

### 13.8 kV급 발전기 고정자 권선의 절연상태 평가

김희동\*, 공태식\*, 주영호\*  
한전 전력연구원\*

### Assessment of Insulation Condition in 13.8 kV Generator Stator Windings

Hee-Dong Kim\*, Tae-Sik Kong\*, and Young-Ho Ju\*  
Korea Electric Power Corporation(KEPCO) Research Institute\*

**Abstract** - 35년 이상 동안 운전된 2대의 가스터빈 발전기(70 MVA, 13.8 kV) 고정자 권선의 절연상태를 평가하기 위해 정지중 절연진단 시험을 수행하였다. 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정된 결과 모두 양호하여 절연상태가 매우 건전하게 평가되었다. 유전정접이 서서히 증가하는 전압이 부분방전 개시전압과 거의 일치하며, 이 전압은 다시 제1차 전류 급증점 보다는 3 kV정도 낮게 분석되었다. 그리고 발전기 고정자 권선의 부분방전 패턴은 내부방전으로 분석되었다.

#### 1. 서 론

발전기 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 절연재료 내부의 보이드(void) 생성, 반도전층 손상 및 단말권선(endwinding) 표면 오손으로 상관 방전 등에 의해 열화가 진행하다가 최종적으로 절연파괴에 도달한다[1, 2]. 운전중인 발전기 고정자 권선의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 저하시키고 단시간에 복구가 곤란하기 때문에 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다.

정지중인 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 절연진단 시험을 수행하고 있다. 절연진단 시험 항목은 절연 저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 포함하며, 측정데이터를 종합적으로 분석하여 절연열화 정도를 판정하고 있다. 국내에서는 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 주기적으로 평가하기 위해 절연진단 시험을 수행하고 있으며, 일본전기학회에서 제정한 판정기준을 활용하고 있다[3]. 그러나 최근 국내에서도 고압회전기 고정자 권선의 절연열화 판정기준을 정립하는 연구가 진행되고 있다[4, 5].

본 연구에서는 35년 이상 동안 운전된 가스터빈 발전기(70 MVA, 13.8 kV) 고정자 권선에서 정지중 절연진단 시험을 수행하였다. 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하여 종합적으로 분석하였다.

#### 2. 시험방법

본 논문은 화력발전소에서 35년 동안 사용된 13.8 kV급 가스터빈 발전기 고정자 권선의 정지중 절연진단 시험을 수행하였다. 교류전압을 인가하기 전에 발전기 고정자 권선에서 삼상 일괄로 직류 5 kV를 인가하면서 성극지수(Automatic Insulation Tester, AVO International)를 측정하였다. 발전기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 슈어링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor), 부분방전 측정기(Partial Discharge Detector : PDD, Tettex Instruments TE 571) 및 디지털 부분방전 측정 시스템(Digital Partial Discharge Measuring System, Doble Lemke, LDS-6)를 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 인가하였으며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛(Coupling Unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기 와 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400 kHz 이다. 발전소 현장에서 측정된 발전기 고정자 권선의 부분방전 크기가 상전압에서 2,850~9,760 pC을 나타내었으며, 외부잡음은 1,100~1,200 pC 정도로 측정되었다.

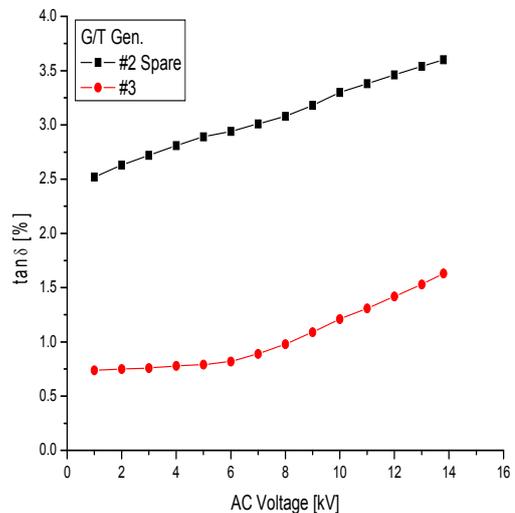
#### 3. 시험결과 및 고찰

화력발전소에서 35년 동안 사용된 2대의 가스터빈 발전기(Gas Turbine Generator ; G/T Gen.) 정격을 나타내었다. 가스터빈 발전기(70 MVA, 13.8 kV)는 동일한 정격용량과 부하를 갖고 있다. G/T Gen. #2 Spare는 현재 운전을 하지 않는 예비기이며, G/T Gen. #3은 운전중에 있다. 표 1에서 나타낸 바와 같이 2대의 가스터빈 발전기 고정자 권선의 성극지수는 1.5이하로 측정되었지만 절연저항은 높게 나타났다. G/T Gen. #2 Spare 및 #3은 삼상 일괄로 교류전압을 13.8 kV까지 증가하면서 전류의 변화를 측정하여 나타내었다. 13.8 kV에서 G/T Gen. #2 Spare 및 #3의 ΔI는 각각 1.70%, 1.79%를 나타내었다. 13.8 kV 발전기의 경우 ΔI는 12%이상이면 불량으로 판정하고 있으며[3], 2대 모두 ΔI가 1.70~2.39%로 측정되어 양호한 절연상태를 나타내고 있다. 또한, G/T Gen. #2 Spare와 #3의 제1차 전류 급증점이 나타나는 전압은 각각 9.0 kV, 9.5 kV로 분석되었다.

〈표 1〉 발전기 고정자 권선의 교류전류 특성

G/T Gen.	성극지수	ΔI[%] at 13.8 [kV]	P <sub>11</sub> [kV]
#2 Spare	1.34	1.70	9.0
#3	1.28	1.79	9.5

그림 1은 G/T Gen. #2 Spare 및 #3은 삼상 일괄로 교류전압을 13.8 kV까지 증가하면서 유전정접(dissipation factor, tanδ)의 변화를 측정하였다. tanδ-전압 특성 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 전압 증가에 따라 약간씩 증가하고 있다. 13.8 kV 발전기의 판정기준을 적용하기 위해 13.8 kV에서 측정된 데이터를 근거로 Δtanδ를 계산하였다. 표 2에 나타낸 바와 같이 13.8 kV에서 G/T Gen. #2 Spare 및 #3의 Δtanδ는 각각 0.97%, 0.88%를 나타내었다. 13.8 kV 발전기의 경우 Δtanδ는 6.5%이상이면 불량으로 판정하고 있으며[3], 2대 모두 Δtanδ가 0.88~1.71%로 측정되어 양호한 절연상태를 나타내고 있다.



〈그림 1〉 tan δ -전압 특성의 비교

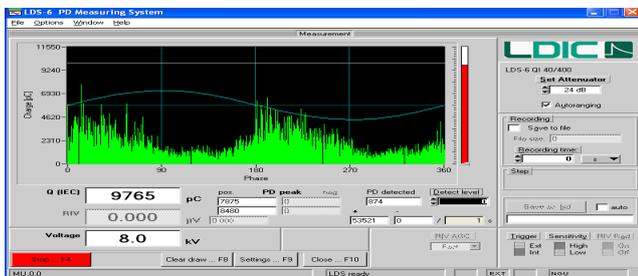
표 2에서 나타낸 바와 같이 발전기 고정자 권선을 삼상 일괄로 교류전압을 인가하면서 부분방전 크기를 측정하였다. 수백 pC의 외부노이즈에서 시작하여 부분방전 크기가 1,000 pC이상으로 나타날 때 전압을 부분방전 개시전압(Partial Discharge Inception Voltage : PDIV)이라 한다. 그림 1에서 보인 바와 같이 유전정접이 5~7 kV에서 서서히 증가하고 있기 때문에 부분방전 개시전압도 이 부분에서 발생될 것으로 예측할 수 있다. 실제적으로 현장에서 측정한 부분방전 개시전압은 표 2에 나타낸 바와 같이 5.5~6.1 kV에서 발생되었다. 다시 말하면 유전정접-전압 특성에서 유전정접이 서서히 증가하는 전압이 부분방전 개시전압과 거의 일치하게 된다. 이 전압은 교류전류의 제1차 전류 급증점이 나타나는 전압 보다 3 kV정도 낮게 분석되었다. 따라서 발전기 고정자 권선에서 절연열화가 발생되면, 유전정접의 증가점, 교류전류의 제1차 전류 급증점 및 부분방전 개시전압 등이 모두 낮은 전압으로 이동하고 절연과피도 낮은 전압에서 발생하는 것을 예측할 수 있었다[3].

G/T Gen. #2 Spare 및 #3의 상전압인 8 kV에서 부분방전 크기는 각각 9,760 pC, 2,850 pC으로 측정되었으며, 상전압의 1.25배 즉 10 kV에서 부분방전 크기는 각각 14,070 pC, 4,700 pC으로 증가하였다. 8 kV에서 부분방전 크기가 10,000 pC이하는 양호하고 30,000 pC이하의 요주의 30,000 pC 이상은 불량으로 판정하고 있다[3]. 따라서 상전압에서 부분방전 크기를 분석한 결과 G/T Gen. #2 Spare와 #3은 양호하게 평가되었다.

〈표 2〉 발전기 고정자 권선의 부분방전 특성

G/T Gen.	계통잡음 [pC]	개시전압 [kV]	PD Magnitude [pC]	
			E/ $\sqrt{3}$ [kV]	1.25E/ $\sqrt{3}$ [kV]
#2 Spare	1,900	5.5	9,760	14,070
#3	2,200	6.1	2,850	4,700

표 2에 나타낸 바와 같이 G/T Gen. #2 Spare 및 #3은 삼상 일괄로 상전압과 상전압의 1.25배인 8 kV와 10 kV까지 교류전압을 증가하면서 부분방전 크기와 패턴을 측정하였다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 2대의 발전기 고정자 권선 내부의 결함으로 인해 내부방전(internal discharge)을 나타내고 있음을 확인하였다.



〈그림 2〉 발전기 고정자 권선의 부분방전 패턴

#### 4. 결 론

35년 동안 운전한 2대의 13.8 kV급 가스터빈 발전기 고정자 권선의 정지중 절연진단 시험을 시행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) G/T Gen. #2 Spare 및 #3에서 제1차 전류 급증점은 각각 9.0 kV, 9.5 kV, 유전정접이 급격하게 증가하는 전압은 각각 6 kV, 7 kV 및 부분방전 개시전압은 각각 5.5 kV, 6.1 kV로 분석되었다.

(2) 유전정접이 서서히 증가하는 전압이 부분방전 개시전압과 거의 일치하며, 이 전압은 다시 제1차 전류 급증점 보다 3 kV 정도 낮게 분석되었다. 따라서 발전기 고정자 권선에서 절연열화가 발생되면, 유전정접의 증가점, 제1차 전류 급증점 및 부분방전 개시전압 등이 모두 낮은 전압으로 이동하고 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 따라서 G/T Gen. #2 Spare 및 #3은 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기가 모두 양호하여 절연상태가 매우 건전하게 평가되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김희동, "발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석", 전기전자재료학회논문지, Vol. 15, No. 2, pp. 119~126, 2002.
- [2] 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.
- [3] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 6, pp. 1021~1025, 1986.
- [4] 주영호외 6명, "발전기 정지중 진단 및 수명평가 기술개발(1 단계 보고서)", 지식경제부, 2009.
- [5] Hee-Dong Kim and Chung-Hyo Kim, "Stator Insulation Quality Assessment for High Voltage Motors Based on Probability Distributions", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 571~575, 2008.