

## 대용량 터빈발전기 고정자 권선의 절연상태 평가

김희동, 이영준, 박덕현\*  
한전 전력연구원, \*발전교육원

### Assessment of Insulation Condition in Large Turbine Generator Stator Windings

Hee-Dong Kim, Young-Jun Lee, Deok-Hyun Park\*

Korea Electric Power Research Institute, \*Korea Electric Power Conventional Power Generation Education Center

**Abstract** - This paper describes to access the insulation deterioration condition of the stator windings in three large turbine generators. Nondestructive tests have been carried out on stand-still generators which have been in service for 2 to 30 years. In most cases these tests include ac current increase rate( $\Delta I$ ), delta tan delta( $\Delta \tan \delta$ ), and maximum partial discharge( $Q_m$ ). Gen. 2 show that the  $\tan \delta$  is higher than other two generators in the  $\tan \delta$ -voltage curve. Partial discharge(PD) patterns were observed internal, corona and treeing discharges in large turbine generators. The PD tests were confirmed the correlation between discharge patterns and the kinds of defects.

### 2. 시험방법

본 논문에서는 운전연수가 각각 2년, 15년 및 30년 이상된 3대의 대용량 터빈발전기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 분석하였다. 교류전류와 유전정접 시험은 셰링브리지(Schering Bridge)를 사용하였으며, 셰링브리지는 전원장치(HV Supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(Resonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 부분방전을 측정하기 위해 각 발전기 고정자 권선에 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하고, 커플링 캐패시터(Coupling Capacitor, 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(Digital Partial Discharge Detector, Tettex Instruments TE 571)에서 방전크기와 패턴을 분석하였다.

### 1. 서 론

발전기 고정자 권선은 결함 및 열화가 어느 범위 이상으로 진행되면 갑자기 파괴되는 현상이 일어날 확률이 높아지므로 주기적인 절연진단이 필요하다. 운전중인 발전기에서 절연파괴 사고가 발생하지 않도록 정기중 진단법은 1955년 Rushall에 의해 발전기 고정자 권선에 직류전압을 인가하여 절연열화를 진단하였다[1]. 1960년대는 주로 직류전압, 교류전압, 충격전압 및 극저주파 전압 등의 절연진단 장점을 평가하기 위해 노력하였으나, 한가지 진단만으로는 절연열화 상태를 만족스럽게 평가할 수 없다는 결론에 도달하였다[2, 3]. 1970년대는 여러 가지 진단기법 자체를 평가하여 미국과 유럽을 중심으로 코드(cord) 및 규격화(IEEE 43, ESI 44.5, BS 4999, IEEE 4333 등) 작업을 수행하였다[4]. 1980년대는 Simons, Yoshida 등에 의해 비파괴 시험을 통하여 측정된 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전에 의하여 고압 발전기의 열화 상태를 판정하였다[5, 6].

우리나라에서도 1970년대 초반부터 시작된 비약적인 경제성장으로 전력수요가 증대됨에 따라 많은 발전소가 건설되어 발전설비 용량이 증대되어 왔으며, 경제수명 이상 운전된 발전기가 증가하고 있다. 이에 따라 노후화된 발전기의 기술적, 경제적 및 전력의 안정적 공급 측면에서 고정자 권선의 절연진단을 위한 비파괴 시험 및 수명평가를 위한 기계적 특성 분석 등이 수행되고 있다[7, 8].

본 논문에서는 운전연수가 다른 3대의 대용량 터빈발전기 고정자 권선의 절연상태를 평가하기 위해 정지중에 절연진단을 수행하여 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 시험하였으며, 유전정접 및 부분방전 패턴에 의해 절연열화 상태를 분석하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 교류전류 분석

Gen. 1은 약 2년 동안 운전한 발전기(정격전압 22kV, 560 MVA), Gen. 2는 15년 동안 운전한 발전기(정격전압 26kV, 800MVA), Gen. 3은 약 30년 동안 운전한 발전기(정격전압 21kV, 275MVA)를 나타냈다. 그림 1은 3대의 발전기에서 전류-전압 특성을 나타냈으며,  $\Delta I$ 가 각각 0.64 %, 0.33%, 0.30%으로 분석되어 양호하게 판정되었다. 일반적으로  $\Delta I$ 가 작을수록 절연재료의 상태를 양호하게 판정한다.

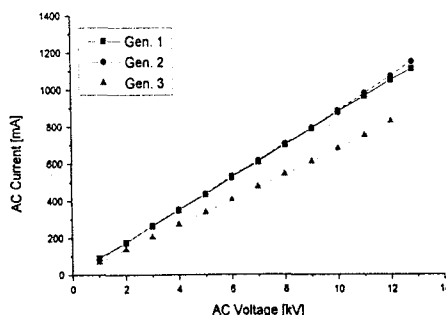


그림 1. 발전기의 전류-전압 특성

### 3.2 유전정점 분석

그림 2, 그림 3과 그림 4는 교류전압을 상전압까지 증가시키면서 유전특성을 나타냈으며,  $\tan\delta$ -전압 특성에서 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. 그림 2는 약 2년 동안 운전한 발전기의  $\tan\delta$ -전압 특성을 보였으며,  $\Delta\tan\delta$ 가 A, B, C상에서 각각 0.68%, 0.65%, 0.57%로 나타났다. 유전정점이 1차적으로 6.3kV에서 완만하게 증가하고 2차적으로 9kV에서 급격하게 증가하고 있으며, 이 전압 부근에서 부분방전의 개시가 발생되고  $\tan\delta$  증가 패턴이 완만하기 때문에 부분방전 발생량도 크지 않을 것으로 예상된다. 그림 3은 15년 동안 운전한 발전기의  $\tan\delta$ -전압 특성을 보였으며,  $\Delta\tan\delta$ 가 A, B, C상에서 각각 0.77%, 0.68%, 0.84%로 나타났다. 유전정점이 6kV에서 급격하게 증가하고 있으며, 이 전압 부근에서 부분방전의 개시가 발생되고  $\tan\delta$  증가 패턴이 크기 때문에 부분방전 발생량도 크게 나타날 것으로 예상된다. 그림 4는 30년 운전한 발전기의  $\tan\delta$ -전압 특성을 보였으며,  $\Delta\tan\delta$ 가 A, B, C상에서 각각 0.45%, 0.41%, 0.42%로 나타났다. 유전정점이 8kV에서 급격하게 증가하고 있으며, 이 전압 부근에서 부분방전의 개시가 발생되고  $\tan\delta$  증가 패턴이 완만하기 때문에 부분방전 발생량도 크지 않을 것으로 예상된다. 또한, 유전정점이 낮은 전압에서 급증하게 될수록 절연재료의 열화정도가 심한 것으로 판정한다. 따라서 그림 4의 발전기 고정자 권선이 3대 중에서 가장 많이 절연열화가 진행된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 그림 1은 운전연수가 2년 경과된 초기 유전특성을 나타냈으며, 운전연수가 증가함에 따라 그림 3과 같이 변화되어 절연열화가 진행됨에 따라 그림 2의 특성을 갖을 것으로 판단된다.

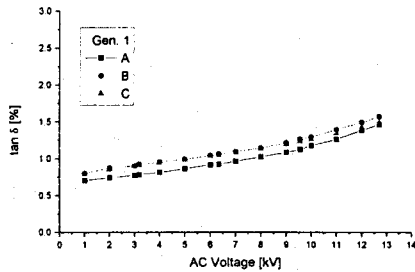


그림 2. Gen. 1의  $\tan\delta$ -전압 특성

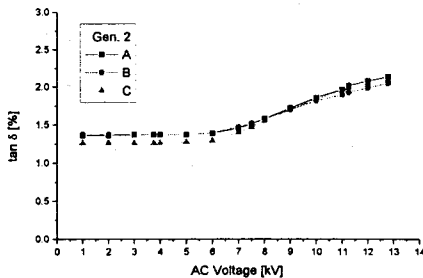


그림 3. Gen. 2의  $\tan\delta$ -전압 특성

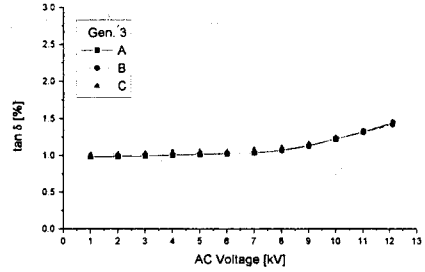
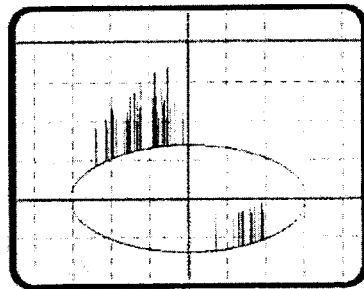


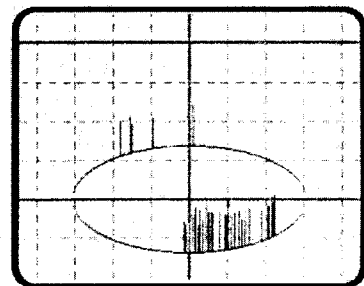
그림 4. Gen. 3의  $\tan\delta$ -전압 특성

### 3.3 부분방전 분석[9]

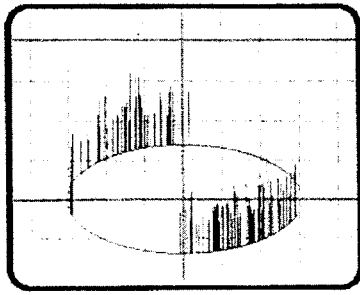
그림 5는 신규화력발전소에서 약 2년 동안 운전한 발전기 고정자 권선에서 상전압(12.7kV)을 인가하였을 때 A, B, C상의 부분방전 크기가 각각 6.7nC, 5.0nC, 9.0nC로 측정되었다. 부분방전 패턴은 A, B상이 내부방전(internal discharge), C상은 표면방전(surface discharge)으로 분석되었다. 내부방전은 대부분의 회전기에서 발생하는 방전패턴으로써 절연재료 내의 보이드(void)에서 일어나며, 표면방전은 주절연과 소선절연 사이의 보이드 혹은 사소한 결합부분에서 발생한다. 이들은 함침 바니쉬나 수지에 의해 완전히 채워지지 않은 소선 사이와 전이된 소선의 교차점 및 주절연으로부터 분리된 동도체 표면에서 주로 야기된다 [10]. 따라서 부분방전 크기와 패턴을 분석한 결과 이 발전기 고정자 권선의 절연재료는 양호하게 나타났다.



(a) A상(PD-Range : 5.0nC/div)

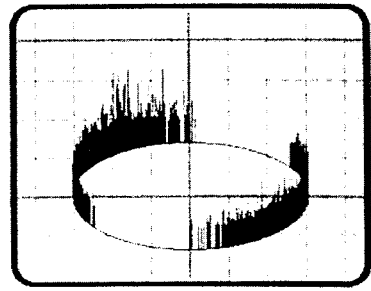


(b) B상(PD-Range : 5.0nC/div)



(c) C상(PD-Range : 5.0nC/div)

그림 5. Gen. 1의 부분방전 패턴

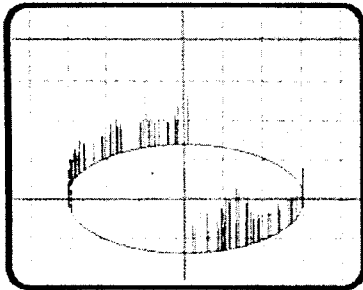


(c) C상(PD-Range : 5.0nC/div)

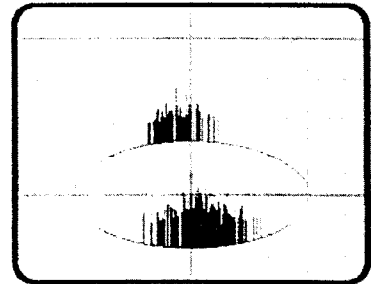
그림 6. Gen. 2의 부분방전 패턴

그림 6은 원자력발전소에서 15년 동안 운전한 발전기 고정자 권선에  $0.87 \times$ 상전압(13.0kV)을 인가하였을 때 A, B, C상의 부분방전 크기가 각각 11.7nC, 10.3nC, 7.6nC으로 측정되었다. 부분방전 패턴을 분석한 결과 A상은 표면방전(surface discharge), B, C상은 트리잉방전(treeing discharge)이 나타나기 때문에 절연재료의 내부 보이드에서 트리가 개시되고 있음을 알 수 있다. 이와같이 도체와 절연재료 사이에서 트리가 발생하고 있는 것은 절연열화 초기단계를 나타낸다. 따라서 발전기 고정자 권선의 절연재료 내부에서 초기열화 패턴이 나타나고 있기 때문에 향후 열화진행 상태를 알기 위해 주기적인 절연진단이 필요하다.

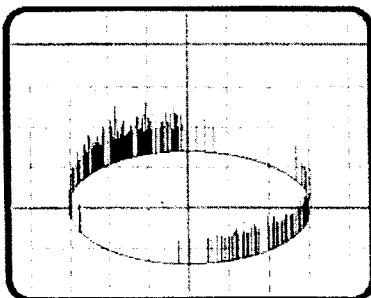
그림 7은 화력발전소에서 30년 동안 운전한 발전기 고정자 권선에서 상전압(12.1kV)을 인가하면서 A, B, C상의 부분방전 크기를 측정된 결과 각각 3.0nC, 7.0nC, 6.0nC으로 나타났다. 부분방전 패턴은 A, B, C상 모두가 코로나 방전(corona discharge)으로 분석되었으며, 이와같은 정, 부코로나 방전은 발전기가 장기간 운전됨에 따라 절연재료 내부의 보이드(void)에 돌출된 날카로운 부분에서 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 고정자 권선 내부에서 어떤 변화가 진행되고 있으나, 부분방전 크기와 패턴을 분석한 결과 아직까지 절연열화 상태는 보이지 않고 있다.



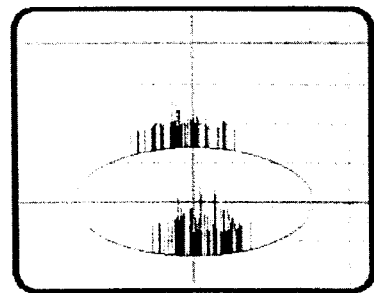
(a) A상(PD-Range : 10.0nC/div)



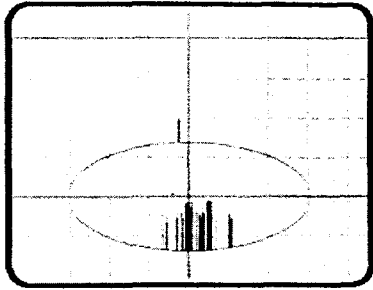
(a) A상(PD-Range : 2.0nC/div)



(b) B상(PD-Range : 10.0nC/div)



(b) B상(PD-Range : 5.0nC/div)



(c) C상(PD-Range : 5.0nC/div)

그림 7. Gen. 3의 부분방전 패턴

표 1은 각각의 발전기에서 부분방전을 측정할 때 계통잡음, 방전 개시전압 및 크기를 나타냈다. Gen. 1은 유전정접이 1차적으로 6.3kV에서 완만하게 증가하고 2차적으로 9kV에서 급격하게 증가하고 있으나, A, B, C상에서 부분방전의 개시전압이 각각 7.31kV, 6.86kV, 5.64kV로 나타났다.  $\tan\delta$ -전압 특성의 증가 곡선이 완만하게 나타남에 따라 부분방전의 크기도 A, B, C상에서 각각 6.7nC, 5.0nC, 9.0nC으로 나타나기 때문에 절연상태가 양호하게 판정된다.

Gen. 2는 유전정접이 6kV에서 급격하게 증가하고 있으며, 부분방전의 개시전압이 A, B, C상에서 각각 4.80kV, 5.13kV, 5.50kV로 나타나기 때문에 거의 일치하고 있다. 부분방전의 크기도 A, B, C상에서 각각 11.7nC, 10.3nC, 7.6nC로 나타났으며, 유전정접 분석에서 예상한 바와 같이 3대의 발전기 중에  $\tan\delta$ -전압 특성의 증가 곡선이 가장 크게 나타남에 따라 부분방전의 발생량도 가장 크게 분석되었다.

Gen. 3은 유전정접이 8kV에서 급격하게 증가하고 있으며, 부분방전의 개시전압이 A, B, C상에서 각각 8.03kV, 7.0kV, 9.36kV로 나타났다.  $\tan\delta$ -전압 특성의 증가 곡선이 완만하게 나타남에 따라 부분방전의 크기도 A, B, C상에서 각각 3.0nC, 7.0nC, 6.0nC으로 나타나기 때문에 절연상태가 양호하게 판정된다. 결과적으로 Gen. 2가 3대의 발전기  $\tan\delta$ -전압 특성에서 보인 바와 같이 유전정접이 낮은 전압에서 증가하고 있으며, 부분방전의 크기와 패턴을 분석한 결과 절연재료 내부의 보이드에서 트리가 진행되는 것으로 나타나기 때문에 초기열화가 개시되고 있음을 확인하였다.

표 1. 발전기에서 부분방전의 특성

발전기	부분방전		계통잡음 [pC]	부분방전 개시전압 [kV]	$E/\sqrt{3}$ [nC]
	A상	B상			
Gen. 1	A상	397	7.31 kV	6.7	
	B상	393	6.86 kV	5.0	
	C상	503	5.64 kV	9.0	
Gen. 2	A상	166	4.80 kV	11.7	
	B상	382	5.13 kV	10.3	
	C상	392	5.50 kV	7.6	
Gen. 3	A상	156	8.03 kV	3.0	
	B상	393	7.00 kV	7.0	
	C상	503	9.36 kV	6.0	

#### 4. 결 론

운전연수가 각각 2년, 15년 및 30년 이상된 3대의 대용량 터빈발전기 고정자 권선에서 절연상태를 평가하기 위해 정지중에 절연진단을 수행하여 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하였으며, 유전정접과 부분방전 패턴에 의해 절연열화 상태를 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 발전기 3대의 교류전류는 3상이 모두 직선적으로 일치하기 때문에 양호하게 판정되었으며,  $\tan\delta$ -전압 특성을 분석하여 부분방전의 개시전압과 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있었다.

(2) 각 상별로 측정된 대용량 터빈발전기 고정자 권선에서 내부방전, 표면방전, 트리밍 방전 및 코로나 방전 등과 같은 부분방전 패턴에 의해 절연재료 내부의 열화상태를 분석할 수 있었다.

(3) 유전정접과 부분방전을 시험하여 분석한 결과 30년 운전된 발전기에 비해 15년 운전된 발전기 고정자 권선에서 절연열화가 더 진행되었음을 확인할 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Rushall, R. T., and Simons J. S., "A examination of high-voltage d.c. testing applied to large generator", Pro. IEE, 102 A, pp. 565-576, 1955.
- [2] Simons J. S., and Richards, M. T., "Non-destructive electrical test methods for evaluating high-voltage insulation", Pro. IEE, 109 A, pp. 71-79, 1962.
- [3] Schuler R., "Assessing the state of the insulation of stator winding", Bull. Assoc. Suisse Electr., pp. 777-785, 1969.
- [4] Simons J. S., "Preventative maintenance testing of large machines-recommendations for insulation test procedures", IEE, Colloquium Digest, pp. 129-136, 1975.
- [5] J. S. Simons, "Diagnostic Testing of High-Voltage Machine Insulation", IEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 3, pp. 139-154, 1980.
- [6] H. Yoshida and Y. Inoue, "Test Method of Rotating Machines, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1069-1071, 1986.
- [7] 김희동, 김정훈, 김태완, 강도열, "발전기 고정자 권선에서 절연열화 평가에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 46, No. 6, pp. 929-935, 1997.
- [8] 김희동, 김희곤, 김태완, 강도열, "발전기 고정자 권선에 사용되는 마이카/에폭시 복합재료의 기계적 특성에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 327-333 1997.
- [9] E. Gulski, "Digital Analysis of Partial Discharge", IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul, Vol. 2, No. 5 pp. 822-837, 1995.
- [10] I. M Culbert, H. Dhirani, and G. C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 3-26, 1989.