

전력기기 내부의 부분방전 측정시 방전형태의 분석에 대해서

조 연 옥* · 김 광 화**

*한국전기연구소 고전압연구실장

**한국전기연구소 고전압연구실 연구원

차 례

- I. 서 론
- II. 부분방전 등가회로
- III. 부분방전의 측정
- IV. 부분방전 형태분석
 - 4.1 일반사항
 - 4.2 부분방전진단
 - 4.3 잡음진단
- V. 전력기기의 허용 부분방전의 크기
- VI. 결 론

I. 서 론

최근의 전력기기는 대용량의 전력공급을 위해서 초고압화 되는 경향이고 또한 경제적 이유때문에 소형화 추세에 있으며, 보다 높은 신뢰성을 요구하고 있다. 이에 따라 전력기기의 절연열화에 대한 과제는 대단히 중요한 문제로 대두되고 있다.

기기 내부에서 발생하는 부분방전이 전력기기의 절연수명에 크게 영향을 미친다는 사실은 오랫동안 인정되어 왔으며 기기의 장기적 절연 신뢰도를 향상시키기 위해서 부분방전 발생을 가급적 억제하여 왔다.

부분방전이라 함은 절연체 내부 또는 근처의 가스 공간에서 가스의 절연강도보다 인가된 전계강도가 높을때 발생하는 지속시간이 매우 짧은 국부적인 가스방전을 말한다. 그러므로 부분방전은 절연체 일부분에 제한되어 있으며 부분적으로 전극간을 잇는다.

절연체 내부의 가스공극에서 부분방전이 일어나면 가스방전에 의해 발생하는 오존, 산화질소, 불안정한 여자 및 전리된 이온이 형성되어 공극 주변의 절연체에 화학반응을 일으켜 절연체가 열화된다고 믿어지고 있으며, 이러한 이유때문에 부분방전과 절연수명은 깊은 상관관계가 있다고 인정되어 왔다.

그러므로 전력기기의 신뢰도를 높이기 위해서는 절연체 내부에서 부분방전이 발생하는 것을 가급적 억제해야 하며 부분방전이 발생하더라도 전력기기의 운전상 지장이 없는 허용 부분방전의 크기를 결정하는 것은 대단히 중요한 문제라 하겠다.

일반적으로 부분방전이 아무리 적게 발생하더라도 전력기기가 완전히 안전하다고는 할 수 없으나 많은 운전경험에 의하면 부분방전이 어느 정도 일어나더라도 기기가 안전하게 운전되고 있으므로 사용상 지장이 없는 허용 부분방전량을 결정하기 위해서는 많은 운전경험에 의존하는 것이 타당함을 알 수 있다. 예를 들어 케이블이나 커패시터 경우처럼 절연에 높은 전계가 걸리도록 설계된 기기의 경우에는 부분방전을 가급적 억제하는 추세이므로 기기의 품질을 보증하기 위해서는 매우 적은 부분방전의 크기를 측정하는 것이 중요하다. 그러

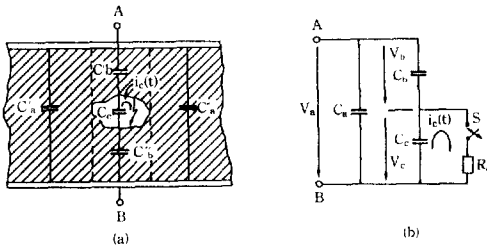
나 변압기나 회전기 같이 운전중에 부분방전이 일어나는 것을 어느 정도 인정하는 경우에는 매우 적은 량의 부분방전을 측정하는 것이 극단적으로 중요하지 않다.

이상에서 전력기기 내부에서 발생하는 부분방전은 전력기기의 절연에 크게 영향을 미치므로 전력기기의 품질 보증을 위해서 허용 부분방전의 크기를 결정하는 것과 정확하게 측정하는 문제가 매우 중요함을 설명하였다. 이와 관련하여, 본고에서는 절연체 내부에서 일어나는 부분방전에 대해서 간략하게 검토한 후, 부분방전의 측정 및 대표적인 전력기기의 부분방전 허용치에 대해서 논하고자 하였다. 특히, 부분방전의 측정 부분에서는 부분방전 측정기의 오실로스코프 상에 나타난 펄스 파형 해석에 중점을 두어, 기기 외부에서 발생하는 잡음에 의한 오실로스코프 상의 펄스 파형을 구분하게 함으로써 정확한 부분방전의 측정에 도움을 주고자 하였다.

II. 부분방전 등가회로

밀폐된 기기 내부에서 발생하는 부분방전은 기기의 외부의 전압인가단자에서 측정할 수 밖에 없다. 그림 1-(a)는 두개의 전극사이에 고체 또는 액체 절연체와 절연체 내부의 가스공극을 보여주고 있다. 그림 1-(a)에서 C_c 는 공극의 커패시턴스, C'_b 및 C''_b 는 공극과 직렬로 놓인 절연체의 커패시턴스, C'_a 및 C''_a 는 공극이 없는 부위의 절연체의 커패시턴스를 나타낸다.

일반적으로 공극내의 가스의 유전율이 절연체의 유전율보다 적으므로 인가전압을 증가시키면 공극내에서 가스방전이 일어난다. 교류전압 인가시에는 전압이 정극



$$C_a = C'_a + C''_a$$

$$C_b = C'_b + C''_b$$

$$C_a \gg C_c \gg C_b$$

그림1. 부분방전의 등가회로

성 또는 부극성 파괴치에 이르기 전에 가스방전이 발생하여 공극 커패시턴스 C_c 를 방전시킨다. 부분방전이 일어날 때 흐르는 방전전류 $i_c(t)$ 는 임펄스 함수와 같은 ns 범위의 매우 짧은 파형을 가진 펄스이다.

그림 1-(b)는 그림 1-(a)의 등가회로로서, 스위치 S는 가스공극 커패시턴스 C_c 사이의 전압 V_c 로 제어되며 방전시 S는 매우 짧은 시간동안 닫히며 그동안 $i_c(t)$ 가 흐른다. 시료가 V_a 로 충전되어 있고 전원을 시료에서부터 분리하면 S를 닫을때 전류 $i_c(t)$ 는 $\delta q_c = C_c \delta V_c$ 를 C_c 로 부터 방출한다. 방전이 개시되기 전후의 전하량을 비교하여 단자 A, B사이의 전압강하 δV_a 를 구하면 아래와 같다.

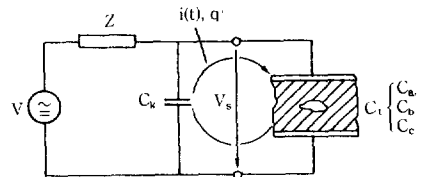
$$\delta V_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \delta V_c \quad (1)$$

이 전압강하 δV_a 로 부터 δV_a 로 부터 전하량 δq_c 를 측정할 수 없으나, 전압강하 δV_a 는 식(1)로부터 $C_b \delta V_c$ 에 비례하고 C_b 는 공극의 반경에 따라 증가하기 때문에 전압강하 δV_a 는 전하량 δq_c 에 비례함을 알 수 있다.

그러므로, 부분방전 량은 시료 단·자간 전압강화를 측정함으로써 간접적으로 알 수 있다. 그러나, C_a 가 C_b 보다는 대단히 크기 때문에(10^3 이상) 전압강하가 대단히 적어서(식(1) 참조) 측정하기가 매우 어렵다. 다음 장에서는 이러한 점을 고려하여 부분방전 측정에 대해서 논하겠다.

III. 부분방전의 측정

그림2는 부분방전의 측정회로를 보여 주고 있다. 커패시턴스 C_k 는 부분방전이 일어날때 부분방전 전하량 δq_c 를 저장하는 결합 커패시터이며, 임피던스 Z는 전압원과 C_k 및 시료사이의 인가선로 임피던스이거나 필터



$$C_t \cong C_a + C_b$$

그림2. 부분방전의 시험회로

이며, 부분방전이 시료에서 일어날 때 부분방전 펄스를 전압원쪽으로 흐르는 것을 억제하는 역할을 한다.

시료 커패시턴스 C_t 사이의 전압강하 δV_C 를 상쇄시키기 위해서 C_t 와 C_k 사이에서 전류 $i(t)$ 가 흐르며 C_k 가 C_t 보다 매우 크면 전하이동 q 는 아래와 같다.

$$q = \int i(t)dt = (C_a + C_b)\delta V_a = C_b\delta V_C \quad (2)$$

식 (2)의 전하량 q 를 부분방전의 크기라 하며 결합 커패시턴스 C_k 에 흐르는 전류를 측정하여 구할 수 있다.

IV. 부분방전 형태 분석

4.1 일반 사항

부분방전 측정기는 개개의 펄스에 응답하는 형과 다수의 펄스를 적분하여 응답하는 형으로 나눌 수 있다. 전자는 근본적으로 피크전압계이며 후자는 일반적으로 감도가 높은 전류계 또는 전력계이다. 음극선 오실로스코프와 펄스계수기가 전자에 속하며 전류계, 전력손실 측정기 및 전파장해 측정기등은 후자에 속한다. 위와 같은 측정기로 기기 내부에서 발생하는 부분방전의 정확한 측정과 분석을 위해서는 잡음선별과 펄스 형태 분석이 필요하므로 부분방전 펄스가 직접 나타나는 오실로스코프가 가장 보편적으로 사용되고 있다.

음극선 오실로스코프를 이용한 부분방전 측정기는 부분방전 시험시 부분방전 또는 교정 펄스가 그림3과 같

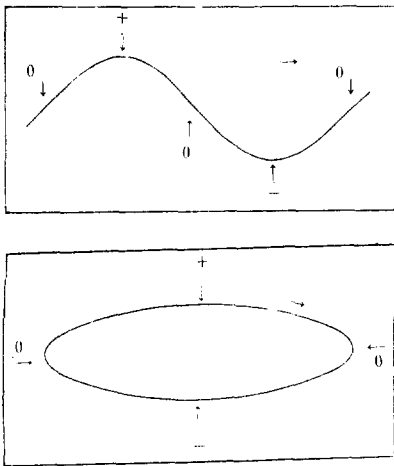


그림3. 부분방전 측정기의 오실로스코프상의 시간 기준선

은 타원형 또는 정현파 시간 기준선(Time Base) 위에 겹쳐 나타나도록 되어 있다. 그림3에서 +, -는 각각 인가전압의 정극성, 부극성 파고치 부분을 0는 영점을 나타낸다. 기준선 위에 겹쳐 나타나는 방전 펄스는 그림 4와 같으며 기준선 위에 수직으로 나타난 선분의 크기는 부분방전 펄스 크기에 비례한다. 화살표는 시간 기준선이 움직이는 방향을 나타낸다.

시간 기준선 위에 나타나는 펄스 형태는 다양하며 이 형태를 분석함으로써 부분방전의 발생 원인을 규명할 수 있다. 부분방전의 원인을 진단하는 데는 오실로스코프 관측만으로는 가능하지는 않으나, 일반적으로 오실로스코프 상의 방전 형태나 그것의 전압 및 시간에 따른 변화가 부분방전 진단에 주요한 단서가 되므로, 먼저 오실로스코프 상의 방전 형태와 그것이 인가전압과 시간, 위상에 따라서 어떻게 변화하는지 주의깊게 관찰해야 한다. 그러나 보다 정확한 진단을 위해서는 아래와 같은 사항을 검토해야 한다.

일반적으로 방전특성은 온도와 압력에 따라 변하므로 이들의 영향을 분석함으로써 보다 정확한 진단을 할 수 있다.

가스의 방전전압은 압력을 증가시키면 높아진다(Paschen의 법칙). 그러나, 압력을 증가시키더라도 절연체 내부의 공극 내의 가스방전에는 영향을 미치지 않을 것이므로, 내부와 표면방전을 구분하는데 압력변화를 이

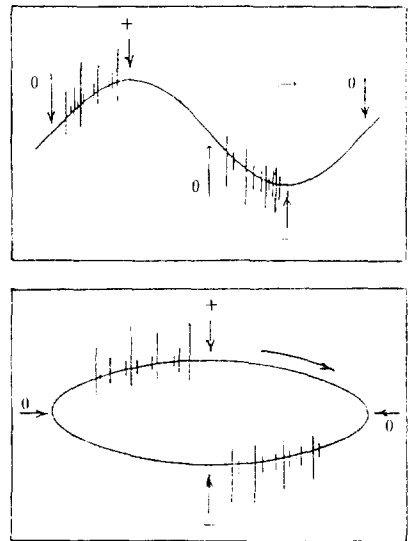


그림4. 시간기준선 상의 부분방전 펄스

용한 방법이 된다.

때때로 방전특성은 기기 제작 직후에는 매우 심하게 변한다. 고분자 압출 절연체의 공극은 제작후 수일에 걸쳐 압력이 떨어지므로 방전의 크기가 증가한다. 절연체가 습기를 포함하고 있는 경우에는 절연체와 공극사이로 습기가 이동하여 제작후 일정기간 동안 매우 복잡한 방전특성을 보여준다.

부분방전의 진단은 사진이나 초음파 등을 사용하는 방법으로도 가능하며, 측정회로나 측정전류를 변화시켜 방전특성을 검토하는 방법을 사용할 수도 있을 것이다.

부분방전 시험은 여러 원인으로부터 발생하는 잡음에 의해 크게 영향을 받는다. 이들 잡음이 주위 잡음과 같이 연속적이고 크기가 균일하면 이들은 측정기의 감도를 감소시킨다. 이들 잡음은 인가전압과 더불어 증가하므로 측정기 감도는 비례해서 감소하게 된다. 또한 전압을 상승시킬때 시험회로에서 발생하는 방전은 시험회로 내부에서 발생하는 것처럼 생각될 수 있으므로 이들 잡음을 최소로 억제해야 하며 오실로스코프 내장 측정기를 사용하여 최대한으로 방전펄스와 잡음펄스를 구분해야 한다.

잡음은 1) 전원, 2) 접지, 3) 다른 고전압 시험 및 전자장 방사, 4) 시험회로에서의 방전, 5) 시험회로의 부적절한 접속들에 의해서 발생하므로 이들에 매우 깊은 주의를 기울일 필요가 있다.

4.2 부분방전 진단

절연체 내부에서 발생하는 부분방전 펄스를 오실로스코프로 관찰할때 가장 기본적인 형태는 그림5와 같다. 일반적으로 부분방전 진단시 검토해야 할 인자들은 펄스의 크기, 부분방전의 개시위상 위치, 펄스의 숫자, 펄스간격, 펄스크기의 전압 및 시간에 대한 의존성 등이다.

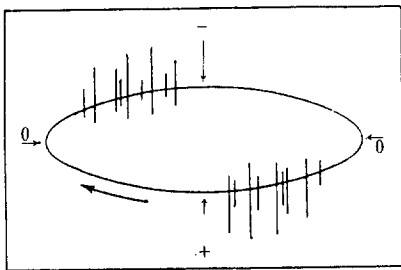


그림5. 가장 일반적인 부분방전 형태

절연체 내부에서 부분방전이 발생할 때 공통적인 오실로스코프 상의 펄스양상은

- 1) 부분방전 펄스가 정극성 및 부극성 파고치에 이르기 전에 발생하여 파고치 이후에 소멸하며,
- 2) 펄스 크기가 전압의 크기에 상관없이 극히 다양하며(random),
- 3) 펄스사이의 간격이 일정하지 않다(random).

이상과 같은 공통적인 펄스양상 외에 부분방전을 진단하는 데 알아야 할 사항들을 요약하면 아래와 같다.

1) 정극성 반주기와 부극성 반주기의 펄스크기가 대략 같을 경우에는 (3 : 1정도까지) 공극이 절연체 내부에 위치하고 있으며, 크기가 크게 다를 경우(10 : 1 정도) 공극이 전극에 가까이 있거나 방전이 절연체 표면에서 일어난다.

2) 전압을 상승시키면 일반적으로 펄스의 개수(반복율)는 증가하는데, 절연체 내부에 다수의 공극이 존재하면 전압을 상승시킬때 반복율이 매우 커서 개개의 펄스를 구분할 수 없을 정도가 된다.

3) 절연체 내부에 다수의 공극이 존재하면 방전개시 후 전압을 상승시키면 펄스의 크기가 증가하나, 공극 수효가 적은 경우에는 펄스의 크기가 전압에 따라서 크게 변하지 않는다.

4) 일반적으로 방전이 개시되는 전압은 방전이 소멸되는 전압보다 높다. (그림6 참조)

5) 레진합침 절연체의 공극에서 부분방전이 발생하면 공극 벽에 전도성 물질이 형성되기 때문에(차폐효과) 방전개시전압 보다 높은 전압을 일정시간 동안 계속 인가할 경우 펄스의 크기가 시간이 지남에 따라 점차 감소하여 소멸전압이 개시전압보다 매우 높다. 또한 전체 방향으로 길쭉한 공극을 가진 탄성절연체, 경화제 및 방식제를 포함한 열경화성 절연체 내부의 공극 및 에틸렌 프로필렌 고무 등에서는 시간이 지남에 따라 펄스 크기

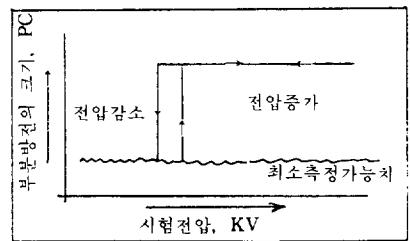


그림6. 부분 방전개시전압과 소멸전압

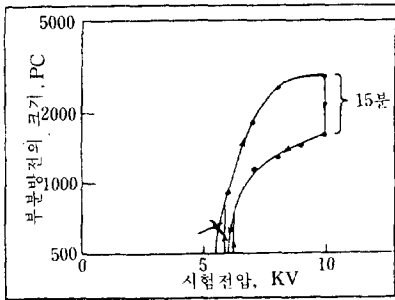


그림7. 시간에 따른 부분방전 크기의 감소

가 감소한다. (그림7 참조)

6) 운모를 포함하는 회전기기 절연체 내부에 공극이 있으면 방전개시전압보다 높은 전압을 계속 유지하는 경우 부분방전의 크기가 점차 증가하여 소멸전압이 개시전압보다 훨씬 낮다.

7) 커패시타등에서와 같이 습기를 포함한 섬유질 절연체와 접촉한 절연유 내부의 가스방출에서 방전이 개시되면 방전의 크기 및 반복률이 증가하나 전계를 제거하면 가스방출이 소멸되므로 전압을 개시전압보다 높이 유지하면 방전의 크기는 수분안에 수백배 증가하고 소멸전압은 개시전압보다 3배 이상 적다.

4.3 잡음 진단

앞에서 절연체 내부의 부분방전 진단에 대해 논했으나 이들 부분방전의 크기를 측정하기 위해서는 잡음이 어떤 형태로 오실로스코프 상에 나타나는 지를 알아야 하며 잡음의 발생 원인을 제거해야 한다. 다음은 오실로스코프 상에 나타나는 잡음의 일반적인 형태를 요약한 것이다.

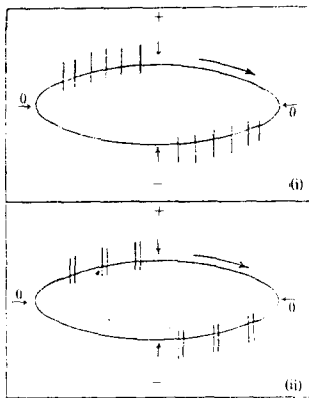


그림8. 비점지물과 대지사이의 코로나에 의한 방전형태

1) 펄스의 간격이 일반적으로 일정하다. (그림8 참조)

2) 시험실 내부에 비점지물이 놓여 있을 때는 시험회로와 비점지물 사이의 스트레이 커패시턴스에 의해 비점지물에 전압이 유기되고 대지사이에 코로나가 발생할 수 있다. 이 경우에 방전형태는 전압이 파고치에 이르기 전에 펄스가 발생하고, 펄스간격이 균일하며 때로는 펄스들이 짝지어 나타난다. 전압을 상승시킬 때 펄스 크기는 변하지 않으며 소멸전압과 개시전압이 같다. 때로는 전압을 높이 올리면 펄스가 사라졌다가 다시 내리면 나타난다. (그림8 참조)

3) 날카로운 금속의 끝 또는 모서리에서 코로나가 발생할 경우에는 정극성 또는 부극성 전압 파고치를 중심으로 펄스가 대칭으로 나타난다. 절연체 내부의 금속끝에서 코로나가 발생하는 경우에는 정극성 및 부극성 전

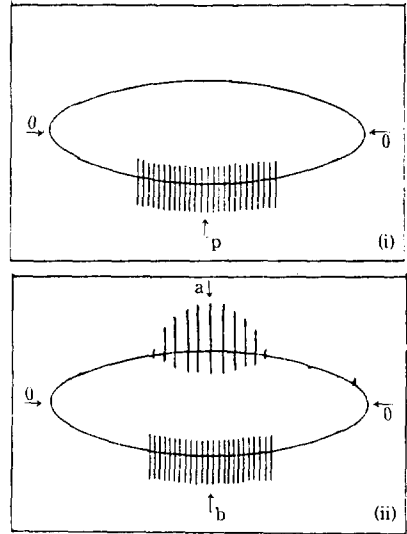


그림9. 기중 (i) 및 절연유중 (ii) 날카로운 금속끝에서의 코로나 방전

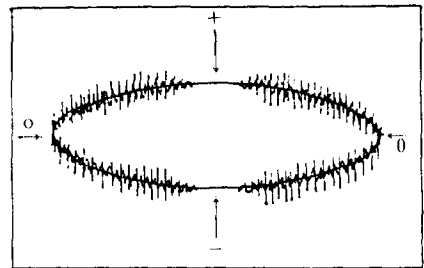


그림10. 측정회로의 접촉불량에 의한 코로나 방전

압 파고치를 중심으로 펄스가 대칭으로 나타난다. (그림9 참조)

4) 금속과 금속사이의 접촉이 나쁜 경우에는 전압 영점을 중심으로 개개를 분간할 수 없을 정도로 많은 펄스가 대칭으로 나타나며 전압에 따라서 펄스크기가 커진다. (그림10 참조)

5) 시험회로의 리액타나 변압기 철심의 자기포화에

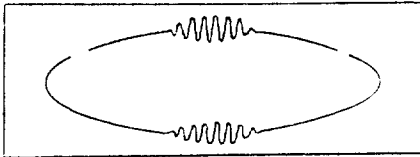


그림11. 전압원으로 부터의 고조파에 의한 저주파 진동

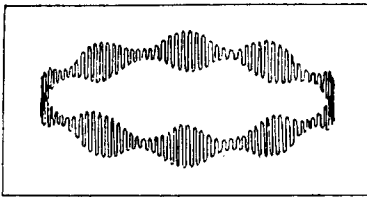


그림12. 전자방사에 의한 고주파 진동

의해 고조파가 발생하면 저주파 진동이 오실로스코프 상에 나타난다(그림11 참조).

6) 전자송신장치, 방송국으로부터 잡음이 들어오는 경우에는 오실로스코프 상에 변조된 고주파 진동이 나타난다. (그림12 참조)

V. 전력기기의 허용 부분방전의 크기

표1은 국제규격 또는 저자의 경험에 의한 전력기기의 허용 부분방전의 크기이다.

VI. 결 론

이상에서 전력기기의 절연열화에 크게 영향을 미치는 부분방전을 측정기상에 나타난 방전형태 진단에 중점을 두어 알아 보았다.

부분방전의 발생원인을 규명하고, 잡음과 부분방전을 선별하여 부분방전을 정확히 측정하기 위해서는 측정기상에 나타난 방전형태의 해석이 필수적이므로 본고는 정확한 부분방전 시험에 크게 기여하리라 믿는다.

표 1. 전력기기의 허용 부분방전의 크기

전 력 기 기	정 격 사 항	시험전압(kV*)	허용부분방전(pC)	관련규격
대용량회전기	6.6kV, 10kV	1.0	1500	산업체
유입식 변압기	300kV이상	1.5	500	IEC 76-4
		1.3	300	
	3kV이상	1.5	100	JEC 204
Mold 변압기	3.3 - 35kV	1.1	50	산업체
케 이 블	11-33kV	1.3	10	JEC 208
	60-77kV	1.3	5	
	161kV	1.3	5	한전자재규격
케이블 종단 및 직선 접속재	2.5-161kV	1.3	3	ANSI 48, 404
RECLOSER	25.8kV	1.2	50	한전자재규격
계기용변성기	고체절연.7.2kV이상	1.1	50	IEC 44.4
	유입식.72.5kV이상	1.1	10	
MOF	25.8kV	1.1	10	한전자재규격
GIS, GCB	161kV이상	1.1	10	산업체

* 시험전압은 계통대지간 최대전압의 배수임.