

유도뢰와 직격뢰의 프로텍션

역/대한전기기사협회

머리말

예전의 벼락에 대한 방호기술은 뇌격 후에 서지의 진행현상을 연구하는 것이 전부였다.

그러나 일렉트로닉스의 급속한 발전에 의해 벼락에 대한 관측기술도 많이 진보되어 벼락 그 자체의 실체가 점차 판명되어가고 있다. 그리고 전기계 학자만이 아니고 이학계, 기상학계 등 학자간의 연계가 국제적 규모로 활발히 진행되고 있다. 이에 의해 벼락의 발생부터 이동, 뇌방전 다음의 지표면으로의 부전하와 상공에 남겨진 정전하간의 공기의 절연저항, 전기 전도에 의해 연일 계속되는 방전 등과 같은 여러 현상이 해명되고 있다. 벼락에 대한 방호대책도 이들 여러 현상을 보고 세워야 할 것이다.

종래 학자나 기술자들은 그 성과와 뉴스거리를 위해 고전압, 초고압 계통의 연구에만 집중하고 저전압계통의 뇌방호에 대해서는 소홀한 편이었다.

비교적 단순한 회로구성인 배전선에서의 유도뢰조차 아직 충분한 이론무장이 되어 있지 않은 상태이고, 복잡한 저전압회로에서는 서지의 침입 경로도 복잡할 뿐만 아니라 그 내전압도 극히 낮아 그 해석이 대단히 곤란했기 때문이기도 하다. 근년에 급격히 발전하고 또한 끝없이 계속될 정보화 시대에 대비해서 어려운 일이라는 하지만 그 방향에 대해서도 힘을 경주해야 할 것으로 본다.

여기서는 뇌 서지에 대한 일반적인 기술에 대해서는 가볍게 취급하고, 일반적으로는 생각하지 않고 있고 또한 중요한 사항에 중점을 두고 기술해 나가

기로 한다.

1. 벼락에 관한 간단한 설명

뇌운의 발생, 그 계절, 형상, 대지 방전에 이르는 경과, 대지 방전후 대지에서의 전류 흐름, 방전 이후 남겨진 전하의 거동 등에 대해서 간단히 설명한다.

일부의 예외는 있지만 주로 상공의 풍부한 습기와 -7°C 전후 환경에서의 바람의 작용에 의해 +와 -의 전하 분리가 이루어진다. 이 반대극성의 양 전하는 정전기력에 의한 흡인력이 작용하고 있는데, 그 힘에 저항하여 바람의 힘으로 끌려서(주로 +전하를 가진 입자가 상공으로 날려진다) 이 때의 힘에 의한 에너지가 정전기 에너지로서 축적된다.

$$Q=C \cdot V$$

와 같은 정전계의 공식대로 양 전하간의 정전용량 C는 양자간의 거리가 이격될수록 작아진다. 그 사이 방전이 없으면 Q에는 변화가 없고 따라서 V의 값은 C가 작으며 즉, 거리가 떨어질수록 더욱 높아져

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

와 같은 형태의 전기 에너지로 변환된다. 이것은 자연히 발생된 일종의 풍력 발전장치라고 할 수 있다. 이와 같이 해서 양 전류간의 전위차는 하운(夏雲)의 경우 10^8 오더의 높은 값이 된다.

(1) 하뢰(夏雷) : 전하는 분리되는 -7°C 영역은 상공 약 5km의 높은 곳에 있으며, 무거운 입자에 대전된 부전하가 이 부근에 체류하고 있다. 정전하를 띤 미세한 입자는 상승기류(뇌발생 조건은 11m/

sec이라고 한다)에 의해 10~12km 정도의 곳에서 공기밀도 관계로 상승기류가 확산되고 소멸되므로 이 부근에 표류하게 된다. 아래쪽 5km 정도의 곳에 있는 부의 뇌운 직경은 약 5km 정도인 것이 표준이다.

(2) 동뢰(冬雷) : 겨울철의 벼락은 기온이 급변할 때 발생하기 쉽고 대륙으로부터의 차가운 바람과 습기를 가진 따뜻한 공기가 접촉하고 이때 부는 심한 바람으로 발생한다. 전하가 분리되는 -7°C 의 온도 당연히 낮으며 백~수 백km인 곳에 -의 뇌운이 존재한다.

이때 지표면의 풍속은 10m/sec 정도인데 상공이 될수록 강하며 수 km의 곳에서는 60m/sec 정도가 된다. 따라서 날려진 +전하의 입자는 경사진 상공으로 날아가 백~수백 km의 곳에 존재한다.

일반적으로 이때의 바람은 동일하게 불고 있지 않고 100~150m 정도의 폭을 가진 바람의 덩어리와 같은 상태로 불고 있으며, 따라서 뇌운도 가늘고 긴 몇 개의 띠의 형상으로 존재하지 않을까 상상된다.

(3) 대지방전에 이르는 경과 : 하뢰(夏雷)의 경우 약 5km 상공에 있는 부전하를 가진 구름과 대지간에 방전이 되는 것인데 옛날 뇌운의 전하가 높아져 대지와 사이의 전위차에 의해 공기의 절연 강도가 약한 곳을 들어가 절연파괴를 일으켜 방전되는 것이라고 생각하는 사람이 많았지만 전술한 바와 같이 뇌운의 높이, 직경 공히 5km에 이르는 평행판에 가깝고, 따라서 이 사이는 약 30kV/m 정도의 평등 전계에 가까워 공기의 절연을 파괴하는 데는 약 100배 정도의 전위차가 필요하다.

뇌운중에는 격심한 난기류가 존재하고 있으며 이 난기류 또는 동극성 전하의 반발력 등의 원인으로 전하의 덩어리가 뛰어 나갈 때 그 통과한 흔적에 전하를 남기면서 전진하는데, 점차 선단의 덩어리 전하는 통로에 남겨져 감소하고 거의 없어진 곳에서 정지하지 않을 수 없게 된다.

이 동안에도 반도체 형상인 구름에서는 그 통로에 연속적으로 전하가 주입되고 있으며, 따라서 정지하

고 있는 통로 선단의 전로는 코로나 방전에 의해 팽창한다. 이 팽창이 에너지적으로 정지 한계에 달하면 또 진전을 개시하기 시작하여 전과 동일한 운동을 반복한다. 이 하나의 스텝 길이는 약 수 10m이다. 이와 같이 작은 범위로 진전, 정지를 하므로 스텝 리더라고 하고 있다.

그 진전하는 방향은 반드시 수직방향만이 아니고 선단 전하 주변의 모양에 따라 방향이 정해지는데 계속 대지에 대한 전계가 원래의 뇌운에 의해 존재하고 있어 도중에는 여러가지 경로를 더듬지만 최후에는 대지 가까이 도달한다. 그중에는 구름의 상태에 따라 연속해서 스텝 리더 출발구에 연속해서 주입하고 있던 전류가 그치면 리더가 지표에 도달하지 않고 도중에 없어져 버리는 일도 있다.

리더 선단이 대지 가까이 도달했을 때 지표에는 뇌운 및 이 리더와 상대해서 반대극성의 전하가 유도되고 지표에서 리더를 향해서 방전이 개시된다.

이것이 주방전이며, 앞서의 스텝 리더 선단 및 그 통로에 잔류해 있는 전하를 중화한 곳에서 밀도가 높은 전하가 없어지며 통상적으로는 일단 차단된다. 이것이 차단되지 않았을 때는 전술한 통로에 공급되고 있던 전류가 그대로 연속해서 흘러(수 십~수 백 A) 구름의 대부분의 전하를 방전해 버린다. 이것을 연속전류라고 한다. 일단 차단됐을 때 일시 정지한 후에 구름 주입구에 충분히 전하가 집합되면 재차 대지와 사이의 방전이 발생하는 일이 있다. 이것이 여러번 반복되는 것이 다중뢰이다.

동뢰의 경우, -전하 방전시에는 구름의 높이가 낮기 때문에 방전을 개시한 주방전을 차단하기 어렵고 하뢰에 비해서 파괴값은 낮지만 파괴장이 긴 1발뢰가 되기 쉽다고 생각된다. +전하의 경우는 약간 높은 곳에 있고 또한 가늘고 긴 형태를 하고 있어 다중뢰가 될 가능성이 크지 않은가 상상된다.

스텝 리더의 운동이 에너지 보존칙, 최소 보존의 법칙을 따르기 위해서는 전술한 바와 같은 운동을 하지 않을 수 없다고 생각하고 있다.

이상, 선행 방전에 대한 메카니즘에 대해서 여러

가지 언급한 것은 이 진전의 양상 여하에 따라 선로에 유기되는 서지 전압의 파고값, 파형 등이 많이 달라지는 것으로서 특히 배전선로에서의 내뢰 대책상 중요한 사항이 된다. 또한 가공 지선, 피뢰기의 효과적인 구조, 설치법 등을 시사해 주는 것이다.

(4) 직격뢰 : 송배전선, 전기설비를 향해서 직접 방전됨으로 인한 과전압 현상을 직격뢰라고 한다. 철탑 등을 직격하여 이 전위의 상승에 의해 철탑에서 선로쪽으로 플래시 오버하는 역 플래시 오버도 직격뢰의 일종으로 인정된다.

역 플래시 오버는 철탑 또는 접지의 서지 임피던스와 뇌전류의 적(대수적 적이 아니고 더뮬의 정리에 의한 상승적)에 의한 전위가 되고 이 전압이 높아져 선로쪽으로 플래시 오버하여 선로에 서지 전류를 주입한다. 서지 종료 후에도 전원에 의한 속류에 의해 지락으로 이행한다.

(5) 유도뢰 : 선로 또는 전기설비 근방에 대지 방전이 발생했을때 이 뇌도에서 주위로 전자계가 복사되고 이것에 의해 선로에 유도전압이 유기된다. 특히 유도뢰의 경우 종래의 기술인 진행파 이론과 같이 1점에 서지 전압이 인가된 것과는 양상이 다르고 선로상에는 시간의 뒤짐과 전압이 상이한 서지 전압이 분포되어 유기되는 것이며 또한 그 전후에 설치된 몇 개소의 피뢰기 동작이 서로 간섭하여 동작하기 때문에 일반적으로 억제된 서지 전압은 진동성분을 많이 포함한 파형이 된다. 유도뢰의 경우에는 그 근방에 설치된 전주, 접지선 등도 수직 안테나의 작용을 하여 복잡한 현상이 된다.

2. 뇌해방호를 위한 시설, 장치, 기기

(1) 가공 지선 : 고전압 송전선에서는 이것에 의해 전력선을 차폐하여 선로에의 직격을 방호하는 것이다. 기타 작용으로서 선로와의 정전, 전자작용에 의해 선로의 서지 전압을 저감시킨다. 기타에도 여러가지 작용이 있지만 생략한다. 배전선로에서는 가공 지선에 직격이 있어도 선로의 절연강도가 낮기 때문에 역 플래시 오버로 이행하여 피해를 발생한

다. 그러나 가공 지선 접지부에서 에너지가 크게 흡수되기 때문에 선로의 피해가 경감되는 효과가 있다.

배전선에서의 가공 지선의 주목적은 유도 서지 전압의 저감과 그 접지점 통과후 다음 전주에 침입하는 서지 전압을 저하시키는 것이다. 가공 지선의 설치에 의해 서지 전압을 1/2 정도 저감시키는 작용은 있지만 이 정도로는 뇌해를 방지할 수가 없고 피뢰기의 병용이 필요하다.

(2) 아크 혼 : 주로 송전선에서 애자의 플래시 오버로 인한 파손을 방지하기 위해 사용한다. 배전선의 절연화에 수반하여 뇌 서지에 의해 일단 절연을 파괴하고 방전했을 때 주위는 절연물이 남아 있기 때문에 아크 점이 이동할 수 없고 계속되는 속류에 의한 용단사고가 발생하여 이것을 방호하기 위해 배전선에도 아크 혼의 사용이 시도되고 있다.

(3) 매설 지선(키운터 포이즈) : 송전선 탑각 접지의 서지 임피던스 저감을 주목적으로 하는 것으로서, 철탑에서 여러 선을 매설한 지선을 철탑에서 방사형상으로 설치한다.

(4) 피뢰기 : 피뢰기도 과거 각종 형식의 것으로 변천을 거듭해 왔지만 현재 가장 우수한 성능을 가지고 있는 것은 산화아연을 주성분으로 한 소결체에 의한 비직선 저항체를 사용한 직결 갭을 사용하지 않은 피뢰기가 주류를 이루고 있다.

다만, 배전선에는 현재 직렬 갭을 설치하여 산화아연소자에 상시 과전을 방지하여 이것에 의한 열화 또는 서지 전류를 방전한 후의 열 폭주의 위험 또는 지락, 개폐 등에 의한 과전압시의 동작을 방지함으로써 제한전압의 저하를 도모한 직렬 갭이 달린 산화아연형 지뢰기가 많이 사용되고 있다.

한편, 피뢰기 설치밀도의 향상에 의해 뇌사고가 많이 감소되고 있다. 현재 이 사고 중에는 직격뢰에 의한 것이 상당한 수를 나타내고 있다. 갭레스형 피뢰기를 선로에 여러개 설치할 때는 그 병렬효과에 의해 특히 동뢰와 같이 파고 값은 그리 크지 않으나 지속시간이 긴 벼락에 대해서는 선로의 방호를 기대

할 수가 있다. 로켓 유리실험으로 60개의 파괴기를 설치한 모의배전선에 직격뢰를 주어 선로, 파괴기 공히 피해가 없었던 예가 있다.

(5) **업소버** : 특히 저압회로, 신호회로 등에서는 파괴기에 의해 서지의 에너지 대부분을 처리하여도 아직 그것들을 방호할 수 없을 때 이것을 2단, 3단으로 삽입하여 서지, 노이즈를 저감시킨다.

(6) **실드 변압기** : 전자기기류의 방호, 무선중계소, 댐의 계측제어선 등과 같이 부하측의 출력회로가 옥외로 나가 있는 경우에 우수한 노력을 발휘한다. 이것의 주요 동작은 전원회로와 부하회로의 절연화와 그 사이의 서지 이행을 1차 코일과 2차 코일 간에 설치한 실드판에 의해 차단하는 것이다. 그리고 저전압회로에서는 대지로의 회로를 생각하는 것이 가장 중요하며, 이 사이의 움직임은 합리적으로 한 이층, 삼층의 실드를 설치하여 별개의 접지를 취함으로써 탁월한 성능을 발휘한다.

(7) **뇌방전 및 뇌운의 검출, 관측장치** : 레이더에 의해 뇌운의 발생 또는 이동을 관측하여 뇌 피해를 받기 전에 안전상 중요한 기기, 컴퓨터 등을 예비전원으로 전환하거나 사고 수복에 대한 인원, 기재준비를 한다. 또는 간단한 뇌방전검지기(예전대 시그레 카운터 유사품)등에 의해 20~50km 정도에 있는 뇌운이 검지되며, 이것을 여러 개소에 설치함으로써 뇌의 발생, 이동 등과 같은 개황을 알 수가 있다.

지표의 정전계 강도 또는 코로나 전류의 검지에 의해 그 근방으로의 대지방전 확률이 극히 높아진 것을 예지할 수가 있다. 머리말에서 뇌운의 경과등을 언급한 것은 이와 같은 기술에 직결되기 때문이다.

변전소에 설치된 ZPT에 의해 뇌서지가 발생한 것을 검지하고 그 배전선 상에 뇌운이 있는 것을 아는 데, 이 출력과 지락, 단락사고가 동시에 발생했을 때는 벼락에 의한 피해로 판단할 수 있어 릴레이류를 로크하여 재송전에 의한 피해의 확대를 방지하거나 파전류 계전기의 시한을 짧게 하여 단선할 때까지

전원을 차단시키는 등의 효과적인 처치를 취할 수가 있다.

3. 각 시설에 대한 내뢰(耐雷)대책

앞에서 뇌의 방호를 위한 시설, 기기류를 들었지만 이것들을 실제선로에 합리적으로 사용하고 각 기기의 기능을 효율적으로 발휘하기 위해서는 여러가지 기술이 필요하다.

이것들을 취급한 것이 절연협조의 설계인데 이것은 송배전법에 대한 서적에도 나와 있으므로 생략한다.

(1) **발변전소 관계** : 송전선에 직격된 뇌 서지의 대부분은 현수애자에 설치된 아크폰에 의해 처리되지만, 이를 통과한 것을 파괴기에 의해 기기가 갖는 절연 레벨까지 서지를 억제한다. 초고압계통에서는 파괴기에 가해지는 부담은 뇌 서지에 의한 것보다 오히려 개폐서지에 의한 것이 크다.

구내 기기에 접속되는 케이블 시드에 개폐기 채투입시 십~수 십ns와 같이 극히 급준하고 또한 본선의 전압에 가까운 오더가 높은 서지 전압이 발생한다. 이것을 방지하기 위해 케이블 시드 보호용 파괴기가 사용되고 있다.

(2) **송전선** : 송전선로에서는 가공 지선에서 전력선을 효과적으로 차폐하고 이것에 직격시킴으로써 전력선에서의 직격을 방지하는 것이 중요하다. 종래의 차폐이론으로는 좀 설명이 어려운 현상으로 중상 직격의 사고 예가 있다. 스텝 리더의 지표에서의 최후 동작 및 가공 지선, 첩탑 등에서, 이를 맞이하는 것 같이 생기는 코로나 방전 등의 동향에서 직격점이 정해지는 것으로, 어떠한 효과적인 방책 또는 효과적인 제어법이 발견되지 않을까 생각된다.

그리고 특이한 현상으로서 일본의 예를 들면 서쪽 해안 산악지를 통과하고 있는 초고압 송전선에서 겨울의 뇌운이 산과 함께 포위하여 2회선에 거쳐 플래시 오버 사고가 발생하는 현상이 있다고 한다. 이것들에 대한 원인 규명과 대책은 벼락의 발생과 그 뇌운이 산에 근접했을 때, 또는 그 뇌운의 내부, 뇌운

이 포위한 후의 여러 현상을 파악하여야 충분한 대책을 세울 수 있을 것으로 보고 있다.

(3) 배전선 : 배전선에는 송전선과 같은 선형상의 것이 아니고 면형상의 디멘션을 가지고 있으며, 이것을 방호하기 위해서는 방대한 양의 내뢰 기재가 필요하다. 따라서 직격뢰에 대한 방호를 생각하는 것은 경제적으로 불가능하고 주로 유도뢰를 대상으로 하여 대책이 세워진다.

현재로 배전선의 내뢰설계는 가공 지선과 피뢰기를 주류로 하여 세워지고 있다. 이 밖에 아크폰 또는 이것과 직렬로 산화이연소자를 넣은 한류형 아크폰, 지지 애자, 개폐기, 변압기 내의 주변에 산화이연형 소자를 구비한 복합형 기기의 사용이 시도되고 있다.

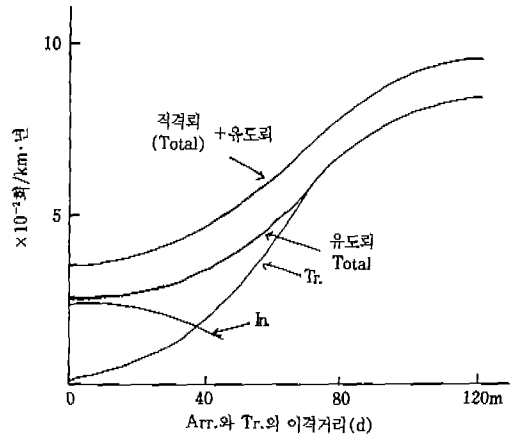
가장 중요한 것은 각 내뢰기재의 성능을 충분히 발휘하는 효과적인 설치방법의 검토도 중요한 문제이다.

일례로서 피뢰기의 보호거리에 대해서 생각해 본다.

<그림 1>은 유도뢰 서지 전압이 선로상에 분포된 상태를 고려하여 사고확률을 계산한 것으로서, 피뢰기의 설치간격 250m, 애자 및 변압기의 절연장도 실력값을 125V, 85kV, 피뢰기의 제한전압을 25kV, 접지저항 30Ω인 경우에 변압기와 피뢰기의 이격거리 d와 1년간에 선로 1km당 발생하는 사고횟수를 계산한 것이다(애자, 변압기 양 사고 포함). 이와 같이 뇌해(雷害)발생 횟수의 확률은 피뢰기와 변압기의 거리 d에 의해 많이 달라지는 것으로, 일반적으로 생각되고 있는 것같이 피뢰기의 보호거리 150m라는 식으로 이 범위에 있는 기재를 보호하는 것으로 잘못 생각하기 쉽다.

정확히는 어느 사고율의 목표를 정하고 그 피뢰기의 설치간격(예컨대 250m)일 때는 변압기를 피뢰기에서 몇m 이내에 설치하지 않으면 안되게 된다. 설치간격이 달라지면 당연히 동 사고율에서 보호거리가 나온다. 동일한 최대 이격거리일 때는 사고율이 달라진다.

동일한 피뢰기의 설치간격(250m)이더라도 변압



<그림 1> 피뢰기와 변압기의 이격거리 및 뇌해사고횟수(회/km·년)(순시정전포함)

기와 피뢰기의 거리 d를 40m 이내(가능하면 0)로 함으로써 사고율이 대단히 적어진다. 사고중 d가 커질수록 변압기 사고가 많아지고 애자 사고는 적어진다.

그리고 피뢰기 설치주에서도 어느 정도의 사고가 있으며, 잘못 생각하면 보호거리 0과 같이 단락된 이미지를 받게 된다. 피뢰기 설치주에서의 사고중 직격뢰에 의한 것도 상당수 존재하는데 통상적으로 생각되고 있는 경로 이외의 원인에 의한 존재도 생각할 수 있으며 이 규명도 중요하다.

(4) 저압회로, 제어선, 전자기기 시스템 : 피뢰기의 본질적인 동작으로서 뇌 서지로 인한 과전압을 대지에 보내고 이어서 전원에서 흐르는 속류를 차단시키는 것은 6kV급 기기, 선로일 때도 접지저항에 피뢰기의 방전전류가 흐름으로 인한 접지선의 전위 상승이 무시할 수 없는 수치가 된다. 저압회로에서는 이 수치가 치명적인 것이 되며, 피뢰기의 제한전압 등에 의한 큰 값이 되어 버린다. 예를 들면 접지저항 30Ω인 곳에 1000A의 방전전류가 흐르면 30kV와 같은 큰 값이 되어 버린다.

저전압회로, 특히 반도체 기기를 방호하는 방식으로서 접지선의 전위를 안전한 값까지 저하시키는 것은 불가능하므로 기기 케이스, 전원선, 출력회로 등

을 전부 동전위화시키고 이들 상호간의 상대 전위차를 없애는 방향의 내전방법이 필요해진다. 예를 들면 전원에서 서지가 침입해온 경우 전술한 대책을 취했을 때 출력선도 고전위가 되고 이것이 출력선을 따라 진행하면 그 종단에서 고전위차가 되며 여기서 사고가 일어난다. 따라서 종단에서도 앞에서와 동일한 대책을 취하여야 한다. 기기 외함의 전위가 높아지고 이 부근의 기기 케이스 전위도 높아져 다른 계통의 전원, 제어선이 연결되어 있으면 그 개소로의 플래시 오버가 발생한다.

각 단자를 케이스, 접지선과 동전위화시키는 것은 지극히 간단하며 전원선에 연결되어 있는 피뢰기의 접지, 기기 외함, 출력회로에 연결되는 피뢰기의 접지선을 전부 일괄해서 하나의 접지선에 접속하면 된다. 다만 이때는 그 기기 외함을 서지에 대해서 동일한 전위가 되므로 인체의 안전, 타 기기에의 케이스 간 방전 등에 주의하여야 한다.

앞에서 기술한 실드달린 변압기에 의해 전원선과 기기의 절연화에 의해 서지 이행은 없어지지만 이들 접지를 거쳐 서지가 전달되므로 1매의 실드판으로는 절연화가 달성되지 않고 이중 또는 삼중 실드에 의해 효과적인 각 회로마다의 동전위화, 각 회선간의

절연화, 대지로부터의 회로의 차단 등 이상적인 작용을 할 수가 있다.

접지선은 0전위로 하는 것으로 간단히 생각하지 않고 접지선에서 서지를 얻어 넣는 일도 많이 있는 대지의 회로가 대단히 중요한 포인트가 된다.

저전압계의 내되는 중요한 것이다.

(5) 가공선과 케이블 접속점 : 가공선의 서지, 임피던스는 약 400Ω인데, 케이블의 서지 임피던스는 그 치수에 따라 상이하지만 10~30Ω 정도이므로 여기서 반사(부)현상이 일어난다. 케이블 내는 낮아져서 진행하지만 종단에서 약 2배가 되며 반사된 것이 입구에 되돌아 와서 다시 정반사가 행하여진다. 이와 같은 반사투과가 반복되는 주로 케이블 입구에서의 사고확률이 높다. 상세한 설명은 많은 지면이 필요하므로 간단히 보호법만을 들고 끝내기로 한다.

(i) 케이블 접속점 가공선측에 가공 지선을 설치하고 이 근방 여러 개는 각주 접지로 한다.

(ii) 접속점에 피뢰기를 설치하고 그랜드 와이어의 접지, 피뢰기의 접지, 케이블 시드 등 일괄 접지한다.

(iii) 케이블 부하측에도 피뢰기를 설치한다.

<다음호에 계속>

너도나도 사전점검

재해없는 우리고장