

## 765 kV 송전선로 뇌 사고율 분석

강연욱\*, 곽주식, 주형준, 구교선, 권동진  
한전전력연구원

### The Analysis of the Lightning Outage Rates on 765 kV Transmission Lines

Yeon-Woog Kang\*, Joo-Sik Kwak, Hyoung-Jun Ju, Kyo-Sun Koo, Dong-Jin Kweon  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - 송전선로를 설계할 때, 경제성을 고려하는 것이 중요하지만, 정전에 의한 피해를 최소화하기 위하여 전기적인 절연설계 및 구조설계를 최적화하도록 노력하고 있다. 그러나 낙뢰는 절연설계에 있어서 외부적인 요소로 낙뢰에 의한 계통의 순간 정전을 최소화하기 위해서는 많은 비용뿐만 아니라 기술적으로도 해결해야 할 문제가 많이 있다. 이러한 낙뢰에 의한 정전은 외국의 경우 230 kV 송전선로에서 약 26%, 345 kV 송전선로에서 약 65%를 점유하는 것으로 보고 되고 있다. 한편의 경우도 약 60%가 낙뢰에 의한 고장으로 이것을 줄이려는 관심이 높아지고 있다. 좁은 국토의 효율적 이용의 필요성과 송전선로 건설시 주민들의 반대 등 제약 요소 때문에, 한편에서는 세계 최초로 765 kV 송전선로를 2회선 선로로 설계하고 건설하여 운영하고 있어, 외국의 1회선 송전선로에 비해 낙뢰에 의한 순간정전에 취약한 구조를 갖고 있다. 특히 한편에서 운전중인 765 kV 송전선로 중에서 동해안 지역에 위치한 송전선로의 뇌 사고율이 서해안 지역에 위치한 송전선로보다 높은 것으로 보고 되고 있어, 본 논문에서는 그 원인을 분석하고자 한다.

#### 1. 서 론

송전선로에서 발생하는 낙뢰에 의한 정전은, 낙뢰가 가공지선을 지나 도체에 직접 접촉함으로써 첩탑에 섬락이 발생하는 차폐실패 사고와, 낙뢰가 가공지선에 의해 차폐가 되었지만 그 낙뢰 크기가 충분히 커서 첩탑의 섬락을 발생시키는 역섬락 사고로 구분된다. 이러한 송전선로의 뇌 사고율을 계산하기 위해서는 가스방전 현상, 급격히 변하는 전자기, 도체나 첩탑에 발생하는 코로나에 따른 비선형 특성, 전류나 주파수에 따라 변하는 대지 임피던스 등 대단히 복잡한 전자기적인 현상을 고려하여야 한다.

실제 뇌사고율 예측계산에 있어서는, 결과에 큰 영향을 미치지 않는 범위이내에서 복잡한 전자기적 현상을 간략화하고 선형화하여 계산하고 있지만, 첩탑의 구조 및 고려해야 할 많은 파라메타들에 의해 계산 과정이 복잡하고 반복적인 계산과정이 많기 때문에 수 계산은 한계가 있고 비효율적이므로, 프로그램을 이용하여 계산하는 것이 일반적이다.

본 논문에서도, 765 kV 송전선로의 뇌 사고율 예측 계산을 위해 개발된 프로그램을 이용하여 뇌 사고율을 분석하였으며, 그 분석결과를 제시하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 정확성 문제

송전선로의 뇌사고율을 예측 계산할 경우, 뇌격에 의한 섬락 계산의 많은 부분을 통계로 처리한다. 따라서 연간 100km 당 1건의 평균 섬락률로 계산된 선로가 운전 첫해에는 2건, 두 번째 해에는 0건, 세 번째 해에는 3건의 섬락사고를 보여줄 수 있다. 보호계전과 신뢰성 계획을 위해서, 어떤 특정한 해에 특정한 값을 초과하는 실제 섬락율의 확률을 아는 것이 중요하다. 그러한 가능성을 결정하기 위해서는 이항식의 통계값에 의지해야 한다.

낙뢰가 선로에 접촉할 때, 두 가지 가능한 결과가 있다. 하나는 성공(섬락 없음)이고, 다른 하나는 실패(섬락)이다. 이항 통계의 기본 이론에 의하면, 선로에 n개의 낙뢰가 떨어질 때, 낙뢰에 의한 성공 확률이 p이면, 정확히 k의 성공과 n-k의 실패가 있다. 이것을 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$P_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k} \quad (1)$$

여기서 p : 성공의 확률  
q : 실패의 확률 또는 섬락의 확률

식 (1)에 따라 운전중인 송전선로의 이론적인 섬락 확률을 평가할 수 있다. 송전선로가 운전중인 조건에서 단지 매년 사고를 기록하고 설계 효율성의 효과를 점진적으로 분석하는 과정에 의해 실제 섬락율을 결정할 수 있다. 그러나 충분한 데이터를 확보할 때까지는, 이러한 데이터가 잘못된 판단을 유도할 수 있어서, 실제적으로는 좋은 설계였지만 선로가 최초 가압된 이후 불행한 외부 환경에 많은 영향을 받은 선로의 경우에는, 때때로 선로를 고정하는 불필요한 조치를 취하게 할 수도 있다.

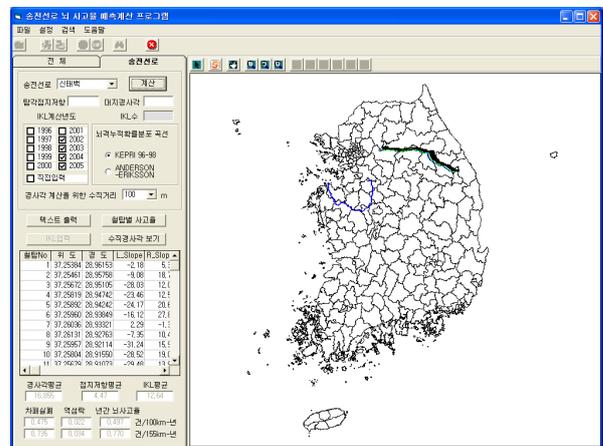
한 예로서, 한편의 345kV 송전선로는 연간 뇌우일수를 20으로 설정하여 내외 설계를 하였으며, 낙뢰에 의한 트립 사고는 연간 100km당 1건 이하가 되도록 설계하고 있다. 따라서 345kV 송전선로를 건설하여 1년간 운전할 경우에 연간 100km당 송전선로의 낙뢰에 의한 사고를 관찰할 수 있는 확률은 표 1과 같다. 표 1에서 알 수 있는 것과 같이 1년 동안 낙뢰에 의한 사고가 1건도 발생하지 않을 확률은 약 36.4%이고, 1건이 발생할 확률은 약 37.2%이며, 2건 이상 발생할 확률도 약 26% 이상된다. 따라서 송전선로 건설 후 초기에 낙뢰에 의한 사고가 많이 발생할 경우, 사고에 영향을 미치는 파라메타의 면밀한 검토와 계산을 통한 검증 이후 대책을 수립하는 것이 잘못된 판단을 방지할 수 있다. 본 논문에서 분석하고자 하는 765 kV 송전선로 뇌 사고율도, 단지 계통에서 관측된 고장 데이터만으로 검토할 경우에는, 운전기간이 짧아 통계적인 편차에 의해 잘못 진단되고 불필요한 대책을 유도할 우려가 있으므로, 예측계산 결과와 고장 데이터의 비교 분석이 필요하다고 판단된다.

<표 1> 송전선로의 낙뢰에 의한 트립사고 발생 확률

연간 100km당 트립 사고수	트립 사고를 관찰할 확률
0	0.364
1	0.372
2	0.186
3	0.061
4	0.014
5	0.003

##### 2.2 낙뢰에 의한 순간정전 고장 데이터 분석

한편에서는 765 kV 2회선 송전선로 3개를 건설하여 운전하고 있다. 송전선로 길이는 전체 약 331 km이며, 이중 1개 선로는 그림 1에서 보는 것과 같이 동쪽에 위치하고 있으며, 나머지 2개 선로는 서쪽에 위치하고 있다.



<그림 1> 765 kV 송전선로 뇌 사고율 예측계산 프로그램

낙뢰에 의한 고장은 2002년부터 2005년까지 4년간 총 6건이 발생하였으며, 이중 5건은 765 kV 신태백 T/L에서 발생하였다. 이들 송전선로의 낙뢰에 의한 고장 발생 데이터는 표 2와 같다.

〈표 2〉 765 kV 송전선로의 낙뢰에 의한 고장 발생 현황

No	고장일시	회선명	고장내용
1	02.06.12	신태백#1	순간고장(단상재폐로)
2	02.10.05	신태백#2	순간고장(단상재폐로)
3	05.03.10	신태백#1, 2	순간고장(단상재폐로)
4	05.06.15	신태백#2	순간고장(단상재폐로)
5	05.07.01	신서산#2	순간고장(단상재폐로)
6	05.07.24	신태백#1	순간고장(단상재폐로)

현재 국내에서 운전중인 765 kV 송전선로는 낙뢰에 의한 송전선로의 뇌사고율을 년간 100km당 0.39건 이내로 억제하려는 목표를 기준으로 설계되었다. 표 3은 각 송전선로의 뇌 사고율 설계치와 고장기록을 나타낸다. 이들 3개 선로의 총 길이는 약 331 km이므로, 4년간 통계적으로 발생될 것으로 예측되는 총 뇌 사고 건수는 약 5.2건이다. 이 값은 실제 고장 기록 6건과 비교할 때 상당히 유사한 값을 알 수 있다.

그러나 765 kV 신서산 T/L과 신태백 T/L의 선로길이가 비슷하여, 4년간 뇌 사고 건수는 각각 약 2.2건과 2.4건으로 비슷하게 발생할 것으로 예측되었지만, 실제 고장기록은 765 kV 신태백 T/L에서 4년간 5건 발생하여 765 kV 신서산 T/L에 비해 무려 5배가 발생했음을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 차이의 발생 원인을 규명하고자 한다.

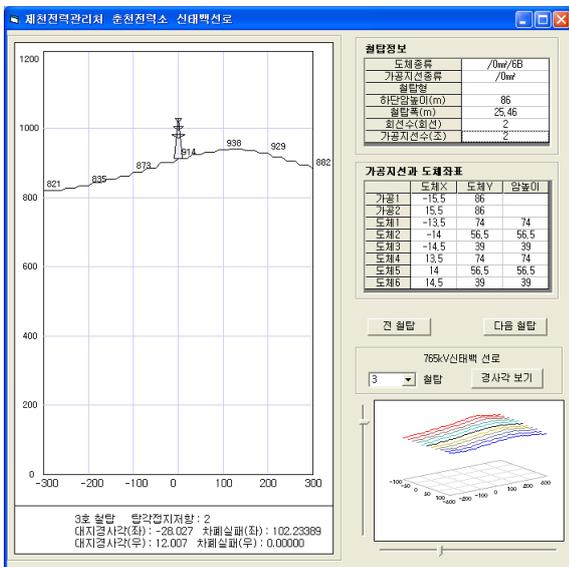
〈표 3〉 765 kV 송전선로의 낙뢰에 의한 순간 정전 발생 실적

선로명	선로길이 [km]	4년간 선로별 뇌 사고 건수	
		설계치	고장기록
765 kV 신당진	38.4	0.60	0
765 kV 신서산	137.8	2.15	1
765 kV 신태백	154.8	2.41	5
총 계	331.0	5.16	6

### 2.3 뇌 사고율 예측계산

표 3에서 알 수 있는 것과 같이 765 kV 송전선로의 뇌 사고율은 전체적으로 설계치 범위에서 운전되고 있음을 알 수 있으나, 765 kV 신태백 송전선로의 경우에는 설계치의 약 2배의 고장이 발생하고 있다. 이러한 차이는 운전기간이 짧아 통계적인 관점에서는 충분히 가능하다고 판단되지만, 선로의 중요성을 고려할 때, 보다 면밀한 규명이 필요하다고 판단된다.

현재 운전중인 765 kV 송전선로를 설계할 당시에는, GIS (Geographic Information System) 정보를 이용하여 각 첩탑의 대지경사각을 고려한 설계가 현실적으로 불가능 하였으므로, 모든 765 kV 송전선로는 유사한 지형에 설치되는 것을 기준으로 내뢰 설계를 하였다. 따라서 현재 서로 다른 지형에 설치되어 운전되고 있는 765 kV 송전선로의 낙뢰에 의한 고장 건수는 선로별로 차이를 보일 수 있다고 판단된다.



〈그림 2〉 765 kV 송전선로 뇌 사고율 예측계산 프로그램

따라서 송전선로 뇌 사고율 예측 계산의 정확성을 높이기 위해, 그림 2와 같이 계산 프로그램을 이용하여 현재 운전중인 첩탑의 높이, 차폐각, 탑각 접지저항, 대지경사각 등의 데이터를 각각의 첩탑별로 적용하여 송전선로의 뇌 사고율을 계산하였다. 계산 결과는 표 4와 같다.

〈표 4〉 낙뢰고장의 설계치, 계산치 및 고장데이터의 비교

선로명	선로길이 [km]	4년간 선로별 뇌 사고 건수		
		설계치	계산치	고장데이터
765 kV 신당진	38.4	0.60	0.46	0
765 kV 신서산	137.8	2.15	1.87	1
765 kV 신태백	154.8	2.41	3.08	5
총 계	331.0	5.16	5.41	6

### 2.3 송전선로 뇌 사고에 영향을 미치는 파라메타 검토

송전선로의 뇌 사고율에 영향을 미치는 요소중에서, 역섬락 사고에 영향을 미치는 주요 파라메타는 탑각 접지저항 및 첩탑 높이 등 이고, 차폐실패 사고에 커다란 영향을 주는 요소는 송전선로 경사각의 대지 경사각이다. 표 5에서 알 수 있는 것과 같이, 765 kV 송전선로 건설시 송전선로가 대부분 산악지에 위치하고 있지만 탑각 접지저항을 낮추려는 노력에 의해 3개 선로 모두 낮은 접지저항 값을 유지하고 있으며, 첩탑 높이도 표준 첩탑을 이용한 시공으로 3개 선로 모두 비슷한 값을 갖고 있어, 이러한 두 파라메타에 의한 영향과 765 kV 신서산T/L과 신태백T/L의 낙뢰에 의한 고장실적의 차이에는 상관관계가 없다고 판단된다.

그러나 송전선로 경사각의 대지 경사각은 두개의 선로에서 큰 차이를 나타내고 있어, 대지경사각과 선로의 고장실적과 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다, 따라서 두 선로의 낙뢰에 의한 고장실적의 차이는 대지 경사각의 차이에 따른 차폐실패 사고율의 차이에 의한 것으로 분석된다.

〈표 5〉 송전선로 뇌 사고율에 영향을 미치는 주요 파라메타 비교

선로명	송전선로 뇌사고율 계산치 [건/4년]	주요 파라메타		
		접지저항 [Ω]	첩탑높이 [m]	경사각 [도]
765 kV 신당진	0.46	3.1	101.1	6.2
765 kV 신서산	1.87	4.6	97.9	8.9
765 kV 신태백	3.08	4.5	97.1	14.9

## 3. 결 론

이상 본 논문에서 살펴본 것과 같이, 현장에서 운전중인 765 kV 송전선로는 내뢰 설계 목표치인 년간 100 km당 0.39건의 범위에서 운전되고 있다. 또한 현재 765 kV 전압 계급의 송전선로에서 기술적으로 획기적인 내뢰 사고 저감방법이 전 세계적으로 제시되지 않고 있다. 따라서 낙뢰에 의한 사고를 보다 저감시켜야 할 경우에는 기존의 저감대책을 보다 면밀히 검토하여 적용하는 것이 필요하며, 이때 절연설계, 안정성 및 경제성 검토가 반드시 병행되어야 한다.

송전선로의 낙뢰에 의한 차폐실패 사고와 역섬락 사고는 모두 발생 원인에 관계없이 최종적으로는 낙뢰에 침입에 의해 발생하는 아킹혼 사이의 전압이 공기 절연 내력이상이 되면 섬락사고로 진전하게 된다. 따라서 아킹혼 간격을 증대시키는 것은 낙뢰에 의한 사고를 줄이는데 효과적인 방법중 하나이다.

또한 낙뢰에 의한 역섬락 사고를 방지하기 위해서는 탑각 접지저항을 낮추는 것이 일반적으로 추천되지만, 현재 765 kV 송전선로의 탑각 접지저항은 충분히 작기 때문에 더욱 낮추는 것은 경제성을 고려한 기술적 검토가 필요하며, 비록 탑각 접지저항을 낮춘다 하더라도 그 효과는 미미할 것으로 판단된다.

기타 첩탑 높이의 조정, 심한 경사면에 설치된 첩탑의 이설, 경사면에 설치된 첩탑의 차폐각 조정 등의 대책도 절연설계, 첩탑의 기계적 강도 및 경제적 타당성 등을 면밀히 검토한 후 시행하여야 한다고 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] William A. Chisholm, John G. Anderson, "EPRI AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above", Electric Power Research Institute, 2005
- [2] Andrew R. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems", Marcel Dekker Inc, 1999
- [3] James T. Whitehead, William A. Chisholm, "IEEE Working Group Report Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No. 3, pp. 1254-1267, July 1993