

공랭식 가스터빈 발전기의 운전중 부분방전 분석

(Analysis of On-Line Partial Discharge in Air-Cooled Gas Turbine Generator)

이은춘* · 공태식 · 김재철 · 김희동**

(Eun-Chun Lee · Tae-Sik Kong · Jae-Chul Kim · Hee-Dong Kim)

Abstract

The on-line partial discharge (PD) in stator windings of air-cooled gas turbine (GT) generator (119.2MVA, 13.8kV) is measured and analyzed in this paper. This generator was designed by global vacuum pressure impregnation (VPI). The generator failed two times at top bar (16T) of phase B in the stator slot. Six epoxy-mica capacitors were installed in three phases of GT generator. On-line PD test was performed on GT generator using turbine generator analyzer (TGA). TGA showed that the normalized quantity number (NQN) and the PD magnitude(Q_m) were high in phase B. Internal discharges were generated in phases A, B and C. The trend analysis of NQN and Q_m value are obtained in order to monitor the insulation condition in GT generator stator windings. Phases A and C were in good condition. But phase B had deteriorated significantly.

Key Words : On-Line, Partial Discharge, Generator, Stator Windings, TGA

1. 서 론

국내에서 1990년대 초에 건설된 복합화력발전소의 운전년수가 20년 이상 경과함에 따라 발전기에 의한 고장발생이 서서히 증가하는 추세에 있다. 공랭식 가

스터빈 발전기의 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부에 보이드(void)가 발생하여 열화가 진행하다가 최종적으로 절연파괴에 도달 한다[1].

또한, 발전기 제작비용을 감소하기 위해 전(global)진공함침(vacuum pressure impregnation; VPI) 방식을 사용함에 따라 14년 정도 운전 후에 절연파괴가 발생하였다[2]. 가스터빈 발전기 고정자 권선의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적 손실이 매우 크다. 따라서 미국, 캐나다 및 일본 등에서는 발전기 고정자 권선의 절연열화 특성을 분석하기 위하여 운전중(on-line)에 부분방전(partial discharge) 진단시험을 통해 건전성을 평가하고 있다.

* 주저자 : 한국수자원공사 K-water연구원, 차장
** 교신저자 : 한국전력공사 전력연구원, 책임연구원
* Main author : Korea Water Resources Corporation. General Manager
** Corresponding author : Korea Electric Power Corporation. Principal Researcher
Tel : 042-870-7670, Fax : 042-870-7699
E-mail : esse@kwater.or.kr
접수일자 : 2014년 1월 28일
1차심사 : 2014년 1월 30일, 2차심사 : 2014년 3월 28일
심사완료 : 2014년 5월 13일

부분방전은 절연열화 정도를 나타내는 중요한 표시 인자이며, 운전중에 부분방전 펄스 수, 크기 및 패턴 등을 종합적으로 분석하여 절연상태를 평가하고 있다 [3-5].

발전기 고정자 권선을 운전 중에 진단하는 TGA (turbine generator analyzer) 장비가 1980년 캐나다에서 개발되어 에폭시-마이카 커패시터(epoxy-mica capacitors)를 이용한 부분방전을 주기적으로 측정하고 있다[6]. TGA장비는 절연재료 내부의 국부적인 열화 상태를 파악하기 위해 NQN(normalized quantity number)과 최대부분방전 크기(Q_m , mV)를 측정하여 방전 패턴과 추이(trend)를 분석함으로써 사전에 결함 여부를 예측할 수 있다.

본 연구에서는 14년 이상 운전된 공랭식 가스터빈 발전기(119.2MVA, 13.8kV) 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 에폭시-마이카 커패시터를 설치하고 운전중에 TGA를 이용하여 NQN, Q_m 의 크기 및 부분방전 패턴을 종합적으로 분석하였다.

2. 시험방법

공랭식 가스터빈 발전기(119.2MVA, 13.8kV) 고정자 권선 A, B 및 C상은 에폭시-마이카 커패시터 C1, C2(80pF, IRIS Power Engineering) 즉 각 상당 2개씩 총 6개의 커패시터를 설치하였다[7]. 그림 1에 나타난 바와 같이 A, B 및 C상의 C1은 발전기(machine) 고정자 권선에서 발생하는 부분방전을 측정한다. 그리고 C2는 차단기, 스위치기어(switchgear) 및 변압기 등과 같은 시스템(system) 측에서 발생하는 외부 잡음(noise)을 측정한다. A, B 및 C상의 커패시터에서 단자함까지 부분방전 신호의 도착시간은 각각 10ns, 13ns 및 14ns이다. 그림 2에 나타난 바와 같이 6개의 에폭시-마이카 커패시터에서 부분방전을 측정할 수 있도록 전압신호(mV)를 전송하기 위해 동축케이블을 인출하여 공랭식 가스터빈 발전기 외부의 단자함(junction box)에 연결하였다. 단자함에서 M은 machine(C1), S는 system(C2)을 의미하며, 부분방전 분석기(turbine generator analyzer : TGA-B, IRIS Power Engineering)와 노트북 컴퓨터를 연결하여

NQN, Q_m 의 크기 및 부분방전 패턴을 분석하고 주기적인 추이 관리를 통해 절연열화 상태를 평가하였다.



그림 1. 에폭시-마이카 커패시터
Fig. 1. Epoxy-mica capacitors

TGA-B는 부분방전 펄스 수, 크기 및 위상을 2차원과 3차원으로 표시할 수 있으며, 부분방전 패턴을 분석하여 결함발생 원인을 예측할 수 있다. TGA-B의 주파수 대역은 0.1~350MHz(-3dB), 측정범위는 $\pm 20 \sim \pm 4,000$ mV이다. 부분방전 시뮬레이터가 내장되어 있고 소프트웨어는 Windows XP 또는 98을 사용할 수 있다. 1ns 만큼 짧은 라이즈 타임(rise-time)을 갖는 부분방전 펄스도 측정이 가능하며, 전형적으로 발전기와 고압전동기 고정자 권선의 부분방전은 1~5ns의 라이즈 타임을 갖는다[8].



그림 2. TGA 측정장비
Fig. 2. Turbine Generator Analyzer(TGA)

3. 가스터빈 발전기의 운전특성

표 1은 공랭식 가스터빈 발전기의 정격을 나타내었으며, 전 VPI 방식으로 제작되었다.

표 1. 가스터빈 발전기의 정격
Table 1. The rating of gas turbine generator

정격용량	119.2MVA	정격전압	13,800V
정격전류	4,987A	역률	0.9
회전수	3,600rpm	여자전압	DC 252V
여자전류	1,176A	제작사	ABB
절연등급	F종	제작년도	1998

가스터빈 발전기는 기동해서 20~25분 만에 전부하로 출력을 증발할 수 있고, 기동정지 횟수가 빈번하여 열적 사이클(thermal cycle)에 의해 바(bar)와 철심 사이의 레진 결합(resin bond) 부분에서 마모가 발생하고, 시간이 경과함에 따라 바가 미세하게 움직이게 된다. 특히 전 VPI 방식으로 제작된 가스터빈 발전기는 빈번한 기동정지와 진동에 의해 바의 표면이 슬롯 내부에서 미세하게 이동하여 반도체성 테이프(semiconducting tape)가 손상된다. 따라서 바와 철심 사이에서 보이드(void)가 생성됨에 따라 부분방전이 발생하며, 열적 사이클에 의해 보이드의 크기가 커짐에 따라 열화가 진행되어 절연파괴를 가속화시킨다[3].

국내에도 전 VPI 방식으로 제작된 가스터빈 발전기 26대가 운전중에 있다. 운전년수가 20년 이상 경과함에 따라 현재 운전중인 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 정지중에 측정된 부분방전 크기가 30,000pC 이상을 나타내고 있다. 이러한 가스터빈 발전기는 주기적으로 정지중과 운전중에 절연진단 시험을 수행하여 부분방전 크기의 변화추이를 관리할 필요가 있다.

4. 시험결과 및 고찰

운전중인 공랭식 가스터빈 발전기 고정자 권선 B상에서 절연파괴가 2번 발생되어 운전중에 주기적으로 절연상태를 분석하기 위해 에폭시-마이카 커패시터를

설치하였다. 그림 3에서 나타낸 바와 같이 2012년 1월에 가스터빈 발전기 B상 고정자 권선의 탑 바(top bar, 16T)의 내부결합과 반도체층 마모로 인해 최종적으로 슬롯내부에서 절연파괴가 발생하였다.



그림 3. 발전기 고정자 바(16T)의 절연파괴
Fig. 3. Insulation breakdown of generator stator bar

표 2. NQN과 Q_m의 크기
Table 2. The magnitude of NQN and Q_m

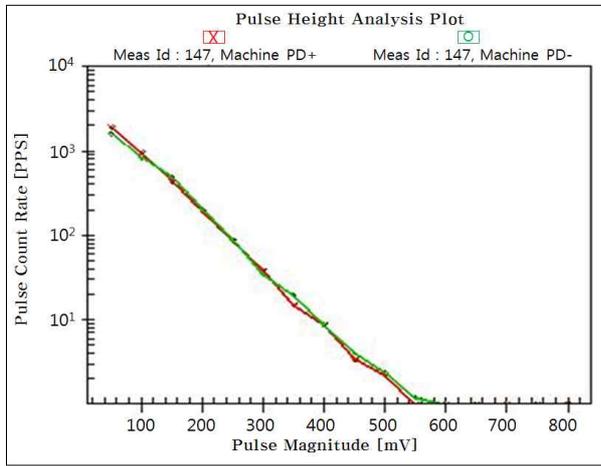
구분		측정결과				
		'13.1.23	'13.5.9	'13.7.23	'13.12.23	
A상	NQN	+	1,017	698	759	884
		-	1,011	727	790	895
	Q _m (mV)	+	448	333	348	388
		-	474	304	363	394
B상	NQN	+	1,331	872	818	1,180
		-	1,226	880	742	1,035
	Q _m (mV)	+	640	419	349	530
		-	592	399	327	472
C상	NQN	+	423	258	495	470
		-	422	259	491	401
	Q _m (mV)	+	213	144	278	235
		-	218	143	268	203

TGA-B를 사용하여 운전중에 부분방전 크기의 변화를 측정하였으며, NQN과 최대 부분방전 크기(Q_m)

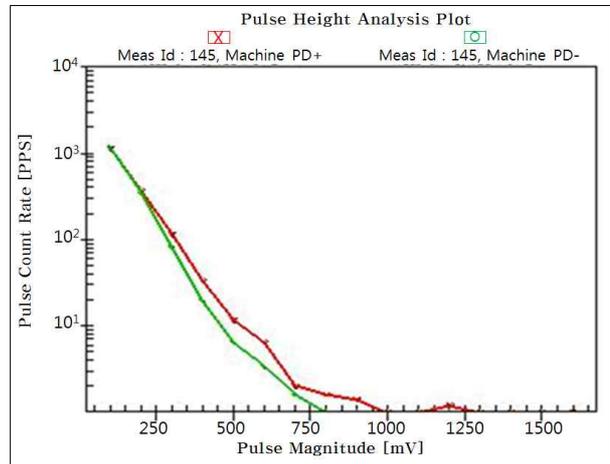
의 분석 결과를 표 2에 나타내었다. 2013년 1월 23일에 측정된 진단결과는 공랭식 가스터빈 발전기 고정자 권선의 절연과괴로 인해 정비작업과 레진주입 작업을 마치고 계통 병입 후에 1주일 정도 지나서 바로 데이터를 측정하였다.

가스터빈 발전기 고정자 권선 A상 Q_m 의 크기가 정극성 448mV, 부극성 474mV이며, B상 Q_m 의 크기가 정극성 640mV, 부극성 592mV로 매우 높게 측정되었다. 발전기 A상과 B상은 레진주입 영향으로 인해

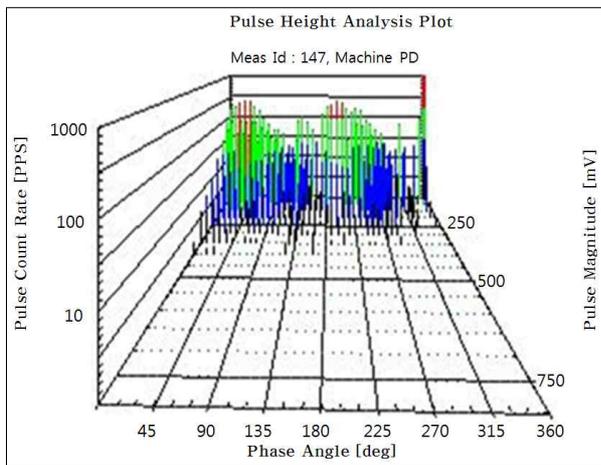
Q_m 의 크기가 초기에는 높게 나타나지만 운전시간이 경과함에 따라 줄열(Joule heat)에 의해 감소한다[8]. Q_m 의 크기가 450mV 이상으로 측정되면 절연열화로 판정하고 있다[9]. 그러나 C상 Q_m 의 크기는 정극성 213mV, 부극성 218mV로 측정되어 양호하게 판정되었다. 따라서 운전 중에 부분방전 진단 데이터를 종합적으로 분석한 결과 공랭식 가스터빈 발전기 고정자 권선 A상은 절연열화가 서서히 진행되고 있다. B상은 절연열화가 상당히 진행되었으며, C상은 양호



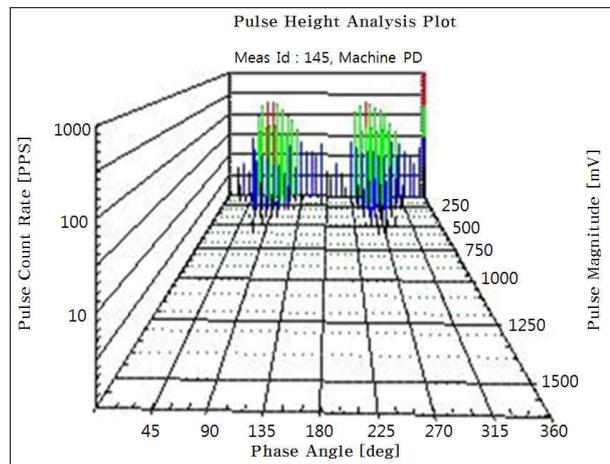
(a) 2차원



(a) 2차원



(b) 3차원



(b) 3차원

그림 4. A상의 부분방전 패턴
Fig. 4. PD patterns of A phase

그림 5. B상의 부분방전 패턴
Fig. 5. PD patterns of B phase

한 상태임을 확인할 수 있었다. 2013년 1월 23일과 7월 23일에 측정된 결과를 비교할 때 발전기 A상과 B상은 초기 값보다 낮고 C상은 초기 값과 유사하게 측정되었다.

그림 4, 그림 5 및 그림 6은 2013년 12월 23일 발전기 운전중에 부분방전 크기를 측정하여 교류 한주기에 표시하였으며, TGA-B를 사용하여 측정된 결과를 원문대로 나타내었다. A, B상에서 Q_m 의 크기가 2013년 7월 23일에 비해 대략 1.1~1.5배 정도 증가하였다. 그림 4 (a), 5 (a) 및 6 (a)는 부분방전 펄스 수[Pulse Count Rate (PPS) : NQN]와 크기[Pulse Magnitude (mV) : Q_m]를 2차원으로 분석하였으며, 그림 4 (b), 5 (b) 및 6 (b)는 부분방전 펄스 수, 크기 및 위상[Pulse Angle (deg)]을 3차원으로 나타내었다.

표 2와 그림 4 (a), 5 (a) 및 6 (a)에 나타낸 바와 같이 발전기 A상은 정극성(388mV)과 부극성(394mV)을 비교할 때 정극성과 부극성이 거의 비슷하게 나타나 부분방전 패턴이 내부방전으로 분석되었다[8].

가스터빈 발전기 고정자 권선 B, C상도 역시 내부방전을 나타내었다. 빈번하게 기동정지를 반복하는 가스터빈 발전기 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부에 보이드가 생성된다.

앞에서 설명한 바와 같이 발전기 고정자 권선 B상은 주절연물 내부의 결함과 슬롯내부에서 반도체층 마모로 인해 2번 절연과피가 발생하였다.

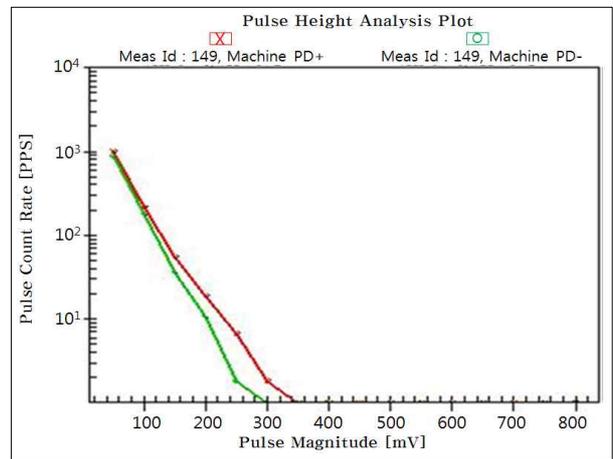
특히 내부방전은 열적 열화에 의해 주 절연재료 내부에서 보이드가 생성되어 부분방전이 발생하고 있으며, 발전기 혹은 고압전동기 등에서 거의 60~70% 정도를 점유하고 있다[8].

따라서 공랭식 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 정지중과 운전중에 부분방전 특성을 종합적으로 분석한 결과 A상과 C상은 양호하고 B상은 절연열화가 심각하게 진행되고 있기 때문에 주기적으로 운전중에 부분방전 크기를 진단하여 추이를 관리할 필요가 있다. 초기값인 정극성 640mV, 부극성 592mV에 비해 부분방전 크기가 갑자기 2~3배 증가할 경우에 요주의 상태로 판정한다[8]. 발전기 고정자 권선에서 절연열화가 예측되기 때문에 사전에 권선 교체 작업을 준비해

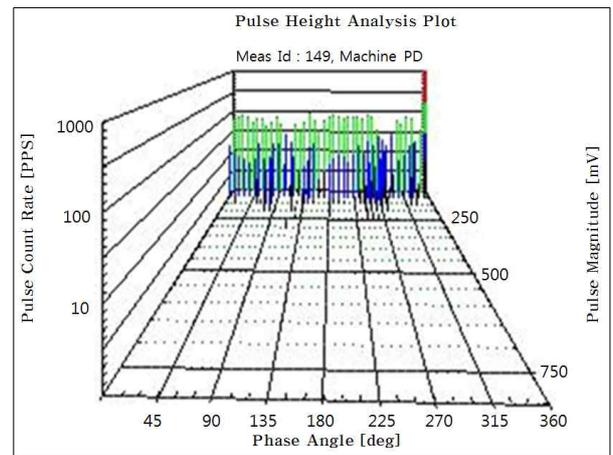
야 한다.

운전중 절연과피가 2년 사이에 2번 발생되었던 가스터빈 발전기 고정자 권선 B상에서 2차원의 부분방전 패턴 추이를 그림 7 (a)~(d)에 나타내었다. 2013년 1월 23일부터 12월 23일까지 4회 부분방전을 측정된 결과 모두 정극성이 부극성에 비해 약간 크게 측정되었다. 정극성이 지속적으로 커져서 부극성에 비해 1.5배 이상 증가하면 슬롯방전이 발생한다[8].

따라서 가스터빈 발전기 고정자 권선의 주요한 결함부는 주절연물 내부이며, 권선 표면의 반도체층 마모도 진행되고 있는 것으로 판단할 수 있다.



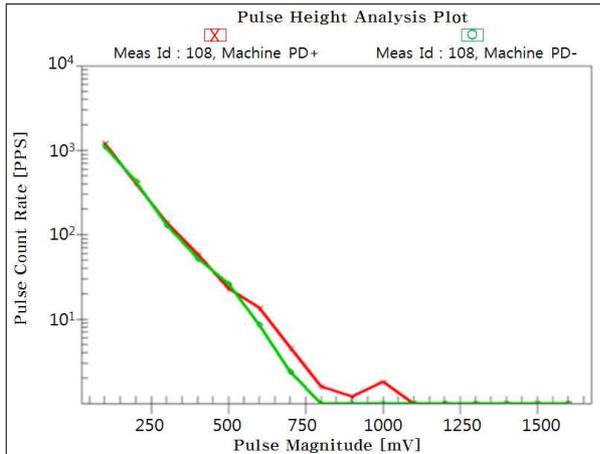
(a) 2차원



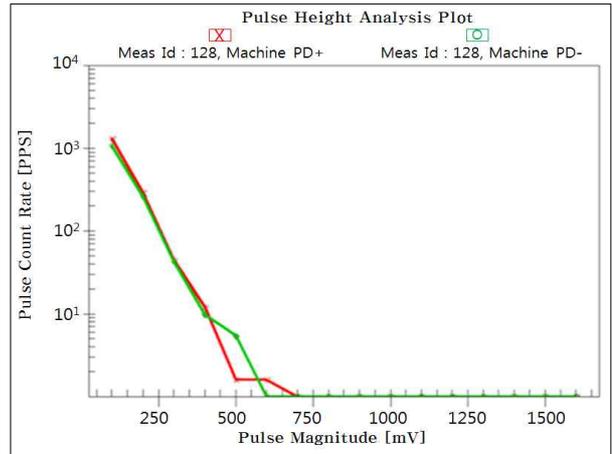
(b) 3차원

그림 6. C상의 부분방전 패턴
Fig. 6. PD patterns of C phase

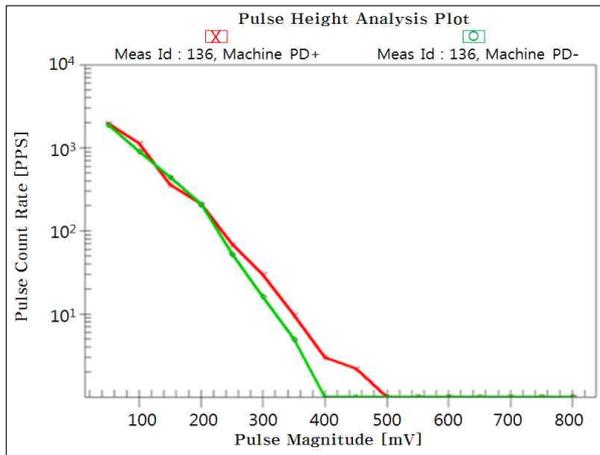
의 유사하게 측정됨에 따라 부분방전 패턴이 내



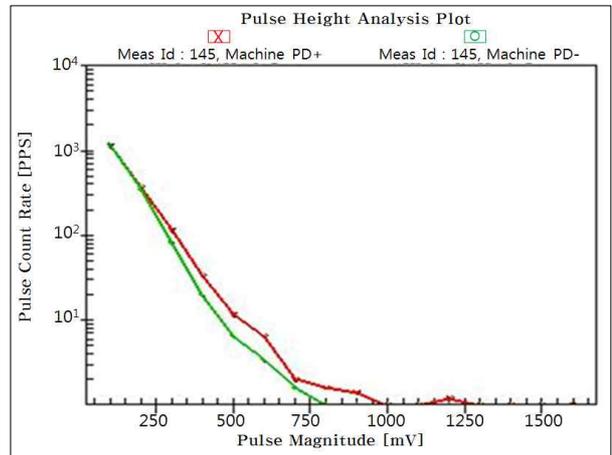
(a) '13. 1. 23. 측정 값



(b) '13. 5. 9. 측정 값



(c) '13. 7. 23. 측정 값



(d) '13. 12. 23. 측정 값

그림 7. B상에서 부분방전 패턴의 추이
Fig. 7. The trend of PD patterns in B phase

5. 결 론

14년 이상 동안 운전된 공랭식 가스터빈 발전기 (119.2MVA, 13.8kV) 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 운전중에 부분방전 시험을 수행하였다. 운전중에 TGA-B를 이용하여 NQN과 Q_m 의 크기 및 부분방전 패턴을 종합적으로 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 운전중 진단결과 발전기 A상, B상 및 C상에서 Q_m 의 크기는 정극성 펄스와 부극성 펄스가 거

부방전으로 분석되었다. 따라서 공랭식 발전기 고정자 권선 주절연재료 내부의 보이드에서 부분방전이 발생되고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 2012년 1월에 가스터빈 발전기 고정자 권선 B상의 탐 바(top bar, 16T)의 내부결함과 반도전층 마모로 인해 최종적으로 슬롯내부에서 절연과피가 발생하였다.

- (2) 운전중에 발전기 고정자 권선에서 부분방전 추이를 종합적으로 분석한 결과 A상 및 C상은 절연상태가 양호하며, B상은 절연열화가 서서히

진행되고 있기 때문에 주기적으로 NQN과 Q_m 를 측정하여 추이를 관리할 필요가 있다. 그리고 Q_m 의 초기값인 정극성 640mV, 부극성 592mV에 비해 급격하게 증가할 경우에는 절연열화가 예측되어 사전에 발전기 고정자 권선의 교체 계획을 수립해야 한다.

본 연구를 통하여 국내 최대전력 수요관리에 신속히 대응하여 전력수급의 안정성 향상에 기여도가 높은 가스터빈 발전기의 중요성을 재인식 할 수 있었다. 향후에는 20년 이상 장기간 사용 중인 가스터빈 발전기 고정자 권선을 실시간으로 감시하는 진단시스템을 개발하여 절연파괴를 사전에 예측하기 위한 판정기준 정립에 관한 연구가 필요하다.

References

[1] R. Morin, R. Bartnikas and P. Menard, "A Three-Phase Multi-Stress Accelerated Electrical Aging Test Facility for Stator Bars", IEEE Trans. on Electrical Conversion, Vol. 15, No. 2, pp. 149~156, 2000.

[2] G. Griffith, S. Tucker, J. Milsom and G. C. Stone, "Problems with Modern Air-Cooled Generator Stator Winding Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No. 2, pp. 6~10, 2000.

[3] Hee-Dong Kim, Byong-Han Kim, "Properties of On-Line Partial Discharge in Hydrogenerator Stator Windings", The Transactions of KIEE, Vol. 55C, No. 4, pp. 172~177, 2006.

[4] Jeong-Ho Chang, Dong-Keun Lee, Heung-Ho Lee, "Site Evaluation and Application of the On-line and Off-line Test for the 13[kV] Class Hydropower Generator Stator Windings", Journal of the KIEE, Vol. 25, No. 11, pp. 73~82, 2011.

[5] W. McDermid and J. C. Bromley, "Experience with Directional Couplers for Partial Discharge Measurements on Rotating Machines in Operation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 175~181, 1999.

[6] G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. McDermid, "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Rotating Machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp. 567~577, 1995.

[7] Hee-Dong Kim, Gyu-Hyun Yang, Young-Ho Ju, "Assessment of Insulation Condition in Gas Turbine Generator Stator Windings", The Transactions of KIEE, Vol. 59, No. 8, pp. 1423~1428, 2010.

[8] G. C. Stone, Partial Discharge Seminar, Iris Power Engineering Inc., Vol. 1, pp. 56~78, 2005.

[9] G. C. Stone and V. Warren, "Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating-Machine Stator Windings", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 42, No. 1, pp. 195~200, 2006.

◆ 저자소개 ◆



이은춘(李殷春)

1965년 2월 2일생. 1992년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 2006년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2013년 숭실대학교 대학원 전기공학과(박사 수료). 현재 한국수자원공사 K-water연구원 차장.
Tel : 042-870-7670
E-mail : esse@kwater.or.kr



공태식(孔太植)

1972년 2월 27일생. 1997년 충북대학교 전기공학과 졸업. 2004년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원.
Tel : 042-865-7573
E-mail : kongts@kepco.co.kr



김재철(金載哲)

1957년 3월 1일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년 ~ 현재 숭실대학교 전기공학부 교수. 본학회 회장.
Tel : 02-820-0647
E-mail : jckim@ssu.ac.kr



김희동(金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 일본 큐슈공업대학교 전기공학과 초빙연구원. 현재 한전 전력연구원 책임연구원.
Tel : 042-865-7571
E-mail : hdkim@kepco.co.kr