

낙뢰에 의한 송전선로의 차폐실패 사고율 계산 알고리즘 검토

강연욱, 광주식  
한전 전력연구원

The Study on the Calculation Algorithm of Lightning Shielding Failure Outage Rates

Y. W. Kang, J. S. Kwak  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 산업이 고도화되고 전력수요가 증가함에 따라 전력의 안정적인 공급에 대한 국민들의 요구가 점점 증가하고 있다. 그러나 전력을 수송하는 대부분의 송전선로는 가공 송전선로로서 낙뢰에 의한 고장에 노출되어 있어 한전에서는 이를 최소화하려는 노력을 하고 있다. 현재 한전에서는 연간 100km당 1건 이내로 낙뢰에 의한 고장을 제한하는 것을 목표로 설계하여 운영하고 있으나 낙뢰에 의한 고장을 더욱 감소시키기 위하여 각종 내뢰 시책을 시행하고 있다. 이를 위해서는 근본적으로 낙뢰에 의한 송전선로의 고장을 가능한한 정확하게 예측하는 것이 중요하며, 본 논문에서는 낙뢰 고장 예측 계산을 위해 중요한 요소인 차폐실패 고장률 계산 알고리즘을 검토하고자 한다.

1. 서 론

전력계통에서 썬지는 대단히 파괴적일 수 있다. 그러므로 경제성을 고려하여 가능한 모든 곳에서 썬지로부터 전력실비를 보호하는 것은 중요하다.

스위칭 썬지나 지락 고장에 의해 발생하는 썬지는 정상적인 계통운전을 위한 피할 수 없는 결과이므로 수용해야 하지만, 그것들의 영향은 투입저항에 의한 스위칭 썬지의 감소와 같은 세심한 설계에 의해 감소시킬 수 있다. 그러므로 썬지로부터 전력실비를 보호하기 위해서는 우선 전력계통 외부로부터 발생한 낙뢰 썬지를 방지하기 위해 노력해야 한다. 두 번째로 침입한 낙뢰의 영향을 최소화해야 한다.

이를 위해서 썬어도 낙뢰가 빈번할 것이라고 생각되는 곳에 낙뢰에 대한 가공 송전선의 보호는 일반적이다. 그러한 보호를 위해 상도체와 같은 방향으로 가공지선 1조 또는 2조를 상도체 위에 설치한다. 이들 가공지선은 절탈에 설치되어 보통의 일반적인 환경에서 대기전위를 갖게 된다. 이들 전선을 배치하는 의도는 낙뢰를 가로막아 주려는 것인데, 그렇지 않으면 상도체 자체에 접촉할 것이다. 그러한 보호는 송전선 전체에 가공지선을 설치하거나 또는 변전소에 인접한 몇 마일 구간만 설치할 수 있다. 후자의 경우는 송전선로의 비 보호구간에서 낙뢰에 썬지가 발생하여도 썬지가 선로 끝단에 도달하는 시간에 비례하여 상당히 감소될 것이라고 가정하거나 또는 선로를 따라 썬지가 전진되는 동안에 코로나나 다른 감쇄 효과에 영향을 받는다고 가정에서 운영되지만 한전 및 외국의 경우 안정적인 전력공급을 위해 송전선로 전구간에 가공지선을 설치하여 운전하는 것이 일반적이다. 따라서 본 논문의 주요 관심사항은 상도체에 대한 가공지선의 위치에 따른 차폐실패 사고율 계산 알고리즘에 관한 것이다.

2. 주요 파라메타 검토

2.1 뇌격흡인거리

가공지선이 효과적으로 낙뢰를 차폐하려면, 낙뢰에 대하여 상도체보다 가공지선이 더 흡인력이 있어야 한다.

뇌격 리더(the tip of the leader stroke)가 대기 표면에 접근함에 따라 나무, 큰 건물 및 송전철탑 구조물과 같은 큰 사물쪽으로 뇌격 리더가 끌려가는 것은 일반적으로 경험하는 현상이다. 뇌격 흡인거리(striking distance) S의 개념이 과거부터 소개되어 왔다. 이것이 의미하는 것은 뇌격 끝단이 접지된 물체로부터 거리 S 이내에 도달하면 그 물체에 뇌격이 접촉할 확률은 더 멀리 떨어진 다른 사물에 접촉할 확률보다 훨씬 더 크다는 것이다. 뇌격흡인거리에 대한 Golde의 가장 중요한 기여는 뇌격흡인거리 S가 뇌격전류의 함수라는 것을 가정한 것이다. Whitehead는 이러한 관계를 일련의 분석적인 수식으로 정량화 했으며, 식(1) 및 (2)를 각각 제안하였다.

$$S = 8(I)^{0.65}(m) \tag{1}$$

$$S = 10(I)^{0.65}(m) \tag{2}$$

여기서 I 는 뇌격전류 피크치(kA)이다. 본 논문에서는 ERPI(Electric Power Research Institute)의 보고서 "Transmission Line Reference Book 345kV and Above"에서 추천하는 식(2)를 적용하여 송전선로의 차폐실패 사고율을 검토하였다.

2.2 차폐 비보호 범위

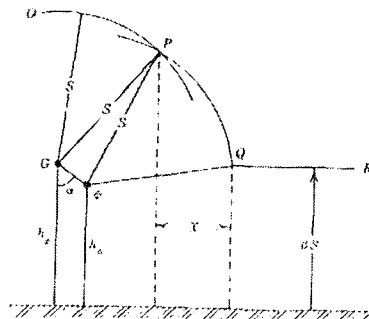


그림 1. 부적절한 차폐의 취약성을 보여주는 도해

가공지선에 의한 상도체의 차폐효과를 검토하기 위하여 Anderson의 접근 방식에 따라 가공지선 G와 차폐각

a에 의해 정의되는 상도체  $\phi$ 의 상대적인 위치를 보여주는 그림 1과 같은 도해를 만들 수 있다.

임의의 전류  $I$ 를 선택함에 따라서 전류값에 따른 뇌격 흡인반경  $S$ 와 중심점으로서  $G$ 와  $\phi$ 를 갖는 원호들이 그려진다. 높이  $\beta S$ 를 갖는 대지에 평행한 수평선은 대지 표면으로부터 거리  $\beta S$  이내에 접근하는 뇌격은  $G$ 와  $\phi$  표면보다는 대지에 접촉되는 영역을 나타낸다.

Anderson에 따르면 초고압(EHV) 송전선에서  $\beta$ 는 0.8이고, 초초고압(UHV) 송전선에서  $\beta$ 는 0.67이라고 보고 되어지고 있다. 이 수평선과 2개의 원호는 3개의 영역을 정의할 수 있다. 전류 크기  $I$ 를 갖는 뇌격이 원호 OP를 관통하면 가공지선에 접촉하는 경향을 보일 것이다. 유사하게 영역 QR을 관통하는 뇌격은 대지로 갈 것이다. 원호 PQ사이에서 뇌격 전류  $I$ 는 상도체에 접촉할 것이고, 그것은 차폐실패를 의미한다. 그림 1은 부적절한 차폐 설계시, 송전선과 평행하게 폭  $X$ 를 갖는 낙뢰로부터 상도체를 보호하지 못하는 범위를 있음을 설명한다.

뇌격 전류 크기가 커지면 그림 1의  $S$ 는 증가할 것이고, 따라서 원호 PQ는 감소할 것이다. 우리가  $I_{max}$ 라고 지정하는 크기의 뇌격전류에서  $P$ 와  $Q$  점들은 일치할 것이다. 그 점에서  $I_{max}$ 를 초과하는 전류 크기를 갖는 뇌격에 의한 차폐실패는 발생하지 않을 것이다. 반대로 뇌격 흡인거리  $S$ 는 그림 1에서 선택한 값보다도 작은 뇌격전류일 때 감소하고, 원호 PQ와 그것의 투영  $X$ 는 증가할 것이다. 그러나 임의의 전류는  $I_{min}$ 으로 정의되며, 뇌격전류가 상도체에 도달하여도  $I_{min}$  전류 크기 미만의 뇌격전류는 송전선로 애자련의 섬락을 일으키는데 불충분한 전압을 발생시키므로 결과적으로 중요하지 않게 된다.

계산의 단순화를 위하여 이 전압은 선로 애자련의 임계 섬락전압에 대응한다고 가정한다. 따라서 뇌격 채널의 임피던스를 무시하면 차폐실패 사고를 일으키는 최소 임계 뇌격전류는 식(2)와 같다.

$$I_{min} = \frac{2V_{CFO}}{Z} \quad (3)$$

여기서  $V_{CFO}$ 는 애자 임계 섬락전압이고  $Z_0$ 는 선로의 썬지 임피던스이다. 이 식에서 상도체의 60Hz 전위는 무시한다.  $I_{min}$ 에 대응하는  $X$ 의 값을  $X_5$ 라 한다.

### 2.3 뇌격전류 크기 누적확률 분포

차폐실패가 발생하기 위하여, 전류는  $I_{min} < I < I_{max}$  영역에 있어야 하고, 뇌격은 여기서 지정한  $X_5$  영역 이내에 접근해야만 한다.

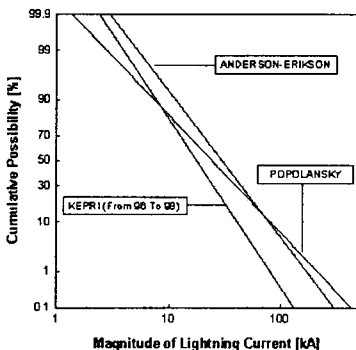


그림 2. 뇌격전류 크기 누적확률 분포곡선

특정 범위 이내에 전류가 존재할 확률은 그림 2와 같은 뇌격전류크기 누적 확률분포 곡선으로부터 구할 수 있다. 즉 확률  $I_{min} < I < I_{max} = P_{min} - P_{max}$ 이다.

낙뢰에서 뇌격 전류의 크기는 확률의 항으로 설명된다. 1972년에 포폴란스키(Popolansky)는 유럽, 오스트레일리아, 미국에서의 조사로부터 624개의 낙뢰 피크전류 측정치로부터 누적 확률 곡선을 발표했다. 이 커브의 로그노말 등가치는 그림 2와 같으며, 근사 중앙값 전류는 25kA이다.

앤더슨과 에릭슨(Anderson and Eriksson)은 338개의 기록을 기초로 60m 이하 높이의 구조물에 떨어지는 낙뢰만을 포함하는 변형된 커브를 그림 2에서처럼 개발했으며, 로그노말 근사치는 중앙값 전류 31kA이다.

그러나 뇌격 전류의 크기는 지형 및 기후의 영향을 크게 받는 것으로 국내의 뇌 사고율 예측계산을 위해서는 국내의 뇌격전류 크기 누적 확률분포의 적용이 중요하며 한전에서는 뇌격을 검출하는 LPATS(Lightning Position and Tracking System) 시스템의 운용을 통해 근사 중앙값 전류 18.83kA를 갖는 국내의 뇌격전류 크기 누적확률 분포곡선을 만들었다. 이상 살펴본 포폴란스키 커브는 식(4)와 같다.

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{25}\right)^2} \quad (4)$$

그리고 앤더슨과 에릭슨 커브는 식(5)와 같다.

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (5)$$

또한 한전에서 구한 커브는 식(6)과 같다.

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{18.83}\right)^{3.5}} \quad (6)$$

여기에서  $P_I$ 는 뇌격 피크 전류가  $I$ (kA)를 초과할 확률이며, 본 논문에서는 각각의 뇌격전류 크기 누적 확률분포에 따른 차폐실패 사고율을 비교 검토하였다.

## 3. 차폐실패 사고율 계산 결과 비교

### 3.1 철탑 및 주요 입력 데이터

본 논문에서는 국외에서 발표된 뇌격전류 크기 누적 확률분포에 따른 송전선로의 차폐실패 사고율과 국내의 뇌격전류 크기 누적 확률분포를 적용한 차폐실패 사고율을 비교 검토하기 위한 주요 입력 파라메타는 표 1과 같다.

표 1. 차폐실패 사고율 계산을 위한 주요 입력 데이터

항 목	데 이 터
IKL	20
탐각저항	20[Ω]
대지경사각	20°
뇌격누적확률분포	Popolansky Curve Anderson-Eriksson Curve 한전의 누적 확률분포 곡선

또한 송전선로 차폐실패 사고율을 예측 계산을 위하여 송전선로 데이터는 그림 3과 같은 한전의 345kV 표준철탑중 Type B의 철탑을 적용하였으며 관련 데이터는 표 2와 같다.

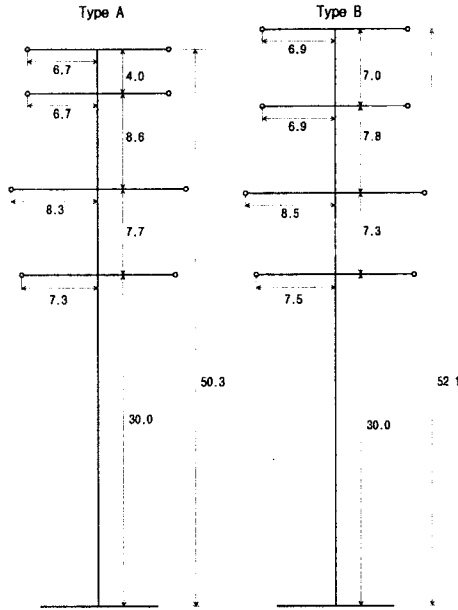


그림 3. 계산에 사용된 345kV 2회선 철탑

표 2. 가공지선 및 도체 데이터

번호	기능	좌표		도체직경 (cm)	번들간격 (cm)
		X(m)	Y(m)		
1	가공지선	-6.9	52.1	1.82	
2	가공지선	6.9	52.1	1.82	
3	A	6.2	45.1	2.961	40
4	B	6.2	37.3	2.961	40
5	C	6.4	30.0	2.961	40
6	C'	-6.2	45.1	2.961	40
7	B'	-6.2	37.3	2.961	40
8	A'	-6.4	30.0	2.961	40

### 3.2 대지 뇌격밀도

전통적으로 특정지역의 낙뢰에 대한 심각성은 IKL에 의해 정의되었다. 그러나 실제 낙뢰에 대한 심각성은 어떤 지역의 대지 뇌격밀도로 판단하여야 한다. 대지뇌격밀도는 1km<sup>2</sup>당 대지로 떨어지는 뇌격수로 정의된다. 이 대지뇌격밀도는 뇌 보호설계에 있어서 아주 중요한 파라메타이다. 만일 대지 뇌격밀도 추정시 50%의 오차는 뇌 사고율 평가에 있어 50%의 오차를 발생시킨다. 일반적으로 대지뇌격밀도 N은 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$N = kT \quad (7)$$

여기서 T는 IKL이며, k는 1 < k < 0.19 범위의 지역에 따른 경험적인 상수이다. 본 논문에서는 0.12를 선정하였다.

### 3.3 송전선로 차폐실패 사고율 예측계산 결과 비교

최종적으로 차폐실패 사고율은 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$N_{SF} = \frac{N}{10} \cdot \frac{X_S}{2} (P_{min} - P_{max}) / 100km/year \quad (8)$$

여기서  $X_S$ 는 전류 범위  $I_{min} < I < I_{max}$  일 때 X의 평균값이며, N은 대지 뇌격밀도이다.

이상 간략히 살펴본 차폐실패 사고율 예측계산 알고리즘에 각종 파라메타를 입력하여 계산한 결과는 그림 4와 같다.

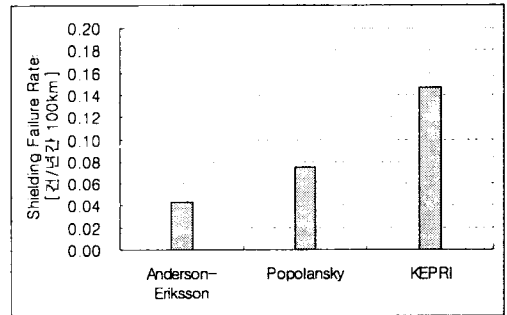


그림 4. 뇌격전류 크기 누적 확률분포 선택에 따른 차폐실패 사고율 비교

## 4. 결 론

뇌격전류 크기 누적 확률분포 곡선의 선택에 따라 차폐실패 사고율의 차이는 크게 나타난다. 현재 한전에서 측정된 2년간의 뇌격 데이터를 기준으로 만든 뇌격전류 크기 누적 확률분포를 적용할 경우, 앤더슨과 에릭슨이 작성한 누적확률 분포를 적용한 것과 비교하여 약 3.5배의 차폐실패 사고율의 차이가 발생한다.

현재 한전이 만든 뇌격 누적확률분포 곡선은 국내에서 측정된 뇌격전류를 기준으로 작성한 것이므로, 많은 데이터를 이용하여 보다 신뢰성 있는 분포 곡선을 작성하는 것이 향후 정확한 뇌 사고율 예측계산을 위해 중요하다고 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K. Berger, R. B. Anderson, H. Kroninger. "Parameters of Lightning Flashes", *Electra*, No. 41, July 1975, pp. 23-37
- [2] R.H. Golde, *Lightning*, Vols 1 and 2, London: New York: San Francisco: Academic Press, 1977.
- [3] *Transmission Line Reference Book - 345kV and Above*, Electric Power Research Institute, 1975.
- [4] G.W. Brown. "Lightning Performance. I - Shielding Failures Simplified", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, pp. 33-38, 1978.
- [5] G.W. Brown. "Lightning Performance. II - Updating Backflash Calculations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, pp. 39-52, 1978.
- [6] F.A. Fisher, J.G. Anderson, J.H. Hageguth. "Determination of Transmission Line Lightning Performance by Means of Geometrical Models", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-78, pp. 1725-1736, 1960.
- [7] M. Darveniza, "Modelling for Lightning Performance Calculations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, pp. 1900-1908, 1979.
- [8] Pritindra Chowdhuri, "Electromagnetic Transients in Power Systems", Research Studies Press LTD, 2004