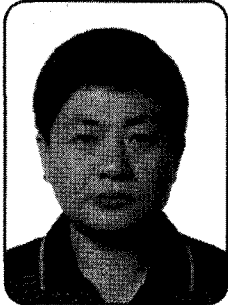


# 국내외 가스터빈발전기 고정자권선의 절연수명 평가 및 수명연장 추진사례



한전KPS(주) 기술연구원  
책임전문원 양 규 현  
TEL : (031)710-4412

## 1. 서론

가스터빈 발전기는 빈번한 기동정지와 이로 인한 히트사이클(Heat Cycle) 열화로 운전년수가 20년 이상 경과함에 따라 절연불량으로 인한 고장발생이 서서히 증가하고 있으며, 장기간 운전하는 동안 열적, 기계적, 전기적, 환경적 열화로 인해 절연물의 내,외부에 보이드 및 절연물의 마모, 침식, 크랙 등으로 결함이 발생하여 열화가 진행하다가 최종적으로 절연파괴에 도달한다. 운전중 발전기의 갑작스런 절연파괴 사고는 전력공급에 막대한 지장을 초래함은 물론 장기간의 복구에 따른 경제적인 손실도 매우 크다. 운전중 발전기 권선의 절연파괴 시대 전류를 동반하므로 고장범위가 확대되어 복구에 막대한 지장을 초래하므로 발전기 권선 절연물에 대한 수명평가를 통해 사전에 정비대책을 수립하여 시행하므로 정지시간 단축 및 고장범위 축소 등 발전기 정지에 따른 운전손실을 최소화할 수 있다.

발전기 고정자권선의 절연수명을 평가하기 위해서는 정지중 절연진단 시험 및 추이분석, 발전기 운전 이력 등을 활용하여 평가하고 있다. 정지중 절연진단 시험항목은 권선저항, 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 측정 등을 포함하며, 측정데이터를 종합적으로 분석하여 절연열화 정도를 판정하고 있다. 운전 이력은 현재까지의 기동,정지 횟수 및 운전시간을 활용하여 절연수명을 평가하고 있다. 기타 건전성 평가시험으로 부분방전 발생 위치검출을 위한 코로나 탐침시험

(Corona Probe Test)과 권선 절연열화에 영향을 미치는 철심과 웨지 및 엔드권선의 흔들림 상태를 평가하는 웨지시험(Wedge test), 철심건전성시험(EL-CID test), 단부권선진동성검사(Bump test) 등을 수행하여 진단의 신뢰성을 높이고 있다. 국내에서는 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 주기적으로 평가하기 위해 절연진단 시험을 수행하고 있으며, 일본전기학회 및 히다찌, 일본전력중앙연구소에서 제정한 판정기준을 활용하고 있다.

본 연구에서는 20년 이상 운전된 국내외 가스터빈 발전기(해외A기기:29,600 kVA, 13.8 kV, 국내B기기:31,250 kVA, 13.8kV) 고정자 권선의 절연수명을 평가하기 위해 정지중 절연진단시험과 그 외 철심과 웨지 및 단부권선진동성에 대한 검사도 병행하여 수행하였다. 해외 A기기에 대한 절연진단 시험중 교류전류 변화율, 유전손실각(tan $\delta$ )변화율 및 부분방전 크기 등을 측정한 결과 모든 특성값들이 불량한 상태이며, 수명평가에서도 운전이력에 의한 잔여 수명은 권선교체 시점까지 10%정도의 여유가 있으나 전기적인 시험에 의한 수명평가에서는 권선교체 시점인 잔여 절연내력 40% 지점을 이미 초과한 상태로 분석하였다. 따라서 본 기기는 안전 운전에 필요한 잔여 절연내력을 확보하고 있지 않은 것으로 평가하여 빠른 시일내에 권선교체가 필요한 것으로 권고하였다. 국내B기기인 경우에는 1999년 초기 진단 결과 교류전류변화율은 기준치 이하이지만 유전손실각(tan $\delta$ )변화율 및 부분방전 크기가 기준치를 초과하여 불량한 상태로 매년 절연진단을 통해 특성치의 변화추이를 관리하였으며, 특성치가 변화되는 시점에 권선교체를 권고하였다. A, B 두 기기 모두 수명평가 결과에따른 권고사항으로 수명연장을 위한 고정자권선 전량에 대한 신품으로 교일교체 작업이 수행되었으며, 교일교체 후 권선절연물에 대한 건전성 평가를 확인하기 위한 내전압시험 및 절연진단시험을 수행하였다.

## 2. 시험방법

### 2.1 고정자권선 절연진단

20년 이상 운전된 가스터빈 발전기(A:29,600kVA, 13.8kV, B:31,250kVA, 13.8kV) 고정자 권선의 절연수명을 평가하기 위해 정지중에 절연진단 시험을 수행하였다. 가스터빈 발전기 고정자 권선에 대한 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 교류 전원장치와 제어 시스템(HV supply and control system), 슈어링 브리지(Schering bridge), 공진 인덕터(resonating inductor), 커플링 캐패시터(coupling capacitor), 커플링 유닛(coupling unit) 및 부분방전 측정기(Partial Discharge Detector)를 사용하였다. 교류전류와 유전정접 시험은 교류 전원장치와 제어시스템(Tettex type 5283, Hipotronics type 75/50/30/750kVA), 슈어링브리지(Tettex type 2816, 2818) 및 공진 인덕터(Tettex type 5288)를 사용하였다. 부분방전 시험은 발전기 고정자 권선에 교류 전원장치와 제어시스템을 연결하여 전압을 인가하였으며, 커플링 캐패시터(Tettex 10nF, Hipotronics 25nF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛(Tettex AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기(Tettex TE 571, Robinson 700D)에서 방전크기 및 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 각각 40~400, 40~300[kHz]이다. 발전기 고정자 권선의 부분방전 크기는 상전압(8 kV)에서 평가하였으며, 교류전류시험 및 유전정접시험도 20년이상 장기간 운전한 기기로 열화가 현저하여 상전압 또는 상전압의 125%까지만 인가하여 절연열화 특성값을 측정하였다. 그리고 부분방전 발생 위치검출을 위해 코로나 탐침시험(corona probe test, Adwel, PPM-97) 장치를 사용하여 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 부분방전 발생 위치 및 크기를 측정하였다.

### 2.2 기타 진단

기타 발전기 구성품에 대한 건전성 평가를 수행하였다. 웨지의 고정상태를 평가하기 위한 웨지 조임성 시험, 철심의 건전성 평가를 위한 EL-CID(Electro magnetic Core Imperfection Detector) 시험 그리고 단부권선 진동성 검사를 위한 Bump Test를 수행하였다. 웨지 조임성 시험은 계측기(Wedge tightness detector, ADWEL, Model 501)를 이용하여 측정하였으며, 철심 건전성 시험은 EL-CID(Digital EL-CID, ADWEL,

Model 601) 장비를 사용하여 철심 양단의 자위차(Magnetic Potential Difference : mpd)를 측정하여 평가하였으며 100[mA] 이하의 자위차를 양호한 기준으로 평가하고 있다. 단부권선 진동성검사는 해머(Impulse force hammer)를 이용하여 가속도계 센서(Accelerometer)로 전달된 신호를 주파수분석기(FFT Analyzer, B&K 3560C)로 해석하여 단부권선이 공진 영역인 electromagnetic forcing 주파수(115Hz~135Hz)와 격리되어 운전되는지를 확인하였다.

## 3. 가스터빈 발전기의 특성

[표 1]은 공랭식 가스터빈 발전기(A,B기기)의 특성을 나타내었으며, [그림 1]과 같이 하나의 Bar에 2개의 턴 그룹으로 된 Multi Coil로 구성되었다. 가스터빈 발전기는 1~2분 만에 무부하에서 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. 가스터빈 발전기는 빈번한 기동정지와 진동에 의해 바의 표면이 슬롯 내부에서 미세하게 이동하여 반도체성테이프(semiconducting tape)가 손상된다. 그래서 바와 철심 사이에서 보이드(void)가 생성됨에 따라 부분방전이 발생하며, 열적 사이클에 의해 보이드의 크기가 커지고 열화가 진행되어 절연파괴를 가속화 시킨다. 따라서 이러한 가스터빈 발전기는 주기적으로 정지중에 절연진단 시험을 수행하여 부분방전 크기의 변화추이를 관리할 필요가 있다.

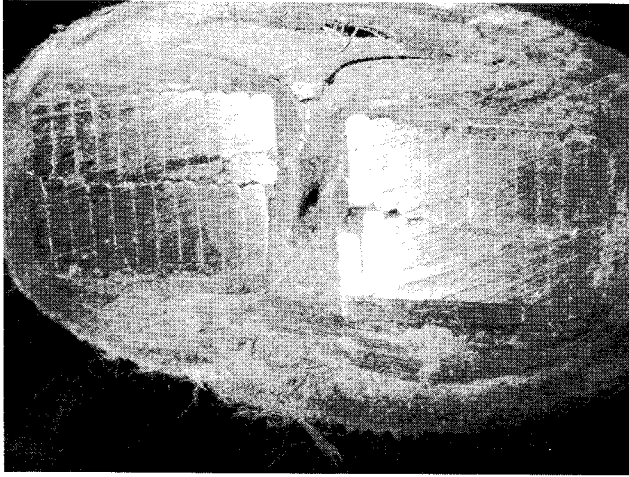
[표 1] 가스터빈 발전기의 정격

A 가스터빈 발전기

정격용량	29,600 kVA	정격전압	13,800 V
정격전류	1,238 A	역률	0.9
회전수	3,600 rpm	여자전압	DC 250V
여자전류	229 A	제조사	GE
절연등급	F종	제작년도	1981

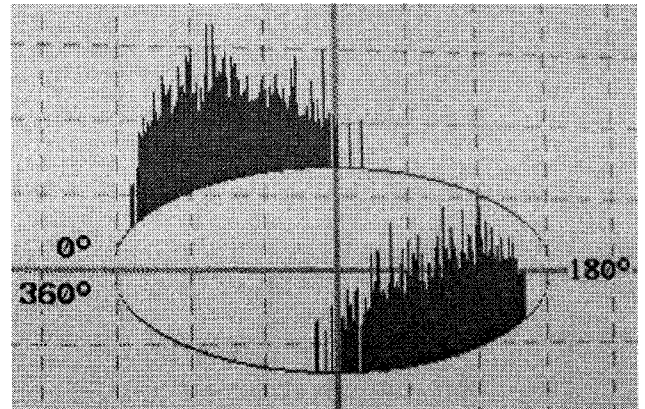
B 가스터빈 발전기

정격용량	31,250 kVA	정격전압	13,800 V
정격전류	1,464 A	역률	0.85
회전수	3,600 rpm	여자전압	DC 125V
여자전류	895 A	제조사	GE
절연등급	F종	제작년도	1991



[그림 1] 열화된 Multi turn coil

보여주고 있다. 방전패턴에서 정극성과 부극성 반주기에 동일한 크기의 방전펄스가 나타나고 q-V곡선에서 방전개시전압이 상전압의 50%이상에서 나타나므로 절연물 내부의 다양한 공극에서 발생하는 내부방전으로 평가할 수 있다.



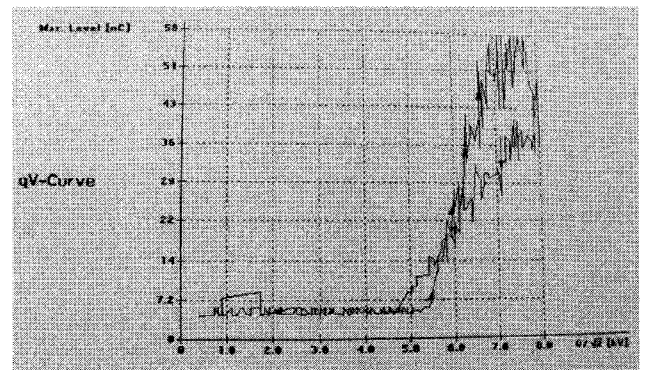
a. 부분방전 펄스 패턴

## 4. 시험결과 분석 및 수명평가

### 4.1 국외 A 가스터빈 발전기 진단결과 분석

#### 4.1.1 진단결과 분석

[표 2]는 A 가스터빈 발전기 고정자 권선 U상, V상 및 W상에서 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 측정하여 결과를 비교하였다. 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태는 일본전기학회 및 IEEE 편찬위원회, EPRI에서 권고한 판정기준을 참고하였다. 발전기 고정자 권선 U상과 V, W상의 절연저항, 성극지수 등 권선의 표면 흡습상태는 양호하나, 교류전류의 증가율( $\Delta I$ ), 유전정접의 증가율( $\Delta \tan\delta$ ) 및 부분방전 크기가 모두 기준값의 범위를 벗어나 있기 때문에 절연상태는 불량하게 평가되었다. 특히 부분방전 시험에서 U, V, W상 모두 기준치를 크게 벗어나 국부적으로 열화가 상당히 진전되어 있으며, 방전패턴 분석에서도 절연물 내부의 다양한 보이드에서 발생하는 내부방전 현상이 주를 이루고 있다. [그림 2]는 부분방전 Pattern과 방전전하량-전압특성곡선(q-V Curve)을



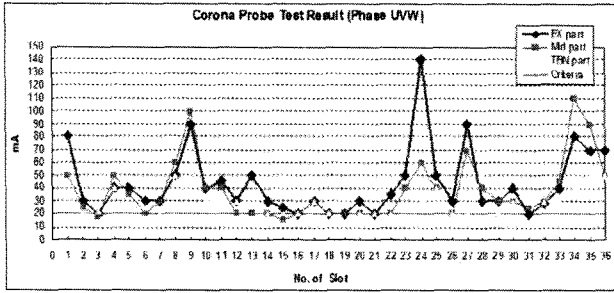
b. 방전량 대 전압 곡선 (qV-Curve)

[그림 2] 부분방전 패턴 및 qV 곡선

부분방전 발생 위치검출을 위해 코로나 탐침시험 (corona probe test, Adwel, PPM-97) 장치를 사용하여 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 부분방전 발생 위치 및 크기를 측정하였다. 그 결과는 그림3과 같으며, 대부분의 코일이 기준치(IEEE1434, 20mA이하)를 초과하고 있어 불량한 상태이다.

[표 2] 발전기 고정자 권선에서 절연진단 결과

시험항목		절연저항 [M $\Omega$ ]	성극지수 at 8kV	$\Delta$ [%] at 8kV	$\Delta \tan\delta$ [%] at 8kV	부분방전크기 [pC]
양호 판정기준		100M $\Omega$ 이상 (40 $^{\circ}$ C)	2.0 이상	1.0미만	1.0미만	10,000미만
가스터빈 발전기 "A"	U상	2,200	3.31	1.02	0.98	50,000
	V상	2,231	3.64	1.10	0.67	53,000
	W상	2,048	3.74	1.63	1.10	47,000



[그림 3] Corona Probe 시험결과

### 4.1.2 수명평가

본 발전기의 잔여 수명을 평가하기 위해 2가지 평가 방법을 통해 잔여 수명 및 절연내력을 평가하였다. 먼저 운전시간과 기동, 정지 횟수 등 운전이력에 의한 잔여 절연내력평가법인 “N-Y map”으로 평가하였으며, 다음으로 [표 2]와 같이 전기적인 시험법에 의해 측정된 특성치를 수명평가 식에 대입하여 평가하는 “D-map” 법을 적용하여 평가하였다.

#### a. N-Y map에 의한 잔여 절연내력 평가

절연열화의 원인은 전기적 열화, 열 열화, 환경적 열화 및 히트사이클에 의한 열화로 분류되며 이중 전자의 3가지는 운전시간(Y)에, 히트사이클은 기동, 정수 횟수(N)에 비례하는 열화로 고려된다. 그러므로 절연층의 복합열화는 운전이력에 관계하므로 복합열화에 의한 잔여파괴전압은 실제자료에서 실험적인 계수를 구하여 적용하면 다음식 (4-1)로 표시가능하다.

$$VR = (1-aY)(1-bNO) \times 100\% \dots\dots\dots (4-1)$$

- 여기서 a : 년차 소모율 ( $a=7 \times 10^{-3}$ )
- b : 기동·정지 소모율 ( $b=8 \times 10^{-5}$ )
- Y : 운전년수
- N : 기동·정지 횟수
- $N_0$  : 등가 기동·정지 횟수

그리고  $N_0 = N \times (\text{평균운전온도}/\text{최대허용온도})$  이다.

[표 3] 운전이력 데이터

운전시간	기동·정지 횟수	평균운전온도
161,198 h	1,182	85℃

[표 3]에서 본 발전기에 대한 등가 기동·정지 횟수  $N_0$ 를 구하면

$$N_0 = 1,182 \times (85^\circ\text{C}/100^\circ\text{C}) \approx 1005 \text{ 이다.}$$

그래서 잔여 절연내력  $V_r$ 을 구하면

$$V_r = (1 - 7 \times 10^{-3} \times 161,198h / (24 \times 365)) (1 - 8 \times 10^{-5} \times 1005) = 88.1(\%)$$

가 된다. 위의 계산결과는 평균적(신뢰성50%)인 잔여 절연내력이 88.1%임을 나타내고 있다. 그러나 이 결과는 신뢰성이 낮으므로, 일반적으로 설비의 중요도에 따라서 신뢰성이 90% 또는 99% 등의 값을 사용(잔여파괴전압의 최저값을 사용함)하므로 여기서는 99%의 신뢰성을 갖는 값( $x-3\sigma$ )을 적용하여 평가하였다.

평균잔여파괴전압과 표준편차( $\sigma$ )의 관계를 나타낸 그림에서 잔여파괴전압 88.1%에 해당하는 표준편차( $\sigma$ )는 6%이므로 99%의 신뢰성을 갖는 잔여 절연내력은 다음과 같이 계산된다.

$$V_r - 3\sigma = 88.1 - (3 \times 6) = 70.1 \approx 70 (\%)$$

따라서 이상의 결과에 의하면 운전이력에 의한 잔여 절연내력은 70%로 운전한계 기준인 60%에 근접한 상태이다.

#### b. D-map에 의한 잔여 절연내력 평가

절연물이 열화하면 내부에 보이드가 증가하고 이 보이드에 전압이 인가되면 보이드에 방전이 발생하여 누설전류와 유전손실이 증가하게 된다. 또한 열화가 진행함에 따라 절연물내의 국부적인 결함부는 확대되고 최대부분방전량은 증가하게 된다. 이러한 누설전류와 유전손 그리고 최대부분방전량과 절연 파괴전압과의 상관관계에 의해 잔여 절연내력을 평가하는 산술식을 도출하였으며, 이를 D-map 법이라고 한다.

처음에는 실험실에서 얻어진 데이터로부터 평가 식을 도출하였으나 이후 신뢰성을 높이기 위해 실제 발전기에서 인출한 샘플 코일로부터 측정된 데이터를 종합적으로 평가하여 다음식 (4-2)를 만들었다.

$$V_r(\%) = 100 - 1.8(\Delta - 0.8) - 27.4 \log(Q_{\max}/1500) \dots (2)$$

여기서  $\Delta : \Delta \tan\delta + \Delta I$

$\Delta \tan\delta$  : 정격전압에서의  $\tan\delta$ 값 - 정격전압의 20%전압에서의  $\tan\delta$ 값

$\Delta I$  : 정격전압에서의 교류전류 변화율

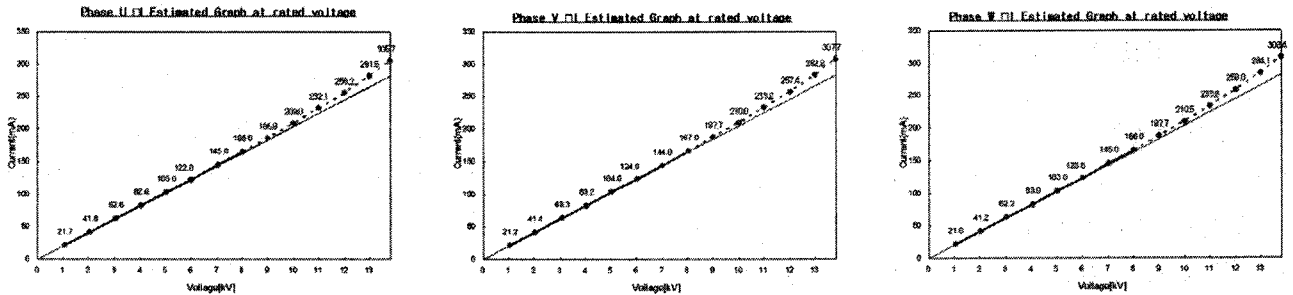
$Q_{\max}$  : 상전압에서의 최대부분방전량 [pC]

27.4 : 절연재료상수 (mica-epoxy resin)

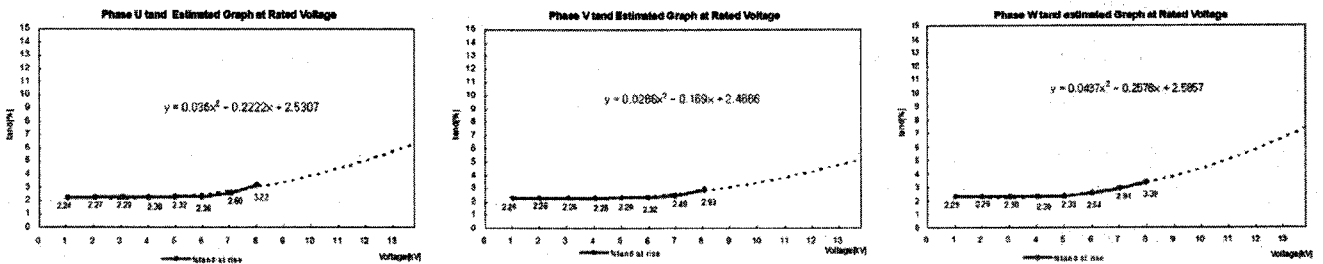
실제 시험전압은 본 발전기의 경우, 열화가 현저하기 때문에 절연파괴 및 절연스트레스를 고려하여 정격전압까지 인가하지 않고 상전압까지만 인가하여 측정하였으

[표 4] 정격전압에서의  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan\delta$ ,  $\Delta I$

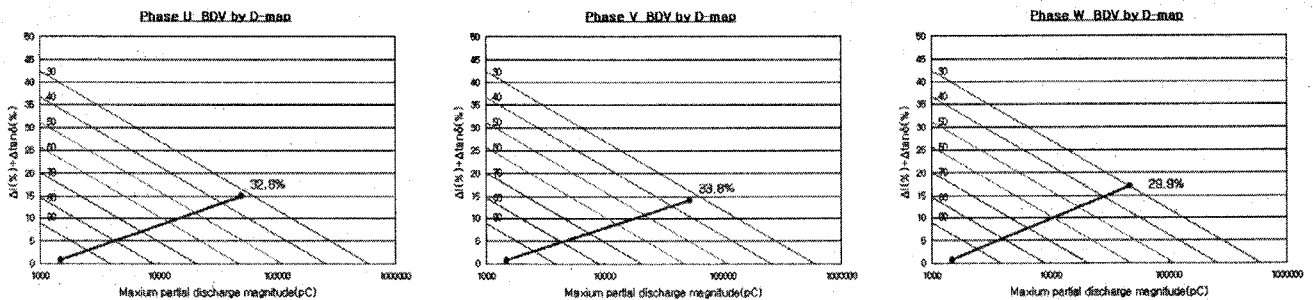
	U상	V상	W상	비 고
$\Delta I$ (%)	8.63	8.81	9.60	정격전압(13.8kV) 추정치
$\Delta \tan\delta$ (%)	6.32	5.20	7.35	정격전압(13.8kV) 추정치
$Q_{max}$ (pC)	50,000	53,000	47,000	측정치(8kV)



a. 각상별  $\Delta I$  추정 그래프



b. 각상별  $\Delta \tan\delta$  추정 그래프  
[그림 4]  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan\delta$  추정 그래프



[그림 5] D-map에 의한 잔여 절연내력 그래프

며, 정격전압에서의 특성값을 [그림 4]의 특성그래프로 부터 [표 4]의 값을 추정하여 평가하였다.

[표 4]를 적용하여 D-map에 의한 잔여 절연내력을 계산하면 다음과 같다.

$$Vr(\%) = 100 - 1.8(8.63 + 6.32 - 0.8) - 27.4 \log(50,000/1,500) = 32.8\% - \text{Phase U}$$

$$Vr(\%) = 100 - 1.8(8.81 + 5.20 - 0.8) - 27.4 \log(53,000/1,500) = 33.8\% - \text{Phase V}$$

$$Vr(\%) = 100 - 1.8(9.60 + 7.35 - 0.8) - 27.4 \log(47,000/1,500) = 29.9\% - \text{Phase W}$$

이 발전기는 안전운전한계인 권선교체시점 40%를 이미 초과한 상태이며, 절연파괴 사고 발생 가능성이 있는 운전한계 30%에 도달해 있는 것으로 평가하였다.

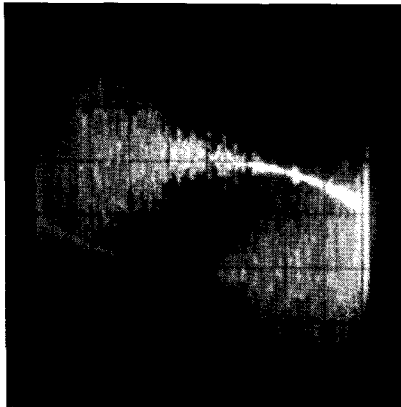
## 4.2 국내 B 가스터빈 발전기 진단결과 분석

### 4.2.1 진단결과 분석

B 가스터빈 발전기는 1991년 제작 및 설치 운전한 기기로서 한전KPS 절연진단팀에서 1999년 최초 절연 진단을 수행하였으며, 2007년 권선교체 전까지 매년 절연특성치에 대한 변화추이를 관리하기 위해 절연진단

을 시행하였다. 특히 이 기기는 1999년 슬롯방전에 의해 백화현상이 심한 6개의 코일에 대한 절연보강을 실시하였으며, 절연보강 후 부분방전 발생크기는 약간 감소하였다. 그러나 슬롯 전반에 걸쳐 방전현상이 진행된 상태이기 때문에 발생크기는 많이 감소하지 않았으나 향후 슬롯방전에 의한 주절연물의 침식등 절연물이 급속히 열화가 진행되는 것을 예방할 수 있었다.

[표 5]는 권선교체전 최종 시험결과이며, 특성치 변화추이를 비교하기 위해 1999년 최초 진단한 결과와 비교하였다. 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태는 일본전기학회, 일본전력중앙연구소 및 IEEE 편찬위원회, EPRI에서 권고한 판정기준을 참고하였다. 발전기 고정자 권선 U상과 V, W상의 절연저항, 성극지수 등 권선의 표면 흡습상태는 양호하나, 교류전류의 증가율( $\Delta I$ )은 불량기준에 근접해 있으며, 유전정접의 증가율( $\Delta \tan\delta$ ) 및 부분방전 크기가 모두 기준값의 범위를 벗어나 불량한 상태로 평가되었다. 특히 부분방전시험에서 U, V, W상 모두 기준치를 크게 벗어나 국부적으로 열화가 상당히 진전되어 있으며, 방전패턴 분석에 의하면 낮은 전압에서는 슬롯방전 현상이 지배적이나 전압을



[그림 6] 부분방전 펄스 패턴

서서히 상승시키면서 절연물 내부의 다양한 공동에서 발생하는 내부방전([그림 6]) 형태가 복합적으로 나타나고 있다. 그리고 1999년 결과치와 비교해 보면 교류전류변화율과 부분방전크기는 증가하였으며, 부분방전 개시전압은 낮아져 열화가 지속적으로 진행되었다고 평가할 수 있다.

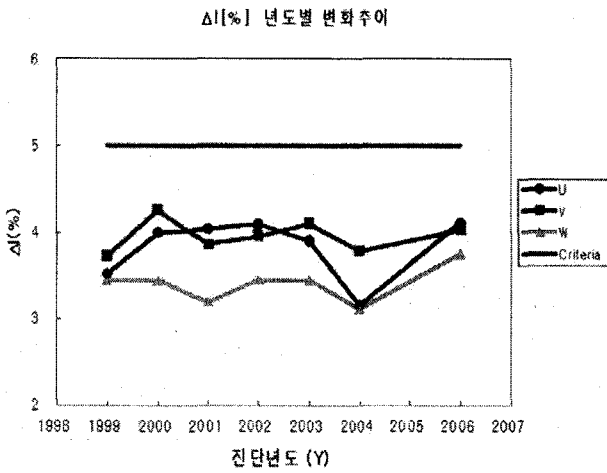
#### 4.2.2 수명평가

본 발전기의 잔여 수명을 평가하기 위해 절연항목별 특성치에 의한 평가는 물론 년도별 추이분석한 데이터를 비교분석하여 평가하였다. 평가기준은 일본전기학회, 일본전력중앙연구소 및 IEEE 편찬위원회, EPRI에서 권고한 판정기준을 참고하였다.

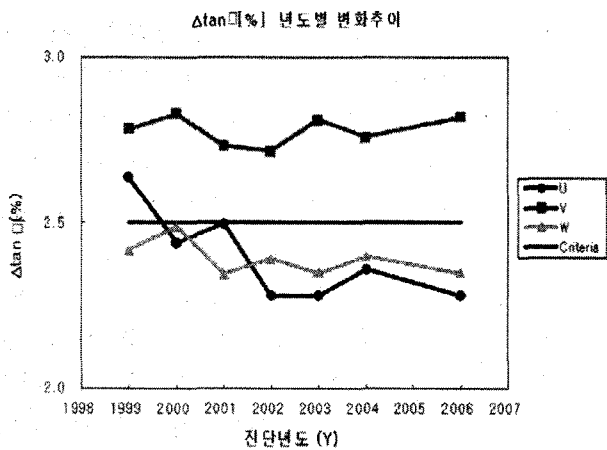
1999년 초기진단 후 1년후 재진단 결과 부분방전크기는 다시 증가하였으며, 그 후 2006년까지는 부분방전크기 및 교류전류변화율, 그리고  $\tan\delta$ 변화율 등 절연열화 특성치의 변화가 없이 일정하게 유지되는 상황이었다. 2006년 최종 진단결과 절연열화특성치 중에서 교류전류변화율이 미세하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 일부 상의 권선에서는  $\tan\delta$ 변화율도 증가하는 추세를 보이고 있었다. 특히 1999년 이후 2006년 최종 진단시험까지 부분방전 개시전압이 서서히 낮아지는 특성을 보이고 있어 슬롯방전에 의한 절연물의 열화가 지속적으로 진행되고 있는 것으로 평가하였다. 따라서 절연물의 특성상 열화가 상당히 진전된 경우에는 갑작스럽게 절연파괴 사고로 진행될 수 있기 때문에 약간의 변화라도 감지되는 시점에서는 권선교체 등 정비대책을 강구해야 한다. 그래서 장기적인 운전과 안정적인 전력공급을 위해서는 권선교체 계획을 수립하여 차기에 권선교체를 시행할 것을 권고하였다.

[표 5] 발전기 고정자 권선 절연진단 결과

시험항목	절연저항 [M $\Omega$ ]	성극지수	$\Delta I$ [%] at 10kV	$\Delta \tan\delta$ [%] at 10kV	부분방전크기 [pC] at 8kV	
양호 판정기준	100M $\Omega$ 이상 (40 $^{\circ}$ C)	2.0 이상	5.0미만	2.5.0미만	10,000미만	
1999년	U상	8,890	10.5	3.52	2,638	35,000
	V상	9,920	11.4	3.72	2,784	30,000
	W상	8,230	12.4	3.44	2,416	32,000
2006년	U상	3,060	7.55	4.11	2,280	40,000
	V상	3,640	5.33	4.03	2,820	40,000
	W상	3,820	8.77	3.75	2,350	40,000

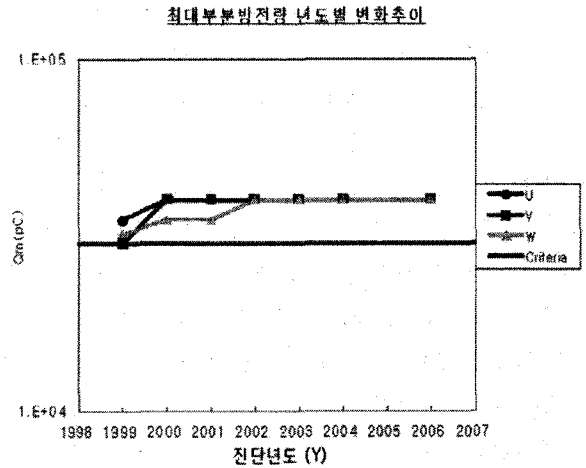


a. 년도별 ΔI 변화추이

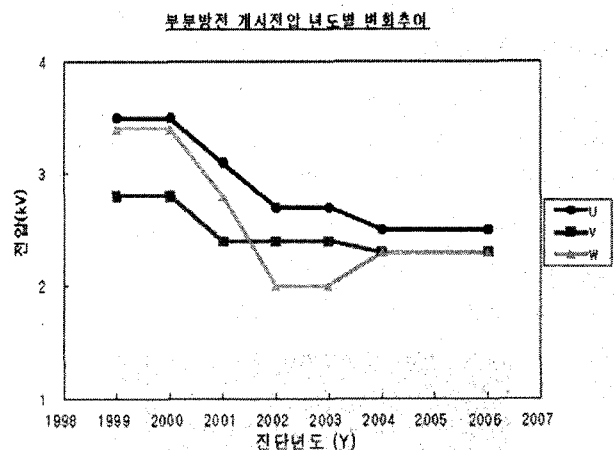


b. 년도별 Δtan δ 변화추이

[그림 7] 년도별 교류전류변화율 및 Δtan δ 변화추이



a. 년도별 부분방전 크기 변화추이



b. 년도별 부분방전 개시전압 변화추이

[그림 8] 년도별 부분방전 크기 및 개시전압 변화추이

## 5. 수명연장 사례

4.1, 4.2항의 진단 결과에 따라 양호한 부품, 예를 들어 철심, 회전자 등은 재사용하고 수명이 초과한 부품에 대해서는 수명연장공사를 권고하였다. 국외 A발전기의 경우에는 고정자권선에 대한 전체 재권선을 시행하였으며, 국내 B발전기의 경우에는 고정자, 회전자 전체

재권선을 시행하였다. 재권선은 KPS에서 수행하였으며, 주자재인 코일은 A발전기인 경우에는 발주자측에서 공급하였으며, B발전기인 경우에는 KPS에서 협력사를 통해 공급, 설치하였다. 설치후 품질확인을 위한 최종시험결과는 [표 6,7]과 같다.

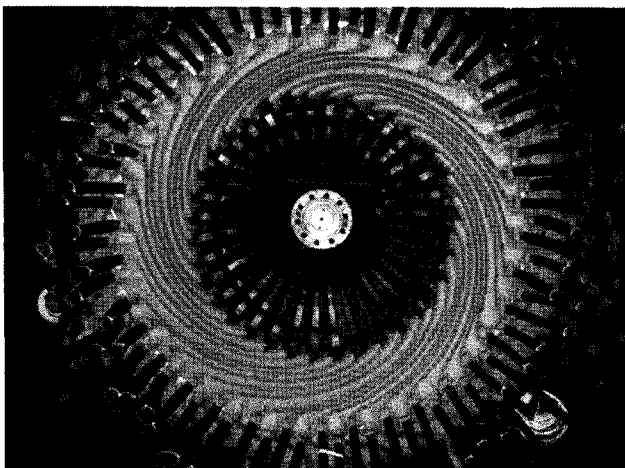
[표 6] A발전기 고정자 권선에서 절연진단 결과

시험항목	절연저항 [MΩ]	성극지수	ΔI [%] at 13.8kV	Δtanδ [%] at 13.8kV	부분방전크기 [pC] at 8kV	
양호 판정기준	100MΩ이상 (40℃)	2.0 이상	12미만	2.0미만	10,000미만	
가스터빈 발전기 "A"	U상	1,915	3.03	1.45	1.06	7,000
	V상	2,167	3.16	1.22	0.92	5,000
	W상	2,090	3.40	1.52	1.03	7,000

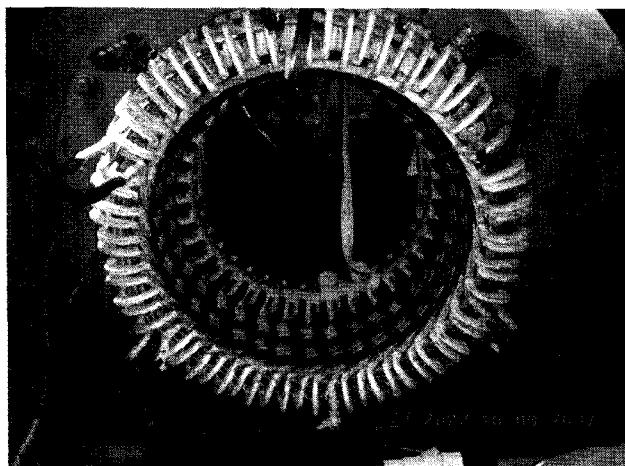
[표 7] B발전기 고정자 권선에서 절연진단 결과

시험항목		절연저항 [M $\Omega$ ]	성극지수	$\Delta$ [%] at 13.8kV	$\Delta$ tan $\delta$ [%] at 13.8kV	부분방전크기 [pC] at 8kV
양호 판정기준		100M $\Omega$ 이상 (40 $^{\circ}$ C)	2.0 이상	12미만	2.0미만	10,000미만
가스터빈 발전기 "B"	U상	9,280	5.05	177	1.14	3,000
	V상	9,530	5.29	1.66	1.10	3,000
	W상	9,220	4.93	1.54	0.80	2,500

A, B발전기 모두 규정전압에서 내전압시험을 실시하여 통과하였으며, 절연특성시험결과도 기준치 이내로 만족하고 있다. 아래 그림9는 발전기 수명연장을 위한 권선교체 진행과정을 보여주고 있다.



a. 국외 A발전기



b. 국내 B발전기

[그림 9] 발전기 수명연장공사

## 6. 결 론

20년 전,후의 장기 운전한 가스터빈 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 정지중 절연진

단시험을 수행하였다. 정지중에 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기 등을 측정하여 잔여 수명평가 및 년도별 변화추이를 종합적으로 분석하여, 수명연장을 위한 정비방안을 권고하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 국외 A 가스터빈 발전기에 대해 교류전류변화율, tan $\delta$  변화율 및 부분방전 크기 등을 측정한 결과 각 상이 기준치를 초과하여 불량한 상태이거나 불량기준에 근접해 있는 상태로 평가되었다. 또한 잔여 절연수명평가에서도 각 상의 잔여 절연수명이 32.8%, 33.8%, 29.9%로 이 발전기는 안전운전단계인 권선교체시점 40%를 이미 초과한 상태이며, 절연파괴 사고 발생 가능성이 있는 운전단계 30%에 도달해 있는 것으로 평가하였다. 운전중 불시에 사고가 발생하면 확대사고 유발 및 자재공급에 상당한 기간이 소요되기 때문에 막대한 비용손실이 발생되기 때문에 사전에 권선교체계획을 수립하여 가능한 빠른 시일내에 권선교체를 시행할 것을 권고하였으며, 1년후 수명연장을 위한 발전기 고정자권선에 대한 전체 권선교체를 시행하였다. 수명연장을 위한 권선교체 후 절연특성값도 양호하게 나타났으며, 장기운전을 위한 품질을 확보하게 되었다. 또한 안정적이며, 신뢰성 있는 전력공급을 위한 기기상태 관리를 위해서는 주기적인 절연진단으로 절연열화 특성치의 변화추이를 지속적으로 관리할 것을 권고하였다.

(2) 국내 B 가스터빈 발전기에 대해 1999년 최초 진단 후 매년 절연특성 관리를 위한 정지중 절연진단을 시행하였다. 최초 진단시 특성치가 불량하여 매년 특성치의 변화추이를 주시하였으며, 그 후 특성치의 변화가 거의 없었으나 2000년 최종 진단결과 절연열화특성치 중에서 교류전류변화율이 미세하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 일부 상의 권선에서는 tan $\delta$ 변화율도 증가하는 추세를 보이고 있었다. 특히 1999년 이후 2006년 최종 진단시험까지 부분방전 개시



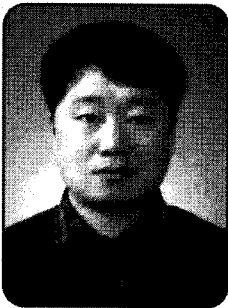
전압이 서서히 낮아지는 특성을 보이고 있어 슬롯방전에 의한 절연물의 열화가 지속적으로 진행되고 있는 것으로 평가하였다. 따라서 절연물의 특성상 열화가 상당히 진전된 경우에는 갑작스럽게 절연파괴 사고로 진행될 수 있기 때문에 약간의 변화라도 감지되는 시점에서는 권선교체 등 정비대책을 강구해야 한다. 그래서 장기적인 운전과 안정적인 전력공급을 위해서는 권선교체 계획을 수립하여 차기에 권선교체를 시행할 것을 권고하였다. 1년후 수명연장을 위한 발전기 고정자권선에 대한 전체 권선교체를 시행하였다. 수명연장을 위한 권선교체 후 절연특성값도 양호하게 나타났으며, 장기운전을 위한 품질을 확보하게 되었다. 또한 절연물의 열화상태를 관리하기 위해서는 주기적인 절연진단으로 절연열화 특성치의 변화추이를 지속적으로 관리할 것을 권고하였다.

**(참고문헌)**

[1] 김희동, 양규현, 주영호 “가스터빈 발전기 고정자 권선의 절연상태 평가”, 전기학회논문지, 2010.  
 [2] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian

Culbert, Hussein Dhirani, “Electrical Insulation for Rotating Machines\_ Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair”, IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.  
 [3] IEEE Std 1434-2000, IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery  
 [4] IEEE Std 62.2-2004, IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus-Electrical Machinery  
 [5] 발전기 권선열화 평가기준 위원회 “발전기권선 절연열화판정기준”, 전력중앙연구소 기술연구소보고 No.67001, 1967. 4  
 [6] Y. Ikeda, H. Fukagawa, “합성레진 절연발전기 권선의 절연열화 판정법”, 전력중앙연구소보고 .W88046, 1988. 6  
 [7] 한국전기연구원, 한전KPS, “발전기 절연수명 진단 시험기술 연구”, 1993. 8

# 드럼 보일러의 변압운전



한전전력연구원  
 엔지니어링센터  
 기계설비진단팀  
 선임연구원 백세현  
 Tel : (042)865-7522

**1. 개요**

변압운전이란 부하에 따라 주증기 압력을 변동시켜 운전하는 방법으로서, 주증기 제어변 개도를 크게 하여

교축손실을 감소시킬 뿐만 아니라, 터빈의 열응력 및 보조기기의 동력절감을 가져와 부분부하에서 열효율을 증가시키기 위한 목적이 있으며 관류형 보일러에서는 일반화된 운전방법이다.

그러나 변압운전은 기저부하 정압운전을 주로 담당하는 드럼형 보일러에서는 적용사례가 극히 드물고 변압운전을 위한 고려사항에 대한 문헌도 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서 본 보고서에서는 장시간 저부하 운전을 하는 드럼 보일러에서 변압 운전을 시행할 경우 예상되는 효과 및 고려해야 할 사항에 대하여 시험적용 사례를 기초로 분석하였다.