

대용량 터빈발전기 고정자 권선의 정지중 및 운전중 부분방전 특성

김희동, 이영준
한전 전력연구원

Off-Line and On-Line Partial Discharge Properties of Large Turbine Generator St

Hee-Dong Kim and Young-Jun Lee
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Off-line and on-line partial discharges were measured on a 828MVA, 22kV and direct hydrogen-cooled large turbine generator. Partial discharge tests were conducted using digital partial discharge detector(PDD) and turbine generator analyzer(TGA). PDD and TGA showed that off-line partial discharge pattern seems to be very similar to that found with on-line. Most of the partial discharge is originating with the stator slot in the three phases. As the partial discharge activity is very low, the stator insulation condition of this generator is very good.

과와 비교를 통해 부분방전 패턴에 의해 절연열화 상태를 분석하였다. 그리고 정지중과 운전중에 분석된 부분방전 패턴이 일치함을 확인하였다.

2. SSC 설치(5)

SSC 센서는 두께 2mm, 길이 52cm이며, 4kV 이상의 발전기, 조상기 및 대형 전동기에 설치가 가능하다. SSC의 차단 주파수(cut-off frequency) 특성은 100MHz에서 1GHz이며, 특성 임피던스는 50Ω이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 SSC 센서는 슬롯파렛트(wedge) 하부에 있는 리플 스프링(ripple spring)과 슬롯 스트립(slot strip) 사이에 설치한다. 발전기 고정자 권선에 18개(1상당 6개)의 SSC를 설치하였으며, 발전기 출력단의 고압 권선에 설치함으로써 절연진단회 효율을 극대화할 수 있다.

1. 서 론

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. 터빈발전기 고정자 권선 슬롯에 SSC(stator slot coupler) 센서를 설치하고 TGA(turbine generator analyzer)를 사용하여 운전중(on-line)에 부분방전을 측정하고 있다[1].

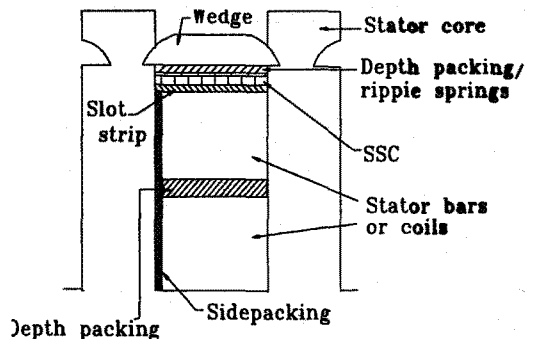


그림 1. SSC를 설치한 고정자 권선의 단면도

따라서 운전중인 터빈발전기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하여 절연열화 상태를 진단하는 연구가 본격적으로 이루어졌으며, Holboll 등은 회전기 고정자 권선에 임의의 공극을 인위적으로 만들어 놓고 고정자 권선에 SSC를 설치하여 TGA로 부분방전의 펄스를 측정하였다[2]. 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.

3. 정지중 및 운전중 부분방전 측정법

발전기의 다양한 운전조건과 절연열화 기구의 복잡성 때문에 열화상태를 정확히 판단하는 것은 어렵지만, 발전기의 절연열화 판정기준을 근거로 보다 적절한 예측정비 및 잔존수명 예측에 관한 연구가 주로 1980년대부터 현재까지 수행되고 있다. 정지중(off-line) 절연진단은 Simons, Yoshida 등에 의해 비파괴 시험을 통하여 측정된 성극지수, 교류전류, 유전 정점 및 부분방전에 의하여 발전기의 절연열화 상태를 판정하고 있다[3, 4]. 이 중에서 부분방전은 발전기 고정자 권선에서 절연열화의 원인과 징후를 나타내는 중요한 요소이다.

본 논문은 정지중에 발전기 고정자 권선의 절연진단 시험을 위해 슈어링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기를 사용하였다. 슈어링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 발전기 고정자 권선에 슈어링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 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.

본 논문에서는 대용량 터빈발전기(828MVA, 22kV) 정지중에 상별로 고정자 권선을 분리하여 교류전압을 인가하면서 부분방전을 측정하였다. 또한 발전기 고정자 권선에 SSC를 설치하고 TGA를 이용하여 운전중에 상별로 부분방전을 측정하였으며, 정지중의 측정결

운전중에 고정자 권선의 부분방전 시험을 위해 TGA(turbine generator analyzer, IRIS Power Engineering INC.)를 사용하여 측정한다. 부분방전에 의해 전자파(electromagnetic wave)가 발생되면 SSC는 안테나와 같은 기능을 하여 전자파의 진행에 따른 시간차(time of arrival)에 의해 발생된 두개의 신호를 양끝에서 RG-178 케이블을 통하여 단말권선 방전(endwinding dischargTGA를 e)과 슬롯방전(slot discharge)을 구별할 수 있는 사용하여 방전패턴과 절연열화 상태를 분석하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 정지중 교류전류, 유전정점 및 부분방전 분석

그림 2는 약 3년 동안 운전한 대용량 터빈발전기(828MVA, 22kV)의 교류전류-전압 특성을 나타냈으며, ΔI 가 각각 0.17%, 0.40%, 0.38%으로 분석되어 양호하게 판정되었다. 일반적으로 ΔI 가 작을수록 절연재료의 상태를 양호하게 판정한다.

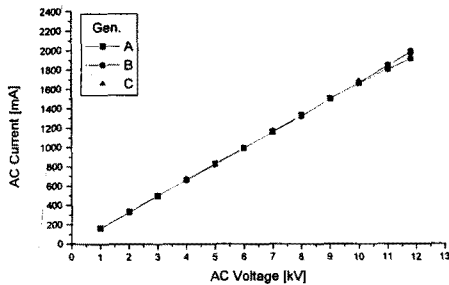


그림 2. 발전기의 교류전류-전압 특성

그림 3은 교류전압을 상전압까지 증가시키면서 $\tan\delta$ -전압 특성을 나타냈으며, 유전특성을 분석하여 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. $\Delta \tan\delta$ 가 A, B, C상에서 각각 0.93%, 0.86%, 0.88%로 매우 양호하게 나타났다. 유전정점이 6kV에서 서서히 증가하고 있으며, 이 전압 부근에서 부분방전의 개시가 발생되고 $\tan\delta$ 증가 패턴이 완만하기 때문에 부분방전 발생량도 크지 않을 것으로 예상된다.

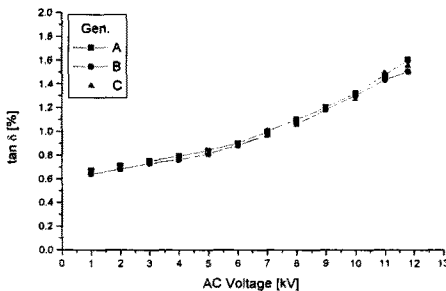
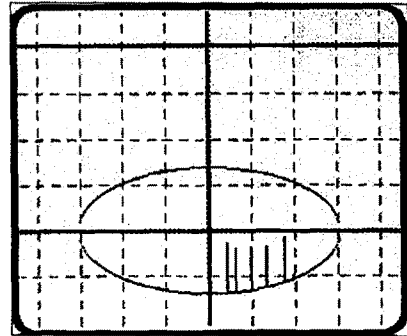
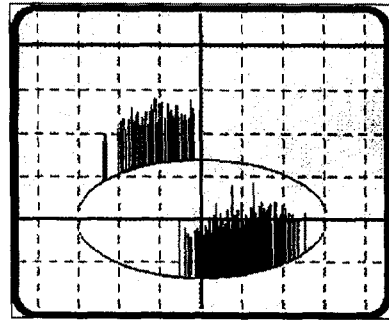


그림 3. 발전기의 $\tan\delta$ -전압 특성

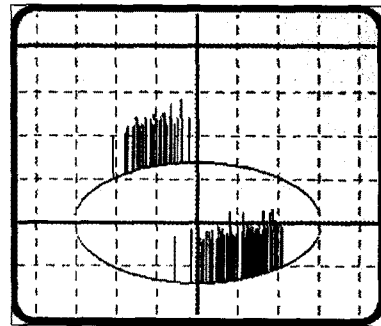
그림 4는 발전기 고정자 권선에서 상전압(12.7kV)을 인가하였을 때 A, B, C상의 부분방전 크기가 각각 4,500pC, 4,300pC, 3,300pC으로 측정되었다. 부분방전 패턴을 분석하면 A상에서는 슬롯방전만이 나타났으며, B, C상은 슬롯방전이 우세한 복합방전으로 분석되었다. 슬롯방전은 발전기 운전중 고정자 권선 직선부에서 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로 마모되어 반도체층이 손상되었거나 혹은 제작시에 틈새가 발생하여 철심과 권선 사이에 방전을 일으킨다. 복합방전은 주절연과 소절연 사이의 보이드 혹은 사소한 결함을 갖는 도체표면에서 방전과 슬롯방전이 복합되어 나타나지만 슬롯방전이 우세하게 분석되었다. 따라서 부분방전 크기와 패턴을 분석한 결과 이 발전기 고정자 권선의 절연재료는 매우 양호하게 나타났다.



(a) A상(PD-Range : 2.0nC/div)



(b) B상(PD-Range : 2.0nC/div)



(c) C상(PD-Range : 2.0nC/div)

그림 4. 발전기의 부분방전 패턴

4.2 운전중 부분방전 분석

그림 5, 그림 6 및 그림 7은 운전중인 발전기에서 SSC로부터 부분방전 펄스를 TGA로 측정된 결과를 나타냈다. 이들 결과는 계획예방정비 6개월 후에 측정하였으며, 정극성(positive)과 부극성(negative) 방전으로 분류하여 표시하였다. 그림 5는 고정자 권선 A상에서 부분방전을 나타냈으며, 단말권선으로부터 부분방전은 전혀 나타나지 않고 슬롯으로부터 부분방전 활동이 매우 낮게 분석되었다.

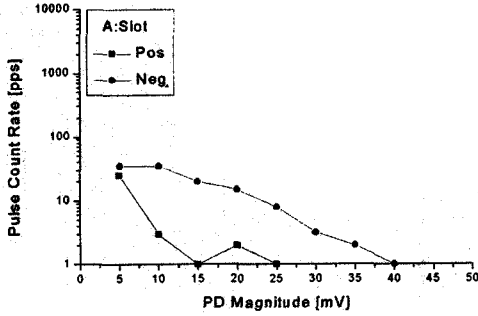
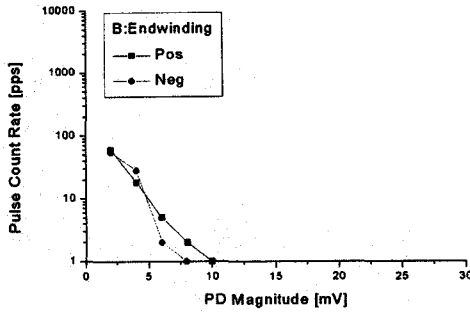
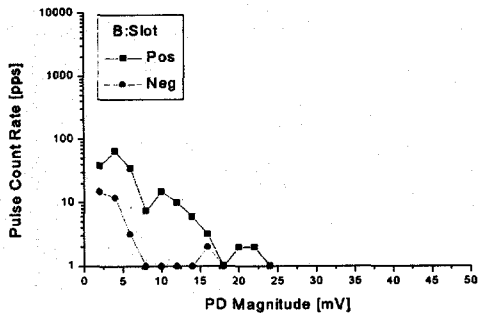


그림 5. 운전중인 발전기 A상에서 부분방전



(a) 단말권선 방전



(b) 슬롯방전

그림 6. 운전중인 발전기 B상에서 부분방전

그림 6과 그림 7은 B, C상에서 부분방전을 나타냈으며, 단말권선과 슬롯으로부터 부분방전 활동이 역시 매우 낮게 분석되었다. 표 1은 발전기 고정자 권선에서 전체적인 부분방전 활동을 파악하기 위해 A, B, C상에서 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(mV)를 측정하여 나타냈다. NQN과 부분방전 크기가 A상에서 가장 크고 B상, C상 순으로 작게 분석되었다. 그리고 부분방전 크기를 정지중 진단결과와 비교할 때 대략적인 크기는 3,300~4,500pC로 나타나기 때문에 매우 양호한 상태를 알 수 있었다.

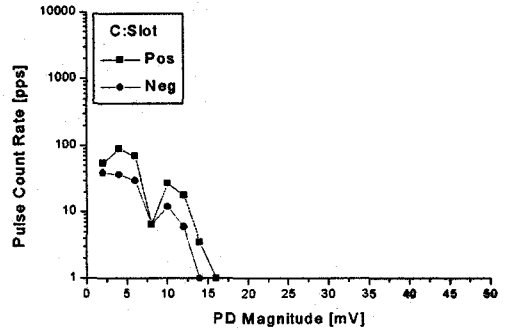


그림 7. 운전중인 발전기 C상에서 부분방전

표 1. 발전기 고정자 권선의 NQN과 부분방전 크기

		Endwinding		Slot	
		Pos	Neg	Pos	Neg
A	NQN	0	0	11	35
	QM[mV]	0	0	7	21
B	NQN	8	6	5	19
	QM[mV]	5	5	4	12
C	NQN	3	8	18	14
	QM[mV]	0	0	12	10

5. 결 론

운전연수가 약 3년 이상된 대용량 터빈발전기 고정자 권선에서 절연상태를 평가하기 위해 정지중 및 운전중에 부분방전을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 발전기의 교류전류-전압 특성에서 3상이 모두 직선적으로 일치하고 $\tan\delta$ -전압 특성에서 $\Delta\tan\delta$ 가 양호하게 분석되었다. 그리고 $\tan\delta$ -전압 특성에서 부분방전의 개시전압과 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있었다.

(2) 정지중과 운전중에 부분방전 패턴을 분석한 결과 3상 모두 슬롯방전이 우세하게 나타났으며, 부분방전 크기가 A상에서 가장 크고 B상, C상 순으로 작게 분석되었다.

(3) 발전기 고정자 권선에서 교류전류와 유전정접 특성이 양호하고 부분방전 활동이 낮게 측정되어 절연상태가 매우 양호하게 분석되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. R. Campbell, G. C. Stone, H. G. Sedding, G. S. Klempner, W. McDermid and R. G. Bussey, "Practical On-Line Partial Discharge Tests for Turbine Generators and Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp. 281-287, 1994.
- [2] J. T. Holboll, M. Henriksen, A. Jensen and F. Sorensen, "PD-Pulse Characteristics in Rotating Machine Insulation", IEEE Intenational Symposium on Electr. Insul., pp. 322-326, 1994.
- [3] J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 3, pp. 139-154, 1980.
- [4] H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069-1071, 1986.
- [5] H. G. Sedding, S. R. Campbell, G. C. Stone, and G. S. Klempner, "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp. 700-706, 1991.