

송전선의 뇌해대책 현상과 전망 ①

글/김 경 호
한전 중앙교육원 교수

1. 서론

송전선에서의 낙뢰재해에 관해서는 지금까지 시행하고 있는 가공지선 또는 아킹혼의 설치, 철타점지저항 저감을 위한 매설지선의 설치 그리고 일본 전력회사에서 시행하고 있는 알루미늄을 함유한 애자의 채용 등 여러 가지 대책을 시행한 결과 낙뢰로 인한 설비 피해사고는 현격하게 감소되었다.

또, 송전선에 고장이 났을 때에도 일단 트립된 송전선의 차단기가 자동투입되어 신속하게 정상상태로 복귀시키는 재폐로 장치의 채용에 의해 정전시간이 감소되었다.

그렇지만 고도 정보화 시대가 도래됨에 따라 컴퓨터 등 전자통신 기기가 급속하게 보급되고 있는 현대에 있어서는 순간 정전이 사회에 영향을 크게 미치고 있어 보다 고품질의 전력공급이 요구되고 있다.

한편, 뇌에 의한 정전사고 방지는 쉬운 것이 아니어서 한국전력에서도 그 방지대책에 고심하고 있는 실정이다.

우리나라 송전선로 총 고장중 낙뢰로 인한 고장이 51.5%(순간고장 포함)를 차지하고 있고, 뇌다발지역을 경과하고 있는 송전선로에서는 가공지선에 발생하는 전기고장의 약 70%가 뇌로 인한 고장이며, 현 상태에 있어서는 뇌고장의 감소가 중요한 과제로 대두 되고 있다.

이러한 가운데 뇌해방지에 있어서는 표 1에 표시한 바와 같이 각종의 대책이 실시되고 있거나 그 연구가 진행되고 있다.

- 가공지선이 뇌격을 받을 경우의 그 고장에 있어서는
- ① 전력선에서의 직격뢰에 의한 전력선의 전위가 상승하여 전력선과 철타사이에서 섬락(閃落)이 발생하는 차폐 실패에 의한 것
 - ② 가공지선 또는 철타에 뇌격이 떨어져 철타의 전위가 상승하여 철타와 전력선 사이에서 섬락이 발생하여 철타 역섬락에 의한 것으로 대별된다.

따라서 이것을 방지할 수 있는지 여부가 송전선 뇌해방지 대책의 기본이라 할 수 있으며, 또한 습뢰(襲雷)의 예측이나 정확한 낙뢰정보의 파악도 계통운영이나 송전선 보수면에서 유용한 기술이라 할 수 있다.

본고에서는 한국전력 송전설비의 낙뢰고장 현황과 뇌현상, 그리고 뇌방전의 기초 이론 및 뇌 구조 등에 대하여 고찰하여 보고 뇌해현상으로서 섬락의 방지대책인 뇌예측을 중심으로 기술하고자 하며, 또한 冬季雷 같은 큰에너지를 갖고 있는 뇌격을 상정하여 종래의 가공지선에 대하여 내뢰성의 향상을 도모한 내뢰형 가공지선에 관하여도 기술하고자 한다.

II. 낙뢰고장 현황

- 연평균 낙뢰고장 전수 : 126건/년('90~'97년, 순간고장 포함)
- 낙뢰고장중 약 17%가 지장전력 발생 고장으로 정전고장을 높음
- 낙뢰고장율(표 2)
- 낙뢰고장 발생 현황(표 3)

표 1 송전선 피해 방지대책

| 구 분 | 항 목 | 방 지 대 책 | 시 행 방 법 |
|---------------------------------|---------------|--|---|
| 송 전 선 낙 뢰 방 지 | (1) 설비피해방지 | ① 아크 혼의 설치 ② 가공지선의 설치 ③ 알루미늄 함유 애자채용 | - 내뢰형 가공지선 |
| | (2) 섬락 방지 | ① 차폐설비방지 | - 고전압화 - 전력선 하부의 차폐선 설치 - 가공지선의 多條化 - 아크혼 간격의 증가 - 송전용 피뢰장치 |
| | | ② 철탑 역섬락 방지 | - 고전압화 - 전력선 하부의 차폐선 설치 - 가공지선의 多條化 - 탑각접지저항의 저감 - 아크혼 간격의 증가 - 불평형 절연의 채용 - 송전용 피뢰장치 |
| | (3) 재페로 장치 | | |
| (4) 뇌예측 | ① 낙뢰위치 표정 시스템 | | |

표 2 낙뢰고장율

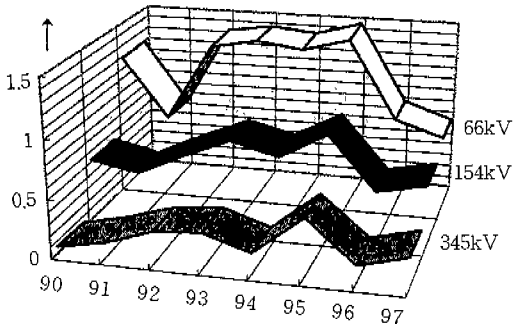
(단위: 건/100C - km · 년)

| 전압 | 연도 | '90 | '91 | '92 | '93 | '94 | '95 | '96 | '97 | 연평균 |
|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 345kV | | 0.061 | 0.142 | 0.266 | 0.306 | 0.174 | 0.504 | 0.160 | 0.266 | 0.240 |
| 154kV | | 0.521 | 0.438 | 0.619 | 0.789 | 0.690 | 0.913 | 0.457 | 0.544 | 0.623 |
| 66kV | | 1.192 | 0.675 | 1.347 | 1.415 | 1.370 | 1.478 | 0.817 | 0.680 | 1.141 |
| 계 | | 0.538 | 0.408 | 0.656 | 0.766 | 0.657 | 0.884 | 0.417 | 0.482 | 0.602 |

※ 낙뢰고장율 설계기준 : 0.99건/100C - km · 년 (154kV 현수애자 9개기준)

낙뢰고장율

(건/100C - km · 년)



연도 별 →

연도별 낙뢰고장율 추이

Ⅲ. 뇌현상 및 뇌방전

1. 뇌현상

가. 뇌의 발생

모래폭풍·화산폭발·대형화재 등 여러 종류에 의하여 뇌가 발생하지만 가장 보통의 뇌운은 상층 대기와 하층대기가 불안정한 성층을 구성하고 있는 경우에 발생하는 적란운이다. 즉, 하층의 공기가 너무 가볍거나 상층의 공기가 너무 무거운 경우 그 수직 불안정도를 해소하기 위해 강한 상승 기류가 발생한다. 상승기류에 동반하여 단열팽창된 공기는 온도가 저하 하고, 함유된 증기의 응결 및 빙결이 일어나기 때문에 다량의 잠열이 방출되고 상승에 따른 온도 저하율이 적게 되며 대류권

표 3 낙뢰고장 발생 현황

(단위 : 건)

| 전압 \ 연도 | '90 | '91 | '92 | '93 | '94 | '95 | '96 | '97 | 연평균 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 345kV | 3 | 7 | 14 | 17 | 10 | 30 | 10 | 17 | 13.5 |
| 154kV | 53 | 47 | 69 | 91 | 82 | 117 | 61 | 77 | 74.6 |
| 66kV | 46 | 25 | 48 | 50 | 46 | 47 | 22 | 17 | 34.0 |
| 계 | 102 | 79 | 131 | 158 | 138 | 194 | 83 | 111 | 125.8 |

※ 고장통계 이외의 순간고장 포함 (고장통계 : 지장전력 발생 또는 10분 이상 정전고장)

성층 가까운 곳까지 도달하게 된다.

이러한 구름이 아래와 같은 발생기구로부터 뇌를 발생하게 되며, 이에 따라 뇌운을 다음과 같이 분류한다.

- ① 열뢰(熱雷) : 여름철의 강한 일사에 의해 지표부근의 공기가 열을 받아 상승 하는 기류에 의해 발생하는 뇌. 열뢰가 산복(山腹)에서 발생하는 뇌를 산뢰라 한다.
- ② 계뢰(界雷) : 온난기류가 서로 만나는 지점에서 발생하는 상승기류에 의한 뇌로 전선뢰라고도 한다.
- ③ 저기압성뢰(低氣壓性雷) : 태풍이나 저기압의 수축성(收束性/모아서 묶음)기류 때문에 생기는 상승기류에 의해 발생하는 뇌.

※ 뇌운의 발생은 단독 원인보다는 조합된 조건에 의해 생기는 경우가 많다.

나. 뇌운의 구조

뇌운은 몇가지의 뇌운세포로부터 구성되어 있지만 그림 1과 같이 상부는 正(+), 하부는 負(-)로 대전하고, 뇌 아래부분에 正으로 대전한 소구역이 있다. 단독 뇌운세포는 상승기류와 하강기류를 가진 대류계로 수명은 0.5~1시간 정도이지만 뇌운 내에서는 세포가 순차적으로 발생과 소멸을 반복하고 있기 때문에 전체적으로는 뇌운활동을 지속하면서 이동한다. 뇌운세포는 유년기, 성년기, 노년기로 구분할 수 있으며, 성년기에는 상승기류가 가장 격렬하고 전하분리도 활발하므로써 뇌방전도 이 시기에 가장 많다. 전하의 분리 구성에 대해 과거에는 여러 가지 설이 있었지만 뇌운에 대하여 기상학적, 전기학적인 관측 결과를 常性的, 定量的으로 설명한 것으로는 과냉각된 물방울과 상층운을 형성하는 얼음의 결정이 공존하고 있는 공간에

서 싸라기 또는 우박이 생기는 과정에서 전하가 분리되는 현상으로 설명할 수 있다.

다. 뇌운의 전하분포

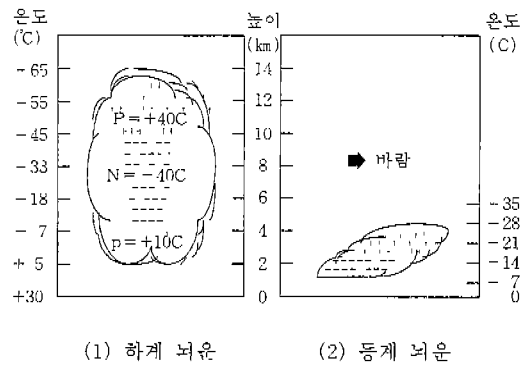


그림 1 뇌운 내의 전하분포

뇌운은 작은 구름으로부터 수평거리가 20km가 넘는 것까지 그 크기가 다양하다. 전형적인 뇌운의 높이는 대개 8~12km 정도이다. 뇌운들 중에는 바람, 물, 얼음 등이 혼재되어 있고 중력이나 온도 변화가 존재한다. 따라서 그림 1과 같이 이러한 요소들의 상호작용에 의해 正(+전하)는 뇌운의 상부에 넓게 분산하여 분포하고 있고, 負(-)전하는 뇌운중에서 기동모양으로 빙결고도 부근에서부터 온도고도 약 40°C의 상층까지 조밀하게 분포하고 있다. 이와 같이 뇌운의 주된 전하구조는 전기 쌍극자구조를 띄고 있다. 또한 뇌운의 주된 구조 외에 뇌운의 하부는 상승기류의 유입부분으로써 극부적으로 정전하가 분포되어 있다.

그림 1은 Malan이 제안한 전형적인 뇌운의 전하들을 공간적으로 나타낸 것으로, 이 뇌운전하 분포도의 작성자료는 뇌운의 주변에서 전계밀도의 측정으로 얻어 졌으며, 측정된 전계는 뇌운의 전

하와 대지 유도전하에 의해 발생된 것으로 뇌운전하와 도전성 대지밀의 영상전하에 의한 것이다.

2. 뇌방전

가. 뇌방전의 종류

뇌방전의 종류는 방전이 발생하는 대상별로 다음과 같이 구분한다.

(1) 운내방전 (Intra-Cloud or Cloud Discharge)

동일 뇌운내의 정(+), 부(-) 전하간에서 발생하는 방전

(2) 운간방전 (Cloud-to-Cloud Discharge)

다른 뇌운간의 정(+), 부(-) 전하간에 발생하는 방전

(3) 대지방전 (Cloud-to-Ground Discharge)

뇌운의 전하와 대지에 유도된 전하간에 발생하는 방전

(4) 대기방전 (Air Discharge)

뇌운전하와 인근 대기간에 발생하는 방전

뇌방전은 운내방전도 많이 일어나지만 더 큰 관심사가 되는 부분은 대지방전이다. 뇌운과 대지간의 방전은 하나 또는 그 이상의 간헐적인 부분방전으로 이루어져 있다. 전체방전을 섬광이라 하며, 이의 지속시간은 0.2초 범위이다. 각각의 방전요소들을 뇌격이라 부르며, 발광단계는 수십 μs 범위에서 관측된다. 보통 각 섬락은 서너개의 뇌격으로 이루어져

있고, 그 뇌격은 40 μs 나 그 이상의 간격을 두고 일어난다. 뇌운과 대지간 뇌 섬락은 보통 -10 Coulomb보다 적은 양의 전하를 가지며 뇌운의 N 그림 1으로부터 대지로 향하는 형태를 가진다.

나. 뇌방전 구조

(1) 대지로의 낙뢰

① Stepped Leader

낙뢰의 경우 공기절연은 뇌운의 하부로부터 대지까지 약 1~2km에 걸쳐서 파괴된다.

그림 2는 구름과 대지간 뇌 섬락의 발광특성을 나타낸 것이다. 뇌섬락은 약하게 발광하는 선구방전으로부터 시작되어 구름에서 대지로 향하는 리더가 진전하고 끝이어서 강하게 발광하는 귀환뇌격이 뒤 따른다. 귀환뇌격은 대지에서 구름으로 향한다. 섬락에서 처음 뇌격이 있기전에 일어난 구름과 대지간 선구방전을 Stepped Leader라고 부른다. Stepped Leader는 그림 1에서 뇌운의 N과 p지역 사이에서 극부적인 전기적 절연파괴로부터 시작된다. 이 절연파괴는 얼음과 물 입자들에 부착된 전하들을 움직이게 만든다.

구름 하부에서의 부(-) 전하가 극부적으로 집중된 결과가 전계를 형성시키고 그 전계는 원주모양으로 부(-) 전하들을 대지쪽으로 진전시킨다. 이 원주 모양을 Stepped Leader라고 부르며, 그 이유는 약 50 μs 의 간격으로 휴지시간을 가지면서 전형적으로 50m 길이의 발광체를 하향으로 진전시키기 때문이다. 각 리더 단계는 밝게 빛나고 μs 보

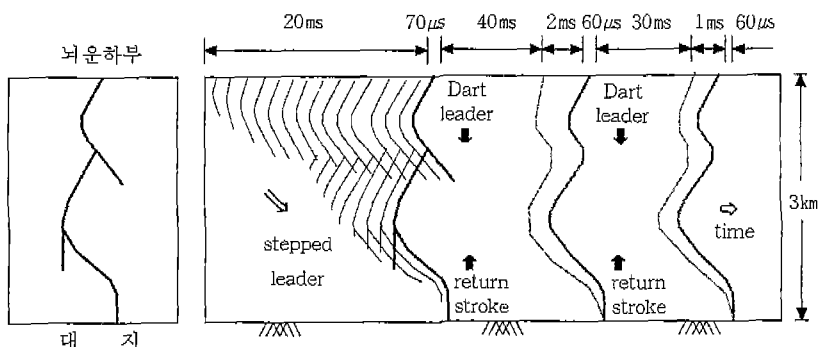


그림 2 회전카메라에 의해 분해된 전광

다 짧은 시간에서 관측된다. Stepped Leader의 평균속도는 약 $1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ 이다. 그러므로 3km 정도의 거리를 이동하는 데 20ms 정도의 시간이 걸린다. 대지에 거의 이르렀을 때의 Stepped Leader는 보통 -5 Coulomb 정도의 전하가 전체 방전로에 분포하게 된다. 수십 ms 동안 이 정도의 전하량을 축적하기 위하여 흘러야 하는 평균전류는 102A 정도이다. 발광 Stepped Leader의 직경은 사진상으로 1m~10m 정도로 측정되었다. Stepped Leader의 중심에 있는 좁은 도전성 중심을 통하여 밀로 흐른다.

② Return Stroke (귀환뇌격)

Stepped Leader가 높은 부(-) 전계로 하전된 원주 덩어리를 지면에 가까이 진전시켰을 때 지면에서 높은 전계의 영향으로 지면으로부터 리더점을 향하여 상향방전을 일으키기에 충분한 크기의 전계가 된다. 이러한 방전중의 하나가 리더에 닿았을 때 리더의 나머지 부분이 부(-)전계이면서 부(-)전하로 충전된 상태로 리더의 밑부분과 지표전위는 연결된다. 이러한 상황은 일정한 전위로 충전된 송전선의 끝부분에 단락이 발생한 것과 비슷한 상황이다. 리더 방전로는 송전선과 같은 역할을 하고(비선형이고 손실이 있다) 강한 발광을 하는 귀환뇌격을 유도한다. 고전계로 전리된 귀환뇌격의 파두부분은 Stepped Leader에 의하여 미리 만들어진 방전로를 통하여 지표전위를 상승시킨다. 귀환뇌격의 파두부분은 전형적으로 광속의 1/3~1/10의 속도로 진전하고 70 μs 정도의 시간에 지표로부터 뇌운의 하부에 이른다. 귀환뇌격의 파두부분과 대지사이의 영역은 큰 전류가 흐른다.

리더 방전로에 축적된 과잉 부(-) 전하는 귀환뇌격 파두의 하부에 있는 고도전성 방전로를 통하여 대지에 도달한다. 대지에서 측정된 전류는 전형적으로 수 ms 동안 10~20kA에 이르고 20~60 μs 동안에 최대치의 1/2(파미장)까지 떨어진다. 수 백 A 정도의 전류가 수 ms 동안 흐르게 된다.

귀환뇌격 방전로에서 초기 가스밀도는 리더의 가스밀도 특성과 동일한 반면, 귀환뇌격에 의해 방전로로 전달되는 에너지 때문에 귀환뇌격 방전로의 초기온도는 리더의 온도보다 높다. 그러므로 방전로의 압력은 주변의 압력보다 높아 방전로는 팽창될 것으로 예상된다. 팽창은 초음속으로 일어

나고 충격파를 발생시켜 궁극적으로 우리가 들을 수 있는 천둥이 된다. 방전로 팽창의 충격파장은 거의 5~10 μs 정도 지속된다.

충격과 이후의 전류전달 방전로의 가스밀도는 충격파의 팽창만큼 감소된다. 충격파장의 후반부분에서 측정된 방전로의 온도는 약 30,000K이다. 방전로 팽창의 충격파장이 끝난 후에 고온이면서 저밀도의 방전로가 μs 또는 수십 μs 에서 주변 압력과 거의 같은 정도가 된다. 압력이 평형을 이루었을 때 방전로의 직경은 거의 수 cm 정도가 된다.

③ Dart Leader

귀환뇌격이 더이상 흐르지 않으면 뇌섬락은 비로소 끝나게 된다.

그렇지 않고 부가적인 전하가 방전로의 꼭대기에 남아 있다면 섬락은 부가적인 뇌격을 포함하게 된다(섬락은 다중 뇌격섬락으로 정의된다).

일반적으로 각 연속뇌격은 높은 영역으로부터 뇌운의 N지역으로 전하를 빼내면서 발생된다. 이 전하는 K-Streamer와 J-Streamer 진전으로 불리는 작용에 의해 뇌격들 간에서 적절히 만들어지고 이 스트리머 진전과정은 선행되어 일어났던 귀환뇌격의 상부와 부(-) 전하의 높은 부분과의 사이에서의 전기적인 방전과정이다.

만약 약 100ms 이내에 감소하는 귀환뇌격 방전로에 유효한 부가적인 전하가 더 있다면 연속 또는 Dart Leader가 귀환뇌격의 방전로를 통과해서 이온화 정도를 높이고 방전로를 따라 전하를 축적시키며 대지로 향한 뇌운전위를 재이동 시킬 것이다. 그래서 Dart Leader는 두 번째(혹은 후속) 귀환뇌격을 위한 시점이 된다. Dart Leader는 약 50m 길이의 방전로 발광영역이 나타나서 Stepped Leader의 평균속도 보다 조금 더 빠른 정도인 약 $2 \times 10^6 \text{ m/s}$ 의 속도로 서서히 대지로 진전한다.

Dart Leader의 도식적인 내용은 그림 2와 같다. Dart Leader에 의해 전달되는 전하는 Stepped Leader에서 보다 적고 Dart Leader는 Stepped Leader 처럼 가지가 분리되지 않는다. 만약 선행된 귀환뇌격에서 약 10 μs 이상 전류의 흐름이 멈추었다면 Dart Leader가 되는 것이다. Dart-Stepped Leader는 처음에는 연속적인 리더처럼 감쇄된 방전로를 따라 밀로 시작되나 어떤 시점에서 Stepped

Leader로 바뀐다. 만약 Stepped Leader가 원래의 방전로를 따라 일어나면 첫 번째 귀환뇌격에 선행한 Stepped Leader 보다 그 길이는 더 짧아지고 휴지시간 간격도 더 짧은 간격이 된다.

만약 Stepped Leader가 원래의 방전로를 따라 일어나지 않으면 첫 번째 뇌격의 stepped leader와 닮은 형태가 된다. 만약 선행의 귀환뇌격에서 전류가 상대적으로 수백 ms 정도의 오랜 시간 동안 흐르는 것을 멈추었다면 후속뇌격이 Stepped Leader에 의해 시작되고, 이 경우 방전로는 감쇄된 방전로와는 다르다. 최초의 귀환뇌격은 선행의 Stepped Leader와 같이 보통 많은 가지를 가진 하향이다.

그러나 Dart Leader 뒤의 후속 귀환뇌격은 가지가 거의 없다. 최초의 귀환뇌격은 후속 귀환뇌격과 비교하여 평균 진전속도가 느리며 대지에서 전류 증가율이 낮고, 최대치까지의 시간이 길며 일반적으로 많은 전하를 전달한다.

(2) 높은 건조물로의 낙뢰

대지로의 낙뢰는 Stepped Leader가 뇌운에서 출발하지만 높은 건조물로 낙뢰하는 경우에는 거꾸로 건조물에서 상향 Stepped Leader가 출발하는 경우가 많다. Stepped Leader는 구름에 가까워짐에 따라 구름을 향해서 가지가 생긴다.

이 때 상향 리더 하향 리더 주뇌격형상을 표시한 것이 그림 3이며 시간은 좌에서 우로 이동하고 있다. 그림 3에서 알 수 있는 것과 같이 상향리더가 구름에 도달해도 일반적으로 구름에서 Return Stroke가 없고 그대로 소멸하는 적이 많다.

이것은 뇌운의 도전율이 비교적 낮기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 어느 시간후에 구름쪽에서 다시 이전 리더의 방전로를 통해서 하향 리더가 진전하고, 이것이 대지에 접근하면 대지측 건조물에서 상향리더가 발생하고 양측 선단이 결합하면 Return Stroke 전류가 흐르고 대지로의 낙뢰와 같은 형상의 낙뢰가 발생된다, 이것은 지상의 건조물이 대단히 높고 그 선단 부근의 전계가 대단히 높기 때문이다. 또 이런 종류의 낙뢰는 뇌우 종말기에 강하고 순간방전을 동반해서 일으키는 경우가 많다. 이것은 선단이 강한 정전계에 순간방전을 동반하는 충격적인 전하 상승이 중첩하고 그 선단

에서 강한 상향리더가 출발하기 때문이다. 또한 이런 종류의 낙뢰는 반드시 낮은 건조물만이 아니고 20여 미터의 건조물에서도 발생한 적이 있다.

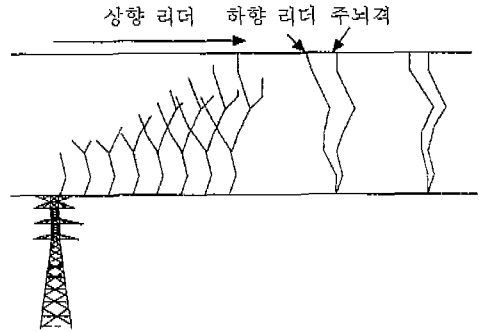


그림 3 상향 뇌격

다. 공기의 절연내력

공기의 절연내력은 평등 전계중에서 30kV/cm 정도이기 때문에 이 이상이 아니면 공기의 절연파괴는 일어나지 않는다. 그러나 낙뢰의 경우는 복잡한 기구를 갖기 때문에 공기의 절연파괴가 3~5kV/cm의 전계강도에서 일어난다.

라. 뇌방전 에너지

1회의 뇌방전에 따라 소비되는 전하량을 Q, 뇌운과 대지간의 전위차를 V라 하면, 뇌방전 에너지 P_E는 다음과 같다.

$$P_E = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V$$

(뇌방전 에너지 계산 예)

1회 방전 소비 전하량 20(C), 방전로 길이 3km, 방전이 진행되는 데 약 3.5kV/cm의 평등 전계가 필요하다고 하면

- 뇌운과 대지간 전위차: $V=3.5kV/cm \times 3km = 10^6(V)$
- 1회 방전 소비 에너지: $P_E = \frac{1}{2} \times 20 \times 10^6 = 10^6(J) = 10^6(W)$

여기서 뇌활동이 비교적 활발한 뇌운은 10초에 1회 비율로 뇌방전을 반복하기 때문에 1개 뇌운이 방전하는 에너지 P_T 은

$$P_T = 10^6 \times 1/10 = 100만 (kW)$$

즉, 뇌방전 에너지는 원자력발전소 1기의 발전 용량에 해당하게 된다.

○ 다음호에 계속 됩니다