

765kV 송전선로 낙뢰고장 분석 및 대책

민병욱* 이성학* 김호기* 강연욱* 방항권* 박재웅**
한국전력공사* 한밭대학교**

Analysis and Countermeasure of Lightning Fault on 765kV Transmission Lines

Byeong-Wook Min* Sung-Hak Lee* Ho-Ki Kim* Yeon-Woog Kang* Hang-Kwon Bang* Jae-Ung.Park**
Korea Electric Power Corporation* Hanbat National University**

Abstract - KEPCO has built, for the first time in the world, 765kV double circuit transmission lines which use vertically arranged phase conductor, while 765kV transmission lines in other countries are single circuit lines and use horizontally arranged phase conductor. System operating voltage, switching overvoltage, and lightning overvoltage were considered in determining the air gap. Recently, however, lightning outage rate of some 765kV transmission lines in KOREA shows that it is more than what is expected. Lightning fault of 765kV transmission lines is mostly single phase grounding fault which can be reclosed. But it still needs to be carefully managed, for the bulk system like 765kV transmission lines have huge effects on whole power system. This paper introduces analysis and countermeasure of KEPCO's 765kV transmission line lightning outage.

1. 서 론

765kV 송전선로는 외국의 경우 1회선 수평배열 또는 삼각배열방식으로 건설하고 있으나 우리나라는 순수 국내기술을 이용하여 세계 최초로 2회선 수직배열방식으로 건설하였다. 우리나라의 765kV 송전선로는 오손지역별로 구분하여 상용주파과전압, 개폐과전압, 뇌과전압을 고려하여 절연설계를 하였으나 일부 송전선로에서는 낙뢰로 인한 섬락고장이 설계 고장목표를 초과하여 발생하고 있으며 최근 들어 우리나라의 낙뢰 발생빈도가 높아지면서 765kV 송전선로의 낙뢰고장도 증가하고 있다. 765kV 송전선로의 낙뢰고장은 대부분이 단상 제제로 1회선 순간고장으로 정전은 발생되지 않고 있지만 전력계통의 안정성에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 고장예방이 매우 필요한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 765kV 송전선로의 낙뢰고장을 예방하기 위하여 낙뢰고장의 유형과 발생원인을 분석하고 이에 대한 대책을 제시하였다.

2. 765kV 송전선로의 설비현황

2.1 송전설비현황

765kV 송전선로는 2008년 5월 현재 755c-km, 첩탑 748기가 2회선 수직배열방식으로 건설되어 4개의 송전선로가 운전 중에 있으며 신안성변전소에서 신가평 변전소 간을 1회선 삼각배열방식으로 건설 중에 있다. 765kV 송전선로는 초기에 345kV로 가압하여 운전한 후 765kV로 승압하여 운전하고 있으며 765kV 송전선로의 설비현황은 표1과 같다.

〈표 1〉 765kV 송전선로 현황

선로명	선로구간	설비제원		선로가압일	
		선로길이	첩탑	345kV	765kV
당진화력	당진화력~신서산	77.0 c-km	90 기	1998.12.	2002. 5.
신서산	신서산 ~ 신안성	274.7 c-km	259 기	2000. 6.	2002. 5.
신태백	신태백 ~ 신가평	309.8 c-km	317 기	2000. 7.	2004.10.
신울진	울진원전~신태백	93.1 c-km	82 기	2006. 4.	

2.2 송전선로 경과지역

765kV 당진화력~신서산~신안성 송전선로는 당진군, 서산시, 예산군, 아산시, 천안시, 진천군, 안성시 지역을 경과하는 서해안 루트로 연해오손과 태풍의 영향이 심한 지역이며 특히 서산시와 당진군 지역은 우리나라에서 낙뢰발생빈도가 가장 높은 지역으로 낙뢰고장 방지에 대한 별도의 대책의 필요한 지역이다. 울진원전~신태백~신가평 송전선로는 높은 해발고도에 의한 공기절연특성이 저하되고 다설지역으로서 착빙설에 의한 고장대책이 필요한 지역이며 신태백~신가평 송전선로의 경과지는 전 구간이 등가염분부착밀도가 0.03mg/cm²이하인 청정지역을 경과하고 있다.

3. 765kV 송전선로의 절연설계

3.1 절연설계 목표

765kV 송전선로는 전력계통에서 발생하는 상용주파과전압과 개폐과전압 등 내부이상전압과 뇌격 등에 의한 외부이상전압에 대하여 원칙적으로 섬락이 발생하지 않도록 설계하였으며 계통설계 최고전압은 800kV로 하였다. 절연설계목표 과전압 배수는 상용주파과전압과전압은 대기간전압 실효값의 1.2배, 개폐과전압은 대기간전압 파고치의 1.9배 그리고 상간은 3.5배를 적용하였다. 뇌격 등 외부이상전압에 대한 목표사고율을 연간뇌우일수(IKL/Isokeraunic Level) 20을 적용하여 년간 선로길이 100km당 0.35건으로 가공지선 2조를 첩탑 중심으로부터 최외측 전력선 도체 위치보다 1m 외측에 또는 가공지선의 대기선 연직선과 전력선 도체가 이루는 차폐각을 -8° 이상으로 설계하였다. 또한 역섬락 고장을 방지하기 위하여 첩탑의 탑각절지저항 설계기준은 15Ω 이하로 하였다. [1]

3.2 오손지역별 애자설계

345kV 이하 송전선로의 오손등급은 청정, A, B, C, D지역으로 구분하였으나 765kV 송전선로의 애자 소요량 산출을 위한 오손등급은 경제적인 절연설계를 위하여 ESDD (등가염분부착밀도/Equivalent Salt Deposit Density)를 세분화하여 기존의 청정지역(0.03mg/cm²)을 청정 I 지역(0.01mg/cm²)과 청정 II 지역(0.03mg/cm²)으로 구분하였으며 오손지역은 애자면이 높은 위치에 설치되므로 오손량의 저하를 감안하여 최대 오손지역을 B지역으로 설계하였다. 오손지역별 소요 애자수량은 청정 I 지역 현수에자련의 경우 내뢰에 대한 절연강도로 설계하였고 기타지역은 내오손기준으로 결정하였으며 오손지역별 소요 애자수량은 표2와 같다.

〈표 2〉 오손지역별 소요 애자수량

오손구분		청정 I 지역	청정 II 지역	오손A지역	오손B지역
염분부착량 (mg/cm ²)		0.01	0.03	0.063	0.125
소요 애자 수량	현수2련	320mm(N)	30	37	44
	내장3련	320mm(F)			39
		340mm	29	36	41
		340mm	28	36	41
		340mm		41	48

3.3 공기절연간격 및 아킹흔 능력

765kV 송전선로는 1상당 6도체로 전선의 장력이 매우 크기 때문에 과전압에 의해 애자가 손상되었을 경우 애자교체작업이 매우 어려운 실정이다. 따라서 과전압에 의한 섬락을 아킹흔으로 유도하기 위하여 모든 애자련에 아킹흔을 설치하였으며 아킹흔의 능력은 기본적으로 83% 이하를 유지하도록 하였다. 765kV 송전선로의 공기절연간격은 표3과 같으며 오손지역별 아킹흔의 간격과 혼 능력은 표4와 같다.

〈표 3〉 765kV 송전선로의 공기절연간격

애자련	절연간격	표준간격			
		표준간격	최소간격	상간간격	이상시간격
현수에자련		5,380 mm	4,530 mm	8,420 mm	1,850 mm
내장에자련		5,150 mm	4,310 mm	8,420 mm	1,850 mm

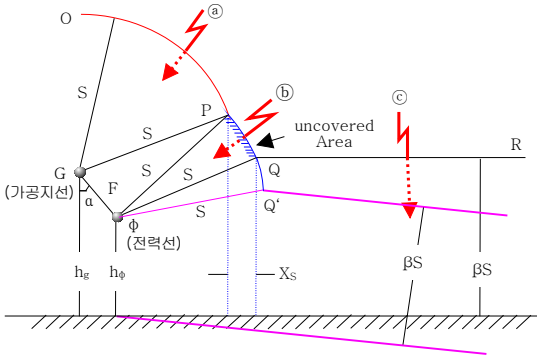
〈표 4〉 765kV 아킹흔의 능력

애자련	오손등급	혼 간격	청정 I 지역	청정 II 지역	오손A지역	오손B지역
			82.1 %	66.5 %	55.9 %	63.1 %
현수에자장치		4,800 mm	82.1 %	66.5 %	55.9 %	63.1 %
내장에자장치		4,600 mm	80.1 %	62.3 %	54.7 %	46.7 %

4. 765kV 송전선로의 낙뢰고장

4.1 낙뢰고장 발생 메커니즘

송전선로의 낙뢰고장은 크게 역섬락과 차폐실패로 구분할 수 있다. 역섬락(back flashover)은 2가지 형태로 구분할 수 있으며 첫 번째는 절탑 또는 가공지선에 뇌격이 가해져 절탑의 전위가 현저히 상승하게 되어 송전선로의 절연내력을 초과하게 되면 절탑에서 전력선으로 섬락하는 경우이며 두 번째는 가공지선에 뇌격이 가해지면 송전선로의 경간 내에서 가공지선으로부터 전력선으로 섬락이 발생하는 고장이다. 차폐실패(shielding failure)는 뇌격이 가공지선에서 차폐되지 않고 전력선에 직격되는 경우로 뇌에 의한 과전압이 선로 양측으로 진행하여 애자런에 도달하게 되며 이 과전압이 애자런의 내전압 보다 높은 경우 섬락을 일으키게 되는 고장으로 가공지선에 대한 Armstrong-Whitehead의 뇌격차폐 이론은 그림1과 같다.



〈그림 1〉 Armstrong-Whitehead의 뇌격차폐이론

그림1은 차폐실패 현상을 나타낸 것으로 뇌격 ①은 가공지선으로 유도되며, 뇌격 ②는 대지로 떨어지나 뇌격 ③은 전력선에 직격하게 된다. 이 때 각각의 범위를 정하는 호(弧)의 반경을 뇌격거리라 하며 뇌격전류의 크기(I)에 대하여 $S = 10I^{0.65}$ 의 값을 갖는다. 대지에 대한 뇌격거리는 상공의 도체에 대한 뇌격거리 S에 대하여 βS 로 표시되며, 이 때 β 값은 1.0(HV), 0.8(EHV) 또는 0.64(UHV)의 값을 사용한다. S에 대한 호 중에서 호 PQ는 뇌격에 대한 전력선의 노출범위가 되며, 대지경사각 θ_g 를 고려하면 이 범위는 호 PQ'로 늘어나게 된다. 뇌격의 각도가 단지 수직이라면 실제 뇌격에 대한 전력선의 노출범위는 호 PQ의 투영길이 X_s 가 되며 대지 경사각이 있는 경우에는 호 PQ'의 투영길이 X_s 가 된다. 차폐각이 0°보다 작을 경우 수직되에 대하여는 차폐실패가 일어나지 않으며 경사비에 대하여는 뇌격각도 증가에 따라 다소 차폐실패가 발생하나 뇌격각도가 증가되면 그 발생 확률 값을 감소하고 노출면도 작아지므로 차폐실패는 적어지게 된다. [3]

4.2 낙뢰고장 발생현황

765kV 송전선로의 낙뢰고장은 정전이 수반되지 않는 단상제폐로 1회 선 순간고장이 대부분으로 전체 낙뢰고장의 약 0.9% 정도로 매우 적으나 고장이 발생하게 되면 전력계통에 미치는 영향이 매우 크다. 765kV 송전선로는 최초 건설 후 현재까지 총 18건의 낙뢰고장이 발생하였으며 최근 들어 우리나라의 낙뢰발생빈도가 높아지면서 송전선로의 낙뢰고장도 증가하고 있다. 연도별 송전선로의 낙뢰고장 발생현황은 표5와 같으며 낙뢰로 인한 애자장치 섬락고장사태는 그림2와 같다.

〈표 5〉 송전선로 낙뢰고장 현황

구분 \ 연도	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	연평균
낙뢰고장	186	142	205	269	358	339	462	280
765 kV	1	2	0	0	4	5	7	2.6



〈그림 2〉 낙뢰로 인한 765kV 애자장치 섬락고장

5. 765kV 송전선로 낙뢰고장 분석

5.1 낙뢰사고율

765kV 송전선로의 경우 연간뇌우일수(IKL) 20, 절탑높이 85m, 대지경사각 10°, 탑각접지저항 15Ω, 가공지선 2조(창출길이는 전력선에 1m 가산한 값)를 기준으로 하였을 경우 역섬락사고율(BFOR / Back Flashover Rate) 0.263 건/100km·year, 차폐실패사고율(SFFOR / Shielding Failure Flashover Rate)은 0.129 건/100km·year로 총 낙뢰고장률을 0.39건/100km·year로 예측하고 목표사고율은 연간 0.35건/100km 이하로 결정하였다. 그러나 765kV 전체 송전선로인 2C-377.3km에 대한 연간 낙뢰사고율은 표6과 같이 설계목표 1.32건 보다 2.6배나 많은 3.4건을 기록하고 있다.

〈표 6〉 765kV 낙뢰고장현황 및 낙뢰사고율

선로명	오순지역별 낙뢰고장 (건)				연간낙뢰사고율(건)	
	청정 I	청정 II	오순A	오순B	목표	실적
당진화력					0	0
신 서 산	1	3			0.480	0.687
신 태 백	13				0.542	2.517
신 울 진	1				0.163	0.233
합 계	15	3	0	0	1.320	3.437

5.2 낙뢰고장 분석

765kV 송전선로의 낙뢰고장 중 약 80% 정도가 ESDD가 0.01mg/cm² 이하인 청정 I 지역에서 발생하였으며 대부분이 아킹혼 섬락고장으로 애자의 오순에 의한 영향은 적은 것으로 판단된다. 신태백 송전선로의 고장 유형을 송전선로 뇌사고율 예측계산 프로그램으로 분석한 결과 역섬락고장이 42.8%, 차폐실패 고장이 57.2%로 분석되었다. 청정 I 지역의 경우에는 대부분이 산악지역으로 해발고도가 높아 공기밀도가 낮게 되므로 공기절연내력의 저하로 인해 아킹혼 간의 섬락이 일반 평지에서 보다 쉽게 발생하게 된다. 또한 대지경사각이 크게 되어 차폐실패 고장확률이 증가하게 되며 실제 신태백 송전선로의 낙뢰고장 발생개소의 대지경사각은 8~25°로 차폐실패 고장확률이 다른 송전선로 보다 매우 높다.

6. 765kV 송전선로 낙뢰고장 방지대책

6.1 낙뢰고장 저감대책

송전선로의 낙뢰고장을 방지하기 위하여 절탑접지저항의 저감, 아킹혼 간격의 증대, 가공지선 차폐각의 증대, 피뢰기 설치 등이 있다. 절탑접지저항 저감방안은 역섬락 고장을 감소시킬 수는 있으나 실제 절탑접지저항은 10Ω 이하로 매우 낮아 낙뢰고장 저감효과는 매우 적으며 차폐실패 고장을 감소시키기 위하여 가공지선 암의 창출길이를 증가하여도 그 효과는 매우 적다. 그러나 차폐실패 고장에 대한 대지경사각의 영향은 매우 크다. IKL 20, 경간 350m, 탑각접지저항 5Ω인 송전선로의 대지경사각이 0°일 경우 연간 차폐실패 사고율은 0.023, 5°일 경우 0.426, 10°일 경우 0.611, 15°일 경우 0.822 건/100km로 대지경사각의 증가에 따라 차폐실패 사고율은 기하급수적으로 증가하게 되므로 신설 송전선로의 경우 가급적 대지경사각이 적은 지형을 선택하여야 한다.

6.2 아킹혼 간격의 증대

공기의 절연내력은 AC의 경우 약 21kV/cm, DC의 경우 약 30kV/cm 이나 해발고도가 높아질수록 기온과 기압, 공기밀도가 떨어지게 되어 공기의 절연내력은 저하하게 된다. 또한 낙뢰는 비를 동반하게 되므로 공기는 습윤상태가 되어 공기의 절연내력은 7~8kV/cm 정도로 급격히 저하된다. 따라서 해발고도가 높은 지역의 경우 공기절연내력의 저하를 고려하여 아킹혼의 간격을 증대하므로써 낙뢰고장을 감소시킬 수 있다.

7. 결 론

765kV 송전선로의 고장은 전력계통의 안정에 매우 큰 영향을 미치고 있으나 낙뢰고장이 설계목표를 초과하여 발생하고 있어 낙뢰고장 예방이 매우 시급한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 765kV 송전선로의 낙뢰고장 유형과 낙뢰사고율 그리고 낙뢰고장 발생원인을 분석하고 고장 방지대책으로 대지경사각을 적게 하고 아킹혼 간격을 증대하는 방안을 제시하였다. 그러나 아킹혼의 간격을 증대하는 방안에 대하여는 향후 애자면으로 섬락하기 시작하는 임계통락전압을 고려한 아킹혼의 간격과 좌표 결정, 아킹혼의 형상과 특성에 대하여 연구하여야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 765kV 송전선로 절연설계지침 및 해설서, 한국전력, pp.3~12, 1994
- [2] EPRI AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above, Third Edition, EPRI, pp.6-50~6-51, 2005.12.
- [3] Transmission Line Reference Book-345kV and Above, Second Edition, Electric Power Research Institute, pp.567~569, 1982