



가압 수소가 발전기 고정자 권선 절연 열화와 부분 방전 특성에 미치는 영향

The Effect of Pressurized Hydrogen on the Aging and Partial Discharge Activity in Generator Winding Insulations

김진봉*

Jin-Bong Kim

(1999년 6월 23일 접수, 1999년 12월 3일 채택)

ABSTRACT

The purpose of the study is to investigate the effect of H₂ pressure on partial discharge (PD) activity and aging rate in turbine generator winding insulations.

A series of field tests and laboratory tests were performed to investigate the effect of H₂ pressure on PD activity. Field tests were conducted at two unit turbine generators in two conditions, in H₂ pressure and in air atmosphere.

Obtained results are as follows ;

- 1) $\Delta \tan \delta$ and maximum partial discharge are reduced with increase of H₂ pressure and partial discharge inception voltage.
- 2) The reduction ratio of $\Delta \tan \delta$ due to H₂ pressure is higher than one of PD magnitude.
- 3) Partial discharge pulses suffer from attenuation and distortion when transmitted along windings, because of the complex L-C network between windings. From the result, partial discharge pulses are subjected to resonance phenomena in a generator winding.

1. 서론

발전기나 대형 전동기의 고정자 권선을 진단하여 절연의 이상 유무를 평가함에 있어 부분

방전 측정은 중요한 기법으로 사용되어 왔다. 또한 부분 방전의 측정에 의해 절연물의 전기적 인 열화상태 뿐만 아니라 과열이나 주기적 응력에 의한 단말 권선에서의 표면 방전, 웨지 이완,

* 한서대학교 항공기계학과

그리고 슬롯 방전등의 이상 상태도 신뢰성 있게 판별할 수 있다¹⁾. 그러나 고정자 권선에서의 복잡한 구조와 부분 방전의 전송특성으로 인하여 부분 방전의 절대 값을 기준으로 고정자 권선의 절연 상태를 판정하기 어렵다는 것이 근래에 인정되기 시작하였다²⁾. 따라서 최근에는 부분 방전을 발전기 운전 중에 주기적으로 측정하여 부분 방전의 크기나 위상 분포 등의 특성이 발전기 운전시간에 따라 변화하는 경향을 분석함으로써 권선의 절연상태를 진단하는 새로운 기법을 도입하고 있다³⁾.

이와 같이 발전기 운전 중에 부분 방전을 측정하여 절연의 이상 유무를 판정할 경우, 부분 방전의 발생 상태는 고정자 권선 절연 주위의 분위기에 의해 영향을 받게 된다. 특히 가압 수소 상태에서 운전되는 화력 발전기 고정자 권선에 대한 열화 상태를 판정하기 위해서는 수소의 영향이 고려되어야 할 것으로 사료되며 이에 관련된 연구 결과들은 다음과 같다.

일반적으로 2기압의 가압 수소 중에서 열화되는 고정자 권선은 대기 중에서 열화되는 권선의 수명보다 1.5~4배 정도 길다^{4,5)}. 이러한 현상은 가압 수소중의 절연물은 표면 방전을 비롯한 모든 방전의 발생이 억제되므로 전기적 열화가 서서히 진행되기 때문이다^{6,7)}. 화력 발전기 고정자 권선 절연 내력에 대한 수소 가스 압력의 영향을 실험한 결과는 수소 압력이 1.5 기압일 경우에 공기 중에서의 절연 내력과 같으며, 4기압인 경우에는 대기중의 절연 내력보다 1.5배 정도가 높은 것으로 나타났다^{5,8)}.

한편, 부분 방전의 측정에 의하여 절연물의 열화 상태를 정확히 평가하기 위해서는 운전중 측정의 경우에 부하를 경감시킨 후에 수소 가스의 압력을 감소시켜 부분 방전을 측정하며, 정지 중에 부분 방전을 측정할 때에는 대기 중에서 실시하는 것이 보다 효과적이지만^{6,8)}, 고정자 권선이 심하게 열화된 경우에는 정격 수소 압력일 때에도 운전중의 측정 방법이 보다 효과적으로 권선의 절연 상태를 진단할 수 있다고 보고되었다⁶⁾.

이상에서 수소 가스를 냉매로 사용하고 있는 화력 발전기 고정자 권선의 경우에는 가압 수소

에 의하여 열화의 진행 및 부분 방전의 발생에 영향을 받고 있다고 보고되고 있으나, 고정자 권선의 주 절연 종류나 수소 압력에 따라 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 제작되는 고정자 권선이나 국내에서 운전중인 발전기 권선을 대상으로 하여 수소 압력이 고정자 권선의 열화 및 부분방전의 발생에 미치는 영향을 규명함으로써 고정자 권선 절연 열화 상태 판정의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

이를 위해 수소 가스 용기 내에서 전기적으로 가속 열화시킨 고정자 권선과 실제 운전중인 발전기의 고정자 권선에 대한 부분 방전을 대기 중과 가압 수소 중에서 측정하여 가압 수소의 영향을 규명하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 측정 장치

부분 방전 측정기로서는 Tettex9120 PD Detector를 사용하였다. 부분 방전의 크기는 측정기기의 주파수 대역에 따라 달라지게 되는데 외부 잡음의 영향이 없을 경우에는 범용 증폭기(40~200 kHz)를 사용하였고, 부분 방전 측정시 계통 잡음이 심한 경우에는 계통 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 협대역 증폭기를 사용하여 측정하였다. 한편 절연물의 유전 정점은 Tettex 2818 QA Shering Bridge를 사용하여 측정하였다.

2.1.2 가속 열화 시험

신규로 제작된 고정자 권선을 대기 중에서 3개, 가압 수소 중에서 6개를 가속 열화시켰다. 가속 열화시 전압 강도는 5.5kV/mm로 하였고 전원 주파수는 420 Hz로 하였으며, 이와 같이 하였을 때의 예상 절연 수명은 대기 중 열화 권선의 경우 4,400 시간이고 수소 중 열화 권선은 18,000 시간이었다. 본 연구에서 적용한 수명 예측은 General Electric 사에서 적용하는 $t = (E_0/E)^r$ 의 관계식⁴⁾을 이용하였다. 여기서 $r=6.52$, $E_0=26.85$ kV/mm, 그리고 E는 인가 전압 강도로

서 정상적으로 가속 열화를 시킬 수 있는 5.5 kV/mm를 적용시켰다. 따라서, 본 연구에서 사용되는 가속 열화 시험용 권선의 절연 두께는 5mm로서 최대 인가 전압은 27.5kV가 된다. 한편 상기 식은 전원 주파수가 60Hz인 경우에 적용된 식으로 전원 주파수가 420Hz가 되면 절연 수명은 1/7 수준으로 감소하게 된다. 본 연구에서는 대기중과 가압 수소 중에서 고정자 권선을 동시에 가속 열화시켜 1,800 시간이 경과한 후 각각의 예상 수명이 40% 및 10%가 되었을 때 부분 방전 및 유전 정점 시험을 실시하였다.

한편, 수소는 4기압으로 가압하였는데 이 압력은 본 연구에서 사용된 권선에 대해 실제 발전기에서 가해지는 압력이고, 본 연구에서 수소 가압 열화 시험을 위해 제작한 수소 가압용 용기는 Fig.1에서 보는 바와 같다.

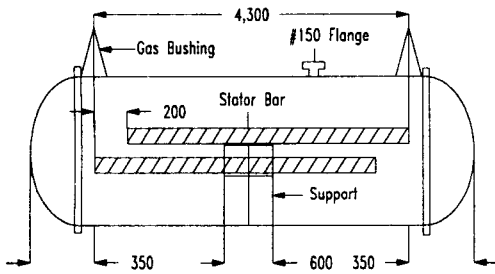


Fig. 1 Configuration of test chamber

2.2 실험 방법

공기 중에서 열화된 권선은 공기중과 4기압의 가압 수소 중에서 유전 정점과 부분 방전 크기를 측정하였으며, 가압 수소 상태에서 열화된 권선은 공기중과 0, 1, 2, 3, 4기압의 수소 중에서 측정하였다.

한편 실제 발전기를 대상으로 한 현장 측정은 2대의 발전기에 대해 가압 수소 상태와 대기 상태에서 측정하였으며 실험실에서 가속 열화시킨 권선과 각 발전기의 특성은 Table 1과 같다. 이 중에서 B 발전기의 경우는 사용 연수가 25년이 경과한 시점에서 절연 상태가 불량하여 신규 권선으로 교체한 것으로 권선의 교체 전/후에 각각 측정을 하였다.

Table 1 Specifications of Generator Windings

| Generator Type | Capacity | Insulation | Operating Time | H ₂ Pressure (kg/cm ²) |
|--|--------------------|------------|----------------|---|
| A (Accelerated Aging Winding in Lab.) | 500[MVA] 22[kV] | Epoxy | 1,800 hours | 4 (6ea) |
| | | | | Air(3ea) |
| B | 300[MVA] 17[kV] | Polyester | 25 years | 2.5 |
| C | 300[MVA] 19[kV] | Polyester | 27 years | 3 |

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 수소 압력에 따른 유전 정점(tan δ)의 특성

발전기 고정자 권선의 절연물에 내재해 있는 미소 공극에 발생하는 부분 방전의 평균치를 나타내는 tan δ를 A 권선에 대하여 구한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같다. Fig. 2는 A 권선 중 가압 수소와 대기 상태에서 열화된 각 group의 권선들에 대한 tan δ 평균값을 나타낸 것으로 수소 중에서 열화된 권선은 대기 상태와 수소 압력을 단계적으로 증가시킨 상태에서 측정하였고, 대기 중에서 열화된 권선은 대기 상태에서만 측정하여 상호 비교한 결과이다. 수소 중 열화 권선의 경우 tan δ(또는 Δtan δ)는 측정시의 수소 압력이 증가함에 따라 점차로 감소하며, 대기 중에서 측정한 값은 0기압과 1기압의 수소 압력에서 측정한 값의 중간이 되었다. Fig. 2의 결과 중 정격 상전압(12.7 kV)에서 수소 중 열화 권선의 Δtan δ 대기 중에서 측정하였을 경우 0.87%, 2기압 수소 중에서는 0.12%가 되어 2기압의 수소 가스에 의해 Δtan δ가 대기 상태에서 측정한 결과에 비해 14% 수준으로 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 수소 압력이 증가함에 따라 tan δ(또는 Δtan δ)가 감소하는 이유는 다음과 같다. 고체 절연물 내 미소 공극에 전압이 인가되면 전자 사태(electron avalanche)가 발생하고 이 전자 사태는 유동(streamer)로 천이된다. 이와 같은 유동에 의해 공극 간격 d와 이 공극 내의 가스 압력 p 사이에는 다음 식과 같

은 관계가 성립한다⁹⁾.

$$\alpha d + \log(\alpha/p) = 14.46 + \log(E/p) - (1/2) \log(pd) + \log(d)$$

여기서, α : Townsend 1차 이온화 계수

E: 전계 [kV/mm]

이와 같은 관계식을 기초로 하여 가스 압력과 부분 방전 개시 전압의 관계를 실험적으로 구한 결과¹⁰⁾에 의하면 이들 사이에는 거의 선형적인 관계가 성립됨을 알 수 있다. 한편 $\Delta \tan \delta$ 는 부분 방전 개시 전압에서의 $\tan \delta$ 와 인가 전압에서의 $\tan \delta$ 차이를 나타내기 때문에 부분 방전 개시 전압이 증가하면 $\Delta \tan \delta$ 가 감소하게 된다. 따라서 $\tan \delta$ 측정시 권선 주위의 가스 압력이 증가하면 부분 방전 개시 전압이 증가하여 $\Delta \tan \delta$ 가 감소하게 된다.

한편 대기 중에서 열화된 권선을 대기 중에서 측정하였을 때의 $\tan \delta$ (또는 $\Delta \tan \delta$)가 수소 중에서 열화된 권선을 대기 중에서 측정하였을 경우의 $\tan \delta$ (또는 $\Delta \tan \delta$)와 거의 동일하게 나타나고 있다. 즉 수소 압력이 증가함에 따라 부분 방전의 평균적인 발생량은 수소 압력에 의해 억제되며, 대기 중 열화 권선과 가압 수소 중 열화 권선의 전반적인 열화 정도는 거의 유사한 상태임을 알 수 있다. 한편 가압 수소 상태에서 운전 중인 실제 발전기에 대한 유전 정점 시험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2의 각 대상 발전기에서 U, V, W 각 상의 측정 결과는 유사하였기 때문에 대표적으로

Table 2 $\Delta \tan \delta$ for the generator B and C

| Generator | B | | C | |
|---|------|--------------------|------|------------------|
| | Air | Hydrogen (2.5 atm) | Air | Hydrogen (3 atm) |
| $\Delta \tan \delta$ | 1.54 | 0.3 | 0.74 | 0.26 |
| Reduction Ratio ($\Delta \tan \delta$ at hydrogen / $\Delta \tan \delta$ at air) | 0.2 | | 0.35 | |

U 상에 대한 결과만을 기술하였다. 25년간 사용된 B 발전기 권선의 2.5 기압 수소 상태에서의 $\Delta \tan \delta$ 와 대기 중에서의 $\Delta \tan \delta$ 의 비는 0.2로 가압 수소에 의해 $\Delta \tan \delta$ 가 80% 감소하였다. 한편 C 발전기의 경우에는 $\Delta \tan \delta$ 가 65% 감소하였다. 이와 같이 장기간 사용되어 절연 상태가 상당히 열화된 권선의 전반적인 부분 방전 발생 상태는 가압 수소에 의하여 상당히 억제됨을 알 수 있다.

한편 Fig. 2의 실험실에서 가속 열화시킨 권선의 $\Delta \tan \delta$ 는 84% 감소하여 각 발전기 열화 권선의 $\Delta \tan \delta$ 의 수소 압력에 의한 저감비가 차이가 나게 되는데 그 이유는 다음과 같다. 발전기 고정자 권선은 각 제작사마다 절연 방식이 상이하고, 운전 조건도 상이하기 때문에 열화 정도도 차이가 나게 된다. 따라서, 열화 진행되는 동안의 각 권선 절연물 내의 공극의 크기, 양 및 분포 상태가 상이하며 $\tan \delta$ 측정시의 수소 압력 상태도 상이하였기 $\Delta \tan \delta$ 저감비의 차이가 발생하였다.

3.2 수소 압력에 따른 부분 방전 특성

전술한 유전 정점은 절연물 전체의 열화 상태를 나타내기 때문에 국부적으로 절연물이 열화되었을 경우에는 이를 명확하게 판정할 수 없다. 실제로 절연물의 이상 상태는 국부적인 개소의 열화 상태에 의해 좌우되기 때문에 본 절에서는 국부적인 열화 상태를 판정할 수 있는 부분 방전 크기를 측정된 결과에 대하여 기술하고자 한다.

Fig. 2의 결과에 의하면 수소 압력이 증가하게 되면 절연물 내의 미소 공극에서 발생하는 부분 방전 량과 크기는 감소될 것으로 추정되며

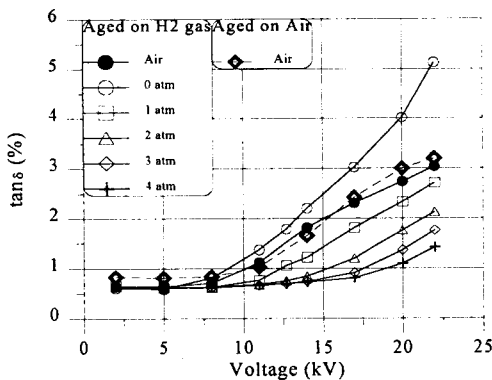


Fig. 2 Average $\tan \delta$ for windings of group A measured in air or pressurized H_2 gas

측정 결과도 Fig. 3에서처럼 일정하게 감소함을 알 수 있다. Fig. 3은 가압 수소 중 열화 권선(A)에서 수소 압력이 증가함에 따른 최대 부분 방전 크기를 나타낸 것으로 A 권선의 정격 상 전압인 12.7 kV에서 측정한 값이다. 각 압력에서 가압 수소 중 열화된 6개 권선 중 최대 값은 □로 표시하였으며 최소 값은 ◇, 그리고 전체의 평균값은 ○로 표시하였다.

이들 6개의 권선에 대하여 대기 중에서 측정 한 부분 방전 크기의 평균값은 11,000 pC으로 2 기압 수소 상태에서 부분 방전 크기는 40% 수준으로 감소한다. 즉 발전기 권선의 열화에 주된 요인으로 작용하는 부분 방전은 수소 압력이 2기압이 될 경우 공기 중에서 발생하는 부분 방전 크기의 40% 수준으로 감소하여 권선의 열화를 40% 감소시킴으로서 권선의 수명은 2.5배 증가시킬 수 있음을 나타낸다. 이 결과는 Breitenstein⁴⁾이나 Terasse⁵⁾ 등이 2기압의 가압 수소 중에서 열화되는 고정자 권선이 대기 중에서 열화되는 권선의 수명보다 1.5~4배정도 길다는 보고와 일치하고 있다. 한편 실제 발전기에 대한 최대 부분 방전 크기의 측정 결과는 Table 3과 같다.

Table 3은 Table 2와 동일한 조건에서 실제 발전기 권선에서 발생하는 부분 방전 크기를 측정한 것이다. 동일한 발전기의 경우 대기중과 가압 수소 중에서 각 상별 $\Delta \tan \delta$ 저감비는 거

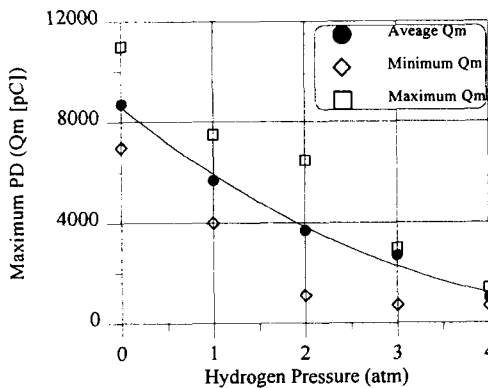


Fig. 3 Maximum PD magnitude according to H₂ Pressure by conventional PD Detector (Applied voltage: 12.7 kV, group A)

Table 3 Maximum PD magnitude for generator windings

| Generator Type | B | | | | C | |
|--|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|------------|------------------|
| | before repair | | after repair | | | |
| Measuring Condition | Air | Hydrogen (2.5 atm) | Air | Hydrogen (2.5 atm) | Air | Hydrogen (3 atm) |
| Maximum PD magnitude (Qm) (×1,000 pC) | 8 | 5 | 3.5 | 0.5 | 7.5 | 4.7 |
| Reduction Ratio (Qm at hydrogen / Qm at air) | 0.63 (0.31) | | 0.25 (0.14) | | 0.64 (0.5) | |
| Band Width of Detector | 0.4 MHz ±30 kHz | | 40~200 kHz | | | |

* () : Minimum reduction ratio in each phase

의 동일한 것에 반해 각 상별 최대 부분 방전 크기의 저감비는 C 발전기의 경우는 거의 유사 하였으나 B 발전기는 2배까지 차이가 발생하였다. 한편 최대 부분 방전 측정시 사용한 증폭기는 C 발전기 및 B 발전기의 권선 교체 후에는 측정 주파수 범위가 40~200 kHz인 범용 증폭기를 사용하였지만 B 발전기의 교체전 권선의 경우에는 계통 잡음으로 인하여 범용 증폭기로는 부분 방전을 측정할 수 없어서 협대역 증폭기를 사용하였다. 이때의 측정 대역폭은 0.4 MHz±30kHz 이다.

Table 3에 의하면 2~3기압 사이에서 장기간 운전된 권선의 대기 중 부분 방전 크기에 대한 수소 중 부분 방전 크기의 저감비는 B 권선의 0.31을 제외하면 대부분이 0.5~0.65가 되었다. 이는 최대 부분 방전 크기로 열화 상태를 판정하는 기준¹¹⁾을 적용하면 공기 중에서 측정한 열화 상태는 수소 중에서 측정한 상태의 1.5~2 배 정도로 열화가 진행된 것으로 판정할 수 있다.

한편 B 발전기의 경우 교체 권선에 대한 측정 결과를 보면 Table 2의 $\Delta \tan \delta$ 는 가압 수소 상태에서 증가한 반면 기준에 장기간 운전 중이던 권선에 비해 수소 가스 중에서의 부분 방전 크기가 현저히 감소하였다. 이와 같은 현상은 권선을 슬롯에 설치한 초기에 slot과 권선 간에 구조적인 적합이 명확하게 이루어지지 않은 상태에서 이들 사이에 미소 공극이 존재하여 대기

중에서 발생한 슬롯 방전이 가압 수소의 절연 분담으로 감소한 것으로 사료된다.

다음으로 Table 2의 $\Delta \tan \delta$ 와 Table 3의 최대 부분 방전 크기의 대기 중에 대한 가압 수소 중에서의 저감비를 비교 분석하면 다음과 같다. 권선이 장기간 사용되어 절연이 어느 정도 열화 되었을 경우에는 각 발전기의 고정자 권선 절연 종류 및 수소 압력에 따라 다소 차이는 있지만 $\Delta \tan \delta$ 의 저감 비는 0.2~0.4배의 수준까지 감소하고 최대 부분 방전 크기는 0.3~0.7배의 수준까지 감소한다. 이와 같이 실제 발전기에 대한 측정 결과인 Fig. 3과 Table 3에서 나타나는 $\Delta \tan \delta$ 와 최대 부분 방전 크기의 저감비 차이는 실험실에서 가속 열화시킨 권선에 대해 측정한 Fig. 2와 Table 2의 결과에서 나타나는 저감비의 차이에 대한 결과와 마찬가지로 $\Delta \tan \delta$ 의 저감비가 최대 부분 방전 저감비보다 큰 것을 알 수 있다. 즉, 가압 수소는 최대 열화 지점에서 발생하는 부분 방전에 대한 국부적인 억제 효과보다는 열화 권선 전체에서 발생하는 부분 방전에 대한 억제 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

이상은 각 권선이나 발전기의 정격 상전압을 인가하였을 경우에 발생한 부분 방전 크기에 대한 결과들에 대하여 기술하였고 인가 전압이 정격 상전압 이상일 경우의 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 A 권선에 대한 인가전압의 증가에 따른 각 측정 조건에서의 최대 부분 방전 크기를 나타낸 것이다. 대기 중에서 열화된 권선은 실선으로 나타냈으며 수소 중에서 열화된 권선은 점선으로 나타낸 것으로, 대기 중 및 수소 중에서 열화된 권선을 대기중과 4기압의 수소 상태에서 각각 측정한 결과이다. 이 두 종류의 열화 권선에 대해 정격상 전압인 12.7 kV에서 대기중과 4기압의 수소 상태에서 측정한 최대 부분 방전 크기는 거의 동일하였다. 인가 전압을 27.5 kV까지 상승시켜 이들 권선에 대해 대기 중에서 측정하였을 경우 최대 부분 방전크기는 30,000 pC과 50,000 pC으로 대기 중에서 열화된 권선의 열화 정도가 심한 것을 알 수 있다. 그러나 이 권선들에 대하여 4기압의 수소 상태에서 인가 전압을 점차로 증가시키면서 측정하였을 경우에

는 대기 중에서 열화된 권선의 최대 부분 방전 크기가 수소 중에서 열화된 권선의 최대 부분 방전보다 작아지는 현상이 나타났다. 이와 같은 현상은 다음과 같이 열화 조건의 차이에 따른 미소 공극 크기의 차이에 기인한 것으로 사료된다. Fig. 4의 결과에 대한 대상인 실험실에서 열화시킨 권선에 대하여 SEM 촬영을 한 결과, 대기중에서 열화된 권선의 미소 공극 간격은 10~20 μm 정도였고, 수소 중에서 열화된 권선의 미소 공극 간격은 1~5 μm 정도가 되어 대기중에서 열화된 권선의 미소 공극이 더욱 크게 되었다. 이 미소 공극 사이에 4기압의 수소 가스가 채워져, 수소 가스에 대한 파센의 곡선에서 $p \times d$ (가스 압력 \times 전극간 거리)가 최저점 이하가 되면, 동일한 압력에서 미소 공극이 큰 경우가 작은 경우보다 부분 방전 개시 전압이 낮게 된다¹²⁾. 따라서 권선 A의 $p \times d$ bar·mm는 수소 가스에 대한 파센 곡선에서 최저점에서의 값이 10^{-2} bar·mm 이하인 범위인 것으로 추정¹²⁾되어 Fig. 4와 같은 현상이 나타났다.

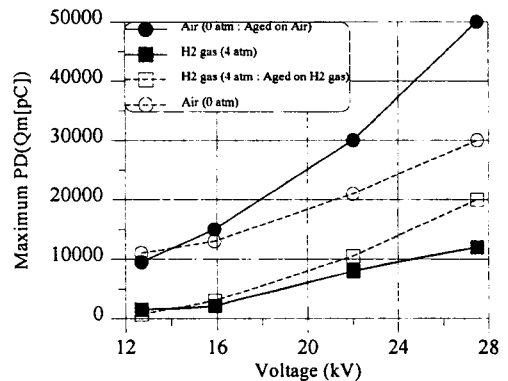


Fig. 4 Maximum PD magnitude above the rated phase voltage by conventional PD detector(Windings aged in hydrogen gas or in air : group A)

한편 부분 방전의 크기는 측정 주파수 대역에 따라 측정값이 변하기 때문에 각 주파수 대역에서 수소 압력에 따른 부분 방전 크기의 변화를 주파수 분석기를 이용하여 측정하였다. 측정 주파수 대역은 5 MHz, 10 MHz, 그리고 15 MHz로 하였고, 각 주파수 대역에서 측정한 최

대 부분 방전크기는 대부분 10 MHz 대역에서 가장 크게 측정되었는데, 그 이유는 다음과 같다. 고정자 권선에서 부분 방전을 측정할 경우, 고정자 권선과 측정기는 LC 회로를 구성하게 된다. 이와 같은 LC 회로에서 공진 주파수는 다음과 같다¹³⁾.

$$f_{\text{resonant}} = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$$

여기서, L: 회로 임피던스

C: 회로 캐패시턴스

따라서, Fig. 5의 결과에서 구성된 측정 회로의 공진 주파수는 10 MHz가 되어 이 주파수 대역에서 부분 방전이 최대로 측정되었다. 한편, 가압 수소 중에서 열화된 권선에 대한 부분 방전 크기를 대기 중에서 10 MHz 대역에서 측정하였을 경우의 평균값은 25 mV 정도가 되어, 2 기압의 수소 압력에서 부분 방전크기는 1/5 정도로 감소하며 4기압에서는 1/10 정도로 감소하였다.

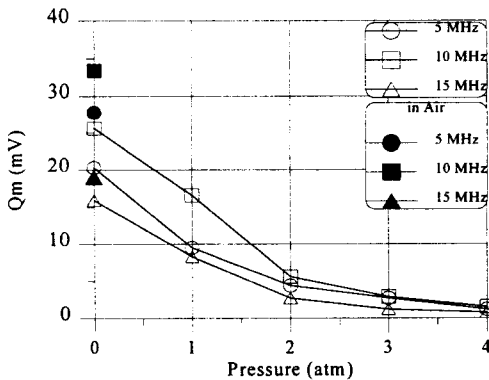


Fig. 5 Average value of maximum partial discharge magnitude by FSA(Applied voltage: 12.7 kV, Winding aged in hydrogen gas: group A)

4. 결 론

발전기 고정자 권선에서 발생하는 부분 방전에 미치는 가압 수소의 영향을 규명하기 위하여 실험실적 열화 권선 및 장기간 운전된 발전기 권선에 대한 시험을 실시하고 얻어진 결과 및 결론은 다음과 같다.

1) 수소 가스 압력이 증가하게 되면 압력 증가

에 따른 부분 방전 개시 전압이 증가하여 $\Delta \tan \delta$ 와 최대 부분 방전 크기가 감소하게 되며, 이들 사이에는 거의 선형적인 비례 관계가 성립된다.

- 수소 가스 압력의 증가에 따른 $\Delta \tan \delta$ 의 저감비가 최대 크기의 부분 방전의 저감비보다 크게 된다. 따라서 발전기 권선에 대한 가압 수소의 억제 효과는 전체 권선 중 극심하게 열화된 지점에서 발생하는 최대 부분 방전보다는 권선 전체에서 발생하는 부분 방전에 대한 억제 효과가 큰 것에 기인한 것임을 알 수 있다.
- 정격 상전압 이상의 전압을 인가하였을 경우, 파센의 법칙에 의해 대기중에서 열화된 권선의 최대 부분 방전 크기가 수소 중에서 열화된 권선의 최대 부분 방전 크기보다 작게 된다.
- 부분 방전을 측정 할 경우 측정 회로의 임피던스와 캐패시턴스에 따라 공진 주파수의 차이가 나기 때문에 측정 주파수 선정에 유의를 하여야 하고, 동일 권선에 대하여 주기적인 측정을 할 경우에는 동일한 주파수 대역의 측정기를 사용하여야 한다.

참 고 문 헌

- Miller R. and Black I.A., "Measuring Techniques for Identifying Partial Discharges in Stator Windings of Electrical Machines". IEE Dielectric Materials, Measurements and Applications, Conference Publication No. 213, pp. 221~234, July 1982.
- Sedding H.G., "Theory and Practical Discharge Testing of Rotating Machines", International Conference on Generator and Motor Partial Discharge Testing, Toronto, Ontario, April 18-19, 1994.
- McDermid W., "Relationship between PDA Data and Condition of Stator Windings of Various Rotating Machines in Manitoba Hydro", CEA-EPRI-Ontario Hydro PDA and RF Monitor User's Workshop, To-

- ronto, Canada, Sept. 22-24. 1986.
- 4) Breitenstein A.M., Johnston D.R. and Mauchan C.V., "Accelerated Frequency Hydrogen Atmosphere Voltage Endurance Testing of Micaceous Insulation Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, pp.1389~1393, Sept. 1969.
 - 5) Terase H., Mitsui H. Inoue K., Yoshida K. and Kenjo S., "Proposal of GF(Gas Filled) Insulation for Rotating Machines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp. 2955~2962, No. 6, June 1981.
 - 6) Grunewald P. and Weidner J., "Possibilities and Experience with Off-Line and On-Line Diagnosis of Turbine Generator Stator Winding Insulations", CIGRE 11-206, Aug. 28-Sept. 3, 1994.
 - 7) Mitsui H., Koyanagi S., Kenjo S., Yamauchi T. and Tari M., "Insulation Effects of Hydrogen Gas for Cooling Turbine-Driven Generators", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-18, No. 5, pp. 536~540, Oct., 1983.
 - 8) Sedding H.G., Stone G.C. Braun J.M. and Hogg W.K., "The Relationship between Partial Discharge Activity and Hydrogen Diffusion in Epoxy Resin and Epoxy/Mica Composites", Fifth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, pp.211~214, June 27-30, 1988.
 - 9) J.M. Meek and J.D. Craggs, Electrical Breakdown of Gases, Oxford University Press, 1953.
 - 10) H.C. Pollock and F.C. Cooper, Phy. Rev., 56, 170, 1939.
 - 11) Kimura K., "Progress of Insulation Aging and Diagnostics of High Voltage Rotating Machine Windings in Japan", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, No. 3, May/June 1993.
 - 12) R. Bartnikas, E.J. McMahon, Corona Measurement, pp. 24~25, Related ASTM Publications.
 - 13) I.J. Kemp, B. Gupta, and G. Stone, "Calibration Difficulties Associated with Partial Discharge Detectors in Rotating Machine Applications", Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.92~97, 1987.