

# 수력발전기 고정자 권선에서 부분방전 특성

## Partial Discharge Property of Hydrogenerator Stator Windings

김희동 한전 전력연구원

Hee Dong Kim Korea Electric Power Research Institute

### Abstract

Partial discharge(PD) tests were performed when the hydrogenerator(rated 11kV and 25MVA) was shut down(off-line). Six cable couplers were installed in the ring bus as well as within hydrogenerator terminal box. PD tests were conducted using partial discharge analyzer(PDA) and digital partial discharge detector(PDD). PDA showed that the normalized quantity number(NQN) and the partial discharge magnitude increased with increase of ac voltage. Slot discharges were discovered in three phases(A, B and C) at the rated voltage. PDA and PDD test results are in accordance with the pattern and magnitude of partial discharge. This hydrogenerator stator windings were in good condition.

### 1. 서론

부분방전은 고전압이 인가될 때 절연재료 내부에 있는 공극(void)에서 일어나는 전기적 스파크(electrical spark)이다. 이러한 공극은 제작시에 존재하거나 운전되는 동안에 열적 전기적 및 기계적인 열화에 의해 형성됨으로 부분방전을 측정하여 절연재료에서 열화정도를 판정한다. 발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위해서 케이블 커플러(cable coupler)를 설치하고 PDA (partial discharge analyzer)를 사용하여 절연진단을 수행하고 있다[1].

수력발전기의 고정자 권선을 진단하는 PDA가 1976년에 캐나다의 FES사에서 개발되었다. 따라서 운전중인 발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하여 절연열화 상태를 진단하는 연구가 활발하게 이루어졌다. 고정자 권선에서 전체적인 방전활동을 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(mV)를 주로 측정하는데, 이들은 발전기 부하상태, 고정자 권선의 온도, 전압 및 습도 등에 따라 다르게 나타난다.

발전기의 다양한 운전조건과 절연열화 기구의 복잡성 때문에 열화상태를 정확히 판단하는 것은 어렵지만, 발전기의 절연열화 판정

기준을 근거로 보다 적절한 예측정비 및 잔존수명 예측에 관한 연구가 주로 1980년대 부터 현재까지 수행되고 있다. 정지중 절연진단은 Simons, Yoshida 등에 의해 비파괴 시험을 통하여 측정된 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전에 의하여 발전기의 절연열화 상태를 판정하고 있다[2, 3]. 이 중에서 부분방전은 발전기 고정자 권선에서 절연열화의 원인과 징후를 나타내는 중요한 요소이다.

본 논문에서는 30년 이상 동안 운전된 수력발전기(정격전압 11kV, 25MVA)에 설치되어 있는 케이블 커플러에서 PDA를 이용하여 상전압에서 정격전압까지 교류전압을 인가하면서 정지중에 부분방전을 측정하였다. 또한, 고정자 권선에 교류전압을 인가하면서 정지중에 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 측정한 결과를 PDA 진단결과와 비교함으로써 부분방전 크기의 변화를 고찰하고 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의해 절연열화 상태를 분석하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 케이블 커플러의 설치

그림 1에 보인 바와 같이 수력발전기의 고

정자 권선에서 각 상당 2개씩 총 6개의 운전중(on-line) 부분방전 센서인 케이블 커플러가 설치되어 있다. 발전기 단자측에 3개와 링 버스(ring bus)측에 3개가 설치되어 있으며, 부분방전 신호의 측정을 용이하게 하기 위해서 6개의 커플러에서 전송되는 신호선을 인출하여 발전기 외함에 단자함을 설치하였다.

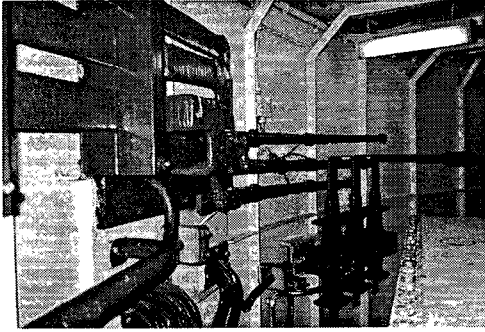


그림 1. 수력발전기에서 케이블 커플러의 설치

## 2.2 PDA 측정기법

본 논문에서는 수력발전기 정지중에 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 부분방전 분석기(partial discharge analyzer : PDA, FES International Co.)를 사용하여 방전크기의 변화와 절연열화 상태를 분석하였다. 고전압 전원장치에서 각 상별로 상전압(6.35kV), 상전압의 1.25배(7.94kV) 및 정격전압(11kV)을 인가하면서 PDA를 이용하여 NQN과 부분방전 크기를 측정하였다.

## 2.3 교류전류, 유전정점 및 부분방전 측정기법

수력발전기 고정자 권선의 정지중 절연진단 시험을 위해 웨링브리지(Schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기(digital partial discharge detector)를 사용하였다. 웨링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성하여 교류전류와 유전정점을 측정하였다. 발전기 고정자 권선에 웨링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하면서 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)를 통해 유입된 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments TE 571)에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 PDA 분석

정지중에 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 PDA를 사용하여 방전패턴과 절연열화 상태를 분석하였다. 표 1은 정지중에 외부에서 고전압을 발전기의 A, B, C상에서 6.35kV, 7.94kV 및 11kV을 인가하면서 PDA를 이용하여 측정된 결과를 나타냈다. 그림 2는 표 1의 결과를 나타냈으며, 전압증가에 따라 NQN과 부분방전 크기가 증가하고 있다. NQN과 부분방전 크기가 A상에서 가장 작고 C상에서 가장 높게 분석되었다.

표 1. 정지중 PDA 측정 결과

상별		측정전압	정지중		
			6.35 kV	7.94 kV	11 kV
A 상	NQN	+	72	139	530
		-	72	129	326
	Max. PD	+	40	100	400
		-	40	100	260
B 상	NQN	+	82	218	541
		-	82	210	416
	Max. PD	+	62	160	400
		-	62	160	300
C 상	NQN	+	267	575	1083
		-	255	577	887
	Max. PD	+	300	360	700
		-	300	360	500

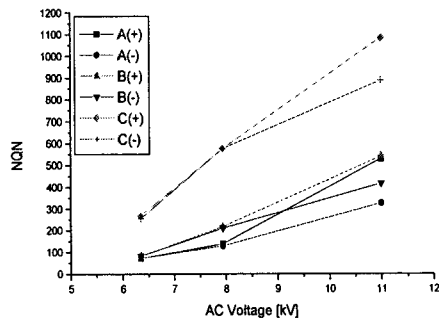


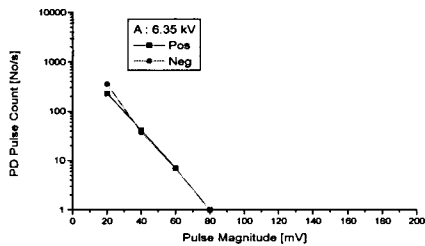
그림 2. 인가전압에 따른 NQN의 변화

발전기 정지중에 외부전원 장치에서 전압을 6.35kV, 7.94kV, 11kV을 인가하면서 부분방전의 패턴을 측정하여 그림 3, 그림 4 및 그림 5에 나타냈다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 A상의 부분방전 패턴을 분석하면 그림 3(a)에서는 주절연재료(groundwall insulation) 내부 보이드(voids)에서 내부방전이 발생하며, 부극성 펄스(negative pulse)와 정극성 펄스(positive pulse)가 거의 일치하게 나타나고 있다. 내부방전은 제조시 바니쉬나 수지의 부적절한 함침 혹은 절연층의 박리와 같이 열

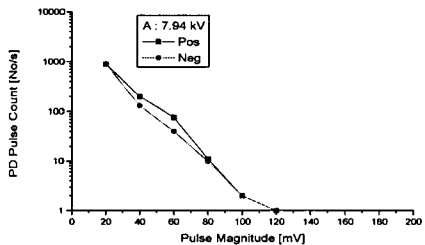
화과정에 의해 발생한다. 그림 3(b), (c)에서는 동일하게 슬롯방전(slot discharge)을 나타내고 있는데 부극성 펄스에 비해 정극성 펄스가 크게 나타나고 있다[1, 4].

슬롯방전은 고정자 권선에서 표면방전의 영향을 최소화 시키기 위해서 주절연 직선부에 반도체 코팅(semiconducting coating)과 슬롯 외부재료에 end-grading 페인트를 사용하고 있다. 그런데 주절연과 슬롯의 상대적인 움직임으로 마모되어 반도체 코팅이 손상됨에 따라 일부 주절연의 접지상태는 나빠지고 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에서 방전을 일으킨다. 따라서 이러한 방전은 고정자 권선의 표면과 철심사이에서 상당한 에너지가 발생하며, 방전시에 오존을 생성하여 고정자 철심과 고무성분의 절연재료를 심하게 산화시킨다[5].

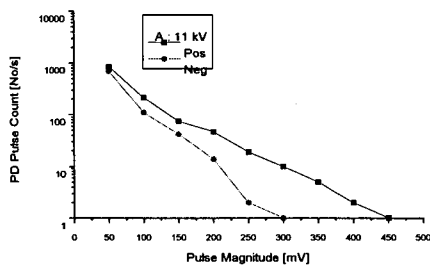
그림 4에서 나타낸 바와 같이 B상의 부분방전 패턴을 분석하면 그림 4(a)는 내부방전을 나타내고 그림 4(b), (c)는 내부방전과 슬롯방전이 혼합되어 나타나고 있다. 그림 5에서 나타낸 바와 같이 C상의 부분방전 패턴을 분석하면 그림 5(a), (b)는 내부방전을 나타내고 그림 5(c)는 슬롯방전으로 분석되었다.



(a) 6.35 kV

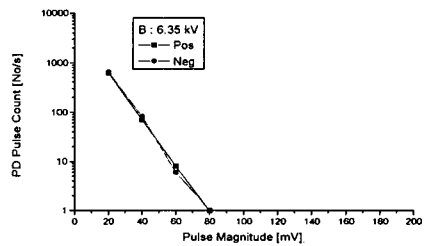


(b) 7.94 kV

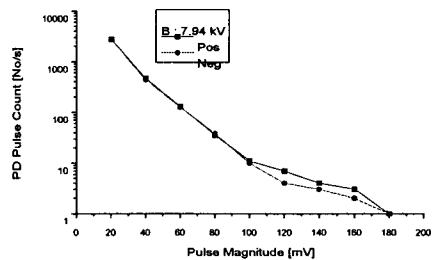


(c) 11 kV

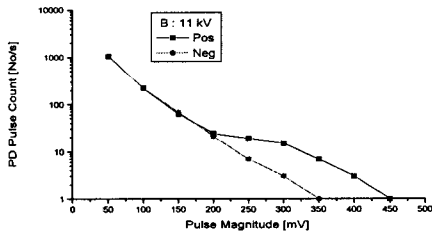
그림 3. A상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴



(a) 6.35 kV

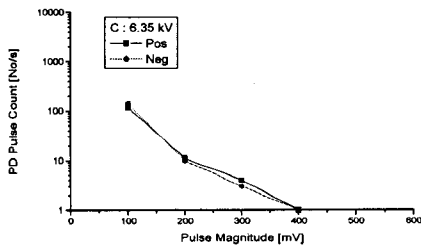


(b) 7.94 kV

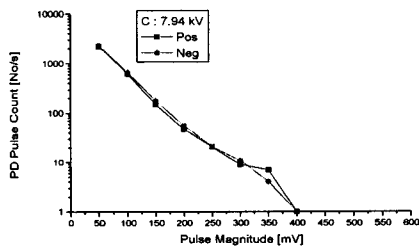


(c) 11 kV

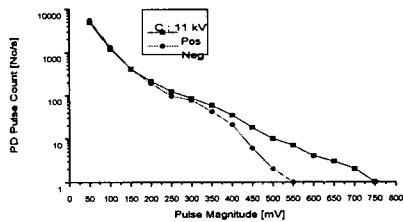
그림 4. B상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴



(a) 6.35 kV



(b) 7.94 kV



(c) 11 kV

그림 5. C상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴

### 3.2 교류전류, 유전정접 및 부분방전 분석

30년 이상 동안 운전한 수력발전기(11kV, 25MVA) 고정자 권선에서 각 상별로 분리하여 정지중에 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하였다. 그림 6은 교류전압을 11kV까지 증가시키면서 교류전류-전압 특성을 보였으며,  $\Delta I$ 가 A, B, C상에서 각각 1.01%, 1.01%, 0.55%로 나타났다.

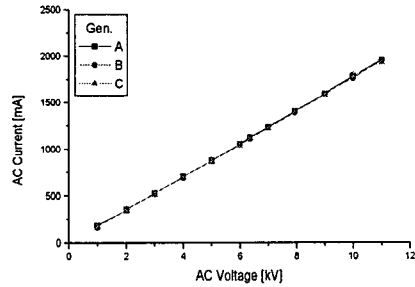


그림 6. 교류전류-전압 특성

유전정접 특성을 분석하면 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. 그림 7은 교류전압을 11kV까지 증가시키면서  $\tan\delta$ -전압 특성을 보였으며,  $\Delta \tan\delta$ 가 A, B, C상에서 각각 1.35%, 0.87%, 0.93%로 나타났다.  $\Delta \tan\delta$ 가 매우 작고 유전정접 특성이 양호하기 때문에 고정자 권선 절연재료의 내부가 양호하게 판단된다.  $\tan\delta$ -전압 특성에서 유전정접이 5kV에서 서서히 증가하고 있으며, 이 전압 부근에서 부분방전의 개시가 발생되고  $\tan\delta$  증가 패턴이 크지 않기 때문에 부분방전 발생량도 작을 것으로 예상된다.

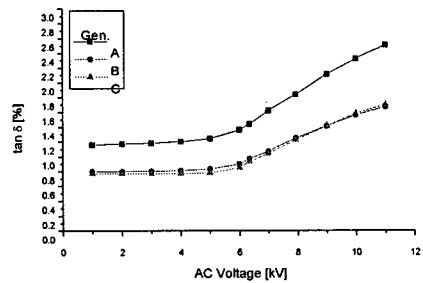


그림 7.  $\tan\delta$ -전압 특성

디지털 부분방전 측정기를 사용하여 부분방전 측정시 계통잡음은 A, B, C상에서 각각 274pC, 520pC, 1,400pC이며, 부분방전 개시전압이 A, B상에서는 발생하지 않고 C상에서만 9.8kV로 나타났다. 정격전압 11kV에서 부분방전 크기는 A, B, C상이 각각 350pC, 780pC, 1,700pC으로 측정되었다. PDA 진단결과와 마찬가지로 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 측정한 부분방전의 크기가 A상에서 가장 작고 C상에서 가장 높게 나타났다. 정격전압에서 측정된 부분방전 패턴은 A, B, C상 모두 슬롯방전이 우세하게 나타났다. 그리고 앞에서 설명한 바와 같이 교류전류-전압 특성에서  $\Delta I$  및  $\tan\delta$ -전압 특성에서  $\Delta \tan\delta$ 와 마찬가지로 부분방전의 크기도 매우 작기 때문에 이 발전기 고정자 권선은 절연열화가 거의 발생하지 않았으며, 현재 절연재료의 상태가 매우 양호하게 판정된다.

#### 4. 결론

수력발전기 정지중에 PDA를 이용하여 NQN과 부분방전 크기를 측정하고, 웨빙브리지와 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하여 고정자 권선에서 절연열화를 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 발전기의 상전압에서 정격전압까지 인가전압을 증가하면서 PDA를 사용하여 측정한 결과 전압증가에 따라 NQN과 부분방전 크기가 증가하고 있음을 확인하였다.

2. PDA와 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 각 상별로 측정한 부분방전 패턴은 거의 일치하였으며, 부분방전 크기는 A상에서 가장 작고 C상에서 가장 높게 분석되었다.

3. 발전기 고정자 권선을 정지중에 절연진단하여 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 세밀하게 분석한 결과 매우 양호하기 때문에 절연재료가 열화되지 않았음을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Partial Discharge Analyzer Analysis Report, ADWEL International Ltd., pp. 5-7, 1997.

2. J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 3, pp. 139-154, 1980.
3. H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069-1071, 1986.
4. G. C. Stone, B. A. Lloyd and S. R. Campbell, "On-Line Monitoring for Condition Assessment of Motor and Generator Stator Windings", IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp.94-103, 1994.
5. I. M. Culbert, H. Dhirani, G. C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 3-24~3-28, 1989.