

송전선로 주변의 낙뢰활동과 고장과의 비교 분석

곽주식*, 강연욱, 구교선, 권동진
한전 전력연구원*

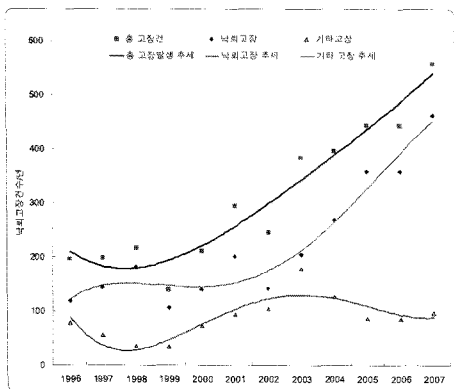
Comparative analysis of lightning activity and transmission line faults

Joosik Kwak*, Yeon-woog Kang, Kyosun Koo, Dong-jin Kweon
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 154 kV 송전선로의 낙뢰고장기록과 선로주변의 낙뢰측정기록을 분석하여 상관관계를 분석하였다. 낙뢰관측기록과 고장의 위치, 시각과 고장 메카니즘의 규명은 선로의 합리적인 대책수립에 유용한 정보를 제공할 수 있다. 6년간의 LPATS 및 KLDNet 관측기록과 송전고장기록을 이용하여 EMTF 해석모델과 뇌사고울 해석 S/W를 사용하여 뇌설락 임계전류를 계산하고 뇌고장 유형을 분석 하였다.

1. 서 론

우리나라에는 66, 154, 345, 765 kV 전압의 송전선로가 운전되고 있으며 총 39,400여기의 첩탑이 29,403 circuit-km의 회선을 구성하고 있다. 이 중에서 154 kV 선로가 약 20,000 circuit-km를 차지하고 있다. 345, 765 kV 선로는 발전소에서 생산된 전력을 부하단까지 대량 수송하는 역할을 하며, 154 kV 선로는 생산된 전력을 부하계통으로 분배하는 역할을 주로 담당하고 있다. 이러한 송전선로는 대부분 가공선로이며 산악지역을 많이 통과하고 있어 항상 낙뢰와 같이 자연현상에 노출되어 있다. 그림 1에서와 같이 KEPCO의 자료에 따르면 순간정전을 포함하여 송전선로 고장원인 중에서 낙뢰가 70 ~ 80% 이상을 차지하고 있다. 전력기기의 품질이 높아지고 시스템 운영기술의 발전으로 자연재해 이외의 고장은 낮은 수준으로 억제되고 있지만 낙뢰와 같은 자연재해에 의한 영향이 증가하는 경향을 보이고 있다.[1] 특히 말단 송전선로를 구성하고 있는 154 kV 선로에서 전체 송전고장의 약 80%의 낙뢰고장이 발생하고 있다. 이는 154 kV 선로가 가장 많은 비율을 차지하고 있는 것이기도 하지만 345 kV 이상의 고압 송전선로에 비하여 절연거리가 상대적으로 짧아 뇌고장 확률이 높은 특성에 기인하기도 하다. 우리나라의 송전선로는 대부분 2회선이 이상으로 구성되고 있다. 2005년 이후 최근 4년간의 통계에 따르면 낙뢰로 인한 송전선로의 2회선 고장비율이 평균 약 40% 정도를 차지하고 있다.



〈그림 1〉 낙뢰가 원인인 송전고장('96-'07)

송전선 고장기록과 낙뢰감지 네트워크 KLDNet(Kepco Lightning Detection & Information Network)에 의한 측정기록을 분석하여 154 kV 선로에서의 고장과 낙뢰활동과의 상관관계를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 송전선로의 낙뢰고장

낙뢰가 송전선로의 가공지선이나 첩탑상부에 발생하면 뇌찌지 전류가 대지로 방전하면서 첩탑전위가 상승하여 애자런의 섬락을 일으키는 역섬락 고장과 낙뢰가 전력선에 직격하여 발생하는 차폐실패 고장이 발생한다. 역섬락 고장은 접지저항이 낮아질수록 고장발생 확률도 낮아지

지만 차폐실패 고장은 접지저항과는 관련성이 없으며 가공지선에 의한 차폐각이 큰 영향을 끼친다. 두 종류의 고장 모두 애자런의 섬락으로 나타나게 되므로 확인된 아크 섬락 흔적만으로 낙뢰고장의 유형을 분석하여 대책을 세우는 것은 간단하지 않다. 다만 뇌관측 기록의 전류 크기와 낙뢰발생위치, 보호계전기 동작기록으로부터 유추할 수 있을 뿐이다. 송전선로의 낙뢰고장을 정확히 분석하기 위해서는 정확한 낙뢰의 위치, 크기와 보호계전기의 동작기록의 시간 정밀도가 중요한 요인으로 작용한다.

2.1.1 뇌우일수와 송전선로에 영향을 주는 낙뢰[2]

뇌우 일수로부터 다음의 관계식을 이용하면 대기 뇌격밀도를 구할 수 있다. 매 1km² 당 발생한 낙뢰(flash)수 이다.

$$N_g = aT^b \text{ [flash 또는 stroke/km}^2 \text{ year]} \text{-----(1)}$$

여기서 a와 b의 상수는 지역별로 다른 값을 갖는다. Td는 thunder storm day, Th는 Thunder storm hour이며 미국의 경우 식(2)와 같은 관계가 있는 것으로 보고되고 있으며 뇌우일수와와의 관계보다 적절히 대기 뇌격수를 설명해 주는 것으로 보고 된다.

$$N_g = 0.04 T_d^{2.25} = 0.054 T_h^{4.1} \text{ [flashes /km}^2 \text{ \cdot year]} \text{----(2)}$$

또한 낙뢰측정시스템으로부터 얻어진 직접 대기뇌격밀도값을 사용할 수도 있다. EPRI Red Book에서 송전선로에 영향을 주는 대기 뇌격밀도도 제시하는 관계식은 다음과 같다.

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h_t^{0.6} + b) \text{ [flashes/100km}^2 \text{ \cdot year]} \text{-----(3)}$$

여기서 b는 가공지선 폭, ht는 첩탑의 높이이다. 다시 first return stroke의 전류 I와 평균 도체 높이 h의 함수로서 표현하면 다음과 같다.

$$N_L = \frac{N_g}{10} (3.14 I^{0.69} h^{0.43} + b) \text{-----(4)}$$

일반적으로 송전선로에 떨어지는 낙뢰중에서 첩탑에서의 섬락을 일으킬 수 있을 정도로 첩탑과 그 근처의 낙뢰 수가 60%, 선로 공간에 떨어지지만 첩탑에서의 섬락을 일으키지 않는 낙뢰가 40% 정도로 가정한다. 왜냐하면 첩탑 경간중상으로 갈수록 가공지선과 전력선이 첩탑높이보다 낮아지게 되어 첩탑이 주변에서 가장 높은 곳에 노출되므로 뇌격 확률이 증가한다. 또한 선로 공간에 발생한 낙뢰는 첩탑까지의 거리가 멀게 되므로 섬락을 일으키지 못하는 것으로 가정한다. 선로영역에 발생하는 낙뢰(역섬락 원인 낙뢰 포함)와 전력선에 도달하는 모든 낙뢰중에서 첩탑에서의 역섬락에 기여하는 낙뢰의 수만을 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

2.1.2 낙뢰로부터 송전선로에 의하여 차폐되는 폭

지상위로 지나가는 송전선로는 그 선하에 낙뢰에 대하여 전기적 영향을 만들어 낸다. 이 영역내에 발생하는 낙뢰는 대지에 도달하지 않고 송전선로에 떨어지게 되어 송전선로에 의하여 완전 차폐되는 영역이 존재한다. 이 영역 밖의 낙뢰는 대지에 떨어지게 된다.[2] 이 영역은 가공지선의 폭(b)과 평균 높이(h)로부터 식(5)와 같이 주어진다.

$$W = b + 4h^{1.09} \text{ [m]} \text{-----(5)}$$

여기서 h는 가공지선의 dip을 고려한 평균 높이이다.

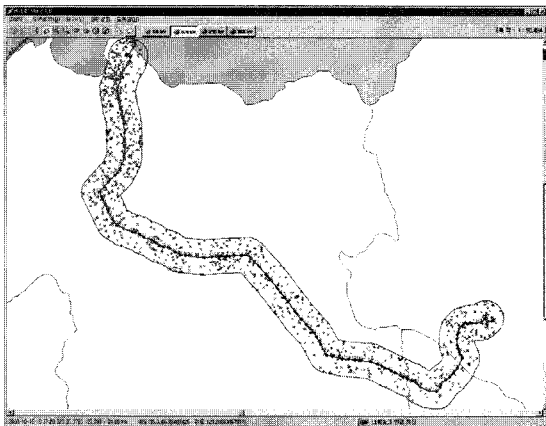
IEEE 송전선로의 뇌보호 가이드(IEEE Std 1243-1997)에서 제시하는 가공지선이나 전력선에 대한 뇌격 흡인거리는 다음의 식으로 표현된다.

$$r_c = 10I^{0.65} \text{------(6)}$$

2.1.3 선로 주변의 낙뢰 발생과 고장과의 관계

전세계적으로 낙뢰관측 시스템의 위치 정밀도는 평균 약 500 m 정도이며 cloud-to-ground flash 낙뢰감지율은 80 ~ 95% 범위인 것으로 보고 되고 있다.[3] 한전의 KLDNet은 남한내륙지역에 발생하는 cloud-to-ground stroke의 감지율이 95% 이상, 위치 정밀도는 250 ~ 500 m 이내로 설계되어 있다.

따라서 선로의 낙뢰고장에 영향을 주는 뇌 발생 범위는 선로에 의하여 차폐되어지는 폭(W)에 뇌관측 시스템의 위치 오차범위를 더한 영역이 된다. 154 kV 선로의 가공지선의 평균 높이가 50m 이고 가공지선의 폭(b)이 7 m 이면 식(5)에 의한 폭은 291 m 가 된다. 또는 식(6)에 의한 발생가능한 가장 큰 낙뢰 전류가 200 kA라고 할 때 선로의 뇌격 흡인 거리는 약 313 m 가 된다. 300 kA 에 대해서는 408m 가 된다. 낙뢰 측정시스템의 위치 오차 250 ~ 500 m를 고려하면 고장원 낙뢰의 분포 범위는 선로 반경 646 ~ 1146 m 가 된다. 식(5) 대신 식(6)을 300 kA 낙뢰전류에 대하여 고려하면 선로반경 704 ~ 1204 m 내의 낙뢰는 송전선로 고장과 관련 있는 것으로 간주 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 ±1 km내의 낙뢰가 고장과 관련성이 있는 것으로 고려하였다. 또한 보호계전기 기록과의 시간 상관관계도 중요하게 작용한다. 그러나 고장기록과 낙뢰기록사이에 보증할 만한 시각 오차정보가 확보되어 있지 못한 실정이다. 그림 3은 154 kV 구레 송전선로 반경 1 km 이내의 6년간의 낙뢰측정기록을 보여주고 있다. 총 727개의 낙뢰(stroke) 발생이 측정된 것을 보여준다.



〈그림 2〉 154 kV 구레 T/L 발생낙뢰(2003 ~ 2008) 총 727개

〈표 1〉 대지 낙뢰 밀도 [stroke/km² year]

년도	선로명		
	154-A T/L	154-B T/L	154-C T/L
2003	0.17	0.06	0.09
2004	0.28	0.06	0.64
2005	-	-	-
2006	3.12	0.86	1.90
2007	1.03	0.62	1.99
2008	4.77	0.92	0.60
평균	1.56	0.42	0.87

표 1은 송전선로에 km² 당 발생하는 대지 낙뢰 밀도를 보여준다. 동일한 154-A T/L선로에 대해서도 연도별로 0.17 ~ 4.77 [stroke/km²]의 대지 낙뢰 밀도를 보여준다. 표 2에서는 선로에 발생한 낙뢰고장건수와 고장과 관련성이 있는 선로 반경 1 km 이내에 발생한 낙뢰수가 정리되어있다. 이 낙뢰중에서 고장발생시간대에 발생한 낙뢰가 고장의 원인을 제공한 것으로 추정하게 된다. 2005년도의 경우 LPATS 시스템의 성능이 저하되어 대상 선로주변 낙뢰측정기록이 없는 경우이다. 1 km 반경내에 낙뢰기록이 존재하지 않는 경우 최대 5 km 범위까지 검색영역을 확장 하였다. 2006년 이후의 관측기록은 대부분 고장위치 1km 반경내에 관련성 있는 낙뢰기록이 확인되었다.

표3 은 송전철탑에서 차폐실패와 역섬락을 일으키기 시작하는 최

소 임계전류의 크기와 낙뢰측정 기록을 비교하였다. 해석 대상 선로들은 2회선 고장을 억제하기 위하여 선로용 피뢰기가 설치되어 있다. 임계전류는 전력연구원에서 개발한 뇌사고을 계산 S/W와 EMTP 해석모델을 이용하여 계산하였다. 분석된 결과로부터 측정된 낙뢰크기는 차폐실패 고장의 원인이었을 것으로 분석되고 2회선 고장등 다지점 동시고장현상을 규명하기위한 추가적인 연구가 필요한 부분으로 사료된다.

〈표 2〉 송전선로 발생 낙뢰와 고장건수

선로길이	선로명					
	154-A T/L		154-B T/L		154-C T/L	
	38.8 km		16.9 km		28.1 km	
년도	발생 낙뢰수	고장 건수	발생 낙뢰수	고장 건수	발생 낙뢰수	고장 건수
2003	13	3	2	2	5	0
2004	22	6	2	2	36	1
2005 ^{주1)}	0	6	0	3	0	4
2006	242	5	29	3	107	0
2007	80	3	21	3	112	2
2008	370	2	31	1	34	0
합계	727	25	85	14	294	9

주1) 2005년도는 낙뢰관측시스템의 성능저하로 관측기록 없음

〈표 3〉 낙뢰전류 크기와 임계섬락전류

선로명 (고장선로)	구분	임계전류[kA]		KLDNet 기록 [kA]
		차폐실패	역섬락	
154-A T/L	1	7~11	74	8 ~ 14.4
	2	2.8~15	79	19.8~27.1
	3	2.8~15	64	17.8~27.1
	4	2.8~15	64	21.7~22.4
	5	2.8~15	64	12.2~22.4
	6	2.8~18	70	8.6~16.5
154-B T/L	1	2.7~39	64	10~30
	2	2.6~26	67	35.7
	3	2.7~35	64	12.9~35.4
	4	2.7~16	65	10~43.2
	5	2.7~18	65	14.6
	6	2.6~33	50	13.4
	7	2.6~33	50	11.2~68
154-C T/L	1	3.4~148	62	62~120 추정
	2	3.4~148	62	62~120 추정
	3	3.4~14.8	62	4.9~16

3. 결 론

송전선로에서 발생한 6년간의 고장기록과 낙뢰관측시스템의 측정 기록을 분석하여 낙뢰활동과 고장관계의 상관관계를 분석하였다. 낙뢰와 고장기록 사이의 시간적 관계(time correlation)를 분석하기에 고장기록의 시각 편차가 커서 정량적 분석이 이루어지지 못하였지만 고장위치는 관련한 낙뢰발생기록과 선로내 반경 1km 이내에서 높은 관련성을 보여 주었다. 선로 1 km 반경내의 낙뢰 발생횟수와 대지 낙뢰밀도와 고장사이의 관련성이 확인되었다. 그러나 낙뢰전류의 크기에 대한 상관관계를 설명하기위해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 선로주변 낙뢰활동과 고장사이의 상관관계 분석은 고장발생확률은 예측하고 고장유형을 분석하여 합리적인 대책을 수립하는데 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 광주식, 강연욱, 우정욱, 구교선, 권동진, "한전낙뢰감지네트워크(KLDNet)에 의한 우리나라의 2007년도 낙뢰측정 및 분석", 대한전기학회 하계학술대회, 2008년
- [2] [EPRI Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above Second Edition
- [3] Kenneth L. Cummins, "A review of lightning information for power systems analysis", Transmission and Distribution conference and Exposition, vol.3 pp.1072- 1076, 2003 IEEE PES