

# 초고압발생 및 측정

조 연 옥

(한국전기연구소 고전압 연구실장)

## 1. 서 론

초고압 또는 초고전압(Extra High Voltage, EHV)에 대한 정의는 보는관점에 따라서 다르나 일반적으로 300kV에서 765kV사이의 전압을 초고압이라하고 그 이상을 초초고압(Ultra High Voltage, UHV)라고 하는 것이 일반적인 견해이다. 그러나, 일반적으로 EHV 및 UHV에 관련된 기술은 대동소이하므로 본고에서는 EHV 및 UHV를 구분하지 않고 단순히 30만 볼트 이상의 전압을 초고압이라고 하였다.

초고압이 관련된 기술은 전력의 송전 및 배전계통에서 가장 많이 사용되나, 진공 중에서 전자나 중성자와 같은 아원자를 가속시키는 장치에도 응용된다. 후자의 경우 핵반응을 일으키기 위해서는 수 백만 볼트의 전압이 필요하다. 이들 이외에도 초고압은 자연에서 일어나는 뇌격에서도 발생하며 뇌격이 칠 때 선구방전과 대지간 전압은 1억 볼트에 이르기도 한다. 선구방전은 구름 하단에서 대지로 진전하는 방전 채널을 말한다.

초고압에서 가장 중요한 개념은 일반적인 고압기술(High-Voltage Technology)에서와 같이 전기응력(Electrical Stress)과 전기강도(Electrical Strength)이다. 전기응력은 절연체에 놓여진 단위 전하량에 가해지는 힘으로 정의 되는 데, 이와같이 정의하는 이유는 힘이 하전입자에 가해지면 입자는 운동에너지를 얻어서 가속되어 절연체를 도전시키기 때문이다. 두점 사이의 전압이라 함은 단위 전하를 움직이는 데 사용되는 일이므로

전기응력은 전압경사(전위경도)와 같다고 할 수 있다. 절연체의 전기강도는 그 재료가 견딜수 있는 최대 전기응력으로 정의되나 전기강도의 수량적인 정의는 절연체의 전기강도가 압력, 온도, 전극재료, 전계구조, 전압파형 등에 따라서 크게 영향을 받으므로 매우 복잡하다. 초고전압 계통의 초고압기술은, 그러므로, 그 계통의 전기응력을 파악하고 그 응력 하에서 전기절연체가 견딜수 있는지를 확인하는 것이라 하겠다.

본고에서는 초고압기술 중 전기응력에 대해서 주로 논하고자 한다. 앞에서도 언급한 바와 같이 절연체의 전기강도는 여러가지의 환경적인 요소들에 따라서 크게 영향을 받으므로 절연체의 전기강도를 수량적으로 정의하기 위해서는 요소들의 영향을 충분히 알아야 할 것이다. 이들 요소 중 전기응력에 관련된 것들은 전압의 크기 및 파형이므로 초고압계통에서 사용되는 절연체가 그 초고압에 잘 견딜 수 있는 지를 알기 위해서는 그 초고압계통에서 일어날 수 있는 여러가지 형태의 초고압으로 그 계통의 절연체에 인가하여 그 절연체가 견딜 수 있는 지를 확인해야 할 것이다. 그러므로 전기응력에 관한 한 초고압에서 중요한 문제는, 초고압계통에서 일어날 수 있는 파형을 해석하고, 그 파형을 어떻게 실험실에서 모의하여 발생하고, 발생된 전압을 정확하게 측정하는 기술이라 하겠다.

이러한 관점에서 본고에서는 현재 전력계통 분야의 세계각국의 초고압연구를 간략하게 소개한 후 초고압 발생 및 측정에 대해서 논하고자 한다.

표 1. 대표적인 초고압 시험장치 및 연구

국명	기관	고전압 시험장치	연구내용
소련	동력전화성	1200kV 시험송전선 T.T: 900~1200kV	· 1200kV급 송전연구
	직류공학연구소	T.T: 500kV, 1000kV, 1500kV 직류전원: 1200kV, 300mA I.G*: 4300kV, 300kJ	· UHV 직류송전연구 · 초고압 관련연구
영국	CERL	T.T: 1550kV I.G: 5200kV, 390kJ	· UHV 송전연구 · 초고압 관련연구
프랑스	EDF	T.T: 550kV 756kVA I.G: 6000kV, 450kV 4000kV, 300kJ	· 송전선 장애대책 및 오존시험 · 초고압 관련 연구
이태리	ENEL	T.T: 800kV, 20MVA I.G: 6000kV, 500kJ	· 1000kV급 송전연구 · 750kV급 케이블 장기시험 · 초고압 관련연구
스웨덴	Chalmers 대학연구소	T.T: 750kV, 750kVA I.G: 2400kV 직류전원: 800kV, 20mA	· 초고압 절연설계 · 초고압 관련연구
캐나다	IREQ	직류전원: 1200kV, 125mA I.G: 6400kV, 400kJ 3200kV, 200kJ T.T: 550kV, 6대	· UHV 송전연구 · 오존대책연구 · 장애대책연구 · 초고압 관련연구
미국	AEP	1500kV 시험송전선 T.T: 2250kV 직류전원: 550kV, 1.5A	· UHV 환경대책연구 · UHV 기기절연연구 · UHV 송전연구
	BPA	I.G: 2400kV, 57kJ 5600kV, 448kJ	· 코로나 대책연구
	G.E	T.T: 1500kV, 33MVA	· UHV 송전연구 · 코로나 대책연구
	WESTINGHOUSE	케이블 시험장: 1200kV Yonker LAB: T.T: 1500kV I.G: 4600kV, 345kJ	· 케이블 장기시험 · 전력기기 수명연구 · 초고압 관련연구
일본	도시바	T.T: 2300kV I.G: 6000kV 직류전원: 2000kV	· 초고압기기 개발연구 · 초고압기기 수명연구
	히다치	T.T: 2200kV I.G: 6000kV 직류전원: 1000kV	
	CRIEPI	I.G: 12,000kV 1000kV 시험송전선로 극저온 케이블시험장 UHV 염진해 시험장	· 초고압 관련연구 · 핵융합 관련연구
한국	한국전기연구소	T.T: 1100kV I.G: 4000kV	· 초고압 관련연구

註) \*T.T: 시험용 변압기 \*\*I.G: 충격 발생기

## 2. 초고압 연구설비 및 관련연구

일본을 비롯한 구미 각국의 전력수송에 관련된 UHV 시험설비 및 연구분야는 표.1과 같다.

## 3. 초고압 발생장치

초고압계통에서 일어날 수 있는 전압은 파형별로 분류하면 수 없이 많다. 그러므로, 초고압계통에서 사용되는 설비가 초고압 응력을 전달 수 있는지를 확인하기 위해서는 모든 전압파형으로 설비를 시험해야 할 것이다. 그러나, 계통에서 일어날 수 있는 모든 파형을 실험실에서 정확하게 모의하는 것은 실제적으로 불가능하므로, 계통의 전압파형을 직류전압, 교류전압, 개폐전압 및 뇌전압으로 대별하는 것이 일반적인 관례이며, 이들 전압파형을 IEC 및 ANSI 등의<sup>1) 2)</sup> 국제규격은 규정하고 있다.

### 3. 1. 직류전압 발생장치

고전압기술에서 직류전압은 주로 과학적 연구사업이나 고전압 직류 송전계통에 관련된 기기를 시험하는 데 사용되고 있다. 또 다른 중요한 적용분야는 장거리 고전압 교류 케이블의 내전압시험에 사용되는 데, 이는 교류전압으로 시험할 경우 케이블의 큰 커패시턴스 때문에 큰 전류가 흐르기 때문이다.

또한 고압직류전압은 가속기, 전자현미경등과 같은 물리학 분야에서, x-ray 와 같은 의학분야에서, 집진장치와 같은 산업분야에서 더욱 많이 사용되고 있다. 그러나, 초고압 직류전압은 직류송전계통 및 가속기등에 한정되어 사용되고 있다. IEC 규격 60-2<sup>3)</sup>이나 IEEE 표준규격 4-198<sup>2)</sup>에 의하면 직류전압은 산술평균치로 정의되는 데 파형의 내형율을 5%로 제한하고 있다.

직류전압은 일반적으로 교류전압을 정류하거나, 정전발전(Electrostatic Generation)에 의해 얻는다. 교류전압을 직류로 정류하는 경우 가장 단순한 그림 1과 같은 단상반파 정류회로이다.

반파 정류회로는 백만 볼트 급까지의 전압발생에도 사용되며, 가장 큰 직류전압 발생기는 Prindtz<sup>3)</sup> 의해 설계되었다. 그는 1.2MV 직렬변압기와 역전압이 3.4MV 인 직·병렬 60mA Se 다이오드를 사용하였다.

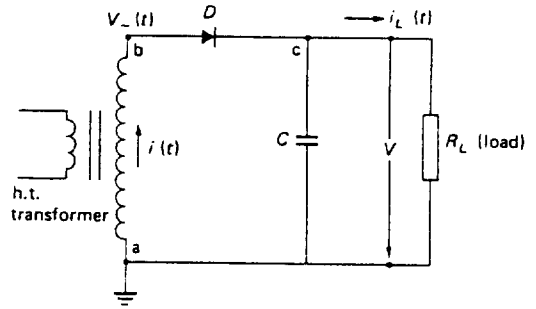


그림 1. 단상반파 정류회로

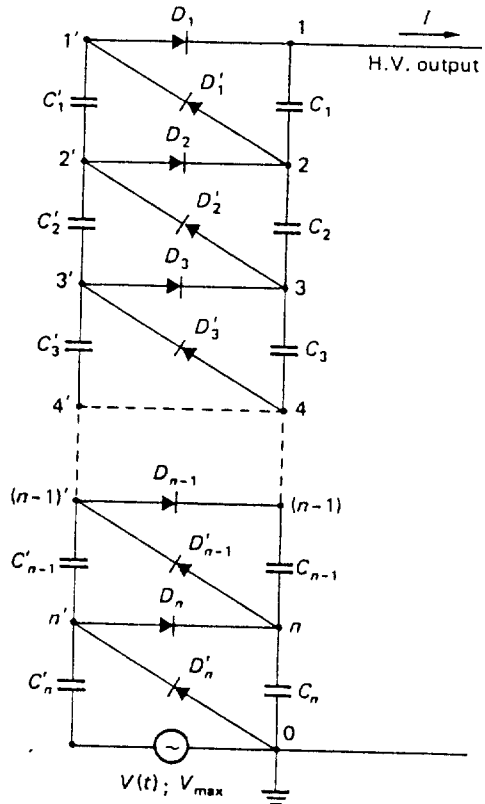


그림 2. 다단식 충전발생기 회로

초고압 직류전압을 얻기 위해서 반파 정류회로를 사용하는 경우 발생장치의 크기가 대단히 커야 하는 단점 이외에도 변압기의 포화가 문제가 된다. 그러므로, 초고압 직류전압 발생장치는 일반적으로 단상 전파 정류회로를 채택하고 있다. 그러나 정류에 의해 초고압 직류전압을 얻는 데 가장 많이 사용되는 방법은 그림 2와 같이 다단식 직렬회로이다. 이 회로의 장점은 각 단의 회로소자, 즉, 정류기 및 커패시터가 전체 발생전압의 일

### 3. 2. 교류전압 발생장치

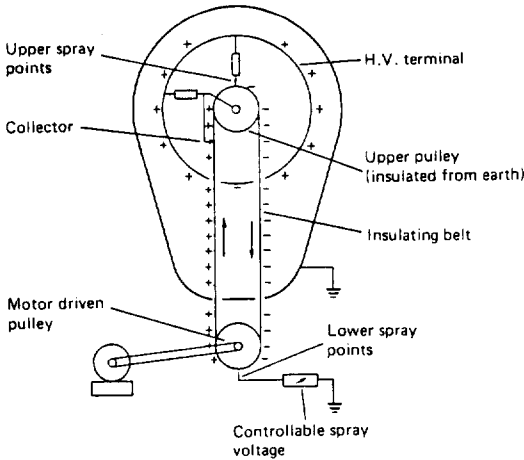


그림 3. 정전발생기 다이어그램

부분 만을 건디면 충분하므로 매우 높은 전압까지 발생 가능하다는 데 있다. 이 회로로 발생 가능한 전압은 2MV 이상이며 전류용량도 100mA 에 이를 수 있다.

정전발생기는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 직접 변환하는 장치이다. 그러나, 정전발생기에서는 전자력에 의한 변환과 달리 하전입자가 전계와 반대 방향으로 움직여 높은 전압을 얻는다.

정전발생기의 원리는 그림 3을 보면 쉽게 이해할 수 있다. 하전입자를 하부 코로나 방전침에 의해 절연벨트로 분사시키면 이들 하전입자는 벨트에 의해 상부로 이동되고 상부 끝에 왔을 때 상부의 방전침에 의해 하전입자가 고전압전극으로 방전되어 고전압전극에 하전입자가 충전되게 된다. 고압전극의 전압은  $V=Q/C$  ( $Q$ 는 충전전하,  $C$ 는 전극의 대지간 커패시턴스) 이므로 고압전극의 전압 상승률은  $dv/dt=I/C$  와 같다. 여기에서  $I=Sbv$  ( $S$ 는 전하밀도,  $b$ 는 벨트넓이,  $v$ 는 벨트속도)이다. 실제로  $dv/dt$ 는 1MV/sec에 이를 수 있으며 누설전류가 없으면 무한대 전압에 이르나, 충전전류가 방전전류와 같은 전압에서 평형을 이룬다.

정전발생기의 주요장점은 매우 높은 직류전압을 쉽게 얻을 수 있고 파형의 왜형이 매우 적다는 데 있으나, 출력전류가 매우 적으며 발생기의 기계적 부분의 잦은 보수가 필요한 단점이 있다. 현재 가장 큰 정전발생기는 Oak Ridge 국립연구소의 중이온 가속기에<sup>4)</sup> 사용된 것으로서 25MV의 직류전압을 발생시킬 수가 있다.

송·배전계통에서는 교류전압을 대부분 사용하므로 초고압기기에 대한 가장 보편적인 시험전압은 교류전압이며 전기절연 계통에 관련된 대부분의 연구도 이 교류전압으로 수행된다. 그러므로, 대부분의 고전압 실험실은 공통적으로 고전압 교류전원을 가지고 있으며 2MV 이상의 교류전원을 가진 실험실도 많다.

일반적으로, 모든 교류전압시험은 시료의 운전주파수에서 수행하나, 철심을 가진 권선시험에는 철심의 포화를 피하기 위해서 전압주파수가 시료의 주파수 보다 높은 것을 사용한다. 전압파형은 정현파에 가까워야 하며 규격에<sup>1) 2)</sup> 의해서 파고치와 rms 치의 비가 5% 범위에서  $\sqrt{2}$ 이어야 한다고 규정되어 있다.

교류전압은 상용주파수 시험용 변압기로 발생하며 초고압 이상의 전압은 그림4. 와 같은 직렬변압기 회로로 발생한다. 그 이외에도 시료의 커패시턴스가 클 때는 그림 5와 같은 변압기와 리액터로 이루어진 직렬 공진회로를 사용하기도 한다.

직렬 공진회로를 사용할 경우

- 1). 전압파형의 개선,
- 2). 전원전력이 주 시험회로에서 사용되는 전력보다 매우 낮으며(약 5% 정도),
- 3). 시료에 고장이 발생할 때 부하 커패시턴스만이 방전하므로 큰 아-크가 발생하지 않는 장점이 있다.

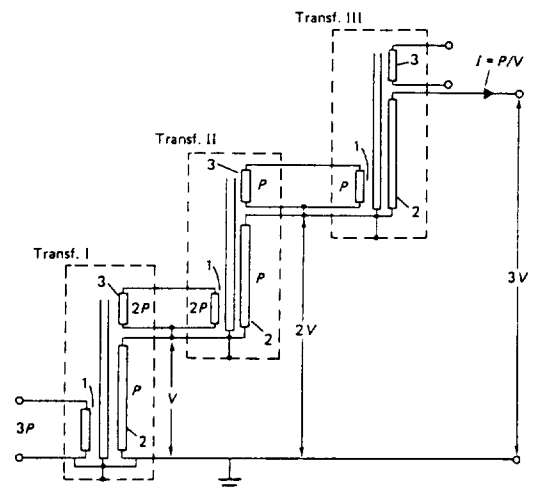


그림 4. 직렬연결 시험용 변압기의 기본회로

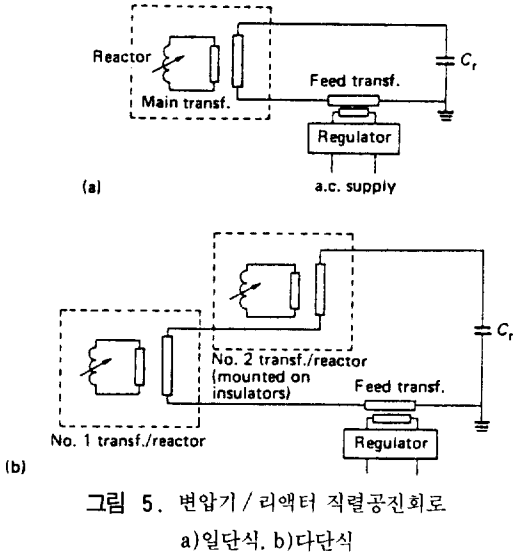


그림 5. 변압기 / 리액터 직렬공진회로  
a) 일단식, b) 다단식

### 3. 3. 충격전압 발생장치

초고압계통에서 일어나는 과도전압은 뇌충격전압과 개폐충격전압으로 대별할 수 있다. 뇌충격전압은 뇌격이 초고압계통으로 침입하였을 때 발생하는 것으로서 뇌격이 초고압계통으로 유입할 때 100kA/μs 정도의 상승률을 가진 뇌격전류가 계통으로 흘러 들어와 계통에 높은 전압을 유기한다. 유기된 전압은 1μs 정도의 파두장과 수 십μs 정도의 파미장을 갖는 매우 과도적인 파형이다.

개폐충격전압은 초고압계통내의 설비의 개폐(Switching)에 의해 발생하는 전압으로서 개폐충격전압의 크기는 계통의 정격전압과 항상 관련이 있으며, 파형은 개폐조건 및 계통 임피던스와 관계가 있다. 전압상승률은 일반적으로 뇌충격전압보다는 매우 느리나(수 백배), 초고압계통에서는 개폐충격전압이 계통의 전기강도에 큰 영향을 미치는 것으로 최근에 보고되고 있다.

충격전압 파형은 실제 매우 다양하나, 시험목적상 비교적 단순한 2중 지수함수 형태의 파형으로 모의된다. EC 규격<sup>1)</sup>등에서 규정한 파형은 그림 6과 같다. 규격에서는 충격전압의 파두장이  $T_1$ 이고 파미장이  $T_2$ 일 때  $T_1/T_2$  충격파라고 하는 데 뇌충격전압의 표준파형은 1.2/50μs 이고 개폐충격전압의 표준파형은 250/2500μs 이다. 그러나 개폐충격전압인 경우 표준파형이 시험목적에 적합하지 않을 때 100/2500μs 및 500/2500μs 파

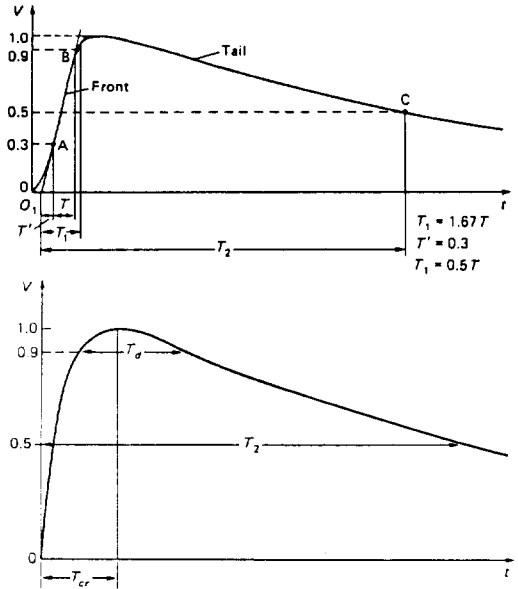


그림 6. 충격파형의 일반적인 파형 및 정의

- a) 뇌충격파형  $T_1$ : 파두장  $T_2$ : 파미장
- b) 개폐충격파형  $T_{cr}$ : 파두장  $T_2$ : 파미장

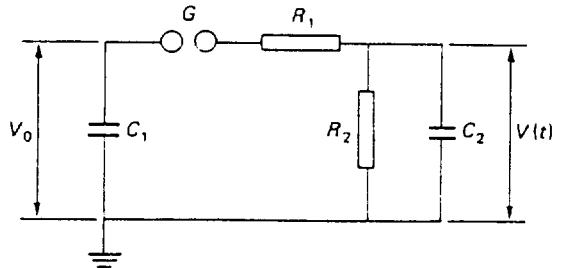


그림 7. 일단 충격발생기 회로.

형을 추천하며 이격거리가 큰 공기절연의 전기강도 시험에서는 파두장이 100에서 1000μs 범위의 파형을 사용하기로 한다.

1단 충격발생기의 기본회로는 그림 7과 같다. 커패시터  $C_1$ 를 직류전원으로 서서히 충전하여 방전갭  $G_1$ 을 방전시키면 파두저항  $R_1$ , 방전저항  $R_2$ , 부하 커패시턴스  $C_2$ 를 통해서 충전전압이 방전되어 이중 지수함수 형태의 전압  $vt$ 를 얻을 수 있다. 일단식 발생기는 수 kV에서 수 MV까지의 전압발생에 사용될 수 있으나 경제적인 충전전압  $V_0$ 는 200kV에서 250kV이므로 수 MV의 전압을 얻기 위해서는 그림 8과 같은 다단식 충격발생회로를 사용한다. 또한 그림 7 및 8와 같은

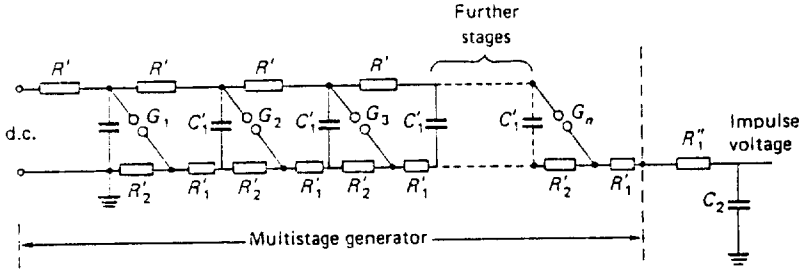


그림 8. 다단식 충격발생기 회로.

회로외에 변압기를 여자시켜 개폐충격전압을 얻는 방법도 있다.<sup>5)</sup>

#### 4. 초고압 측정

초고압을 측정하는 데는 보통 전기계측기술 분야의 전문가에게도 익숙하지 않은 여러가지 문제를 포함하고 있다. 이러한 문제들은 전압이 증가함에 따라서 복잡하여지며 수 MV의 전압을 측정하는 경우에는 문제가 한층 어려워진다. 초고압 측정에 따르는 어려운 문제들은 측정회로의 전계를 제어하여 섬락을 피하기 위해서 측정회로의 크기가 매우 커지는 데 기인한다.

실험실에 사용하는 초고압측정법은 크게 방전갭에 의한 전압측정과 분압기에 의한 전압측정으로 분류할 수 있으나, 방전갭에 의한 전압측정법은 정도가 떨어져 전압 보정용으로 일반적으로 사용되므로 분압기에 의한 전압측정이 초고압측정에 대부분 사용됨을 알 수 있다.

##### 4. 1. 방전갭에 의한 전압파고치 측정

방전갭은 그림 9와 같이 동일 직경의 두 개의 구로써 이루어지며 최대 구간 이격거리는 구 직경에 따라서 제한을 받으며 직·교류 및 충격전압의 파고치를 측정할 수가 있다. 구간 이격거리를 제한함으로써 매우 균일한 전계를 얻어서 불꽃방전이 일어나기 전에는 코로나가 일어나지 않아서 불꽃방전의 시간지연이 매우 짧다.

대부분의 표준규격은 구 갭의 반경 D와 전구 간 이격거리 S에 따른 방전전압을 제시하고 있다. 그러므로, 미지의 전압을 구 갭을 이용하여 측정하고자 할 때는 구 갭에 미지의 전압을 인가하고 구 갭이 방전할 때 까지 S를 조정하여 방전이 일어날 때의 S를 구하면 표준규격의 구 갭의 방전전압표로부터 미지의 전압의 파

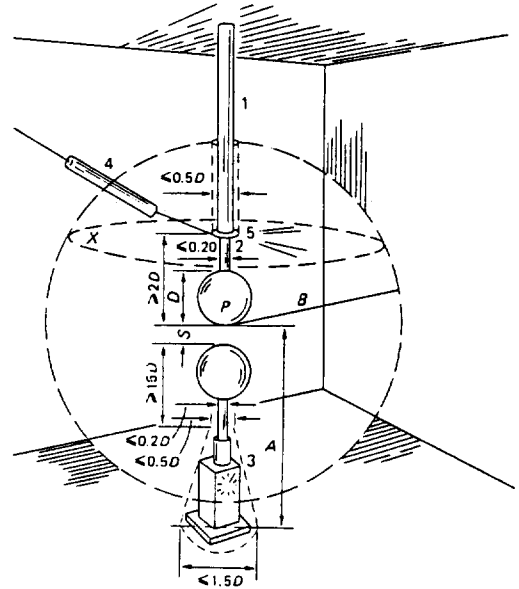


그림 9. 수직형 구 방전갭

고치를 알 수 있다.

표준규격이 추천한 구조를 가진 방전갭을 사용하였을 때 직류전압을 제외하고는 측정오차는  $\pm 3\%$  이내이나, 직류전압의 경우 공기 내의 먼지 등에 의해 많은 오차를 가져와  $\pm 5\%$  범위의 측정오차를 가져온다. 이러한 측정오차 때문에 방전갭은 전압측정용으로 보다는 한정된 측정오차 범위 내에서 측정회로의 전압보정용으로만 사용되나, 측정이 매우 간단하고 신뢰성이 높기 때문에 대부분의 고전압 실험실에서 널리 이용되고 있다.

##### 4. 2. 분압기를 이용한 전압측정

<기본회로>

분압기를 이용한 전압측정을 위한 기본적인 측정회로

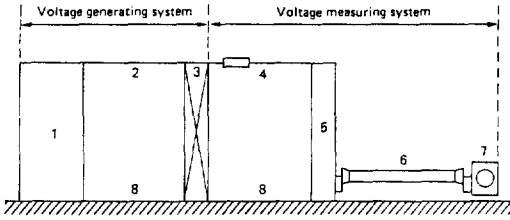


그림 10. 기본적인 전압 시험회로.

1. 전압발생장치 2. 시료에 연결되는 리드선
3. 시료 4. 분압기에 연결되는 리드선 5. 분압기
6. 측정케이블 7. 계측기 8. 대지극로

는 그림10과 같다. 기본적인 고전압시험계통은 전압 발생계통과 전압 측정계통으로 이루어져 있으며 전압 발생기 1, 전압발생기와 시료를 잇는 리드선 2 및 시료 3이 전압 발생계통을 이룬다. 측정계통은 시료의 단자에서 출발하여 분압기 5에 연결되는 리드선 4와 이차 측정계기 7 및 그것에 연결된 측정케이블 6으로 이루어져 있다.

이 구조는 변경될 수 있으나 변경하는 경우 충분히 합리적인 이유가 있어야 한다. 예를들어서, 직류전압 측정일 경우 분압기는, 리드선 2의 전압강하가 무시될 정도이면, 전원장치에 같이 포함시킬 수 있다. 충격전압 측정에는 파형 조정용 부하 커패시턴스를 분압기와 병렬로 연결하여 사용할 수도 있다.

충격전압을 측정하는 경우 분압기 5를 그림과 같이 전압발생장치로부터 멀리 떨어 뜨려야 하는 데, 그 이유는

1) 분압기가 전압발생계통 내에 있으면, 시료에 방전이 일어날 때, 리드선 2의 매우 진동이 심한 전압강하가 분압기에 나타나 분압기의 측정오차가 커지며,

2) 전원장치의 전계로부터 분압기를 적절하게 차폐하기 위해서이다.

이차 측정계통과 고전압 시험지역과의 강한 전자적인 상호작용을 피하기 위해서 측정케이블을 적합하게 선택할 필요가 있으며 케이블은 차폐선이어야 한다. 물론 측정하고자 하는 파형을 정확하게 측정하기 위해서는 분압기, 측정케이블 및 2차 측정장치를 포함한 전압 측정계통의 주파수대역이 측정하고자 하는 파형의 주파수 보다 높아야 한다. 예를 들어서 파두장이  $1.2\mu s$  인 충격파형을 측정하고자 하는 경우, 그 충격파형의 주파수 스펙트럼이 약 1MHz 범위까지 존재하므로 측정계통의 주파수대역은 1MHz 이상이어야 한다.

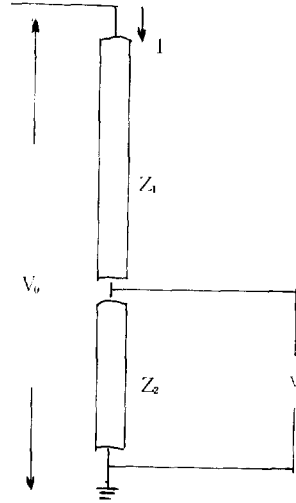


그림 11. 분압기의 기본회로

### 4. 3 분압기

직류, 교류, 또는 충격전압용 분압기는 저항, 커패시터, 또는 이들의 직병렬 회로로 구성된다. 분압기의 대표적인 접속방법은 그림11과 같다.

전압계 V의 내부 임피던스가  $Z_2$ 에 비해서 충분히 크면,

$$V_0 = (Z_1 + Z_2)I = Z_2I(1 + Z_1/Z_2) = V(1 + Z_1/Z_2) \quad (1)$$

이므로,  $Z_2$  양단 간의 전압 V를 측정하면  $V_0$ 를 알 수 있다.

분압기의 임피던스 요소는 원통형태의 절연통 내에 일반적으로 설치되는 데 분압기의 높이는 섬락전압에 따라 다르며 1MV의 충격전압 측정시 분압기의 높이는 약 2.5m 정도이어야 하고 1MV의 교류전압을 측정하기 위해서는 높이가 5m 이상이어야 한다. 이와같이 초고압을 측정하기 위한 분압기는 구조적으로 거대하기 때문에

1) 임피던스를 직렬로 연결할 경우전압을 균일하게 분포시키기가 어렵고,

2) 임피던스와 대지 간에 스트레이 커패시턴스가 존재하여 분압원리에 의한 정확한 전압측정에 많은 문제점이 있다. 스트레이 커패시턴스는 보통 일정하지 않기 때문에  $V_0$ 가 식 (1)과 같이 단순하게 측정되지 않는다.

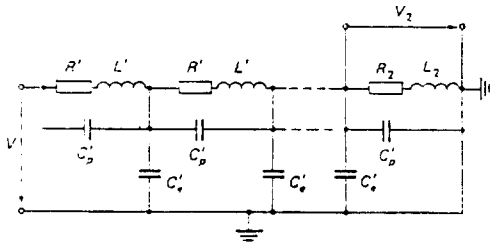


그림 12. 저항분압기의 등가회로

그러므로 초고압 분압기의 주파수 응답특성을 정확하게 해석하기 위해서는 임피던스를 분포회로정수로 모의해야 한다. 분포회로정수로 모의한 저항 분압기는 그림12와 같다. 그림에서  $L'$  및  $C_p'$ 은 실제 저항  $R'$ 에 존재하는 인덕턴스 및 커패시턴스 성분이며  $C_e'$ 은 저항  $R'$ 과 대지 간 사이의 스트레이 커패시턴스이다.

## 5. 결 론

본고에서는 초고압계통에서 문제가 되는 전기스트레스와 전기장도를 살펴 본 후 전기스트레스와 관련하여

초고압 발생장치와 초고압 측정법을 설명하였다. 초고압 측정은 전기계측에 경험이 많은 전문가도 익숙하지 않은 분야로서 정밀한 측정을 위해서는 초고압 측정회로의 주파수 응답특성을 면밀하게 검토하여야 하며 측정기들의 위치도 전원으로 부터의 전자석coupling 을 고려하여 선택해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 1) IEC Publication 60-2(1973). High Voltage Techniques.
- 2) IEEE sta4-1978. IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.
- 3) H.Printz, Feuer, Blitz und Funke. F.Bruckmann-Verlag, Munich, 1965.
- 4) Holifield Heavy Ion Research Facility. Pamplet of Oak Ridge National Laboratory.
- 5) 조연옥 외, "고전압에 대한 공기절연특성연구" 과학기술처 보고서, 1987.