

한국전력과 대만전력의 가공송전선로에 대한 낙뢰고장의 통계적 비교

유명호, 강희권
한국전력 성동전력소

The Statistical Comparison of Lightning Faults of
Overhead Transmission Line between KEPCO and TPC

YOO MYEONG-HO, KANG HEE-KWON
KEPCO Seongdong Power Office

Abstract - 가공 송전선로의 낙뢰고장은 송전설비가 국토 전 지역에 분포되어 있기 때문에 고장 점유율이 가장 높다. 또한 낙뢰가 아주 큰 전기량과 짧은 순간에 방전하는 특성뿐 아니라 다양한 구름의 변화형태에 따른 낙뢰 발생 패턴이 달라 아직까지 이를 예방하거나 제어하는 기술은 높지 않은 수준에 있다. 이 논문은 자연환경이 비슷하고 전압레벨과 전력계통이 유사한 한국전력(KEPCO)과 대만전력(TPC)의 6년간의 송전선로 낙뢰고장을 통계적으로 비교하여 낙뢰고장과 전력선의 차폐각과의 관계적 원인을 도출하고자 하였다.

이에따라 전력선의 차폐각에 따른 낙뢰고장 발생 확률을 시뮬레이션 프로그램을 통하여 도출하고 실제 양 전력회사의 차폐각별 송전선로의 낙뢰고장 발생빈도와 비교하였다.

1. 서론

가공송전선로의 낙뢰고장은 고장의 발생빈도가 아주 높아 송전선로 총 고장건수의 약 50%를 점유하고 있을 뿐 아니라 고장위치를 확인하고 복구하는 시간이 많이 소요되어 전력공급에 막대한 지장을 초래한다. 더구나 고장의 형태 또한 뇌의 종류와 크기에 따라 달라지며 큰 전기량을 가진 구름이 송전설비에 접근하는 방향과 형태에 따라 뇌격의 종류도 다양각색이다. 낙뢰고장은 일반적으로 직격뇌와 유도뢰로 분류되며 대부분 직격뇌에 의해 고장으로 진전된다. 직격뇌는 다시 전력선에 직접 방전되는 형태와 가공지선 및 첩탑 구조물에 방전되어 역섬락되는 형태로 구분되며, 양자 모두 송전선로의 절연내력보다 훨씬 높은 전압으로 (역)섬락(Flashover)에 의한 고장을 일으킨다. 낙뢰를 일으키는 구름의 전기량은 대략 10억

V에 수만A의 엄청난 전기량에 약 1,000분의 5초의 짧은 시간에 방전되는 극소시간 특성으로 낙뢰제어 기술개발 보다는 고장예방 차원의 설비운영을 하고 있는 것이 현실이다. 이에 따라 전력설비 구조나 하계우기와 태풍시기 등 자연환경 조건이 비슷한 대만전력(TPC)의 가공송전선로에 대한 낙뢰 고장현황을 조사하고 한국전력(KEPCO)과 통계적으로 비교분석하여 낙뢰고장과 전력선의 차폐각과의 관계를 뇌사고율로 비교하고자 하였다.

2. 송전설비와 고장 현황조사

2.1 KEPCO와 TPC의 송전설비 현황비교

KEPCO와 TPC의 가공송전설비는 표1에서와 같이 단순히 공장으로 비교하여 10,591km와 14,148km로 KEPCO의 약 75%(회선공장의 경우 50%)정도를 운영하고 있으며, 765kV, 345kV 등 초고압설비가 많은 KEPCO에 비하여 69kV 송전선로가 52%를 점유하고 있다. 또한, TPC의 지중 송전선로는 총 회선 공장이 1,109C-km로 KEPCO의 1,608C-km에 비하여 약 70% 정도를 보유하고 있고 KEPCO의 345kV, 154kV 설비가 총 지중설비의 87%를 차지하고 있는 반면 TPC전력은 154kV가 45%, 69kV가 55%를 점유하고 있다.

2.2 양시간 가공송전선로 고장현황 비교

가공송전선로 총고장건수 비교는 2000년도 단위공장(km)당 총 고장건수의 경우 한전이 0.016건/km으로 대만의 0.0429건/km에 비하여 약37% 수준이지만, TPC는 설비가 취약한 69kV에 고장이 집중(72%)되어 있을 뿐 아니라 345kV선로에 있어서의 고장율이

0.0129건/km로 KEPCO보다 낮고 154kV 선로에 있어서는 0.0309km/건으로 KEPCO의 0.0188km/건 보다 높다.

표1. KEPCO와 TPC의 전압별 송전설비(공장) 현황 (단위 : km)

구분 전압	한국전력			대만전력		
	가공	자중	계	가공	자중	계
765kV	298	-	298	-	-	-
345kV	3,594	46	3,640	2,088	-	2,088
154kV (161)	7,922	749	8,671	2,648	333	2,981
66kV (69)	1,397	11	1,408	4,878	644	5,522
HVDC	30	101	131	-	-	-
합계	13,241	907	14,148	9,614	977	10,591

표2 KEPCO 년도별 총고장건수와 km당 고장건수

전압 별	연 도 별							공장 (km)	2000년 km당 고장건수
	95	96	97	98	99	00	계		
765	-	-	-	-	0	0	0	298	0
345	16	24	45	38	23	51	197	3,594	0.0141
154	47	123	125	163	103	149	710	7,922	0.0188
66	14	40	25	17	14	12	122	1,397	0.0086
계	77	187	195	218	140	212	1029	13,241	0.0160

※ 순간고장 포함, '95는 영구고장만 집계.

표3 TPC 년도별 총고장건수와 km당 고장건수

전압 별	연 도 별							공장 (km)	2000년 km당 고장건수
	95	96	97	98	99	00	계		
345	38	57	44	41	42	27	249	2,088	0.0129
161	71	86	83	93	83	82	498	2,648	0.0309
69	246	383	323	374	314	304	1,944	4,878	0.0623
계	355	526	450	508	439	413	2,691	9,614	0.0429

2.3 가공송전선로 년도별, 고장원인별 비교

표4 KEPCO 년도·원인별 고장건수

고장원인	연 도 별							점유율 (%)
	95	96	97	98	99	00	계	
낙뢰	19	93	111	160	82	123	588	57.14
풍우	2	-	6	-	15	24	47	4.57
빙설해	-	1	2	9	-	-	12	1.17
열진해	-	-	1	-	1	1	3	0.29
외물접촉	22	49	42	31	32	22	198	19.24
화재	17	17	15	5	1	17	72	7.00
일반인과실	1	1	-	-	-	-	2	0.19
작업자과실	3	5	1	1	2	1	13	1.26
타사고파급	5	8	12	3	4	6	38	3.69
자연열화	1	4	-	1	-	1	7	0.68
천재지변	-	-	-	-	-	-	0	0.00
제작불량	2	1	1	5	1	6	16	1.56
시공불량	3	2	-	-	1	-	6	0.58
원인불명	-	3	4	2	1	8	18	1.75
기타	2	3	-	1	-	3	9	0.88
계	77	187	195	218	140	212	1,029	100.0

표5 TPC 원인별 고장건수

故障原因	年						六年合計	佔比例 (%)
	95	96	97	98	99	00		
1 設備不良	1	2	2	0	0	5	10	0.37
2 設備劣化	5	11	4	6	4	2	32	1.19
3 電機動作不良	1	1	1	1	2	2	8	0.30
4 副線感應電壓	1	0	0	0	0	1	2	0.07
5 維護不良	1	2	3	0	2	1	9	0.33
6 本單位工作不備	0	0	2	3	0	1	619	0.22
7 其他單位工作不備	2	0	1	1	0	3	7	0.26
8 施工或設計不良	1	1	3	3	0	1	9	0.33
9 民衆過失	111	137	87	98	95	126	654	24.3
10 異處障害	31	63	6	3	12	18	133	4.94
11 雷 害	91	180	230	278	230	116	1125	41.8
12 風 害	10	47	18	29	10	37	151	5.61
13 其他天然災害	7	2	3	3	8	7	30	1.11
14 鳥獸接觸	3	2	3	5	6	9	28	1.04
15 原因不明	7	19	5	7	8	2	52	1.93
16 其 他	83	59	80	69	62	82	435	16.2
6年總計	355	526	450	508	413	439	2691	100.

○ 양사간 가공송전선로의 과거 6년간 고장원인별 비교는 양사 공회 외물접촉(민중과실)이 약 20% 정도의 고장점유율을 차지하고 있으며 또한 기타 고장원인도 점유율이 비슷한 정도이나 낙뢰에 의한 고장은 KEPCO가 57.1%로 TPC의 41.8%에 비해 약 15% 정도 높은 것이 특이한 사항이다. 따라서, 우리보다 2배이상 우기기간이 긴 TPC의 자연조건을 감안하면 "KEPCO의 낙뢰고장 점유율은 상당히 높다"고 평가할 수 있다.

표6 KEPCO 전압별 낙뢰고장 현황

전압	연도							계
	95	96	97	98	99	00		
345	30	10	17	26	9	25	117	
154	117	61	77	127	69	92	543	
66	47	22	17	7	4	6	103	
계	194	93	111	160	82	123	763	

※ 순간고장 포함

표7 TPC 월별 낙뢰고장 현황

年 月	95	96	97	98	99	00	01	合計	佔比例 (%)
	1	0	0	0	5	0	0		
2	0	0	0	20	0	0	0	20	1.45
3	0	1	15	2	4	0	0	22	1.60
4	0	4	5	15	2	1	3	30	2.18
5	3	6	18	26	6	6	20	85	6.18
6	6	52	60	34	40	18	54	264	19.22
7	52	41	65	78	64	47	46	393	28.52
8	20	62	41	54	79	25	95	376	27.33
9	8	11	22	37	18	11	33	140	10.17
10	2	3	0	7	17	8	0	37	2.69
11	0	0	4	0	0	0	0	4	0.29
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
合計	91	180	230	278	230	116	251	1376	100

2.4 고장통계 종합분석

상기 2.3항의 양사간의 고장원인별 통계를 비교함으로써 알 수 있는 바와 같이 TPC가 가공송전선로 설비량(공장)에 있어서 약 75%로 차이는 있지만 고장원인별 분포와 낙뢰고장 분포에 있어 거의 비슷한 패턴의 고장유형과 분

포를 발견할 수 있다. 다만, 연간 km당 고장 건수 분석에서 KEPCO의 고장율이 0.016건/km로, TPC의 0.0429건/km보다 약 1/3로 정도로 고장 발생률이 작으나 이는 TPC 송전 설비의 반 이상이 취약한 69kV 선로를 운영하고 있는 점과 또한, 우기기간이 한국의 약 2배인 6개월간 지속되는 점 그리고 태풍의 영향을 많이 받는 지역적 기후 특성 때문으로 분석된다.

그러나, 고장원인별 비교에서 KEPCO의 낙뢰고장 점유율이 57.14%로, TPC의 41.81%보다 16%나 크게 높은 것은, KEPCO에서는 154kV이하 송전선로의 대부분이 1조 가공지선으로 상단암 기준 차폐각이 30° 이상인데 반해, TPC에서는 345kV, 154kV, 66kV송전선로의 전체 가공지선이 2조 가공지선형으로 중단암기준 차폐각이 10°이하를 유지함으로써 낙뢰고장감소에 대한 영향이 큰 것으로 판단된다. (세부내용 3항 참조)

3. 345kV 현수형 표준철탑의 변화

그림 3.1은 TPC의 345kV 송전선로 철탑 중 현수형 표준철탑으로 초창기 건설된 南北一路(Old Type), 중반기 건설된 北核系列선로, 최근의 南北二路(New Type)의 제원을 보여준다. 여기서 南北一路(Old Type) 철탑의 차폐각이 10°정도로 보호범위가 좁았으나 이후 건설된 北核系列선로와 南北二路(New Type)에서는 낙뢰에 대한 보강대책으로 차폐각이 0°이하로 유지되도록 보호범위를 확대하고 있음을 알 수 있다. (한전 345kV 현수형 철탑 상단암 기준 : 0°, 중단암 기준 : 약 7°) 즉 TPC의 345kV 현수형 표준철탑에서 2조 가공지선용 암의 폭이 초기단계에서는 9.6M, 중기단계에서는 13.4M, 최근에는 16M로 계속 확장하여 負의 차폐각을 유지하고 있다. 따라서 TPC 345kV 현수형 표준철탑 차폐각은 최근 건설되는 345kV철탑의 경우 최하단암 기준 0° (상단암 기준 -20°)로 건설되고 있다. 또한 KEPCO도 76년도 건설된 초창기 345kV 현수형 표준철탑(가공지선 2조)의 경우 차폐각이 상단암 기준 12°이었으나, 최근 0°의 차폐각으로 건설되고 있으나 TPC의 차폐각 수준에는

미치지 못하고 있다. 게다가, KEPCO에서 채택하고 있는 중단암이 제일 길게 되어있는 Offset 철탑형과는 달리 상단, 중단, 하단암이 거의 동일한 형태로 디자인되어 있는 점은 착빙설에 의한 전선의 도약(Sleet Jump)이 없는 지역에서의 철탑형태로서 낙뢰에 대한 전력선의 보호범위가 확대되어 가공지선의 차폐 효과가 훨씬 양호한 것으로 판단된다.

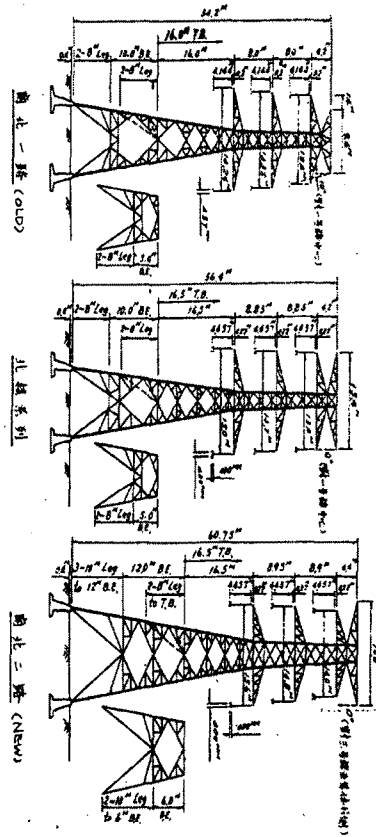


그림 1 TPC의 345kV 현수형 표준철탑의 변화

4. 양사의 가공지선 차폐각 및 절연설계 적용 기준

표 8 KEPCO의 가공지선 차폐각 및 절연설계 현황

구분	차폐각(°)		접지저항 (오姆)	IKL(회)
	상단임기준	중단임기준		
765kV	2조 : -8	2조 : -4	15	30
345kV	초청기 (76)	2조 : 12	2조 : 14	20
	최 근	2조 : 0	2조 : 7	
154kV	2조 : 5	2조 : 9	15	20
	1조 : 30	1조 : 35		
66kV	1조 : 30	1조 : 35	30	20

표9 TPC 가공지선 차폐각 및 절연설계 적용기준

구 분	차폐각(°)		접지저항 (오姆)	IKL(회)
	상단임기준	중단임기준		
345kV	초청기	10	6	20
	중기	0	2	
	최 근	-8	12	
161kV	10 이하		20	30-40
69kV	10 이하		10-20	30-40

5. 뇌사고율 계산

송전선은 가공지선에 의해 차폐되어 도체에의 직격뢰를 방지토록 하고 있으며 뇌차폐에 대해서는 여러 가지 방법이 제안되고 있으나 주로 A-W이론에 근거를 두고 있다. 낙뢰에 관한 송

전선의 영향은 역섬락사고율(BFOR:back flash over rate)과 차폐실패 사고율(SFFOR:shielding failure rate)로 나누어진다. 여기서 역섬락 사고율은 낙뢰가 철탑 및 가공지선에 떨어져 철탑의 순간적인 전위상승에 의해 상도체를 역섬락하는 사고를 말하고 차폐실패 사고율은 가공지선에 의한 차폐가 실패되어 섬락하는 회수를 말한다. 역섬락 사고율은 주로 낙뢰의 파형과 접지저항 등에 크게 좌우되고, 차폐실패 사고율은 철탑의 높이(지상고)와 가공지선 및 상도체의 배열, 즉 철탑의 형태(차폐각)에 의하여 좌우되게 된다. 뇌사고율 계산은 EPRI의 Flash 프로그램을 이용하여 한국전력과 대만전력의 345kV 송전선로 현수형 표준철탑을 기준으로 계산하였다.

표10 KEPCO 345kV 송전선로의 뇌사고율 계산치(IKL 20)

[건/100km·년]

구분	A2-16(OLD) 가공지선 2조 가공지선임 5.9m	A2-30(NEW) 가공지선 2조 가공지선임 6.7m	평균
역섬락	0.227	0.437	0.332
차폐실패	0.011	0.264	0.137
뇌사고율	0.238	0.701	0.479

※ 계산조건 : 지반경사각-20%, 접지저항-10Ω

표11 KEPCO 154kV 송전선로의 뇌사고율 계산치(IKL 20)

[건/100km·년]

구분	A2-15(OLD) 가공지선 1조	A2-25(NEW) 가공지선 2조	평균
역섬락	1.465	1.122	1.293
차폐실패	0.141	0.034	0.088
뇌사고율	1.605	1.156	1.381

※ 계산조건 : 지반경사각-20%, 접지저항-10Ω

표12 TPC 345kV 송전선로 의 뇌사고율 계산치 (IKL 35)

[건/100km·년]

구분	南北一路 (OLD) 가공지선암 4.8m	北核系列 가공지선암 6.7m	南北二路 (NEW) 가공지선암 8.0m	평균
역섬락	1.549	1.455	1.511	1.505
차폐실패	0.596	0.300	0.175	0.357
뇌사고율	2.145	1.754	1.686	1.862

※ 계산조건 : 지반경사각-15%, 접지저항-10Ω

표13. KEPSCO와 TPC의 뇌사고율 비교

[건/100km·년]

구분	전압	KEPSCO	TPC	비교
실적	345kV	0.542	0.830	
	154kV	1.142	1.309	
계산치	345kV	0.479	1.862	
	154kV	1.381	-	

EPRI Flash 프로그램은 상기표 10,11,12 에서의 계산치 결과와 같이 역섬락에 의한 뇌사고 점유율이 차폐실패에 의한 값보다 월등히 높다(5~10배). 이는 본래 뇌전압이 송전선로의 절연레벨 보다 워낙 높기 때문에 철타접지저항과도 관계가 있다. 그러나 이논문에서는 낙뢰발생시기가 주로 우기인점과 우기시 접지저항은 양사 규정치 20Ω이하를 만족한 것으로 판단하여 주로 차폐율을 비교하고자 하였다.

표 12에서 TPC 뇌사고율은 과거 南北一路 (Old)보다 최근 철타인 北核系列, 南北二路 (New) 송전선로가 가공지선 암길이 증대에 의한 차폐각 개선으로 뇌사고율이 감소하였으며, 뇌사고율중 역섬락 사고율은 크게 변하지 않았으나 차폐실패 사고율은 과거철타에 비하여 상당히 감소되었다. 표 10의 KEPSCO 결과치와 비교하면 뇌사고율이 약 2.5배(동일 암길이)로 이것은 TPC 의 우기기간이 2배, 설계기준 IKL 약 30~40으로 KEPSCO 설계기준 IKL

20의 약2배일 뿐아니라 철타지상고의 차이에 따라 TPC의 뇌사고율도 높은 것으로 판단된다.

또한 표13에서 나타난 뇌사고율의 실적과 계산치 비교에서 TPC의 실적치가 계산치의 50% 이하로 나타난 것은 확실적인 계산치대로 동일한 사고가 발생치 않고 랜덤(변화무쌍)한 기후 조건의 영향으로 판단된다. 또한 KEPSCO의 345kV선로의 뇌사고율 계산치에 대한 실적치 비율이 비슷한 반면 TPC의 45%는 KEPSCO 보다 뇌사고율 면에서 낙뢰고장 방지를 강화하고 있는 근거로 볼 수 있으며 KEPSCO의 뇌사고율을 더 감소시키기 위해서는 대만의 345kV 철타에 있어서 차폐실패 사고율을 감소하는 것과 같이 가공지선암을 보다 더 확대하여 차폐각을 확보하는 방안이 좋을 것으로 판단된다.

6. 결론

TPC는 전력설비 건설이나 설비운영에서 모두 아시아 문화권과 지역적 특성 때문인지 한국과 매우 비슷한 자연여건과 사회현실을 가지고 있었으며 거의 유사한 경험들을 가지고 있다. 전력수요의 차이 때문에 송전설비가 약 1/2 수준인 것을 제외하면, 전력계통의 직접접지방식과 절연계급(전압)도 비슷하고, 고장유형과 점유율도 흡사한 점이 많다.

본 논문에서는 KEPSCO과 TPC의 낙뢰고장 통계를 바탕으로 고장율을 도출하고 EPRI Flash 프로그램으로 계산한 뇌사고율과 비교하였으며, 이에 따른 결론은 다음과 같다.

6.1 TPC의 낙뢰고장의 점유율이 KEPSCO의 57.1%보다 낮은 41.81% 라는 것은 우리보다 2배이상 긴 우기를 감안하면 TPC의 낙뢰고장 점유율은 상당히 낮은 편이다. 이는 345kV, 161kV, 69kV 철타 모두 2조의 가공지선을 설치하여 가공지선의 차폐보호 범위를 넓혀서 낙뢰고장을 최대한 억제하고 있는 것으로 분석된다.

6.2 EPRI의 Flash프로그램을 이용하여 345kV 송전선로의 뇌사고율을 계산한 결과 대만전력의 뇌사고율이 한국전력의 약1.5배이며, 이것은 설계기준 IKL 약 30~40으로 우리나라 설계기준 IKL 20의 약1.8배에 따라 대만의 뇌사고율이 높은 것으로 판단된다. EPRI

Flash 프로그램의 적용상에서 역설락 사고율이 차폐실패의 뇌사고율보다 10배이상 큰 결과치는 지속적인 데이터 축적을 통하여 검증되어야 할 과제이다.

6.3 또한 KEPSCO의 뇌사고율을 좀더 감소시키기 위해서는 최근 철탁의 높이, 즉 지상고가 높아짐에 따라 뇌사고율이 높아지고 있어 154kV 송전선로의 2조 가공지선화 등 차폐각 보호범위의 강화와 접지저항의 저감이 필요한 것으로 판단된다.

[참고문헌]

1. 대만전력 “뇌뢰설계기준”1998.12
2. 대만전력 “송전선로 접지기준”1986.2
3. 대만전력 “1999년 臺灣地區落雷精測資料之 建立 完成報告”2000.12
4. 한국전력공사 “765kV 계통절연 협조연구” 1996. 2
5. 한국전력공사 “송전선로 낙뢰고장 원인분석 사례” 2000.12
6. 한국전력공사 “송전 설계기준 제·개정 및 보완 연구”2001.5
7. 한국전력공사 ‘제24차 대만전력 연수보고서’ 2001.11
8. M.E,Almeida,M.T.Correia de Barros, ‘Tower modelling for lightning surge analysis using Electro-Magnetic Transients Program’,1994. 5
9. T.Yamada, A.Mochizuki, J.Sawada, E.Zaima, ‘Experimental evaluation of a UHV TOWER MODEL for lightning surge analysis’,1994
10. T.Hara, O.Yamamoto, ‘Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis’ 1996,5