



# 송전선로용 피뢰기 적용 현황 및 향후 계획

곽 주 식

KEPCO 전력연구원 선임연구원



## 1. 개 황

현대문명이 발달할수록 전력에너지에 대한 의존도는 절대적이라 할 수 있을 정도로 높아져 왔으며, 앞으로도

꾸준히 증가할 것으로 전망된다. 전력수요가 증가하는 만큼 발전소도 증가하고 있으나, 전력소비가 많은 대도시 주변에는 발전소의 입지선정이 어려워 전력의 주된 소비 지역과 멀리 떨어져 있다. 발전소에서 생산된 전력은

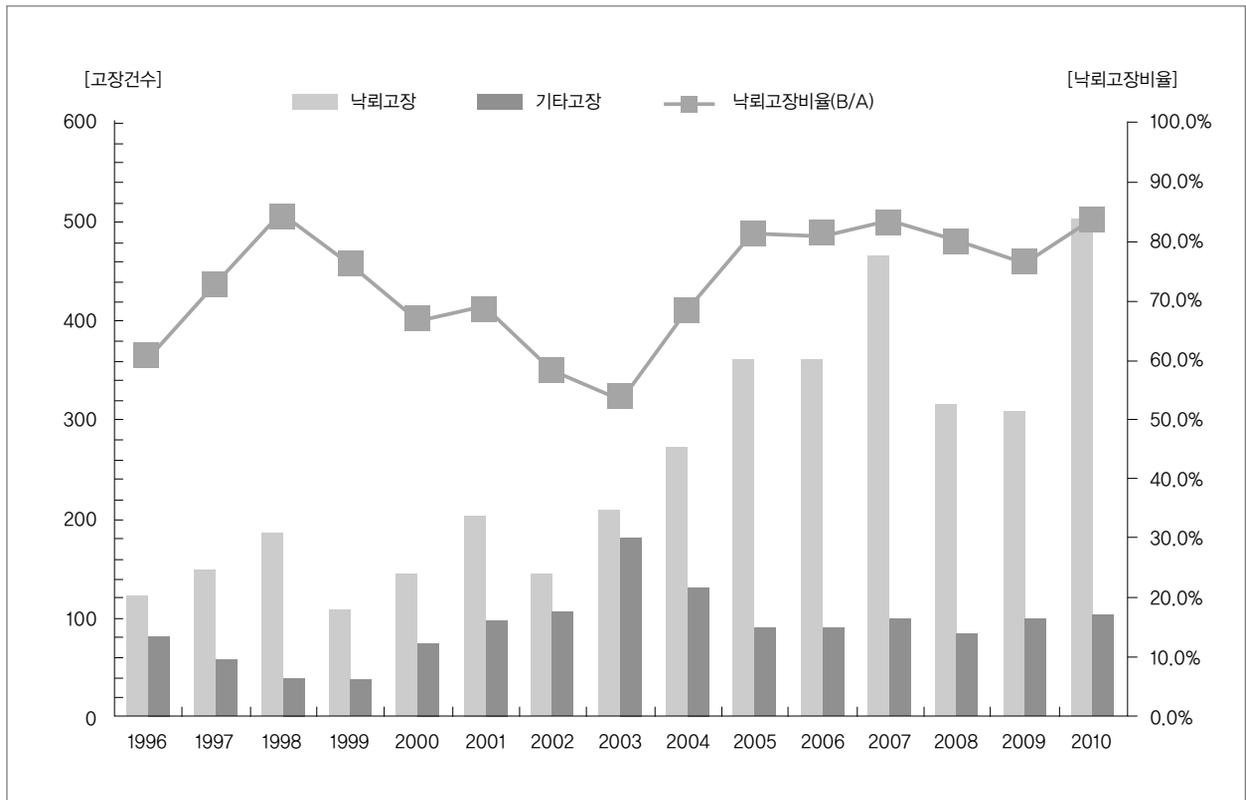
송전선로를 통하여 소비자에게 전달되는데 송전선로의 대부분은 외부환경에 직접적인 영향을 받는 가공선로로서 기상현상에 기인하는 고장 발생에 항상 노출되어 있다.

특히, 태풍과 폭우 발생이 집중되는 여름철에는 낙뢰에 의한 고장 발생비율이 높으며, 전체 송전고장의 약 80%가 낙뢰에 의한 것으로 확인되고 있다. 그림 1은 한국전력 공사 송전계통의 낙뢰고장 통계자료이다.

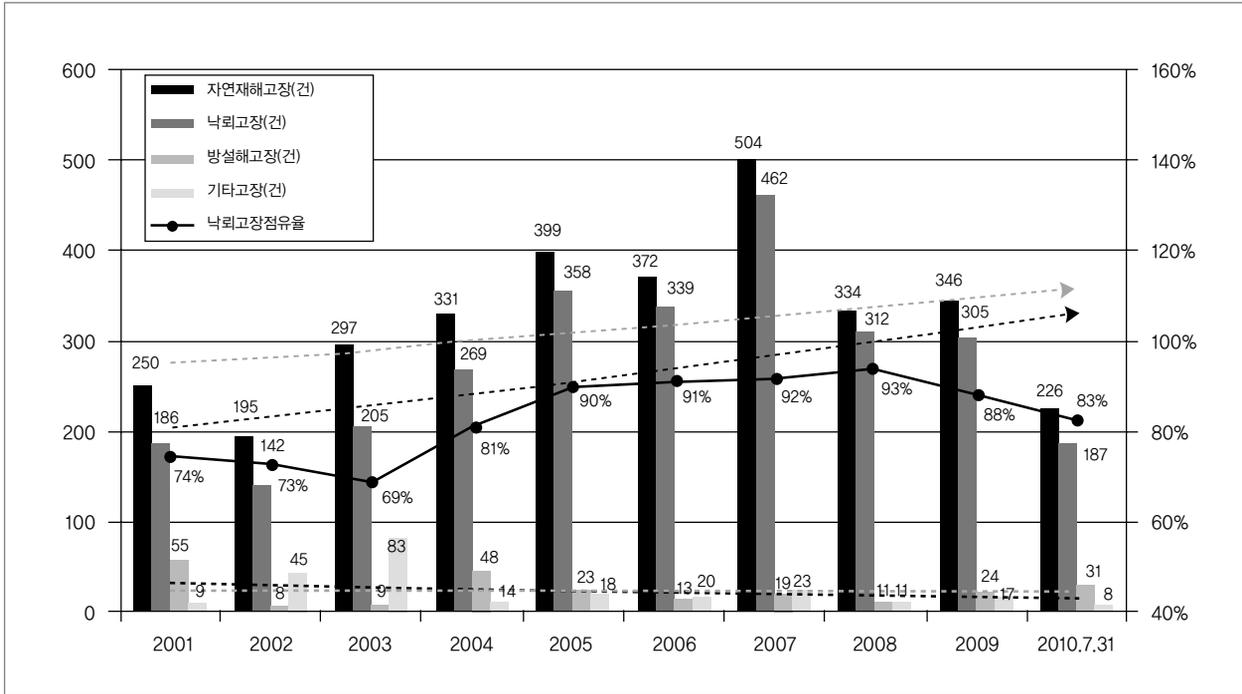
송전선로에는 가공지선을 설치하여 전력선에 낙뢰가 직접 맞지 않도록 하고, 철탑의 접지저항을 낮게 유지하여 뇌과전압이 신속히 대지로 방전되도록 하고 있다. 뿐만 아니라 낙뢰로 인하여 발생된 과전압이 계통에 속해 있는 전력기기에 직접적인 손상을 주지않게 하기 위하여, 뇌과전압이 유입되는 시점에 차단기를 신속히 동작시켜 뇌과전압을 제거시킨 후 다시 차단기를 투입,

자동적으로 전력을 공급할 수 있도록 보호 장치를 운영하고 있다. 따라서, 낙뢰로 인한 직접적인 고장발생으로 인한 정전 비율은 매우 낮은 수준으로 억제되고 있다. 그럼에도 불구하고 재폐로 과정 중에서 발생하는 순간 전압 변동이나 보호범위를 넘어선 뇌과전압으로 인하여 정전으로까지 이어질 수 있다. 또한 민감한 부하의 비중이 커지고 소비자의 기대와 요구수준도 높아지고 있어 전력 회사는 낙뢰고장을 방지할 수 있는 신기술을 꾸준히 개발하여 활용하고 있다.

전력기기의 품질이 높아지고 시스템 운영기술의 발전으로 자연재해 이외의 고장은 낮은 수준으로 억제되고 있다. 하지만 낙뢰와 같은 자연재해에 의한 영향이 상대적으로 증가하고 있어, 전력설비의 안정적인 운영을 위해 근본적인 내뢰대책의 재검토가 요구된다.



[그림 1] 송전선로 고장 발생 현황



[그림 2] 자연재해 고장 발생 현황(낙뢰고장 추이 포함)

그림 2는 자연재해로 인한 송전선로의 고장현황 자료이다. 이 고장통계는 낙뢰로 인한 보호 장치의 정상적인 동작을 모두 포함한 것이며, 이 중에서도 전력공급에 지장을 준 경우는 낙뢰 고장 462건 중에서 2.8%(2007년 기준)에 불과하다. 이와 같이 대부분 고장의 경우 재폐로가 성공적으로 동작하고 공급선로가 이중화되어 정전의 확률은 매우 낮아지고 있다. 그럼에도 불구하고 순간적인 전력품질의 변동에 매우 민감한 부하가 증가하고 있어 고객의 관심은 정전이 아닌 전력품질로 이동해 있다. 또한 잦은 재폐로 동작으로 인한 변전기에서 취약한 개소가 발견되고 있다. 과거에는 재폐로에 의한 순간전압 강하는 큰 문제로 인식되지 않았다. 낙뢰 발생 빈도도 지금과 비교해 보았을 때 많지가 않아 절연설계가 적절한 것으로 판단되었다. 그러나 현재는 재폐로와 같은 순간 전압강하 현상도 전력품질 차원에서 문제시 되고 낙뢰 발생 빈도도 높아져서 낙뢰로 인한 고장 체감정도가 높게 인식되고 있다. 아킹혼 사용에 대한 적정성 재검토나

IKL 증가에 따른 절연설계의 재검토, 송전선로용 피뢰기의 확대적용 및 개발 등 기술적 해결 요구가 증가하고 있는 실정이다.

낙뢰로 인한 정전, 순간 전력품질 저하, 통신 두절 등과 같은 1차적 피해로부터 전철 및 고속철도와 같은 대중 교통의 마비, 반도체·화학·정유 공장의 불시 가동 중단 등 파생되는 경제적 손실이 증가함에 따라 신뢰도 높은 피뢰설비 및 내뢰설계가 요구되고 있다.

사용 중인 송전계통의 낙뢰 대책으로는 가공지선의 설치 및 다조화, 접지저항 저감, 애자련 보호를 위한 아킹혼, 송전선로용 피뢰기 등이 있다.

### 가. 가공지선의 설치 및 다조화 설치

가공지선은 건설비를 증가시키고 운영 중 전력손실이 발생하는 단점이 있으나 가장 오래되고 효과가 우수한 송전선로 내뢰대책으로 사용되어 왔다. 또한 전력선에 낙뢰가 직격되는 것을 방지해 주는 차폐효과와 뇌격

전류가 가공지선으로 잘 흐르도록 하여 철탁의 탐각으로 흐르는 뇌격전류를 분산시켜주는 분류효과가 있다. 가공지선의 3조화는 일부 외국에서 낙뢰가 매우 심한 개소에 한정하여 사용 중에 있다.

#### 나. 접지 저항의 저감

접지저항을 낮추면 고장률은 저하하지만 접지저항을 매우 낮게 유지하려면 시공비가 급격히 증가하여 비경제적이 된다. 특히 우리나라와 같이 대지 저항률이 높은 산악지형을 통과하는 선로가 대부분인 경우 접지저항을 저감시키는데 한계가 있으므로 설계기준에서는 전압 계급별로 접지저항 목표 값을 정하여 관리하고 있다. 접지 저항을 저감하기 위한 기본적인 방법으로는 매설지선을 사용하고 있으며, 필요에 따라 침상접지봉, 도전성 콘크리트 등 보조접지 설비를 추가로 설치하고 있다.

#### 다. 아킹혼

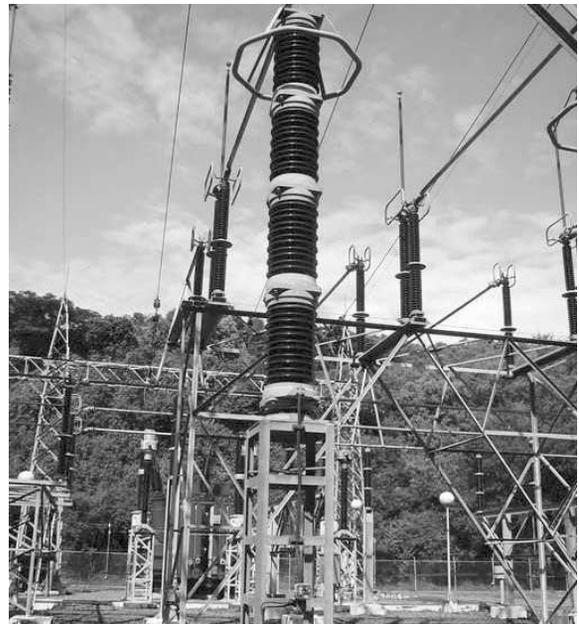
낙뢰고장 시 애자의 손상을 방지하는 것을 주 목적으로 설치하며 금구류가 아크에 의해 용융되는 현상을 방지하고, 전선의 용융 방지 및 코로나 발생 또한 억제시켜 주는 효과가 있다. 일시적인 순간고장이 증가할 수 있으나 애자 손상에 의한 영구적으로 고장발생을 낮추는 효과가 있다. 하지만 아킹혼에 의한 잦은 재폐로 때문에 차단기의 동작 빈도가 높아져서 기기의 수명이 단축되는 단점과 재폐로 과정에서 일어나는 순간전압강하도 민감한 부하에서 민원이 제기되고 있어 근본적인 재검토가 필요하다.

#### 라. 선로용 피뢰기

뇌써지의 침입시 아킹혼에 의한 섬락 이전에 외부 직렬 갭 및 피뢰기를 통하여 뇌써지 전류를 신속히 방전시켜 송전선로가 차단되지 않고 상용주파의 속류도 흐르지 않도록 하는 방법이다. 현재까지의 내뢰대책 중 기술적으로 가장 우수한 방법이다. 다른 내뢰대책에 비하여

상대적으로 고가의 비용이 요구되지만 효과를 고려할 경우 충분한 경제성을 확보하고 있는 방법이다.

최근에는 보다 근본적인 내뢰대책으로 비선형 저항의 사용이 증가하고 있다. 전력설비에 활용되는 비선형 저항은 산화아연(Zinc Oxide) 소자로 만들어지는 피뢰기가 대표적이다. 변전소나 발전소의 중요한 전력기기를 낙뢰나 개폐 과전압으로부터 안전하게 보호하는데 사용되고 있으며, 거의 모든 전기·전자기기에 폭 넓게 쓰여지고 있다.



[그림 3] 일반적인 변전소 피뢰기

## 2. 현황

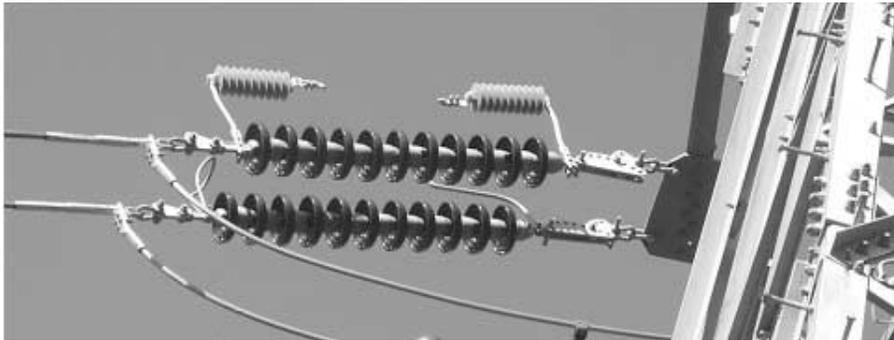
### 가. 송전선로용 피뢰기의 동작 원리와 종류

송전선로용 피뢰기는 변전소용 피뢰기와 달리 송전선로에 설치되기 때문에 부피가 작고 가벼워야하며, 고장 시에도 파편의 비산 가능성과 같은 경우에 보다 엄격한 안전기준이 적용된다.

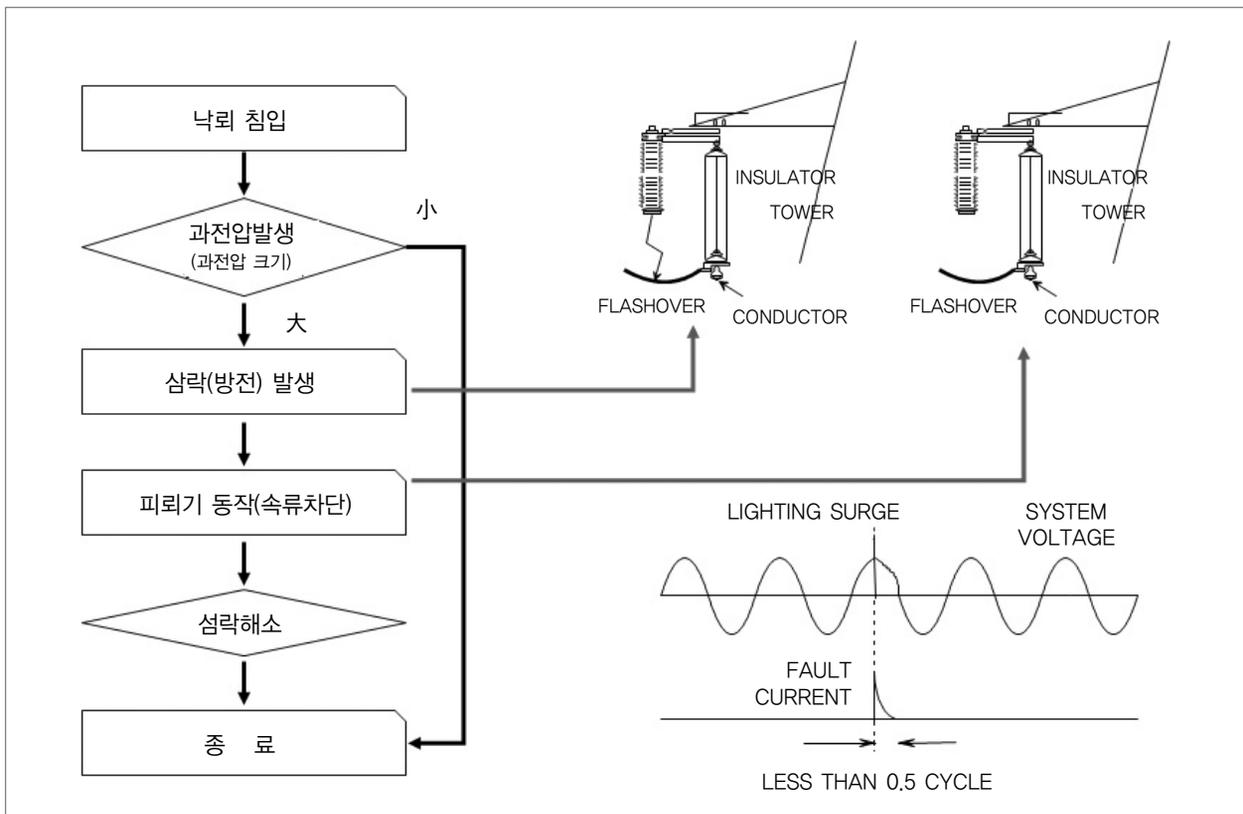
가공송전선로에 낙뢰로 인한 뇌과전압이 발생하면 공기절연이 파괴되어 송전선로가 지락상태가 되고 최대 수십kA 이상의 고장전류가 흐르게 된다. 이러한 고장 전류를 변전소의 보호계전기가 감지하면 차단기를 조작하여 고장이 발생한 선로를 전력계통에서 분리시킨다. 대개의 경우 이러한 동작으로 낙뢰고장이 제거될 수

있지만 설비에 손상이 발생할 경우 다시 전력공급이 불가능하게 되어 정전이 발생한다. 차단기의 성공적인 재폐로가 이루어져 송전이 재개되는 경우라도 순간적인 전압변동이나 순간 정전을 피할 수 없게 된다.

그림 4와 같이 애자런과 평행하게 피뢰기를 설치하면 낙뢰로 인하여 뇌과전압이 발생하는 경우에도 정상적인



[그림 4] 송전선로용 피뢰기



[그림 5] 송전선로용 피뢰기 동작 원리

송전을 지속할 수 있다. 송전선로용 피뢰기는 정격전압에 대하여 부도체로 동작하며 뇌과전압에 의해 전압이 높아지는 경우 도체 특성으로 매우 빠르게 변화되어 송전선로에 가해지는 과전압을 빠르게 해소시켜준다. 과전압이 해소되면 피뢰기는 빠르게 도체에서 부도체로 특성이 변화되어 전원전압에 의해서 계속 발생하는 고장전류의 흐름을 빠르게 차단할 수 있으며, 송전선로를 정상 운전 상태로 환원시키게 된다.

송전선로용 피뢰기는 산화아연 소자와 외부에 공기 절연 간극이 있는 갭형(Externally Gapped Line Arrester), 그리고 산화아연 소자로만 구성된 갭리스형(Gapless)이 있다. 성능면에서 두드러지는 차이는 없으며,

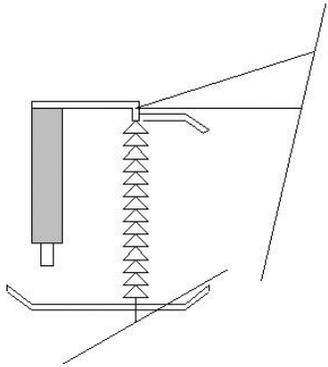
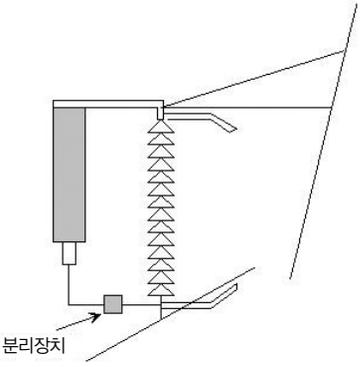
외부 갭형은 일본과 우리나라에서 주로 사용되고, 갭리스형은 유럽과 미국을 중심으로 사용되고 있다.

갭형의 특징은 무게와 부피가 작고 피뢰기 자체 고장에도 송전선로의 정상적인 운전이 가능하다. 반면 갭리스형은 복잡한 갭 간격의 설계가 필요하지 않아 설계가 쉬운 장점이 있으며, 뇌써지 뿐만 아니라 개폐과전압도 억제할 수 있는 특징이 있다. 하지만 피뢰기 자체의 고장인 경우 계통 전체에 영향을 줄 수 있는 문제점이 있다.

**나. 송전선로용 피뢰기의 현황 및 효과**

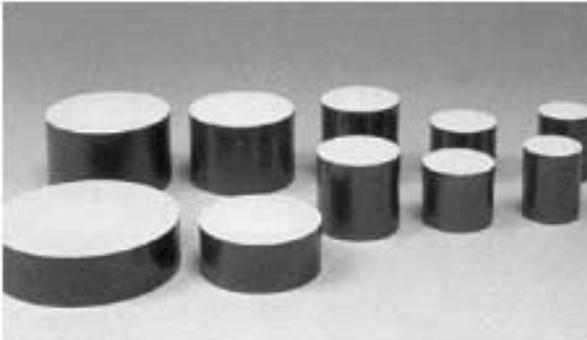
송전계통에 사용 가능한 산화아연 소자는 1976년에 상용화 되었으며, 1980년대에 미국의 Appalachian Power Company와 일본의 전력회사들이 송전선로에

[표 1] 갭형 및 갭리스형 피뢰기의 장단점 비교

구 분	갭(Gap)형	갭리스(Gapless)형
기본 구성		
강 행 재송전	· 피뢰기소자의 처리능력을 초과하는 최대 써지를 흡수하여 영구지락고장 상태로 되어도 직렬 gap에 의해 절연되므로 강행송전이 가능함	· 영구지락고장 상태가 되면 재송전이 불가능
동 작 특 성	· ZnO 소자에 속류가 유입됨 · 1/2 싸이클 후 속류가 차단됨	· 속류가 없음
열 화	· 전력선으로부터 절연되므로 과전열화가 없음	· 상시 과전되므로 열화를 고려한 설계가 필요
용 기	· 자기재 이외의 재료 사용이 가능	· 초기 : 자기재의 애관 사용, 오손설계 필요
중 량	· 경량화 용이	· 경량화 제한
설 치	· 횡진을 고려한 설계가 필요함	· 간단한 금구류로 취부가능
제작사	· NGK, VISCAS, SIEMENS 등	· SIEMENS, ABB, Tyco, Mclean 등

피뢰기의 사용을 시도하였다. 이와같은 시도는 대저항이 매우 높은 암반지대를 통과하는 선로의 낙뢰고장을 줄이기 위한 것이 목적이었다.

하지만 우수한 성능에도 불구하고 피뢰기는 송전선로에 설치하기 무겁고 비싼 수단이었기 때문에 빠르게 확산되지 못하고 전압이 낮은 배전계통에서 선로용 피뢰기가 먼저 사용되었다.



[그림 6] 산화아연 소자

일본에서는 1980년부터 1983년 사이에 수행된 77kV급 갱리스형 피뢰기의 현장시험연구에 이어 1985년에 갱형의 피뢰기가 개발되었고, 1986년에는 최초의 77kV급

폴리머 피뢰기가 상업선로에 설치되었다. 66kV 및 77kV급 피뢰기의 성공적인 낙뢰고장방지 효과가 입증됨에 따라 설치수량이 증가되었다. 초고압 송전선에서 2회선 고장이 발생할 경우 대규모의 정전을 유발할 수 있기 때문에 275kV 갱형 피뢰기(1988년)와 500kV급 피뢰기(1990년)가 개발되었다. 갱리스형 피뢰기는 미국 AEP사의 800kV 선로에도 적용되고 있다. 또한 선로용 피뢰기의 확대 사용으로 관련 국제규격(IEC 60099-8)도 제정되었다.

1990년대 말 고내압 소재와 폴리머 외장재를 이용한 보다 가벼운 경책무형의 피뢰기가 개발되었다.

우리나라는 경책무형의 갱형 피뢰기를 154kV 선로에 시범 적용(2003년)하기 시작하여 꾸준히 사용이 확대되고 있으며, 현재 154kV 선로의 약 30% 선로에 사용 중이다. 표 3은 KEPCO의 154kV 송전선로용 피뢰기 설치 현황이다.

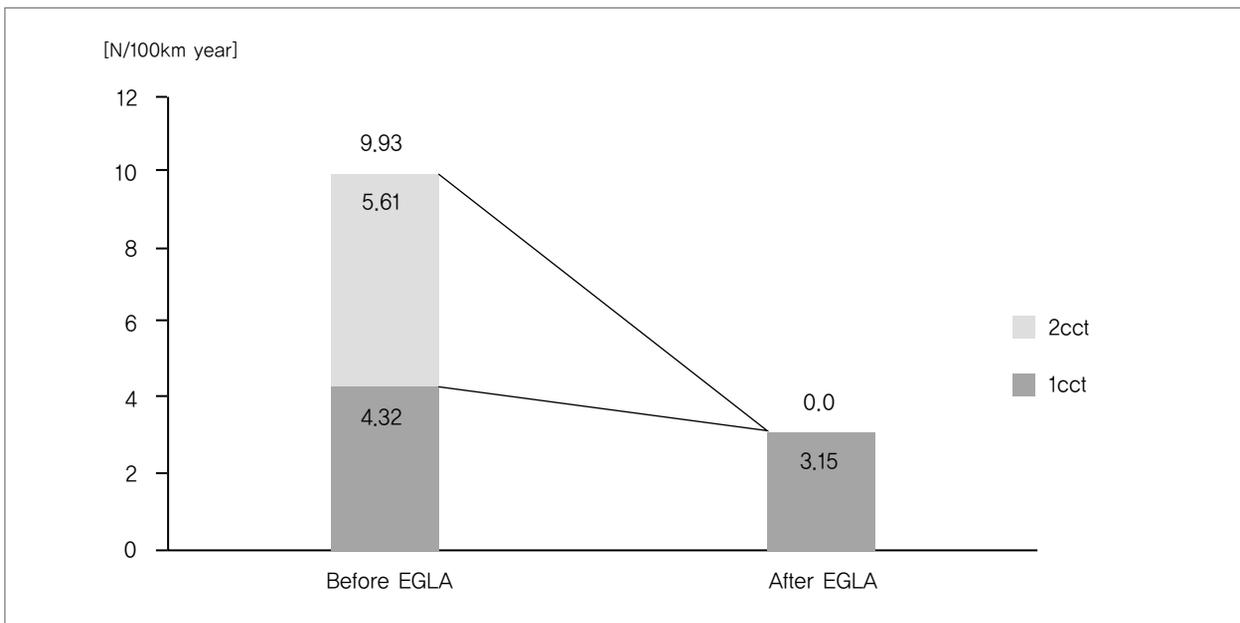
그림 7은 KEPCO에서 분석한 선로용 피뢰기의 낙뢰고장 방지 효과이다. 2003년부터 2010년 사이에 피뢰기가 설치된 87개 선로 중에서 효과분석이 가능한 선로의

[표 2] 154kV 송전선로용 피뢰기 정격

항 목	정 격	항 목	정 격
최대전압	170kV	방압특성	40kA, 0.2초 400A, 2초
정격전압	144kV	외장재	폴리머
방전전류	10kAp(2/20s) 30kAp(4/10s)	소자무게	8kg
속류 차단능력	60Hz 1/2 주기 이내	오손특성	0.35mg/cm <sup>2</sup>
개폐시켜지 내전압	3.3p.u.	설치방법	아킹혼 설치형

[표 3] KEPCO의 154kV 송전선로용 피뢰기 적용 현황

구 분	피뢰기 설치 선로수	피뢰기 설치 첩탑 수	피뢰기 설치 수량
2003년	1	30	90
2006년	6	200	600
2007년	7	346	958
2008년	16	566	1,698
2009년	26	1033	3,111
2010년	34	1039	3,117
합 계	87	3,214	9,574



[그림 7] 154kV 피뢰기(EGLA)의 고장방지 효과

고장자료를 분석한 결과이다. 피뢰기 설치 전 낙뢰고장 평균이 9.93(건/100km, 년)이었던 선로가 피뢰기 설치 후 3.15(건/100km 년)으로 감소한 것을 확인 할 수 있다. 특히 피뢰기가 설치된 구간만을 분석한 결과 2회선 동시 고장이 100% 방지되었다.

### 3. 345kV 송전선로용 피뢰기 적용 현황 및 규격

송전선로용 피뢰기는 154kV 이하의 저압 송전계통을 중심으로 사용이 증가하고 있다.

이에 반해 세계적으로 275kV, 400kV, 500kV, 800kV 등 초고압 선로용 피뢰기는 이미 개발되어 운전되고 있지만 아직 보편화되지 못하고 있는 실정이다. 초고압 선로용 피뢰기는 보다 큰 정격을 필요로 하기 때문에 규모가 커지게 되고 결과적으로는 높은 비용이 걸림돌이 된다.

우리나라는 2003년 154kV 선로에 최초로 설치한 이후 해마다 확대 적용되었으며, 낙뢰고장을 방지하는 효과가 충분히 입증되고 있다. 154kV에 비해 상대적으로 대용량의 전력을 수송하는 345kV 선로는 낙뢰고장에 의한 발전기 출력 감소나 정지 등의 강제적인 전력공급 중단으로 인해 대규모 피해가 예상된다. 현재 345kV 선로 중에서 주요선로를 대상으로 낙뢰로부터의 고장을 예방하기 위해 345kV 선로용 피뢰기를 적용하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

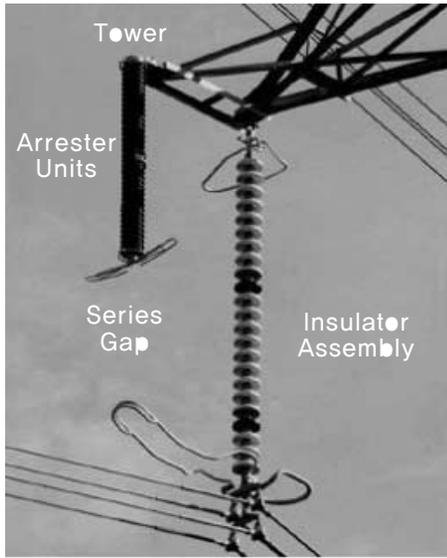
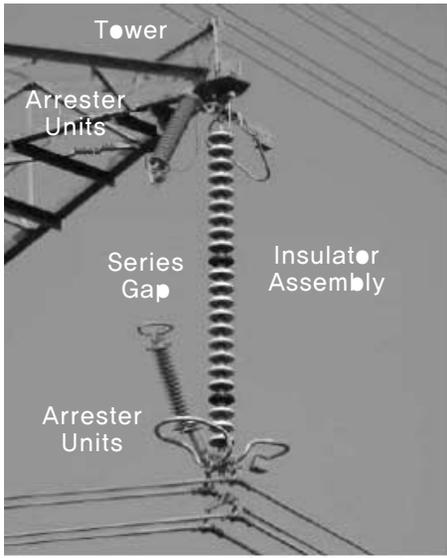
154kV 선로와 마찬가지로 345kV 선로도 가공지선에 의한 차폐와 엄격한 접지저항 기준을 적용하여 운영하고 있지만 아직까지 낙뢰에 의한 단상 또는 2회선 이상의 동시고장이 발생하고 있다. 또한 일시적인 단상 고장으로 재폐로가 성공하는 경우에도 넓은 지역에 전압변동을 일으키기 때문에 피뢰기를 이용하여 보다 효과적으로 뇌섬락 고장을 억제할 필요가 있다.

345kV 송전선로 피뢰기는 설치방법에 따라 철탑 설치형과 아킹혼 설치형으로 크게 구분할 수 있다.

피뢰기의 부피와 길이, 무게를 개선하면 아킹혼 취부 위치에 설치할 수 있다.

아킹혼 설치형은 기설의 아킹혼을 제거하거나 변경하여 설치할 수 있는 경량급의 피뢰기로 철탑 설치형에 비하여 가볍고 콤팩트하여 설치가 용이하며 제조 및 설치비용에서 유리하다.

[표 4] 피뢰기의 설치 방법에 따른 구분

구분	철탑 설치형	아킹혼 설치형
일본 500kV 피뢰기 적용 사례		
특징	설치용 금구류 철탑체에 추가	기설 아킹혼 교체

[표 5] 송전선용 피뢰기 잠정 규격(안)

구 분	Spec	정 의
정격전압	288kV	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 예상되는 상대지간 최대과전압 : 피뢰기 동작 시</li> <li>• 계통 최고전압 : 362kV</li> <li>• 상용주파단시간 과전압배수 : 1.35</li> </ul>
정격방전전류	15kA 2/20 $\mu$ s	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 역섬락시 피뢰기로 흐르는 뇌격전류 목표치</li> <li>• Class Y3 (IEC 60099-8)</li> <li>• 전류 파형 : 2/20<math>\mu</math>s, 4/10<math>\mu</math>s, 8/20<math>\mu</math>s</li> </ul>
최대방전전류	40kA 2/20 $\mu$ s	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 직격뢰시 피뢰기로 흐르는 뇌격전류 목표치</li> <li>• Class Y3 (IEC 60099-8)</li> <li>• 정격 방전전류 파형 : 2/20<math>\mu</math>s</li> </ul>
정격방압전류	50kA .2s	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1선 지락, 단락시의 고장전류 및 고장지속시간 상정</li> <li>• 50kA .2s : 1선지락시 고장전류</li> </ul>
오손등급	Class D	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 예측 가능한 오손 등급으로 표준화 : 가혹한 조건</li> <li>• Class D, ESDD 0.5mg/cm<sup>2</sup></li> </ul>
상용주파 과전압	288kV /1min(wet)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 피뢰기 소자정격</li> <li>⇒ 288kV = 362kV <math>\div</math> <math>\sqrt{3}</math> <math>\times</math> 1.35</li> <li>• 1분간 주수조건에서 견딜 것(우중을 고려)</li> </ul>
개폐과전압	662kV (wet)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 피뢰기 소자가 Faulty 조건 고려 : Gap만으로 견뎌야 하는 과전압</li> <li>• 주수조건에서 견딜 것(우중을 고려)</li> </ul>
직렬갭	1300 ~ 1,500mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 개폐과전압 및 뇌과전압 목표치와의 절연협조 결과</li> <li>• 목표 개폐과전압(2.5p.u.)에 따른 절연거리</li> <li>• 선로별로 목표과전압이하에서 선로별 적용</li> </ul>
소자 무게	30kg 이하	
설치 방법	아킹혼 설치형	

이와 같은 피뢰기는 일본 NGK에서 개발, 납품하였으며 일본의 VISCAS사와 독일의 SIEMENS사에서도 기술규격을 제안하고 있다.

현재 345kV 선로용 피뢰기는 낙뢰 고장 시 발전기 출력의 감발이나 정지, 즉각적인 부하차단이 발생할 수 있는 송전선로를 적용대상으로 설계와 잠정규격이 개발

되어 있다. 표 5에서는 345kV 선로용 피뢰기에 적용을 추진 중인 최초의 잠정 규격(안)을 보여주고 있다. 피뢰기는 외부 갭형(EGLA)이며 정격전압은 288kV, 정격전류는 15kA, 최대 40kA 이다. 직렬갭 간격은 1300~1500mm 사이의 값으로 예상되고 있다.

피뢰기의 직렬 갭 간격은 아킹혼 간격에 대하여 요구

되는 여유 마진을 확보하도록 설계되었다. 피뢰기의 직렬 갭의 뇌섬락 전압과 아킹혼의 섬락전압은 표준편차가 3%인 경우 16~20% 마진이 확보되는 것이 필요하며, 최적의 절연협조 성능을 만족하도록 IEC 60099-8의 권고기준을 참고로 KEPCO 선로 조건을 고려하여 설계하였다. 피뢰기의 직렬 갭 간격은 선로의 개폐과전압에 섬락하지 않도록 설계하였다.

또한 아킹혼 간격 또는 아킹혼이 없는 경우 애자런 길이와 협조적으로 뇌방전을 피뢰기쪽으로 유도할 수 있도록 절연성능을 협조 설계하였다.

#### 4. 향후 계획

345kV 선로는 154kV 선로보다 정전발생 가능성에 대하여 엄격한 법적기준을 만족하도록 구성되어 있지만 재폐로 동작의 실패 가능성과 과부하운전 등으로 고장

발생시 과급 영향이 큰 개소가 존재한다. 345kV 송전선로용 피뢰기의 주된 사용 목적은 154kV 피뢰기와 동일하게 2회선 동시 고장으로 인한 광역정전을 예방하는 것이다.

특히, 정전 시 연계된 발전기의 출력 감발이나 트립, 부하차단이 발생하는 선로를 대상으로 후보선로를 선정하고 시범적용을 추진하고 있다. 현재 2013년 시범적용을 목표로 피뢰기의 설치방법별 비용, 구매규격 및 시험기준이 연구되고 있다. 345kV 송전선로에 피뢰기를 적용하면 2회선 또는 4회선 선로의 동시고장을 예방할 수 있으며, 소비자에게 제공되는 전력품질을 크게 개선하는 효과도 기대할 수 있게 될 것이다. KEA

#### [참고문헌]

1. 한국전력공사, "154 kV 송전선로의 낙뢰에 의한 2회선 동시 트립 방지 대책" 연구보고서, 2004
2. 한국전력공사, 송배전 고장통계보고서, 2008
3. Luiz Cera Zanetta and Carlos Eduardo de Morias Pereira, "Application Studies of line arresters in partially shielded 138 kV Transmission line"
4. C.H.Shih, R.M. Hayes, D.K. Nichols, R.E.Koch, J.A. Timoshenco and J.G. Anderson, "Application of special arresters on 138 kV lines of Appalachian power company", IEEE Trans. Power App. Syst., vol PAS104, pp.2857-2863, Oct. 1985
5. Joosik Kwak et al, "Lightning Performance of Overhead Transmission Lines with Externally Gapped Line Arrester", ICEE 2011