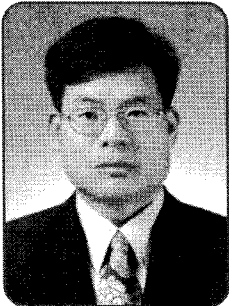


# 가스터빈 발전기 건전성 평가기술



한전 전력연구원  
엔지니어링센터  
전기설비진단팀  
책임연구원/공학박사  
김희동  
Tel : (042) 865-7571

## 1. 서론

1990년대 초에 건설된 복합화력발전소의 운전년수가 20년 이상 경과함에 따라 가스터빈 발전기에 의한 고장발생이 서서히 증가하는 추세에 있다. 가스터빈 발전기 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부에 보이드(void)가 발생하여 열화가 진행하다가 최종적으로 절연파괴에 도달한다[1, 2]. 따라서 정지중에 가스터빈 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태를 평가하기 위해 주기적으로 절연진단 시험을 수행하고 있다. 절연진단 시험항목은 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정점 및 부분방전 측정 등을 포함하며, 측정데이터를 종합적으로 분석하여 절연열화 정도를 판정하고 있으며, 일본 전기학회에서 제정한 판정기준을 활용하고 있다[3]. 그러나 최근 국내에서도 발전기 고정자 권선의 절연열화 판정기준을 정립하는 연구가 진행되고 있다[4].

가스터빈 발전기 회전자 권선은 운전특성상 빈번한 기동정지와 출력 증감발로 인해 응력(stress)이 집중되어 층간단락과 같은 고장이 발생하고 있다. 또한, 회전자 권선의 고장은 저속과 고속회전으로 인한 원심력의 차이, 빈번한 기동정지 및 부하변동에 따른 주기적인 힘이 복합적 요인으로 작용함에 따라 발생한다. 운전중에 받는 연속적인 원심력과 터닝(turning) 운전시에 원심력 변화로 인한 슬롯 내부 권선의 움직임, 빈번한 기동정지로 야기되는 열적, 기계적 응력으로 인한 코일(coil)의 수축과 팽창에 따른 반복적인 피로 및 부하변동시 코일의 발열로 동도체와 절연재료 사이의 열팽창 계수

차이에 의한 상대적인 변위 등으로 인해 층간절연의 위치가 이탈되어 최종적으로 단락을 유발한다[5, 6].

가스터빈 발전기는 고정자 권선과 회전자 권선에 비해 고정자 철심의 과열이나 손상이 발생할 때 사전에 감지 혹은 보호할 수 있는 장치가 없으므로 운전중에 철심의 건전성과 결함에 의한 진전 상태를 점검하기가 어렵다. 특히, 발전기 고정자 철심에서 결함이 발생하면 순환하는 고장전류로 인해 전기적인 손실이 생성되고 국부적인 과열로 진전될 경우 고정자 권선이 손상됨에 따라 접지 사고로 이어지는 큰 고장을 유발하게 된다[7]. 따라서 고가이면서 발전소의 핵심 설비중에 하나인 발전기 고정자 철심의 건전성 여부를 진단하여 결함정도를 판정하는 일은 발전설비 운영에 있어서 신뢰성 확보와 경제적인 정비계획을 수립하는데 중요한 부분을 차지하게 되었다.

본 연구에서는 20년 이상 동안 운전된 가스터빈 발전기 고정자 권선, 회전자 권선 및 고정자 철심의 건전성을 평가하기 위해 정지중에 전기적 진단시험을 수행하였다.

## 2. 가스터빈 발전기 건전성 진단기법

### 2.1 고정자 권선의 진단기법

20년 이상 운전된 가스터빈 발전기(119 MVA, 13.8 kV) 고정자 권선의 절연상태를 분석하기 위해 정지중에 절연진단 시험을 수행하였다. 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정점 및 부분방전 시험을 위해 교류 전원장치와 제어 시스템(HV supply and control system), 슈팅브리지(Schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor), 커플링 유니트(coupling unit) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector)를 사용하였다. 교류전류와 유전정점 시험은 교류 전원장치와 제어시스템(Hipotronics, Type 75.50/30/750 kVA), 슈팅브리지(Tettex instruments, Type 2816)를 사용하였다. 부분방전 시험은 발전기 고정자 권선에 교류 전원장치와 제어시스템을 연결하여 전압을 인가하였으며, 커플링 캐패시터(Hipotronics, 25nF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유니트에 보내어 증폭한 후 부분방전 측

정기(Robinson, DDX7000)에서 방전크기 및 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 30~400 [kHz] 이다. 발전기 고정자 권선의 부분방전 크기가 상전압(8 kV)에서 8,000~35,000 [pC]으로 측정되었으며, 외부잡음은 300~400 [pC] 정도를 나타내고 있다. 따라서 현장에서 측정된 부분방전 크기는 외부잡음이 포함되어 있다. 코로나 탐침시험(corona probe test, Adwel, PPM-97) 장치를 사용하여 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 부분방전 발생 위치 및 크기를 측정하였다.

## 2.2 회전자 권선의 진단기법

그림 1은 가스터빈 발전기 회전자 권선을 나타내었으며, 엔드 링(end-ring)측 점검을 위해 리테이닝 링(retaining ring)을 제거하였다. 가스터빈 발전기 회전자 권선은 N극과 S극이 각각 8개 코일로 구성되어 있다. 가스터빈 발전기 회전자 권선에서 절연저항과 성극지수 시험은 자동 절연상태 시험기(AVO International, 영국)를 사용하였으며, 회전자 권선과 철심 사이에 DC 500V를 인가하여 절연저항을 1분과 10분 동안 측정한다. 절연저항은 1분에서 측정한 값이고, 성극지수는 10분 값을 1분

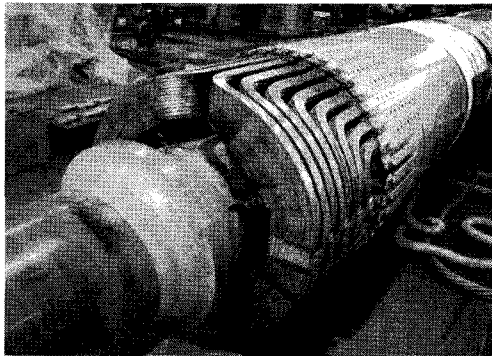


그림 1. 발전기 회전자 권선의 구조

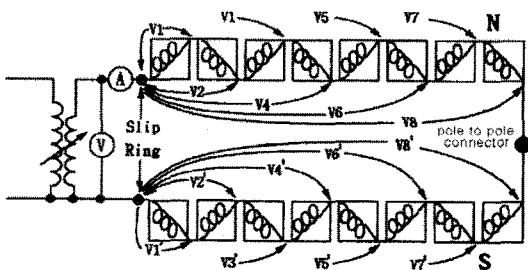


그림 2. 분담전압 시험회로도

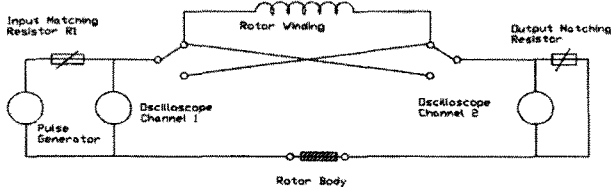


그림 3. RSO 시험회로도

값으로 나눈 값을 나타낸다. 그림 2는 분담전압 시험회로도를 나타내었으며, N극과 S극 코일 각각에서 전압강하를 측정하고 비교하여 증간단락 발생여부를 확인하였다. 그림 3(a), (b)는 RSO(recurrent surge oscillograph) 시험회로도를 나타내었다. RSO 시험은 발전기 회전자 콜렉터 링(collector ring) 양측에 서지(surge) 신호를 인가하여 반사되는 신호와 합성된 파형으로 코일의 상태를 확인한다. 극간(N극과 S극) 코일이 대칭으로 구성되어 있으므로 임피던스가 동일하기 때문에 증간단락이 없는 양호한 코일은 RSO 파형 형태가 일치하게 분석된다.

## 2.3 고정자 철심의 진단기법

그림 4에 나타낸 바와 같이 저 자속 철심시험법인 EL-CID (ELectromagnetic Core Imperfection Detector)를 사용하여 가스터빈 발전기 (167 MVA, 18 kV) 고정자 철심의 건전성을 평가하였다. 정상상태에서 주자속의 4[%] 정도만 인가시켜 시험을 실시하고, 센싱 헤드(sensing Head)를 철심 표면 위로 움직이면서 결합영역에서 유도되어 흐르는 전류를 자기적으로 감지하는 방법이다.

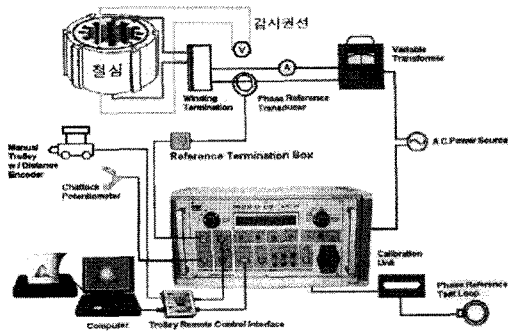


그림 4. EL-CID 시험의 구성도

대용량 발전기 고정자 철심을 시험할 때에는 여자권선의 용도에 맞게 넓은 도체 면적을 가진 케이블이 감겨져야 한다. 또한 철심의 실제 자속을 측정할 수 있도록 감지코일(search coil)을 설치하는 것이 바람직하며, 철심을 감은 여자권선의 위치는 유용한 데이터를 얻는데 중요한 역할을 한다. 특히 권선이 철심 안쪽에 바로 감겨지는 것 보다 여자권선 내경 중심축을 따라 늘 어지도록 하는 것이 중요하며, 손상된 영역을 분석하는데 기준으로 설정하기 위해 철심에 번호를 부여하는 것이 필수적이다. 이렇게 함으로써 다음번 시험결과와 쉽게 비교할 수 있는 장점이 있다.

시험절차는 먼저 고정자 철심 둘레로 여자용 케이블(toroidal winding)을 설치하고 감지코일과 센서장치(Chattock 전위계) 등을 연결한 다음 감지코일 전압을 결정하여야 한다. 장비설치가 모두 완료되면, 주 자

속의 4[%]가 되도록 시험전압을 인가하고 철심을 따라 감지코일이 움직(scan)하면서 철심 절연상태를 측정하면 된다. 이때 측정전류는 mA(milliampere)로 기록되며, 기준값(제조사 권고 : 100 mA)을 넘는 철심영역은 절연물질로 표시하고 신호의 극성을 점검하여야 한다. 특히 고정자 권선이 들어가 있는 경우 손상이 육안으로 식별되지 않기 때문에 신호의 극성에 따라 손상영역을 알아내기 위해 극성 판별은 중요하며 이때 시험자의 경험과 기술수준이 요구된다.

여자용 시험전압은 발전기 정격에 따라 계산되며, 아래 식 (1)과 (2)는 2병렬 권선 구조의 72개 슬롯(slot)을 갖고 있는 발전기(정격전압 13.8 kV)를 시험할 때 감지코일 전압(V<sub>T</sub>)의 계산 예를 나타내었다.

$$V_T = 0.04 \times \frac{V_{P-P}}{2\sqrt{3} K t_p} = 0.04 \times \frac{13800}{2\sqrt{3} \times 0.92 \times 12} = 14.43 \text{ [V]} \quad (1)$$

$$t_p = \frac{\text{Slot 수} \times \text{Slot 당 권선수}}{\text{상수} \times \text{병렬 회로수} \times \text{상당 권선수}} = \frac{72 \times 2}{3 \times 2 \times 2} = 12 \quad (2)$$

- 여기서 V<sub>P-P</sub> : 발전기 단자전압(선간)  
 t<sub>p</sub> : 상간 직렬권선 회로수(턴수)  
 K : 권선 분포 및 단절계수의 합산치  
 (발전기의 경우 0.92 적용)  
 고정자 철심길이 : 3.25[m]

실제 운전중인 대형발전기 고정자 철심에서 인위적 결함을 만들기 어렵기 때문에 소형발전기 고정자 철심을 모의시험 대상으로 선택하여 시험실에서 EL-CID를 시험하였다. 발전기 고정자 철심의 표면 또는 내면에 결함이 있을 경우에는 고장전류 파형이 검출된다. 헤드 탐지기(head detector)에 의해 검출된 축방향 전류의 크기로 발전기 고정자 철심의 건전성 여부를 판별한다. 또한 장비 제작사는 축방향 전류의 크기가 100[mA] 이하일 때 고정자 철심상태가 양호한 것으로 판정하고 있다[7]. 따라서 소형발전기 고정자 철심의 인위적 결함 크기에 따라 측정된 고장전류 파형은 실제 운전중인 대형발전기 고정자 철심의 건전성 평가에 직접적으로 활용이 가능하다.

### 3. 가스터빈 발전기의 특성

가스터빈 발전기(119 MVA, 13.8 kV) 고정자 권선은 전 (global) VPI(vacuum pressure impregnation) 함침 방식으로 제작되었다. 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. 특히, 전 VPI 함침 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 가속화 시킨다. 국내에도 전 VPI 함침 방식으로 제작된 가스터빈 발전기 26대가 운전중에 있다. 운전년수가 20년 이상 경과함에 따라 고정자 권선에서 측정된 부분방전 크기가 13,500 [pC]~18,000 [pC]을 나타내고 있는 발전기도 현재 운전중에 있다. 이러한 발전기는 주기적으로 정지중에 절연진단 시험을 수행하여 부분방전 크기의 추이를 관리할 필요가 있다.

가스터빈 발전기 회전자 권선은 장기간 운전에 의한 사이클(cycle) 피로는 동도체 표면에 균열을 생성하며, 냉각용 공기흡입 필터 등의 문제로 흡입공기 성분중에 포함된 먼지, 도전성 물질 등의 영향으로 고장이 발생한 것으로 분석되었다[8]. '95~'98년까지 국내 발전기 회전자에 의한 고장발생수가 20건이며, 이중에 회전자 단락 및 접지가 15건, 아크(arc) 손상 1건, 리드 플렉시블 커넥타(lead flexible connector) 단선 3건 및 코일(coil) 단선이 1건을 차지하고 있다[9]. 따라서 발전기 회전자 권선에서 고장 발생이 현저하게 높게 나타나기 때문에 예방대책 수립이 절실하게 필요한 실정이다. 현재 발전기 회전자 권선의 절연상태 진단은 절연저항 시험, 성극지수시험, 분담전압시험 및 RSO 시험 등을 주로 정지중(off-line)에 시행하고 있다.

그림 5에 나타낸 바와 같이 발전기 고정자 철심은 주자속의 통로가 되며, 고정자 권선을 지지하는 역할을 한다. 운전중에 발생하는 고정자 철심 내부의 와전류손과 히스테리시스손을 줄이기 위해 얇은 규소강판(두께 : 0.35~0.5 mm, 규소 함유량 : 2~4 %)을 부채꼴로 만들어 슬롯(slot)을 파고 찍어낸 후 절연 바니시(vernish)를 칠해 건조시킨다.

발전기는 철심 수십만 장을 고정자 틀 내측에 부착되어 있는 키바(key bar)에 적층하며, 50~60[mm] 적층시마다 10~13[mm]의 간격편을 삽입시켜 통풍 홈을 만들어 냉각매체가 지나갈 수 있도록 한다. 고정자 철심 단부는 누설자속에 의한 표류 부하손을 줄이기 위해 적층상태에서 에폭시 수지로 접착하는 기술, 비자성 내측 간격편

채택 및 철심단부 조임판(압판)의 도전성 차폐판 처리 등 손실을 경감하는 구조로 되어 있다. 또한 축방향 누설 자속을 감소시키기 위해 고정자 철심단부를 계단식으로 가공하여 공극을 크게 유지하고 주 자계에 의한 자속밀도를 감소시키며, 더불어 수소 통풍로의 저항을 줄일 수 있다.

대용량 발전기에서는 외측 간격편과 철심단부 조임판(압판) 사이에 전기철판을 단락한 상태로 구성되어 있고, 적층시킨 자속분로(shunt)를 설치하여 고정자 철심단부에 축방향 누설 자속량을 저감하여 과열을 방지한다. 고정자 단부 누설자속으로 인한 과열을 방지하기 위해 여러 가지 기술이 사용되고 있으며, 그 중에서 누설자속에 대해 자기저항을 크게 하는 방법, 와전류에 의해 전기저항을 높게 하는 방법 및 고정자 단부 측에 더 많은 냉각매체가 통과하도록 설계하는 방법 등을 많이 고려하고 있다.

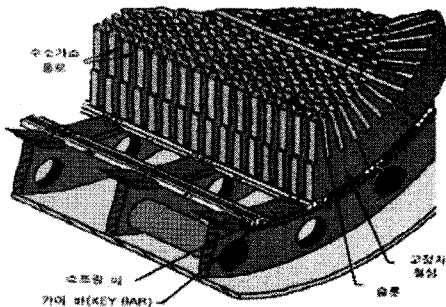


그림 5. 발전기 고정자 철심의 구조

## 4. 진단결과 분석 및 고찰

### 4.1 고정자 권선의 진단결과 분석

표 1은 가스터빈 발전기(119 MVA, 13.8 kV) 고정자 권선 A상, B상 및 C상에서 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 측정하여 결과를 비교하였다. 발전기 고정자 권선의 절연열화 상태는 일본 전기학회에서 제정한 판정기준을 참고하였다[3]. 발전기 고정자 권선 B상과 C상의 절연저항, 성극지수, 교류전류의 증가율( $\Delta I$ ), 유전정접의 증가( $\Delta \tan \delta$ ) 및 부분방전 크기가 기준값의 범위 이내에 있기 때문에 절연상태는 양

호하게 평가되었다[10, 11]. 그러나 A상은 절연저항, 성극지수,  $\Delta I$  및  $\Delta \tan \delta$ 는 양호하고 부분방전 크기가 2007년에 10,000 [pC]에서 갑자기 35,000 [pC]으로 측정되어 기준값의 범위를 초과하여 불량으로 판정되었으며, 전회 측정값을 비교해 보면 3.5배가 급증한 상태이다. 따라서 발전기 고정자 권선 A상에서 부분방전 발생 위치를 찾고 크기를 재확인하기 위해 코로나 탐침 시험을 수행하였으며, 그림 6에 측정결과를 나타내었다.

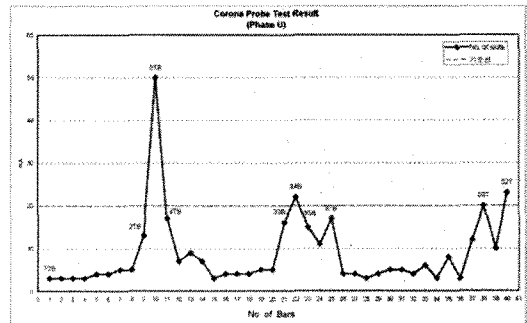


그림 6. Corona probe 시험결과

그림 6에서 가로축은 고정자 권선의 번호를 나타내고



그림 7. 발전기 고정자 권선의 결함위치 정비

세로축은 방전전류의 크기(mA)를 나타내었다. 정지중에 기준치를 초과한 A상에 대해 코로나 탐침시험 결과 3T(top bar)는 50 [mA], 34B(bottom bar)는 22 [mA], 50T는 20 [mA] 및 52T는 23 [mA]을 나타내었다. 방전전류에 대해 예폭사-마이크 절연재료를 사용하는 발전기 고정자 권선의 절연열화 판정기준은 20 [mA] 이하를 양호하게 평가하고 있으며, IEEE Std 1434에서

표 1. 발전기 고정자 권선에서 절연진단 결과

시험항목		절연저항 [M $\Omega$ ]	성극지수	$\Delta I$ [%]	$\Delta \tan \delta$ [%]	부분방전 크기 [pC] at 8kV
양호 판정기준		100M $\Omega$ 이상	2.0 이상	5.0미만	2.5미만	10,000미만
가스터빈 발전기	A상	2,520	4.88	0.37	0.23	25,000(35,000)
	B상	2,290	5.20	0.34	0.23	8,000
	C상	2,200	5.27	0.31	0.41	8,000

제정한 판정기준을 참고하였다[12]. 따라서 3개의 권선은 기준값보다 약간 높게 분석되었으나 3T는 최대 50 mA의 방전전류가 측정되어 심하게 절연열화가 발생한 것으로 평가되었다. 특히, 발전기 고정자 권선 3T는 A상이고 하부에 설치된 3B도 동일한 상으로 운전전위가 높은 3T에서 열화가 많이 진행되었을 것으로 추정할 수 있으며, 보아 스코프(bore-scope) 점검결과 상부 권선 3T에서 백색파우더(white powder)가 많이 관측되었다. 자외선 카메라 관측에서도 슬롯 내부의 권선과 리드부에서는 부분방전이 측정되지 않았으며, 주로 3T의 단말권선에서 부분방전이 발생하였다. 그림 7에서 나타낸 바와 같이 발전기 고정자 권선 3T의 단말권선에서 부분방전 크기를 감소시키기 위해 웨지(wedge)를 약 50 [cm] 절단하였으며, 내부에 도전성 페인트 도포 작업을 마치고 웨지를 다시 복구하였다. 그리고 정지중에 부분방전 크기를 재시험한 결과 25,000 [pC]으로 측정되어 10,000 [pC] 정도가 감소하였다. 코로나 탐침시험 결과에서도 발전기 고정자 권선 3T의 방전전류가 40 [mA]로 10 [mA]가 낮게 측정되었다. 도전성 페인트 도포 작업이 근본적인 해결방법은 아니지만 짧은 시간에 수행할 수 있는 최적의 정비방법으로 사료된다. 왜냐하면 앞에서 설명한 바와 같이 가스 터빈 발전기가 전 VPI 함침 방식으로 제작되어 한 개의 권선을 교체하기 위해 주위의 2~3개 권선들을 작업할 때 오히려 손상을 줄 수 있기 때문이다. 따라서 여분(spare)의 권선이 없어 제작에도 장시간이 소요될 뿐만 아니라 권선 교체 작업도 어렵기 때문에 가장 좋은 방법은 예폭사-마이크로 캐패시터를 설치하여 운전중에 발전기 고정자 권선의 부분방전 추이를 관리하는 것이다.

#### 4.2 회전자 권선의 진단결과 분석

가스 터빈 발전기 회전자 권선에서 층간단락이 단지 몇 개의 턴에서 발생한 경우는 문제가 없지만, 여러 코일에서 다발적으로 발생한 경우 회전자 권선 절연재료가 경제적인 수명에 도달했음을 나타내 준다. 또한, 층간단락 발생율이 전체 코일중에 5~10% 이상이 되면 각 극간(N극과 S극)에서 자속불평등과 줄열( $I^2R$ )에 의한 온도편차로 인한 진동증가와 자속이 감소함에 따라 여자기에서 자속공급이 증대하여 여자기 과열 등이 발생한다[5, 13]. 특히, 여자기 과열로 인해 발전기 정격 출력이 제한되어 출력감발을 유발한다.

따라서 가스 터빈 발전기는 기력이나 원자력 발전기보다 가혹하게 운전됨에 따라 불시정지 혹은 장기간 정비를 필요로 하는 고장이 발생하고 있다. 따라서 발전기 회전자

권선의 층간단락에 의한 고장 발생이 두드러지게 나타나기 때문에 예방대책 수립이 절실하게 필요한 실정이다.

발전기 회전자 권선이 건전한 경우에 절연저항은 200~500M $\Omega$ 이며, 성극지수는 1.5~2.0 정도를 나타내고 있다. 가스 터빈 발전기 회전자 권선의 절연저항은 250M $\Omega$ 이며, 성극지수는 1.7로 양호하게 분석되었다. 발전기 정지중에 회전자 권선에서 분담전압과 RSO 시험을 수행함으로써 층간단락 여부를 판정할 수 있다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 인가전압은 AC 29.7V이며, 전류는 4.13A를 인가하면서 가스 터빈 발전기 회전자 권선에서 분담전압을 측정하여 표 1에 나타내었다. N극과 S극 사이의 코일간 및 극간 편차는 각각 0~0.3%, 0.5%로 양호하게 분석되었다. 분담전압의 판정기준은 코일간 편차는 5%, 극간 편차는 2% 이내면 양호한 것으로 평가한다[6, 13].

표 2. 발전기 회전자 권선의 분담전압 측정결과

코일번호	N극 측정치	S극 측정치	전압차(N/S)	편 차(%)
1	1.02	0.98	-	-
2	1.11	1.07	3.46/3.46	0
3	4.57	4.53		
4	4.68	4.64	3.92/3.83	0.3
5	8.52	8.47		
6	8.64	8.59	4.04/4.03	0.2
7	12.68	12.62		
8	12.82	12.75	0.07	0.5

그림 8(a)~(d)는 가스 터빈 발전기 회전자 권선에서 RSO 시험결과를 나타내었다. 그림 8(a)는 회전자 권선의 상태가 양호하게 분석되었으며, N극과 S극 사이의 파형이 거의 일치하였다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 분담전압과 RSO 시험결과가 상호 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 8(b)~(d)는 회전자 권선에서 턴수를 증가하면서 층간단락을 모의한 RSO 시험결과를 나타내었다. 그림 8(b)는 3개의 턴에서 층간단락 발생, 그림 4(c)는 5개의 턴에서 층간단락 발생 및 그림 8(d)는 7개의 턴에서 층간단락이 발생한 경우를 나타내고 있다. 회전자 권선에서 층간단락 발생 턴수가 증가할수록 N극과 S극 사이의 파형 형태가 큰 것으로 분석되었다[14]. 그림 9(a), (b)는 회전자 권선에서 층간단락 코일의 위치에 따라 모의한 RSO 파형을 나타내었다. 9(a), (b)는 No. 1, 3 코일부근에서 층간단락이 발생하였으며, RSO 파형 형태가 전단부에서 크게 감지되었다. 그러나 9(c)는 RSO 파형 형태가 후단부로 이동함에 따라 No. 8 코일

부근에서 층간단락이 발생하였다. 따라서 정지중인 발전기 회전자 권선에서 RSO 파형을 분석함으로써 층간단락 턴수와 위치를 정확하게 분석할 수 있었다[14].

### 4.3 고정자 철심의 진단결과 분석

계획예방정비기간 동안에 가스터빈 발전기(167 MVA, 18 kV) 회전자를 인출하고 내부를 점검한 결과 그림 10(a), (b)에 나타난 바와 같이 일부분의 단부철심 (stepped core-end region)의 파단손상과 철심 중심부에서 이탈된 통풍구 간격편(vent finger bar)이 내부로 유입되면서 다른 철심들을 손상시켰다. 가스터빈 발전기는 60개의 슬롯과 2병렬 권선으로 구성되어 있다. 앞에서 언급한 식 (1), (2)에 의해 감시전압을 계산하면 22.5[V]가 됨으로 이 전압을 인가하여 EL-CID를 시험하였다. 따라서 고정자 철심 손상부에서 고장전류를 측정함으로써 결함 정도를 확인하여 정비대책을 마련할 필요가 있다.

가스터빈 발전기 고정자 철심 손상부에서 고장전류 파형을 측정하여 그림 11에 나타내었다. 그림 11에 나타난 바와 같이 고장전류 파형을 근거로 크기가 60[mA] 이상으로 측정된 슬롯번호와 손상발생 위치를 표 3에 나타내었다. #23 슬롯에서 고장전류 크기가 110[mA]로 가장 높게 나타났으며, 대부분의 손상부에서 65~98[mA]를 나타내었다. 그림 12는 #23 슬롯에 대한 고장전류의 상세파형을 나타내었으며, 고정자



(a) 철심단부 파단 (b) 철심중간 표면손상

그림 10. 발전기 고정자 철심의 손상위치

철심 손상정도가 가장 심하게 분석되었다. 실제적으로 철심단부에서 멀리 떨어진 손상부(3.3m)에서 높은 고장전류 파형이 나타나 측정의 신뢰성을 확인할 수 있었다[15]. 그러나 그림 10(a)에 나타난 바와 같이 단부철심에서 손상정도가 제일 크게 나타났으나 고장전류는 50[mA]로 낮게 분석되었다. 따라서 EL-CID의 단점은 단부철심에서 신호 스캐닝(scanning)과 해석이 어렵다는 것을 확인할 수 있었다[7].

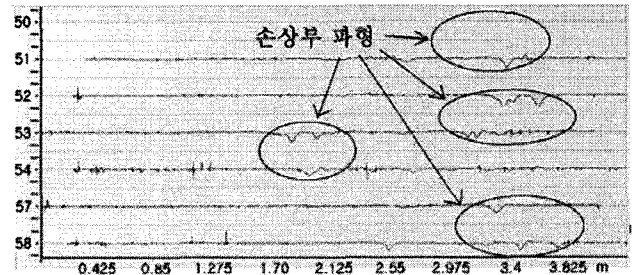
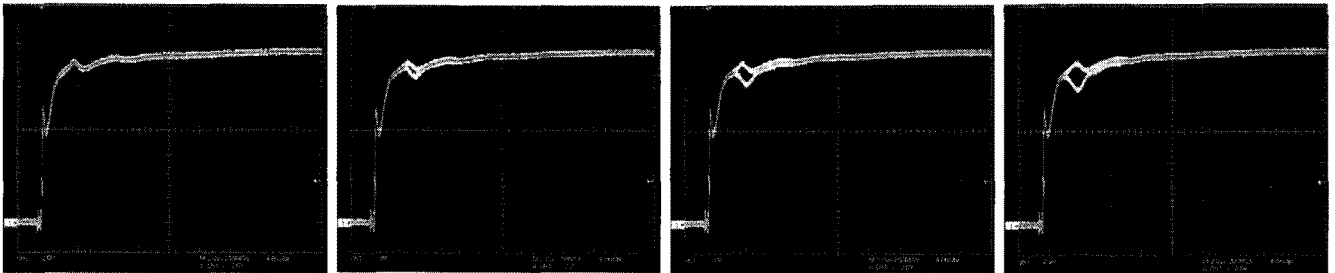
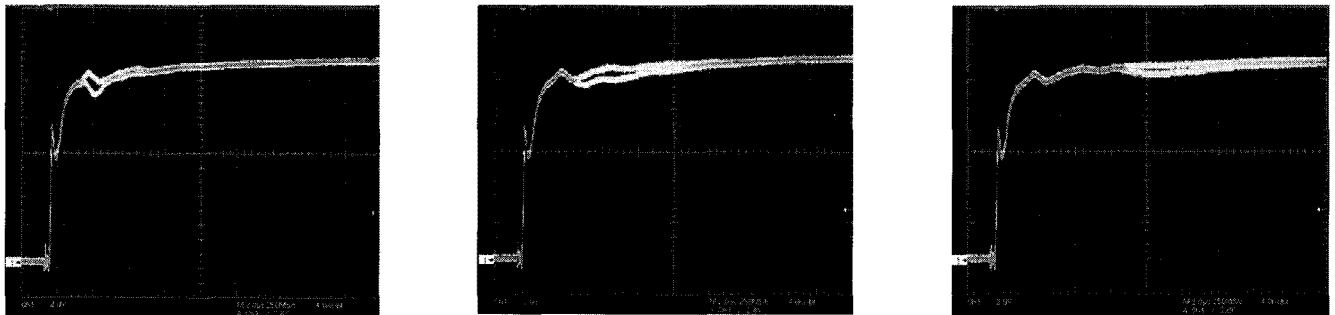


그림 11. 고정자 철심 손상부 측정파형



(a) 양호 (b) 3개의 턴 단락 (c) 5개의 턴 단락 (d) 7개의 턴 단락

그림 8. 층간단락 발생 턴수에 따른 RSO 파형



(a) No. 1 코일에서 층간단락 (b) No. 3 코일에서 층간단락 (c) No. 8 코일에서 층간단락

그림 9. 층간단락 발생 위치에 따른 RSO 파형

표 3. 가스터빈 발전기 고정자 철심 결함에서 고장전류의 크기

순번	슬롯번호	고장전류[mA]	위치[m]	비고
1	4	84	3,2	○ 측정 : 여자기측 기준 ○ 길이 : 4,25[m] ○ 슬롯수 : 60 ○ 분석대상 : 60[mA] 이상
2	23	110	3,3	
3	24	70	3,3	
4	49	67	3,4	
5	52	95	3,3, 3,5	
6	53	75	1,9	
7	58	65	3,4	

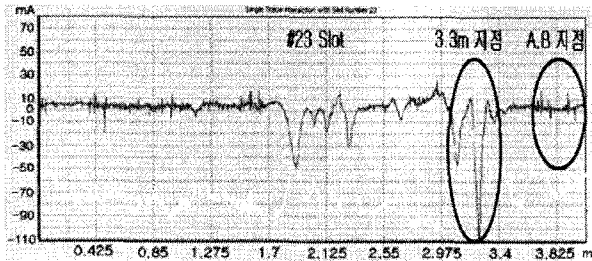


그림 12. 상세 측정파형(#23 Slot)

가스터빈 발전기 고정자 철심에서 결함이 검출된 지점을 찾기 위해서 철심 상부를 센서(sensor)의 양쪽 끝에서 각각 한번씩 스캔(scan) 하도록 하였다. 결함이 존재하면 동일 지점에서 검출파형의 변화가 크게 나타났으며, 건전한 슬롯과 결함이 발생한 슬롯에서 고장전류의 변화를 비교하여 그림 13에 나타내었다. 이러한 결과들은 이미 발표된 문헌들과 일치하였다[7, 15]. 따라서 발전기 고정자 철심의 고장 원인은 주로 외부에서 이물질 유입, 국부적 과열에 의해 생성된 철심절연의 손상 및 고정자 권선의 절연파괴 등으로 분류할 수 있다.

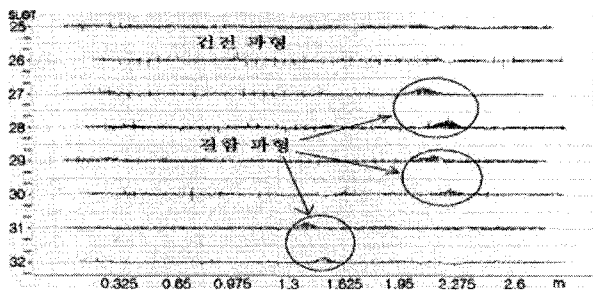


그림 13. 건전한 슬롯과 결함슬롯에서 검출 파형의 비교

10대 이상의 가스터빈 발전기 고정자 철심에서 EFL-CID를 사용하여 측정된 고장전류의 크기가 표 2와 유사하게 분석됨에 따라 표 4와 같은 판정기준을 만들어 운영하게 되었다. 시험장비 공급자가 권고한 철심관리 기준인 100[mA]를 다소 초과하더라도 철심성능 저하로 인한 영향은 크지 않는 것으로 판단되었다. 또한, 발전기 고정자 권선의 웨지(wedge) 상태, 제작사의 절연 방법 및 함침방식 등에 따라 측정값이 다소 차이를 보이고 있으므로 상태판정에 있어 일률적인 관리기준 적

용 대신에 발전기 종류와 제작사별로 특성을 분석하여 종합적으로 판단할 필요가 있다[16, 17].

따라서 국내 가스터빈 발전기 고정자 철심의 건전성 평가, 발전기의 운전특성, 정비주기 및 관리상태 등을 종합적으로 검토한 결과 공급자의 권고치(100 mA 미만)가 다소 엄격하게 기준을 제시하고 있으므로 설비관리 측면에서 어려움이 있었다. 실제로 공급자의 권고 기준값을 다소 초과하더라도 설비운영에 영향을 미치지까지는 상당한 기간이 소요되기 때문에 요주의(100~200 mA) 항목을 추가하여 트렌드(trend)를 관리할 필요성이 있다. 그리고 고장전류의 크기가 200[mA]를 초과한 결함영역에 대해서는 절연불질로 해당부위를 표시하고, 검출파형의 전류극성을 확인함으로써 결함 혹은 손상 의심 지점을 추정하여 세밀하게 점검을 시행한다. 또한, 필요시에는 고정자 철심절연의 루프시험(loop test) 실시와 정밀점검, 온도상승 시험, 발전기 구조물 점검, 고정자 단말권선(endwinding)에서 고유진동 주파수 분석, 고정자 권선의 부분방전 및 절연역율 등 전기적 및 기계적 특성을 종합적으로 진단하여 건전성을 평가할 필요가 있다.

표 4. 가스터빈 발전기 고정자 철심의 판정기준

고장전류 [mA]	관리기준		비고
	개선전	개선후	
100 미만	양호	양호	
100~200	-	요주의	추적관리 대상
200 초과	-	점검	철심절연 상태점검 및 온도상승 시험 등이 필요

## 5. 결 론

20년 이상 동안 운전된 가스터빈 발전기 고정자 권선, 회전자 권선 및 고정자 철심의 건전성을 평가하기 위해 정지중에 전기적 진단시험을 수행하고 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정지중 진단결과 B상과 C상에서 절연저항, 성극지수,  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및 부분방전 크기가 기준값의 범위 이내에 있기 때문에 절연상태는 양호하게 평가되었다. 그러나 A상은 절연저항, 성극지수,  $\Delta I$  및  $\Delta \tan \delta$ 는 양호하고 부분방전 크기가 2007년에 10,000 [pC]에서 갑자기 35,000 [pC]으로 측정되어 기준값의 범위를 초과하여 불량으로 판정되었으며, 전회 측정값을 비교해 보면 3.5배가 급증하였다. 가스터빈 발전기 고정자 권선 A상에서 부분방전 발생 위치를 확인하고 정비를 마친 후에 재진단하여 부분방전 크기를 측정된 결과 25,000

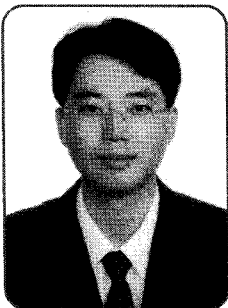
[pC]으로 감소하였으며, 코로나 탐침시험 결과에서도 고정자 권선 3T의 방전전류가 최대 40 [mA]로 측정되어 10 [mA]가 감소하였다. 가스터빈 발전기 고정자 권선에서 부분방전 크기가 25,000 [pC]으로 높게 분석되어 운전중에 진단이 가능하도록 에폭시-마이가 커플러를 설치하고 분기별로 측정하여 트렌드를 관리하고 있다.

- (2) 가스터빈 발전기 회전자 권선의 절연저항은 250 M $\Omega$ 이며, 성극지수는 1.7로 양호하게 측정되었다. 회전자 권선에서 분담전압을 측정한 결과 N극과 S극 사이의 코일간 및 극간 편차는 각각 0~0.3%, 0.5%로 양호하게 분석되었다. 분담전압 측정결과와 마찬가지로 RSO 파형형태도 N극과 S극이 일치하게 나타나기 때문에 양호하게 분석되었다.
- (3) 가스터빈 발전기 회전자 권선에서 층간단락을 모의한 결과 단락 발생 턴수가 증가할수록 N극과 S극 사이의 파형 편차가 큰 것으로 분석되었다. No. 1, 3 코일부근에서 층간단락이 발생하면 RSO 파형 형태가 전단부에 나타나고, No. 8 코일부근에서

층간단락이 발생하면 RSO 파형 형태가 후단부로 이동함을 확인하였다. 따라서 정지중인 발전기 회전자 권선에서 RSO 파형을 분석함으로써 층간단락 턴수와 위치를 정확하게 분석할 수 있었다.

- (4) 가스터빈 발전기 고정자 철심 내부를 육안으로 점검한 결과 여러 군데에서 손상이 발생되었으며, 고장전류의 크기가 110[mA]로 가장 높게 나타난 #23 슬롯에 대해 상세파형을 분석한 결과 운전 중에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 그리고 EIL-CID는 철심내부에서는 작은 결함도 감지가 가능하지만 단부철심영역에서 심각한 결함을 갖고 있어도 신호 스캐닝과 해석이 어렵다는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 가스터빈 발전기 고정자 철심에서 측정한 고장전류를 분석한 결과 공급자가 권고한 기준값(100 mA 미만)을 다소 초과하더라도 설비운영에 영향을 미치지까지는 상당한 기간이 소요된다. 따라서 요주의(100~200 mA)로 관리하여 트렌드를 분석하고, 고장전류가 200[mA]를 초과할 경우에는 해당부위를 중심으로 종합적인 진단이 필요하였다.

## 온실가스 · 에너지 목표관리제 추진현황 및 계획



에너지관리공단  
산업발전 목표관리실  
팀장/공학박사  
임 상 국  
Tel : (031)260-4190

### ■ 온실가스 · 에너지 목표관리제 개요

#### 1) 제도 의의

온실가스 · 에너지 목표관리제는 대규모 사업장의 온실가스 감축과 에너지 절약에 관한 목표를 설정하여 관

리하는 제도이다. 동 제도는 산업 · 발전, 건물, 교통, 폐기물 등 부문별로 운영되며, 2007년도 우리나라 온실가스 배출량(620백만톤)의 약 70%를 관리하게 된다. 대상 사업체를 보면 산업 · 발전부문이 370여개, 건물 · 교통이 40여개, 폐기물이 20여개, 농업 · 축산이 20여개 등으로 약 470여개 온실가스 다배출사업장이 목표관리제의 규제대상에 편입되어 2012년부터 감축 · 절감 목표의 이행에 본격 나서야 하는 상황이다.

온실가스 · 에너지 목표관리제는 온실가스 및 에너지에 대한 감축 · 절약목표를 정부와 기업간의 협의를 통해 정하고, 이행계획, 관리체계 등을 통해 목표를 효율적으로 달성하도록 하는 제도이다. 본 제도의 가장 큰 특징은 목표협약, 이행강제 및 실적의 제3자 검증에 있다. 온실가스 · 에너지 목표관리제의 “목표”는 정