

양수발전기 고정자 권선에서 운전중 및 정지중 부분방전 특성

김희동, 주영호, 윤대현·
한전 전력연구원, *청평양수발전기

On-Line and Off-Line Partial Discharge Properties in the Pumped Storage Generator Stator Windings

Hee-Dong Kim, Young-Ho Ju, Dea-Hen Yoon*
Korea Electric Power Research Institute, *Chungpyong Storage Power Plant

Abstract - Partial discharge(PD) tests were performed both when the pumped storage generator(rated 13.8kV and 220MVA) was on-line and off-line. This generator has been equipped with 12 bus coupler sensors in directional mode. PD tests were conducted using partial discharge analyzer(PDA), partial discharge meter(PDM) and digital partial discharge detector. PDA showed that the patterns of the normalized quantity number(NQN) and the partial discharge magnitude are in accord with on-line and off-line. The insulation condition was estimated by diagnostic tests(off-line) such as PD magnitude and dissipation factor.

1. 서 론

발전기의 다양한 운전조건과 절연열화 기구의 복잡성 때문에 열화상태를 정확히 판단하는 것은 어렵지만, 고압 발전기의 절연열화 판정기준을 근거로 보다 적절한 예측정비 및 잔존수명 예측에 관한 연구가 주로 1980년대부터 현재까지 수행되고 있다. 정지중 절연진단은 Simons, Yoshida 등에 의해 비파괴 시험을 통하여 측정된 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전에 의하여 고압 발전기의 절연열화 상태를 판정하였다[1, 2]. 한편, 1980년대 후반부터 운전중인 발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하여 절연열화 상태를 진단하는 연구가 본격적으로 이루어졌다. 수력발전기의 고정자 권선을 진단하는 부분방전 분석기(Partial Discharge Analyzer : PDA)가 캐나다의 FES사에서 개발되었다. 또한, IRIS사에서는 위상분석 기능이 추가된 PDA-partner를 개발하였으며, 1990년대 초반부터는 화력 발전기 고정자 권선을 진단하기 위해 터빈 발전기 분석기(Turbine Generator Analyzer : TGA)를 개발하여 사용되고 있다.

Stone 등은 운전중에 전동기와 발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위해서 전동기 및 수력 발전기에 버스 커플러(bus coupler)를 설치하고 PDA와 PDA-partner를 사용하여 절연진단을 수행하였다. 그리고 Holboll 등은 회전기 고정자 권선에 임의의 공극을 인위적으로 만들어 놓고 고정자 슬롯 커플러(Stator Slot Coupler : SSC)를 설치하여 TGA로 부분방전의 펄스를 측정하였다[3]. 화력 발전기에서는 고정자 슬롯에 커플러를 설치하고 TGA를 사용하여 부분방전을 측정함으로써 절연열화 상태를 평가하고 있다[4].

본 논문에서는 양수발전기(정격전압 13.8kV, 220 MVA)에 설치되어 있는 버스 커플러(bus coupler)와 부분방전 분석기를 이용하여 운전중에 부분방전을 측정하였다. 또한, 고정자 권선에 교류전압을 인가하면

서 정지중에 부분방전을 측정하여 운전중의 진단결과와 비교를 통해 방전크기의 변화를 고찰하고 유전정접과 부분방전에 의해 절연열화 상태를 분석하였다.

2. 시험방법

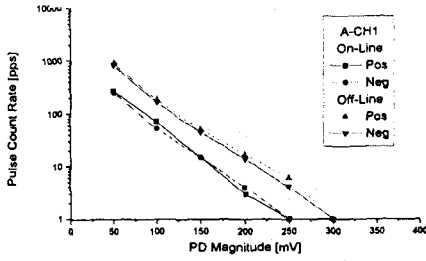
본 논문에서는 양수발전기 고정자 권선의 정지중 절연진단 시험을 위해 웨링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기(Digital Partial Discharge Detector)를 사용하였다. 웨링브리지는 전원장치(HV Supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(Resonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 발전기 고정자 권선에 웨링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 전원 잡음을 제거한 다음 신호를 커플링 유닛(Coupling Unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments TE 571)에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 정지중 및 운전중에 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 부분방전 분석기(Partial Discharge Analyzer : PDA, FES International Co.)를 사용하여 방전크기의 변화와 절연열화 상태를 분석하였다. 또한, 운전중에 PDM(Partial Discharge Meter)을 사용하여 부분방전의 크기를 상시감시 할 수 있으며, 정지중에는 전원장치에서 각 상별로 상전압(7.96kV)을 인가하면서 부분방전 분석기를 이용하여 측정하였다.

3. 시험결과 및 고찰

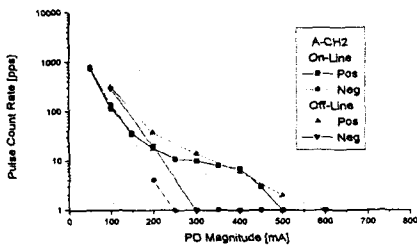
3.1 운전중 및 정지중 PDA 분석

양수발전기는 고정자 권선이 2병렬로 구성되어 있으며, 각 상당 4개씩 총 12개의 운전중 센서(bus coupler)가 설치되어 있다. 부분방전 측정시 입력되는 신호는 전송 시간차(time-of-flight) 방식에 의해 외부 잡음을 제거하고, 부분방전 신호의 측정을 용이하게 하기 위해서 발전기 외함에 단자함을 설치하여 6개의 커플러에서 전송되는 신호선을 인출하였다. 운전중에는 정격출력(200MW)에서 부분방전을 측정하였고, 정지중에는 상전압을 각 상별로 분리하여 인가하면서 측정된 결과를 그림 1, 그림 2와 그림 3에서 나타냈다. 운전중과 정지중에 측정된 NQN(Normalized Quantity Number)과 부분방전 크기(mV)가 다소 차이는 있지만, 그림에서 보인 바와 같이 부분방전 패턴은 거의 일치하고 있다. 부분방전의 패턴을 분석하면 A-CH1은 주절연 내부의 박리와 공극에서 부분방전이 발생하고 A-CH2는 반도체층에 의한 부분방전 형태를 나타내고 있다. B-CH1과 B-CH2는 반도체층에 의한 부분방전 형태를 나타내고 있으며, C-CH1, C-CH2는

권선과 웨지(wedge)에 의한 부분방전 형태를 나타내고 있다.

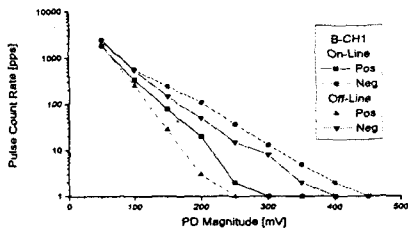


(a) A-CH1

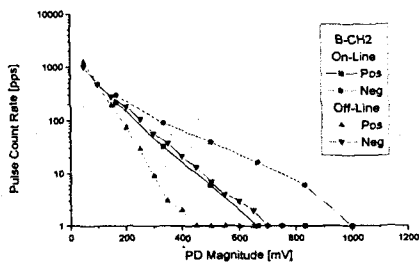


(b) A-CH2

그림 1. A상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴

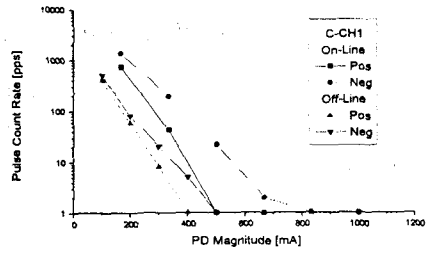


(a) B-CH1

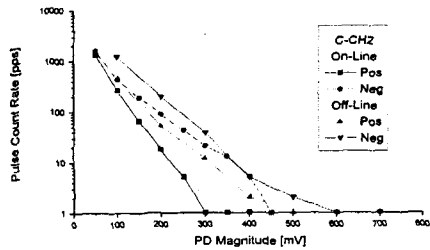


(b) B-CH2

그림 2. B상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴



(a) C-CH1



(b) C-CH2

그림 3. C상에서 PDA를 이용한 부분방전 패턴

표 1은 그림 1, 그림 2와 그림 3을 근거로 A, B, C 상의 CH1과 CH2에서 NQN과 부분방전 크기를 분리하여 나타냈다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 운전중과 정지중에 측정된 NQN과 부분방전의 크기가 B상에서 가장 크게 나타났으며, C상, A상 순서로 작아지고 있다. 따라서 B상에서 가장 많이 절연열화가 진행되었으며, C상, A상 순서로 열화가 작게 됨을 의미한다[5, 6]. 표 2는 운전중에 PDM을 사용하여 부분방전의 크기를 나타냈으며, A, B, C상의 CH1과 CH2에서 부분방전 크기를 측정된 결과 A상이 가장 크게 나타났으며, C상, B상 순서로 작아지고 있다.

표 1. 운전중 및 정지중 PDA 측정 결과

상별	측정방법	운전중		정지중		
		CH1	CH2	CH1	CH2	
A상	NQN	Pos	267	525	336	509
		Neg	235	286	330	233
	Max. PD	Pos	202	452	250	500
		Neg	200	202	250	220
B상	NQN	Pos	382	575	347	689
		Neg	627	1127	624	1148
	Max. PD	Pos	250	498	250	400
		Neg	400	800	350	650
C상	NQN	Pos	499	403	396	442
		Neg	861	661	525	641
	Max. PD	Pos	345	255	320	400
		Neg	510	405	410	500

표 2. 운전중 PDM 측정 결과

측정장치		상별	A상	B상	C상
			Max. PD [mV]	Max. PD [mV]	Max. PD [mV]
PDM	CH1		79	33	39
	CH2		47	2	25

3.2 정지중 유전정접과 부분방전 분석

대략 20년 동안 운전한 양수발전기(13.8kV, 220MVA) 고정자 권선에서 각 상별로 분리하여 정지중에 유전정접과 부분방전 등을 측정하였다. 유전정접 특성을 분석하면 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. 그림 4는 교류전압을 10.8kV까지 증가시키면서 $\tan\delta$ -전압 특성을 보였으며, $\Delta\tan\delta$ 가 A, B, C 상에서 각각 0.45%, 0.50%, 0.54%로 나타났다. $\Delta\tan\delta$ 가 매우 작고 유전정접 특성이 양호하기 때문에 고정자 권선 절연재료의 내부가 양호하게 판단된다. $\tan\delta$ -전압 특성에서 유전정접이 6.0kV에서 급격하게 증가하고 있으며, 이 전압 부근에서 부분방전의 개시가 발생되고 $\tan\delta$ 증가 패턴이 크지 않기 때문에 부분방전 발생량도 작을 것으로 예상된다.

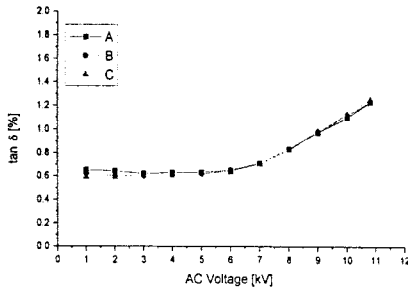


그림 4. $\tan\delta$ -전압 특성

그림 5는 부분방전-전압 특성을 나타냈는데, 전압이 증가함에 따라 유전정접 특성과 비슷하게 증가하고 있다. 부분방전 측정시 계통잡음은 각상에서 대략 995pC이며, 1000pC 개시전압이 A, B, C상에서 각각 4kV, 5kV, 6kV로 나타나고 실제로 5.8kV, 6.2kV, 5.9kV부근에서 부분방전이 크게 증가하였다. 부분방전 크기는 상전압에서 A, B, C상이 각각 5.9nC, 2.8nC, 3.7nC이며, 10kV에서 각각 7.9nC, 3.3nC, 4.2nC로 증가하였다. 따라서 정지중에 측정된 부분방전의 크기가 A상에서 가장 크게 나타났으며, C상, B상 순서로 작아지고 있다. 각 상별로 부분방전 패턴을 분석해 보면 A상은 2.8kV에서는 부코로나 방전이 개시되었다가 4.8kV에서 내부방전으로 전환되었으며, 다시 6.0kV에서 부코로나 방전이 나타났다가 6.6kV에서 내부방전으로 완전히 바뀌어 상전압까지 부분방전의 크기가 증가하고 있다. B상은 4.6kV에서 개시되어 5.8kV에서는 부코로나 방전이 나타나며, 6.0kV~7.0kV에서 내부방전으로 전환되어 상전압까지 증가하고 있다. C상은 5kV에서 내부방전이 개시되었고 크기도 1.1nC정도

를 유지하다가 5.8kV에서 갑자기 2.7nC으로 크게 증가하였으며, 상전압에서부터 10.8kV까지 표면방전을 나타내고 있다. 유전정접 특성과 마찬가지로 부분방전의 크기도 매우 작기 때문에 이 발전기 고정자 권선은 절연열화가 거의 없으며, 매우 양호한 절연재료로 판단된다.

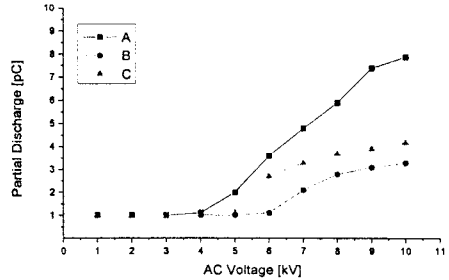


그림 5. 부분방전-전압 특성

4. 결 론

양수발전기를 운전중과 정지중에 NQN과 부분방전 크기를 측정하였고, 정지중에 부분방전과 유전정접을 측정하여 고정자 권선에서 절연열화를 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 운전중과 정지중에 부분방전 측정기를 사용하여 NQN과 부분방전 크기를 측정된 결과 다소 차이는 있지만, 각 상별로 분석된 부분방전 패턴은 거의 일치하고 있음을 확인하였다.

(2) 발전기 고정자 권선을 정지중에 절연진단하여 유전정접과 부분방전 등을 세밀하게 분석한 결과 매우 양호하기 때문에 절연재료 내부가 전혀 열화되지 않았음을 확인할 수 있었다.

(3) 운전중과 정지중에 부분방전 분석기를 사용하여 각 상별로 시험한 결과 B상이 가장 크고 A상이 가장 작게 나타났다. 그리고 운전중에 PDM과 정지중에 디지털 부분방전 측정기를 사용하여 측정된 결과 A상이 가장 크고 B상이 가장 작게 나타났다. 이와 같이 부분방전의 크기가 상반되게 나타났는데, 이는 향후 연구를 진행해야 할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 3, pp. 139-154, 1980.
- [2] H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069-1071, 1986.
- [3] J. T. Holboll, M. Henriksen, A. Jensen and F. Sorensen, "PD-Pulse Characteristics in Rotating Machine Insulation", IEEE International Symposium on Electr. Insul., pp. 322-326, 1994.

- [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] G. C. Stone, "The Use of Partial Discharge Measurements to Assess the Condition of Rotating Machine Insulation, IEEE Trans. Electr. Insul., Magazine Vol. 12, No. 4, pp. 23-27, 1996.
- [6] 주영호외, 발전기 수명평가 및 진단시스템 개발, 한국전력공사 전력연구원 pp. 8-20, 1997.