

전력설비의 뇌서어지 보호

-D공원 뇌격피해에 관련하여-

글/이 경 재(한전 기술연구원 위촉연구원)

머리말

전력계통을 구성하고 있는 발전, 변전, 송전 및 배전설비 그리고 수용가구내에 있는 전력설비들은 끊임없이 상용주파수(60HZ)운전전압에 의한 지속적인 전기적 스트레스를 받고 있으며 그에 따라서는 송배전설비의 개폐서어지에 의한 내부적인 이상전압과 자연현상에서 오는 뇌에 의한 외부이상전압과 같은 충격적인 스트레스를 받아 절연내력이 파괴되어 설비가 파손되는 결과를 초래한다. 따라서 이러한 사고를 방지하기 위하여 전력설비는 위와 같은 지속적인 과전압이나 충격적인 전압에 견딜수 있도록 절연설계를 하게 된다.

물론 전력설비의 절연설계는 위와 같은 내·외적인 이상전압에 대하여 각 기기별로 충분한 절연내력을 갖는 것이 좋으나 이로 인한 과도한 비용을 줄이기 위하여 단계별로, 설비의 기능별로 절연협조를 통하여 경제적이고 확률적으로 안전한 설계를 하게 된다. 즉 고가인 발전설비나 변전설비의 절연은 파괴기를 설치하여 외부에서 오는 서어지의 파괴치를 제한하여 그 보호수준에 맞는 절연설계를 하게 되고, 송배전선로는 고가의 절연설계를 할 수 없으므로 주로 내부이상전압에 견디는 값을 목표로 설계하면서 외부이상전압, 즉 뇌격에 의한 보호는 이로 인한 사고가 소정의 값이하가 되도록 별도의 대책을 하게 된다.

이에 대한 대책은, 첫째 가공지선으로 뇌격을 차폐



하고, 둘째 철탑과 탑각접지 저항을 통하여 안전하게 대지에 흘리게 하며, 셋째 만일 섬락(Flash Over)이 일어나 선로에 사고가 발생하면 고속차단과 개폐로를 함으로써 정전없이 고장제거를 하는 것이다. 뇌에 의한 사고는 송배전선 사고의 반이상을 차지하므로 뇌격에 강한 전력계통을 구성하는 것이 중요하다. 최근에는 산업용이나 일반수용가에서도 전산기를 비롯한 자동제어 및 감시기능 그리고 전자교환기 등의 첨단기 사용으로 이들 기기에 대한 뇌서어지 보호문제가 자주 발생하고 있다.

1. 뇌서어지

뇌에 대하여 강한 전력 계통을 구성하려면 먼저 뇌의 성질을 잘 알 필요가 있다. 뇌운의 발생, 전하분리의 구조, 뇌방전, 뇌격시의 이상전압의 발생과 전파(傳波) 등의 물리적 성질과 뇌격도수, 뇌격전류의 크기, 파형 등의 통계적 성질은 뇌의 성질파악에 주요한 요소가 된다.

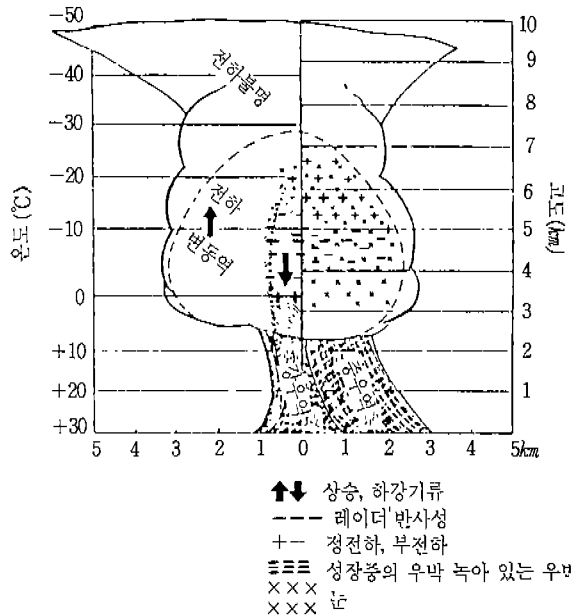
가. 뇌운과 뇌방전

뇌운에는 여름에 강한 햇빛에 의하여 지표면의 습한 공기가 가열되어 발생한 상승기류로 인해 생기는 열력이 있고, 이것이 산의 경사면을 따라 발생하는 산뢰, 불연속선에서 발생하는 계뢰(界雷)와 태풍의 중심으로 몰려오면서 상승하는 구름의 와류에서 생기는 와뢰(渦雷)가 있다. 어느 것이나 강한 상승기류로 발생되며 구름에 높이가 클수록 강한 뇌운이 된다.

뇌운에는 거시적으로 상부가 (+), 하부가 (-)로 대전되나, 하부에 (+)로 대전되는 적은 부분이 있다. 이 전하(電荷)가 어떠한 구조에서 분리되는가는 옛부터 논란의 대상이 되어 왔으나 결정적인 해결은 금후의 과제이다. 뇌방전에는 구름과 지상간에 낙뢰, 구름과 구름간에 방전이 있다. 뇌방전은 자연계의 웅대한 불꽃이며 1km이상의 공간간극에서 1억볼트이상의 전압이 가해질 때 방전이 개시된다. 지상에 대한

뇌격은 먼저 구름에서 계단적인 선행방전(Stepped Leaders)이라 불리는 약한 방전경로가 50m씩 일어났다가 사라지는 명멸을 반복하면서, 0.01초만에 지상에 도달한다. 지상에 도달하면 즉각 대지에서 구름을 향해 강한 빛을 동반한 주방전(Return Stroke)이 일어난다. 이것이 우리가 볼 수 있는 번개이며, 큰 뇌격전류가 흐르게 된다. 이 뇌격의 반수가 다중적이고 0.05초에서 0.5초 정도의 간격으로 제 2, 제 3의 뇌격이 계속된다. 제 2 뇌격부터는, 선행방전은 전술한 계단적인 중단없이 한 줄기로 진행(Dart Leader)된다 <그림1>.

높은 건물이나 탑에 떨어지는 뇌격의 경우는 역으로 탑에서 구름을 향해 선행방전이 출발하고 다음에 구름에서 주방전이 되 돌아온다.



<그림 1> Kuttner의 뇌운 모델

나. 뇌격빈도

뇌격에 의한 선로의 섬락사고를 전무하게 하는 것은 현재 기술이나 경제적 여건으로 불가능하다. 따라서 사고의 횟수를 용인할 수 있는 값 이하로 하기 위한 노력이 필요하다.

이를 위해서 먼저 선로에 어느 정도의 뇌격이 있는가를 예상하는 것이 제일 먼저 알아야 할 기초자료인 것이다.

뇌격도수는 송배전선 100km당 1년간에 몇회 발생하는가로 표현된다. 이것을 예측하는 방법의 하나가 연뇌우일수, 즉 IKL(Isokeraunic level)에서 구하는 방법이다. 식으로 표시하면

$$\text{뇌격도수(회/년} \cdot 100\text{km)} = 2 \times (\text{IKL 값}) \dots\dots\dots(1)$$

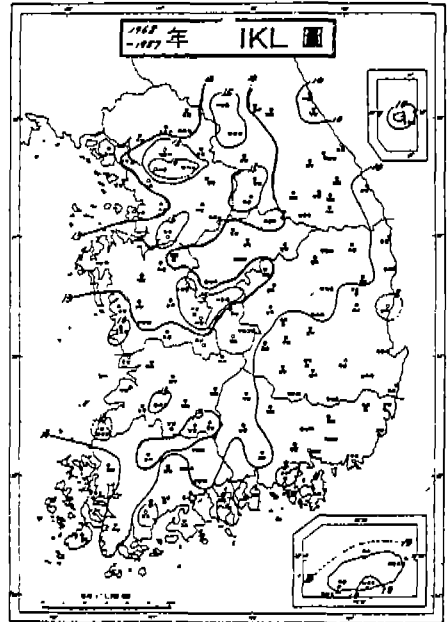
위식은 연뇌우일수 30일일 때 연 100마일당 100회의 뇌격이 있었다는 경험에서 근거한다. (1)식의 방법은 첩탑이나 가공지선의 높이에 관계없이 정한 것이나 이것을 고려하면 뇌격도수는 다음과 같다.

$$\text{뇌격도수(회1년} \cdot 100\text{km)} = (\text{송배전선의 차폐면적 } A) \times (\text{단위면적당 뇌격수 } n) \dots\dots\dots(2)$$

현재 우리나라에서 쓰고 있는 실험식은

$$n(\text{회/년} \cdot \text{km}^2) = 0.1 \times (\text{IKL의 값}) \dots\dots\dots(3)$$

이며 IKL이 30일이면 단위면적당 연간 뇌격빈도



<그림 2> 20년 평균 IKL도

는 0.3(회/년 · km²)가 된다. <그림 2>와 <표 1>은 우리나라의 IKL 분포를 나타내고 있다.

위에서 선로의 차폐면적 A(km²/100km)라는 것은 뇌격중 지상에 떨어질 것 중에서 선로에 떨어질 값을 나타내기 위한 것이며 첩탑이나 가공지선의 높이, 배치에 따라 다르다.

송배전선에서는 뇌격이 없더라도 가까운 곳에 낙뢰에 의하여 송배전선에 이상전압이 발생하는 수가 있다. 이것을 유도뢰라고 하며 뇌운의 하부에 있는 전하(電荷)의 정전유도에 의하여 선로상에 구속전하가 발생하고, 낙뢰에 의하여 그 전하가 구속상태에서 벗어나면 뇌서어지로서 전파된다. 뇌방전은 선행방전과 주방전이라는 복합적 성분을 갖게 되며, 유도뢰서어지는 대전된 전하의 상태에 따라 그에 대응하는 서어지 성분을 갖는 파형이 된다. 유도뢰는 수만볼트의 특고송전선에서는 문제가 되지 않으나 배전선로에서는 이따금 위협의 대상이 된다.

다. 뇌격전류

뇌격도수가 예측되면 다음에 뇌격전류의 크기와 파형이 어떻게 생겼나 알아야 한다. 뇌격전류의 파고

<표 1> IKL실적

		뇌일수 실적(20년도분)	
구분		20년(1968~1987)도분	
뇌일수	구분	IKL	지역
	최고	37	논산, 전주(85년), 35일: 평택(68년), 서울, 윤봉(85년)
	최저	0~5	남해안 및 정남북의 동해안
	평균	11.0	
지역적 분포	다뢰지역	경기도, 강원도 내륙지방, 충북지역	
	과뢰지역	남해안 일부, 경상도 내륙지방	
월별 분포		6~9월에 8.7일로서 전체의 79%를 점유	

계절별 뇌일수

계절별	구분			점유율 (%)		
	20년도	2차	1차	20년도	2차	1차
봄 (3 ~ 5 월)	1.34	1.52	1.03	12.2	12.9	10.8
여름 (6 ~ 8 월)	7.63	8.39	6.31	69.1	70.8	65.5
가을 (9 ~ 11 월)	1.88	1.73	2.15	17.2	14.7	22.5
겨울 (12 ~ 2 월)	0.16	0.19	0.11	1.5	1.6	1.2
계	11.01	11.83	9.6	100	100	100

치는 측정기의 감도나 측정년수, 범위나 지역에 따라 다르나 해마다 변동하는 통계적인 양으로써 파악해야 한다.

<그림 3>은 자강편(磁強片)을 사용한 측정으로 뇌격전류파고치를 누계분포곡선으로 그린 것이다. 곡선의 종축은 횡축의 값 이상의 뇌격전류가 전체의 몇%가 되는가를 나타내고 있다.

곡선 (1)은 AIEE(미국 전기학회)가 1950년 송전선의 내뢰설계를 위해 2721회의 자강편으로 측정한 결과이며 곡선 (2)는 1956년 미국의 345KV OVEE 선로에서 기록된 것이다.

일본에서는 154KV 계통에서 84개 기록, (4)는 일본 60KV 계통에서 1955년에 40개의 기록에 의한 값이다. AIEE조사에 의하면 20KA의 뇌격전류파고치가 넘는 횡수가 40%가까이 나타나고 있으며 일본의 경우는 80~100%의 누적분포를 보이고 있다.

뇌격전류의 파형은 파두장과 파미장으로 결정되나, 특히 파두장이 짧으면 송배전선로에 큰 이상전압 발생의 요인이 되므로 중요한 값이 된다. 국내에서는 이러한 파라미터를 측정조사한 기록이 없으나 1950~1958, 스웨덴에서 높은 연돌의 피뢰침에 대해 뇌격을 측정 한 결과가 <그림 4>에 나와 있다.

여기에서 나온 파두장의 대표치는 2.0 μ s이고 파미장은 약 60 μ s이었다. 우리나라에서 뇌서이지 분석에 사용되는 충격전압의 표준파형으로 2 \times 39 μ s가 적용되고 있다(88.7.IKL작성 및 배전선내뢰설계).

2. 가공지선과 건물내 뇌설계

전술한 (1), (2)식에 따르면 우리나라의 선로 100 km당 뇌격빈도는 연평균 22회이고 km²당 빈도는 0.2 회가 된다. 이것이 설비에 직격되로 작용하면 설비의 피해를 면할 길 없다. 그래서 선로나 설비상부에 가공지선이나 피뢰침 또는 차폐설비를 하여 뇌격으로부터 보호하게 한다. 이 뇌격중 몇 %가 보호되는가를 보호효율 또는 차폐율이라 하고 가공선의 보호각이 적을수록 좋다. 우리나라의 배전선로의 가공지선

은 45°의 차폐각을 기준으로 설치되어 있고, 이로 인한 뇌사고 감소율은 30%이상의 결과를 보이고 있다. 흔히 배전선로에 들어오는 뇌서이지중 180KV정도수준에서 직격뢰와 유도뢰의 비율은 6:4이고 250KV정도의 수준에서는 8:2이다.

22.9KV 라인 포스트 애자의 절연레벨이 나전선인 경우 180KV이고, 절연전선인 경우 250KV이며 가공지선으로 유도뢰에 대한 사고방지는 기대되나 직격뢰에 대하여는 완전차폐가 불가능한 이상 애자나 변압기가 소손되는 경우가 발생한다.

특히 보호효율이 높게 요구되는 발·변전의 구내설비나 특수건물 및 공장에 대하여는 여러 가닥의 가공지선이나 피뢰침을 설치하여 0°에 가까운 차폐각을 구성하거나 건물지붕을 동판으로 시공하여 건물철근과 지하접지망과 연계시켜 완전차폐를 하는 경우가 있다 <그림 5 참조>.

3. 역섬락현상

가공지선이나 피뢰설비로 보호되면 뇌격의 대부분은 가공지선, 전선지지물(철탑, 전주), 접지저항을 통하여 큰 전류가 대지에 유입된다. 이때 애자나 가공지선과 선로도체 사이에 큰 전압차가 발생하여 이것이 후레쉬오버 전압을 초과하면 섬락이 발생한다. 이것을 역섬락이라 한다. 도체에 직접 직격뢰가 맞으면 도체의 전위가 상승하여 지지물과 섬락을 일으키나 가공지선이나 철탑, 전주에 맞으면 지지물의 전위가 상승하여 역섬락이 된다. 뇌격전류 I로 애자에 가해지는 전압 V는 다음과 같다.

$$V = (1 - C_n) \alpha R' I + e \dots \dots \dots (4)$$

[는 저항이 0인 대지면에 방전될 때의 전류이고 C_n은 가공지선과 도체의 전자 또는 정전적인 결합계수로 가공지선의 전압에 비하여 얼마나 도체 전위가 상승하는가의 비율이다. α 는 파고계수라 하고 인접구조물에서의 반사파에 의하여 전위가 저장되는 비율이다. e는 운전전압의 순시치가 된다. R'는 구조물과 접지 저항치 및 뇌도(雷道)를 포함한 실효저항이다.

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_G} + \frac{1}{R_T}} \dots \dots \dots (5)$$

Z_0 는 뇌도입피턴스라하며 뇌격의 주방전회로의 서어지임피턴스라하여 전류 I/2, 전압 $Z_0 I/2$ 의 진행파가 들어온다고 가정하였다.

위식에서 역섬락사고를 적게하려면 R'를 적게하고 C_n 을 크게 하면 된다. 즉 가공지선의 가닥수를 늘려 Z_G 를 줄이면 되고 이에 따라 C_n 는 커짐으로 V의 값이 줄어들게 된다. 역섬락이 발생하면 이어서 전력주파수의 전류가 흐르게 되는데 이것은 선로의 고속차단으로 제거하고 고속차폐로를 하게 되면 건전한 상태로 회복이 가능하게 된다.

4. 뇌서어지의 전파

뇌서어지는 선로나 가공지선을 따라 전파되면서 감소, 변형된다. 뇌서어지의 감쇠, 변형은 발·변전소나 수용가에게 어떤 뇌서어지가 침입하는가를 알 수 있고 (4)식의 α 를 알 수 있게 한다.

감쇠와 변형에 대하여는 여러가지 실험식이 있으나 한 예를 들면 (Foust and Menger의 실험식) 다음과 같다.

$$e = \frac{E}{1 + KEx} \dots \dots \dots (6)$$

여기서 E: 발생서어지 파고치 [KV]

$e: x [km]$ 의 지점에서 도래한 파고치 [KV]

K: 감쇠계수 (=0.0001~0.004[1/km·KV])

5. 구내 전력설비의 피뢰

발·변전소나 수용가구내 설비의 절연은 피뢰기의 보호특성을 기준으로 정해진다. 선로를 타고 들어온 뇌서어지는 선로의 절연내력이나 전파특성에 따라 영향을 받는다. 구내 근처 선로에서 직격되나 역섬락이 있으면 뇌서어지의 전파감쇠가 적고 또 전격점과 피뢰기사이의 왕복반사에 의하여 피뢰기에 큰 전류가 흘러 위험한 사고가 된다.

따라서 22.9KV계통의 피뢰기 설계 기준치 2.5KA를 넘는 뇌격전류가 들어오면 피뢰기는 파손되고 이어서 주상변압기의 BIL이 가장 낮으므로 소손사고가 발생하게 된다.

그러므로 구내의 뇌차폐는 물론 근처의 송전선의 차폐는 완전한 것이 바람직하며 접지저항도 낮게 해야 한다.

그래서 구내의 뇌차폐는 가공지선, 피뢰침, 철구등을 이용, 모선을 완전한 보호각안에 두게 하며 이들은 서로 연결접지를 하여 합성저항을 뿔수록 적게 하는 것이 유리하다. 그러나 피뢰기의 경우는 뇌격전류가 다른설비의 접지선에 분류됨으로써 그 설비의 전위상승을 막기 위하여 단독접지를 하게 된다. 선로를 통하여 유도되로서 들어오는 뇌서어지는 피뢰기가 전압을 제한하여 기기를 보호한다.

그러나 이보다 낮은 서어지는 배전용 변압기를 통해 구내에까지 침입하게 되는데 이때의 서어지의 크기는 변압기의 서어지이행율이 클수록 불리하다. 또한 옥외에 광범위한 저압배전선로를 가지고 있는 공원, 공장 및 특수시설에서는 근처의 낙뢰시 저압배전선로에 유도되는 유도뢰가 구내에 진입되는 경우가 있으며 이로 인해 구내 전자설비를 파손시키는 경우가 있으므로 이를 방지하기 위하여 절연변압기를 사용하는 경우가 많이 있고, 또 컴퓨터나 전자기기회로에는 입력부분에 서어지 흡수기를 설치하게 된다.

6. 접지의 시공

최근에는 대규모의 공장, 공원과 더불어 고층화된 건물이 증가되고 특히 다양화된 첨단기기(컴퓨터, 전자교환기, 계측설비, 감시장치, OA 및 공장자동화 등)가 적용되어 감에 따라 이러한 설비에 서어지가 진입할 경우 대지 전압 상승의 억제를 위해 접지망이 구성되고 특수 설비에 대하여는 독립접지를 시공하게 된다.

전기설비기술기준에는 다음과 같이 기계기구의 구분에 따라 접지공사를 하게 된다 <표 2>.

뇌격에 대하여 피뢰침설비의 접지와 뇌서어지 옥 내침입을 방지하는 피뢰기의 접지를 어떻게 할 것인가. 또 가공배전계통의 가공지선은 피뢰효과가 인정되어 광범위하게 적용되고 있는데, 이 가공지선과 제2종접지(변압기)공사를 공동접지로 할 것인가, 독립접지로 할 것인가는 중요한 논점으로 되어왔다. 우리나라 배전계통은 가공지선과 변압기접지공사를 공용으로 하고 피뢰기는 독립접지하는 것으로 되어 있다. 그러나 공동접지로 할 경우 250이하로 하고 피뢰기접지극과는 1m이상 간격을 두어 상호간섭을 방지하도록 되어 있다<그림 9>.

접지방식에는 다음과 같이 4종류의 형태가 있다.

- ①은 독립접지, ② ③ ④는 공동접지가 된다.
- ① 개개설비를 독립으로 접지
- ② 독립접지된 것을 연결한 것

- ③ 접지를 하나로 공용
- ④ 건축구조체의 철골 및 철근부분에 접지를 연결한 곳

공동접지는 뇌격전류나 접지전류가 흐를 때 저항이 적으므로 전위상승이 적은 장점이 있으나 한쪽에 큰 접지전류로 전위가 상승하면 다른 한쪽의 전위가 동등하게 상승하여 절연의 위협을 주게 된다. 그러나 독립접지는 접지전류의 크기, 대지저항을 및 이격거리에 따라 전위상승치가 달라지므로 허용전위상승치를 고려하여 상호간의 가능성을 방지할 수 있는 간격을 결정할 수가 있다.

공용접지의 이점으로서는

- ① 접지선 수요가 적어 보수점검이 용이하고
- ② 각 접지전극이 병렬이므로 합성저항이 낮아 대전위상승이 낮아지고
- ③ 접지극 하나가 고장이 나면 다른 접지극이 보완시켜주고
- ④ 접지전극 수요가 적어 경제적 시공비가 된다.

그러나 공동접지로서의 문제점은 “전위상승과급의 위험”이다. 이로 인해 독립접지를 주장하는 경우도 많다.

공동접지일 경우 한곳에 뇌격전류가 발생하면 각 접지점을 향해 전류가 흐르면서 각 접지점의 전위가 상승한다. 독립접지이면 자기전극에 그치고 타극에는 파급되지 않는다. 공동접지일 경우는 각 설비에 파급된다. 그러나 접지저항이 아주 적어지면 안전하므로 건물구조체를 접지 전극으로 사용하는 경우가 있다<그림 11>.

그러나 접지전류가 큰 피뢰기나 피뢰침접지는 별도로 하는 것이 상례이다.

그러나 특별히 건물구조체를 이용하여 아주 낮은 접지저항을 취할 수 있을 때에는 공동접지할 수가 있다.

다음 <그림 12> 빌딩에 컴퓨터를 설치한 접지시스템에 대한 실태를 조사한 보고서를 참고로 한 결과를 보인 것이다.

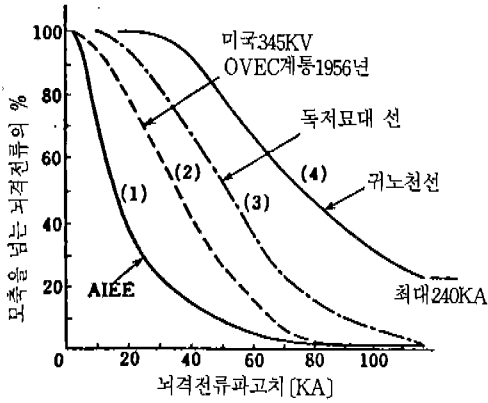
그림에서 전산기 신호용접지를 공용으로 하나나

<표 2> 접지공사의 분류

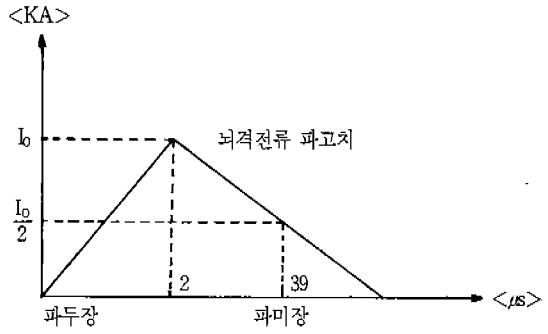
제1종접지공사	특고 및 고압의 금속제 기계기구, 외항 등의 접지
제2종접지공사	특고 및 고압선로와 저압선로를 결합하는 변압기의 중성점 또는 한 단자의 접지
제3종접지공사	300V이하의 저압 금속제기계기구, 외항 등의 접지
특별제3종접지공사	300V초과의 저압의 금속기계기구, 외항 등의 접지

<표 3> 접지저항치

제1종 접지공사 E ₁	10Ω
제2종 접지공사 E ₂	※150/변압기 고압측 1선지락시 전류치 ※고, 저압 혼측으로 저압측 대지전압이 150V를 초과할 경우 1~2초에 고압측 자동차단장치 있으면 300 ※1초이내에 차단장치 있으면 600
제3종 접지공사 E ₃	100Ω, 저압누전차단 0.5초이내면 500Ω
특별제3종접지공사 특E ₃	10Ω, 저압누전차단 0.5초이내면 500Ω



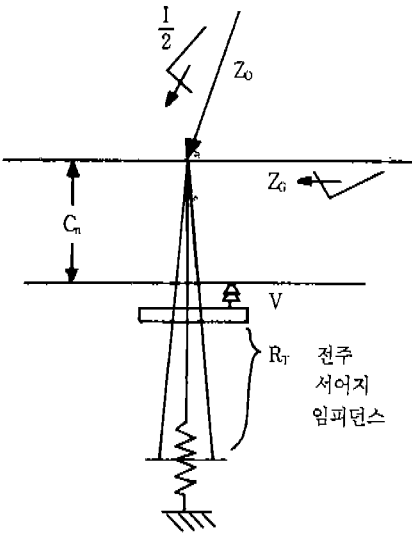
<그림 3> 뇌격전류 파고치 누적 분포 곡선



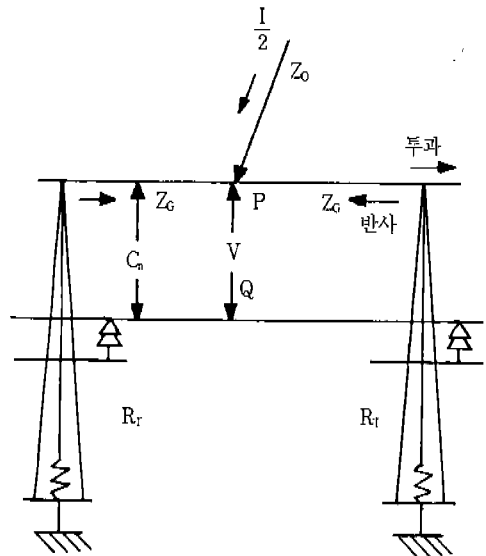
<그림 4> 파형의 파라메타

독립으로 하는가는 중요한 문제이다. 조사된 5개시설 중 2개시설이 독립접지이고 나머지는 공동접지이다. 공동접지와해도, 일반전원설비와 피뢰설비와는 별도

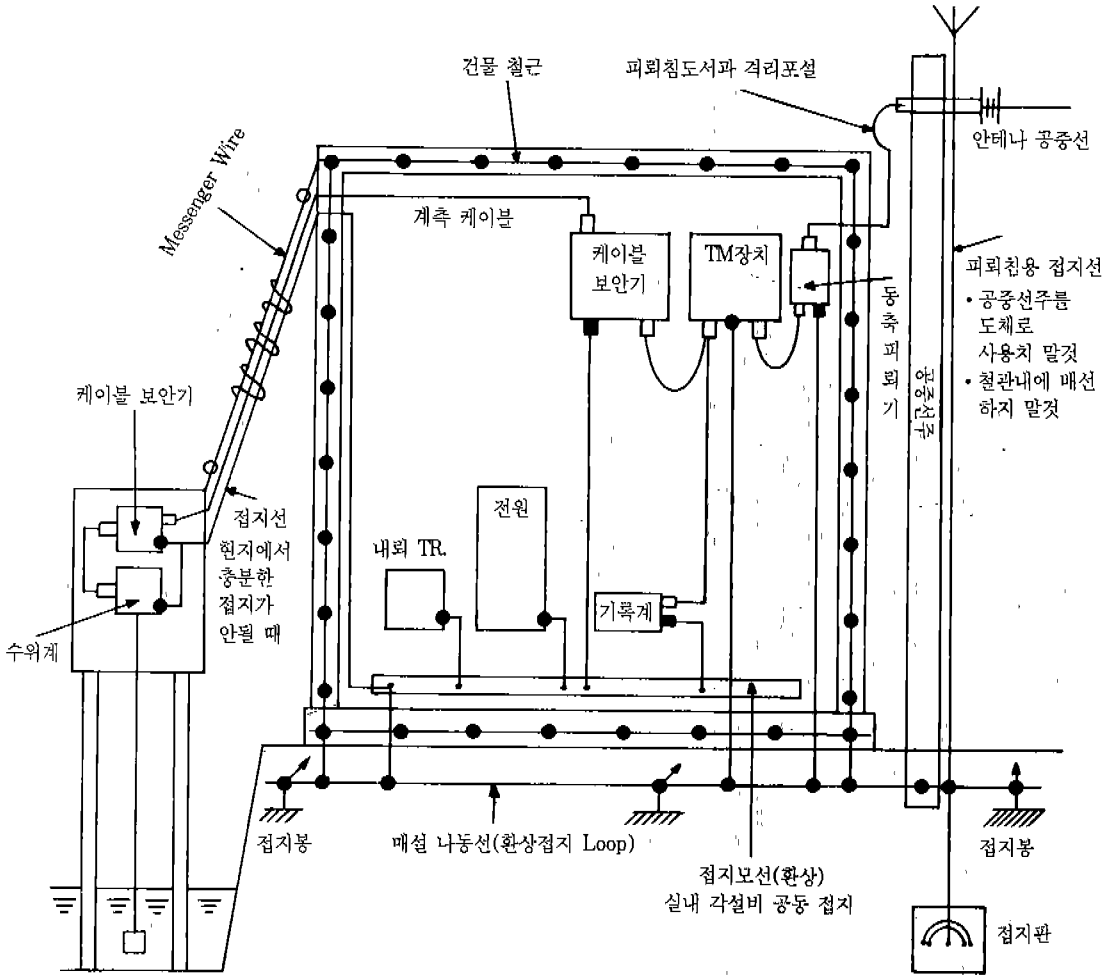
로 시공되어 있다. 그러나 No.5 설비는 컴퓨터 관련 기기와 일반전원설비의 접지를 공동으로 하고 있다. 독립접지를 하는 이유으로써는 타설비로부터 잡음유입



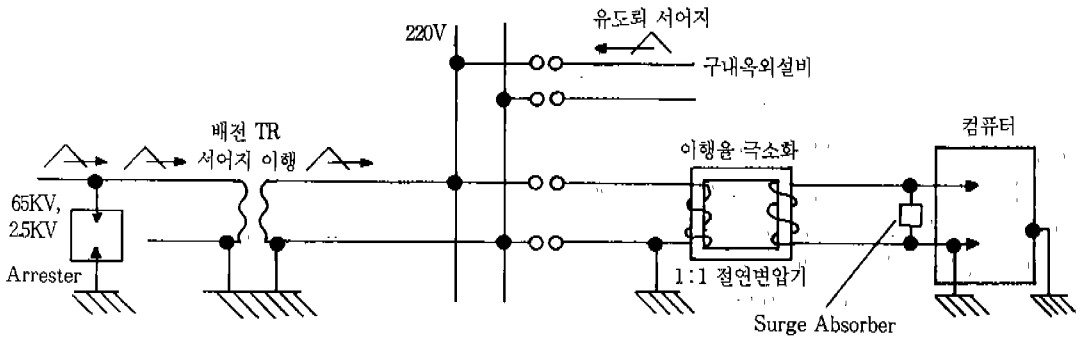
<그림 7> 철탑 뇌격 등가회로



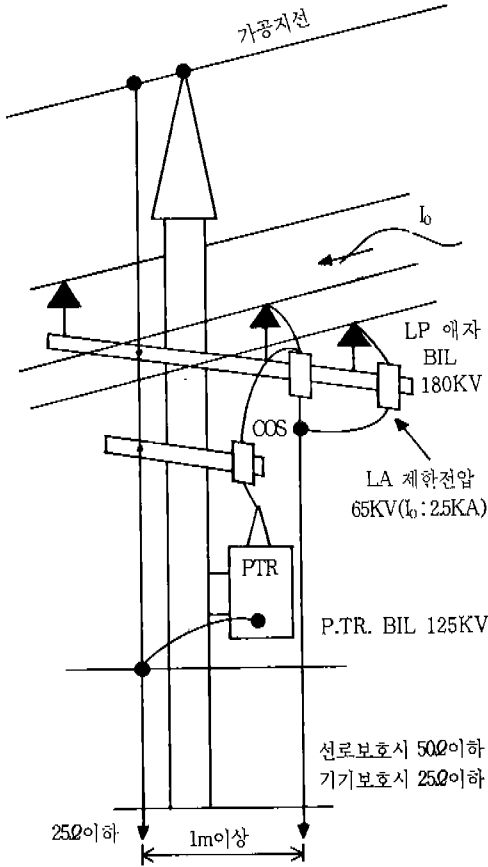
<그림 8> 경간 중앙 뇌격 등가회로



<그림 5> TM(텔레미터)관측소 피뢰 시설에

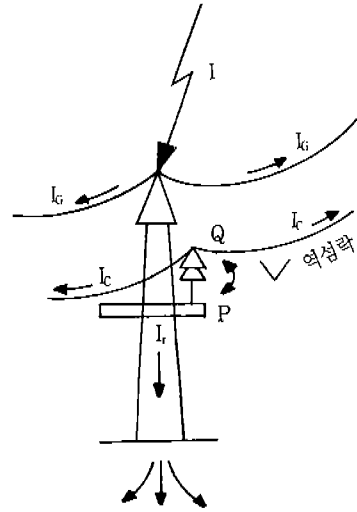


<그림 10> 서어지의 침입 경로

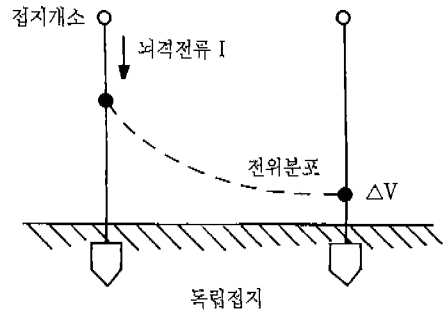


<그림 9>

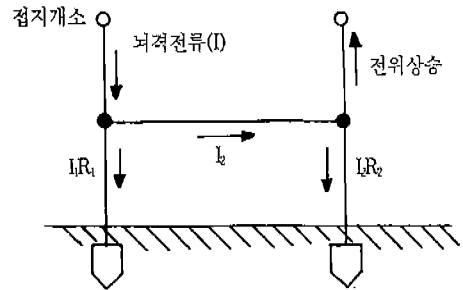
이 방지된다는 것이며 고장발생시 책임소재가 밝혀진다는 것이다. 그러나 No.5의 시설도 공동접지이나 개설이래 고장이 없다. 컴퓨터의 접지를 건물이 완성된 후 시공하려면 시설접지설비를 이용할 수밖에 없으며 이때는 공동접지가 된다. 여기서 주의해야 할 것은 전위변동을 될수록 적게 하기 위해 분기점을 접지극 근처에서 설정하는 것이 최선책이다.



<그림 6> 뇌격 역섬락

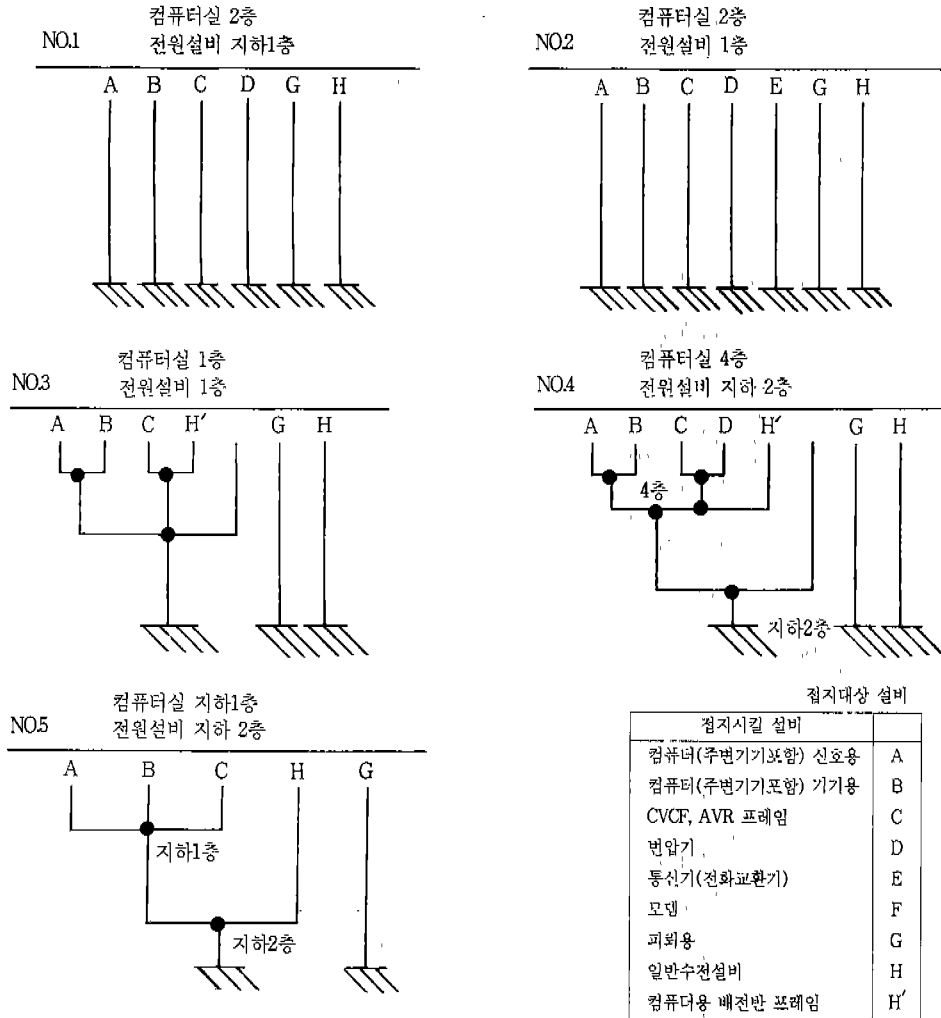


독립접지



공동접지

<그림 11>



<그림 12> 접지시스템의 형태

맺음말

지금까지 뇌운의 발생과 뇌방전현상, 그리고 뇌격 빈도에 대하여 살펴보고 뇌격으로 인하여 발생하는 설비의 파손으로부터 보호하는 내뢰설비와 접지 시공방법에 대하여 개괄적으로 언급하였다. 특히 최근에 사용되는 OA, FA설비와 같은 전자설비에 대하여 건물내 보호방식에 대하여도 사례를 들어 소개하

였다. 그러나 완벽한 내뢰설계에는 막대한 시설비가 소요되므로 설비수준에 알맞은 신뢰도를 확보하면서 보호설비를 해야 한다. 앞으로 이 분야에 대하여는 우리나라의 실정에 알맞도록 뇌격전류 파라미터측정 연구가 이루어져야겠고 설비별로 대책을 강구하려면 EMTP를 이용한 서어지 해석을 통하여 해당 설비별 요구조건에 맞는 보호방식을 적용해야 할 것이다. ©