간격에 따른 뇌 과전압을 분석하기 위한 조건은 다음 표 4에 나타내었다. 가공지선의

표 4 시뮬레이션 조건

Table 4 Simulation conditions

가공지선 접지간격 [m]	가공지선 접지저항 [Ω]	뇌격 전주 [kA]	과전압 측정위치 [m]
50~500	50	20	뇌격 전주, 200, 400, 800

접지간격은 현행 기준인 200[m]를 포함하여 50~500[m] 범위 내에서 다양하게 고려하였으며, 가공지선의 접지저항은 현행 기준과 동일한 50[Ω]이다.

또한, 4.2.1절과는 달리 선로 시작점으로부터 가공지선 접지간격에 따른 영향만을 직접적으로 살펴보기 위하여 뇌격의 위치를 선로의 가장 앞부분으로 선정하였으며, 과전압 측정 지점은 뇌격이 발생한 뇌격 진주를 비롯하여 뇌격 위치로부터 근거리에서 위치한 200[m] 지점과 400[m] 지점, 그리고 피뢰기가 설치된 전주와 300[m] 이격된 800[m]로 선정하여 뇌격 발생 시 상도체와 중성선 사이의 전압을 측정하였다.

5.2.2 시뮬레이션 결과

다음 표 5는 가공지선의 접지 간격에 따른 직격뢰 침입 시의 뇌 과전압을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과를 통하여 가공지선의 접지간격이 증가할수록 뇌격 발생 시의 과전압의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞선 5.1절에서 제시한 가공지선의 접지간격에 따른 뇌서지 전달 특성의 이론적 분석 결과와 동일한 경향을 보여준다.

표 5 시뮬레이션 결과
Table 5 Simulation results

가공지선 접지간격 [m]	과전압 크기 [kV]			
	과전압 측정위치			
	뇌격 전주	200 [m]	400 [m]	800 [m]
50	327.48	183.01	140.35	45.027
100	327.48	231.25	187.97	45.604
200	327.48	256.03	213.51	46.204
300	327.48	274.47	218.83	47.572
400	327.48	288.23	225.78	49.075
500	327.48	311.78	231.12	53.205

표 5에서 접지간격에 관계없이 측정위치가 0[m], 즉 뇌격 전주에서의 과전압이 동일한 이유는 모든 시뮬레이션 조건에서 뇌격이 발생한 선로 시작 부분의 접지저항 값이 동일하기 때문이다. 반면에 과전압 측정위치가 200[m], 400[m], 그리고 800[m]인 경우에는 가공지선의 접지간격 변화에 따라 과전압의 크기가 변동하는 형태를 보이며, 가공지선의 접지간격이 증가할수록 과전압의 상승폭은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 가공지선의 접지간격에 따른 뇌 과전압의 크기는 일정한 비율로 변동하는 형태를 보이지는 않으며, 본 논문에서 고려한 시뮬레이션 조건에 대해서는 현행 기준인 200[m]를 초과하는 가공지선 접지저항인 경우에는 평균적으로 9.16[%]의 전압변동을 보이며, 200[m] 이하의 가공지선 접지저항인 경우에는 약 14.7[%]의 전압변동을 나타내고 있다.

반면에 뇌격 전주로부터 800[m] 이격된 지점에서는 500[m] 지점에 설치된 피뢰기의 제한전압 특성에 의해 과전압의 크기가 감소하여 낮은 크기의 과전압이 측정되며, 이

경우에도 가공지선의 접지간격에 따라 과전압의 크기는 증가하나 그 변동폭은 낮은 것을 확인할 수 있다.

6. 가공지선 접지조건에 따른 섬락률 분석

앞서 제시한 제 4절과 제 5절의 내용에서는 직격뢰 발생 시에 가공지선의 접지조건으로써 접지저항 및 접지간격의 변화에 따라 뇌 과전압의 크기에 미치는 영향을 분석하였으며, 이러한 뇌 과전압은 실제로 전력시스템의 고장 및 전력설비들의 섬락 유발과 직접적으로 관련이 있다. 전력계통에서 발생하는 낙뢰 사고는 대부분 유도뢰에 의한 경우가 일반적이나 섬락률을 판단하는 기준인 섬락의 발생여부는 유도뢰에 의한 영향보다는 직격뢰에 의한 영향을 크게 받는다. 즉, 섬락률의 수치는 대부분 직격뢰에 의한 섬락의 빈도와 직결되어 있다고 볼 수 있다. 이는 유도뢰로 인해 발생하는 과전압보다 직격뢰로 인해 발생하는 과전압의 크기가 상대적으로 매우 크기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서, 본 절에서는 낙뢰 시의 가공지선의 접지조건에 따른 섬락률을 평가하기 위하여 앞 절에서 분석한 가공지선 접지저항 및 접지간격 조건을 고려하여 동일한 조건 하에서 섬락률을 계산하고 분석을 수행하였다.

일반적으로 뇌격은 불규칙한 특성을 갖기 때문에 뇌격의 크기 및 위치는 다양하게 발생한다. 이러한 낙뢰 자체의 랜덤한 특성을 고려하여 뇌 과전압에 의한 섬락률을 계산하기 위하여 Monte Carlo 기법을 적용하였으며, 국내의 KLDNet에서 측정된 뇌격 전류의 누적확률 분포 함수를 기반으로 IEEE std. 1410에서 제시한 섬락률 산정 방식을 적용하여 섬락률을 계산하였다[11].

다음 그림 5는 가공지선의 접지저항에 따른 섬락률을 나타낸 것이다. 현행 기준인 50[Ω]의 접지저항인 경우에는 2.72[건/100km/year]의 섬락률이 계산되었으며, 가공지선의 접지저항을 10[Ω]으로 낮출 경우의 섬락률은 2.58[건/100km/year]로써, 약 5.4[%]의 섬락률 감소 효과를 보였다. 반면에, 가공지선의 접지저항이 높아질 경우에는 섬락률이 증가하는 경향을 보이며, 현행 기준과 비교했을 때 평균적으로 약 3.9[%]의 증가율을 보이고 있다. 이는 가공지선의 접지저항 증가에 따른 뇌 과전압 크기의 상승으로 인한 영향이라고 볼 수 있다.

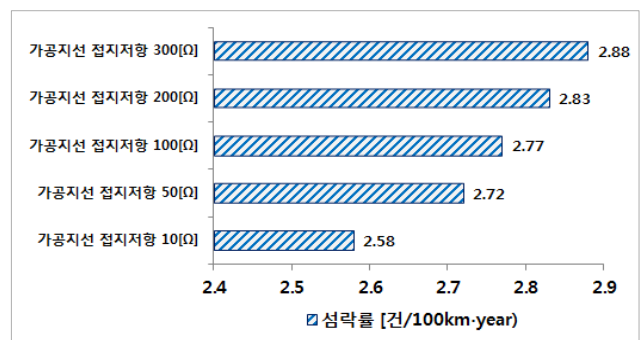


그림 5 가공지선 접지저항에 따른 섬락률
Fig. 5 Flashover rate according to the grounding resistance of OHGW

그림 6은 가공지선 접지간격에 따른 섬락률을 나타낸 것이다. 가공지선의 접지간격을 50[m]와 100[m]로 낮출 경우의 섬락률은 2.49[건/100km/year]과 2.61[건/100km/year]으로 현행 기준이 적용된 경우에 비해 각각 9.2[%], 4.2[%]의 감소율을 보였으며, 이는 가공지선의 접지저항 값을 낮추는 것보다는 가공지선의 접지간격을 낮추는 것이 섬락률을 효과적으로 감소시킬 수 있다는 것을 보여준다. 반면에 가공지선의 접지간격을 높일 경우에는 평균적으로 9.1[%]의 증가율을 보이고 있으며, 500[m]의 경우에 대해서는 현행 기준인 200[m]와 비교하여 섬락률이 최대 11.5[%] 증가하였다.

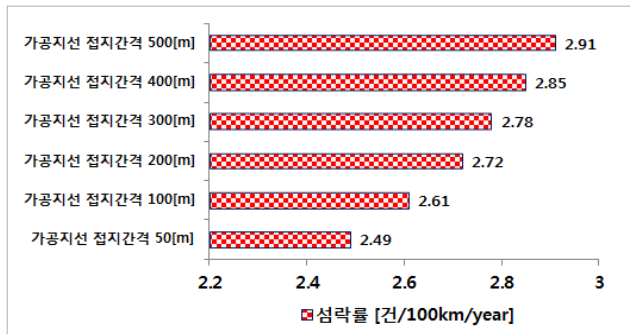


그림 6 가공지선 접지간격에 따른 섬락률
 Fig. 6 Flashover rate according to the grounding interval of OHGW

7. 결 론

본 논문에서는 낙뢰 발생 시, 국내 배전시스템의 가공지선 접지조건에 따른 뇌서지 영향을 분석하였다. 한전의 기준을 기반으로 하여, 낙뢰로 인한 영향을 평가하고 다양한 경우를 모의하기 위해 EMTP를 이용하여 국내의 실제적인 배전선로 모델링을 수행하였으며, 다양한 시뮬레이션을 통해 낙뢰 발생 시 가공지선 접지조건에 따른 과전압 및 섬락률 크기에 대한 비교 및 분석을 수행하였다. 본 논문의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 가공지선의 접지저항이 현행 기준인 50[Ω]을 초과하는 경우에는 평균적으로 8.6[%]의 전압변동을 보이고 있으며, 50[Ω] 이하의 가공지선 접지저항인 경우에는 약 14.2[%]의 전압변동을 나타내었다.
- (2) 가공지선의 접지간격이 현행 기준인 200[m]를 초과하는 경우에는 평균적으로 9.16[%]의 전압변동을 보이고 있으며, 200[m] 이하의 가공지선 접지저항인 경우에는 약 14.7[%]의 전압변동을 나타내었다.
- (3) 위의 (1), (2)를 통해서 낙뢰 발생 시 뇌 과전압의 크기는 가공지선의 접지저항보다는 접지간격 변화에 따른 영향을 더욱 크게 받는 것을 확인할 수 있다. 또한, 섬락률의 경우에도 가공지선의 접지저항보다는 접지간격의 변화에 대해서 비교적 큰 변동폭을 보였으며, 가공지선의 접지저항 값을 저감시키는 경우보다 접지간격을 감소시키는 경우에 섬락률의 감소 효과가 더욱 뚜렷하였다.

상기의 결과를 통해서 가공지선의 접지조건이 배전선로에서 발생하는 뇌 과전압의 크기 및 섬락률에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 특히, 가공지선의 접지저항보다는 접지간격의 변화에 대한 접지조건이 뇌 과전압 및 섬락률의 발생 빈도에 더욱 큰 영향을 미치므로 뇌서지에 대한 배전선로의 보호를 위해서는 가공지선의 접지저항 값을 저감시키는 것보다는 가공지선의 접지간격을 감소시키는 것이 뇌 과전압 및 섬락률을 효과적으로 낮출 수 있다고 볼 수 있다.

추후 연구에서는 가공지선뿐만 아니라 피뢰기의 영향 또한 고려하여 다양한 가공지선 접지조건과 피뢰기 설치조건에 따른 연구를 수행함으로써 최적의 내뢰설비 설치조건에 대한 검토가 이루어질 것이다.

References

- [1] "Study on the isolation design of distribution line", KEPRI, 1992. 3.
- [2] A. J. Eriksson, M. F. Stringfellow, and D. V. Meal, "Lightning-induced overvoltages on overhead distribution lines", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-101, pp. 960-969, Apr. 1982.
- [3] Mario Paolone, Carlo Alberto Nucci, Emanuel Petrache, and Farhad Rachidi, "Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 423-431, January 2004.
- [4] Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Mario Paolone, "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 684-692, January 2007.
- [5] Vernon Cooray, "Lightning Protection", IET Power and Energy Series 58.
- [6] Keon-Woo Park, Hun-Cheol Seo, Chul-Hwan Kim, Chang-Soo Jung, Yeon-Pyo Yoo, Yong-Hoon Lim, "Analysis of the Neutral Current for Two-Step-Type-Pole in distribution Lines", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1483-1489, July 2009.
- [7] "Design Standard-3800", Korea Electric Power Corporation
- [8] S. Yokoyama and A. Asakawa "Experimental Study of Response of Power Distribution Lines to Direct Lightning Hits", IEEE Transmission and Distribution Committee, September 1, 1988.
- [9] CRIEPI, "Guide of Lightning Protection Design for Power Distribution Lines", JAPAN, 2002.
- [10] "A Study on the Establishment of Insulation Coordination Scheme in distribution System", Korea

Electric Power Corporation, May, 2003.

- [11] "Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines", IEEE Std 1410, 2010, IEEE Working Group on the lightning performance of distribution lines.

저 자 소 개



최 선 규 (崔 璇 奎)

1973년 9월 26일생, 2000년 고려대 전기공학과 졸업, 2002년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 한전 전력연구원 선임연구원
 Tel : 042-865-5961
 Fax : 042-865-5809
 E-mail : skchoi@kepri.re.kr



한 준 (韓 準)

1986년 2월 7일생. 2011년 순천향대 정보통신공학부 졸업. 2013년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
 Tel : 031-290-7166
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : j3angh@gmail.com



이 병 성 (李 丙 成)

1968년 8월 17일생, 1993년 충남대 전기공학과 졸업, 1995년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전 전력연구원 책임연구원
 Tel : 042-865-5960
 Fax : 042-865-5809
 E-mail : leebse@kepri.re.kr



김 철 환 (金 喆 煥)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장
 Tel : 031-290-7124
 Fax : 031-299-4137
 E-mail : hmwkim@hanmail.net



서 훈 철 (徐 熏 徹)

1982년 1월 19일생. 2004년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2006년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 2013년 동 대학 정보통신대학 졸업(박사). 2013년 9월~2014년 1월 영남대학교 박사 후 연구원. 2014년 3월~현재 연암공업대학 조교수
 Tel : 055-751-2059
 Fax : 055-751-2053
 E-mail : hunchul12@yc.ac.kr