

# 발전기 운전중 회전자 계자권선의 단락 진단기법에 관한 연구

이영준\*, 김희동\*, 박종정\*, 주영호\*, 조지원\*\*, 이병하\*\*  
\*전력연구원, \*\*인천대학교

## Shorted-Turn Detction Techniques for Generator Rotor

Young-Jun Lee\*, Hee-Dong Kim\*, Jong-Jeong Park\*, Young-Ho Ju\*, Ji-Won Joe\*\*, Byung-Ha Lee\*\*  
\*Korea Electric Power Research Institute, \*\*Inchon University

**Abstract** - A shorted-turn test was performed at the Pyungtaek combined cycle power plant on gas turbine generator #4. The test was conducted using a permanent flux probe and digital oscilloscope.

The flux probe, installed in the generator air gap, senses the field winding slot leakage flux and produces a voltage proportional to the rate of change of the flux. This pattern of flux variation is a signature unique to each field winding.

We have also applied a waveform analysis technique that can identify the pole location, slot number, and number of shorted-Turns with each slot.

평가하고, 회전자 계자권선의 층간단락 여부를 판정. 그 결과를 제시하고자 한다.

### 2. 회전자 계자권선의 층간단락

#### 2.1 회전자 구조

발전기의 회전자는 강(鋼)제의 실린더 형상으로 제작되며 권선은 동선으로 이루어져 있다. 그림 1은 회전자 슬롯의 단면도를 보여주는 것으로써 슬롯내의 권선은 대략 7~18개 정도의 동선으로 이루어져 있으며 절연체에 의하여 각각 분리되어 있고, 회전자 몸체와도 분리되어 있다. 이들 개별권선 사이에 사용되는 대표적인 절연재료는 epoxy-glass나 nomex 등이 사용되며 두께는 0.3~1.0mm 정도이다.

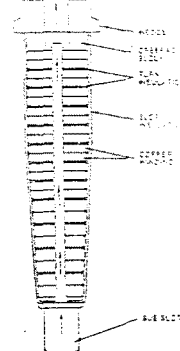


그림 1. 회전자 슬롯 단면도

### 1. 서론

가스 또는 스팀터빈 발전기의 회전자 계자권선의 층간단락은 발전기의 출력제한, 진동증가, 성능저하 등 비 정상적인 운전의 원인을 제공하며, 심한 경우 발전기의 불시정지 및 장기간 정비를 요하는 고장을 일으키기도 한다. 비 대칭적으로 발생한 층간단락, 즉 N, S극중 어느 한쪽 극에서 단락이 발생되었을 경우 비 대칭적인 발열이 회전자에서 발생되며 이로 인하여 회전자의 휘어짐 현상이 발생한다. 이러한 휘어짐은 계자전류의 변화와 더불어 회전자의 불평형, 즉 축진동의 변화를 일으킨다. 그러나 이러한 축진동 발생이 회전자 권선의 단락에 의한 것인지를 판단하기란 쉽지 않으며, 발전기에서 회전자를 인출하여 점검하더라도 상당히 어렵다. 더욱이 발전기 회전자는 단조된 회전자를 가공하여 슬롯을 만들고, 이 슬롯내에 회전자 권선을 삽입하여 양쪽을 retaining ring으로 지지하였기 때문에 시험 및 진단기술을 적용하기가 매우 어려운 실정이다.<sup>(1)</sup>

현재 국내의 발전기 회전자 계자권선의 진단방법으로는 발전기 정지시이나 가능한 절연저항시험, 성극지수시험, 분담전압측정 등 주로 off-line시험에 의존하고 있는 실정으로 진단시험을 위해서는 발전기 정지가 수반되어야 하며, 정확한 계자권선의 층간단락이 발생한 권선의 위치 및 갯수 등을 탐지하기란 매우 어렵다. 이러한 문제점으로 인하여 최근 선진 각국에서는 발전기의 정지없이 진단이 가능한 on-line 진단 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.<sup>(2)(3)</sup>

본 논문에서는 발전기의 정지없이 flux probe 및 범용의 디지털 오실로스코프를 이용한 발전기 회전자 계자권선의 층간단락 진단기법을 제시하고 평택화력 #4 가스터빈발전기에 대한 현장진단을 통해 얻어진 결과를 분석, 검토하여 운전중 진단기법의 신뢰성을

#### 2.2 층간단락

발전기 회전자 계자권선의 층간단락은 한 슬롯내에 포함된 개별권선 사이의 접촉에 의해 발생하는 것이다. 그림 2는 회전자 권선에 층간단락이 발생 되었을 경우의 계자전류 흐름을 나타내는 것으로 단락 발생에 따라 전류가 권선 전체에 흐르는 것이 아니라 일부 by-pass 됨을 보여준다. 즉 회전자의 권선수가 감소됨을 의미하는 것이다.

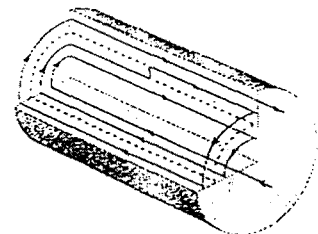


그림 2. 단락에 의한 권선수의 감소

이러한 회전자 계자권선의 중간단락으로 발생하는 현상으로는 첫째, 계자전류 변화에 따라 회전자의 불평형을 가져온다. 중간단락이 발생한 슬롯에서는 권선 전류가 단락된 경로를 흐르기 때문에 비 대칭적인 발열 손실이 발생하며, 이는  $I^2R$  손실이다. 회전자의 온도 변화는 휘어짐 현상을 일으키며, 이는 중간단락의 발생 수 및 위치에 따라 다소 달라지며 회전자 발열이 비 대칭적으로 일어나기 때문에 극에서 먼지점에서의 중간단락은 적은 영향을 주며, 극에 가까운 권선일수록 회전자 불평형을 크게 일으킨다. 둘째, 중간단락 발생시 일정부하 유지를 위해서는 정상시보다 높은 계자전류를 필요로 한다. 그러나 계자 용량에는 한계가 있기 때문에 회전자 권선의 10%보다 많은 중간단락 발생시는 매우 심각한 문제를 발생시킬 소지가 있다. 셋째로는 높은 계자전류의 공급으로 인해 발전기의 운전온도가 그만큼 상승되어 운전 됨으로써 안전 운전에 장애 요인으로 작용할 수 있다. 중간단락의 가장 심각한 상황은 회전자 몸체와 개별권선 사이에 단락이 발생되었을 경우이며, 이러한 경우 큰 전류가 회전자 몸체를 타고 흘러 결국 회전자는 회복하기 힘들 정도로 큰 손상을 입을 수가 있다.<sup>(4)</sup>

지금까지 회전자 계자권선의 중간단락 현상 및 중간단락 발생시의 발전기의 운전에 미치는 해로운 영향 등을 살펴 보았으며, 이러한 중간단락 현상의 발생으로 인한 발전기의 안정운전 저해요소를 사전 제거하기 위해서는 주기적인 회전자의 진단을 필요로 한다.

### 3. 시험장치 및 방법

#### 3.1 시험 대상설비

본 연구에서는 용량 112,300KVA, 전압 13.8kV, 회전자 권선수는 각 극별 7개이며, 각 권선은 17개의 개별권선으로 이루어진 평탄화력 #4 가스터빈발전기를 선정하여 현장시험을 수행 하였다.

#### 3.2 시험장치

발전기 회전자 계자권선의 건전성을 신뢰성있게 평가하기 위해 발전기 운전중 시험방법인 flux probe 시험을 실시하였으며, flux probe는 발전소 건설당시 제작사에서 permanent type flux probe를 발전기 내부에 설치한 상태로 공급되어 시험을 위해 따로 설치할 필요가 없었다.

Flux probe로 부터의 유기 전압파형 수집을 위한 장비로는 범용의 디지털 오실로스코프를 사용 하였으며, 분석을 위해 각 부하대별로 전압파형을 프린트 하였다. 국내에서는 아직 데이터 수집 및 분석을 위한 진단시스템이 개발되어 있지 않은 상태로 현재 우리 연구원에서는 회전자 진단시스템의 국산화 개발을 위한 연구개발을 진행중에 있다.

#### 3.3 시험방법

발전기가 정상적으로 운전되는 발전기 내부에 설치되어 있는 flux probe를 통해 회전자 계자권선 슬롯의 누설자속을 감지하여 이 자속값에 상응하는 전압을 유기, 출력되는 신호를 오실로스코프를 이용하여 데이터를 측정하였다. 데이터 수집은 시험의 신뢰성을 위해 무부하에서 전부하에 이르기까지 10가지의 다양한 부하대에서 이루어졌다. 이러한 전압파형 데이터 수집을 통해 각 부하대별 파형분석을 통해 발전기 회전자 계자권선의 중간단락 발생여부를 평가하였다.

그림 3은 현장시험의 업무흐름도를 간략하게 나타낸 것이다.

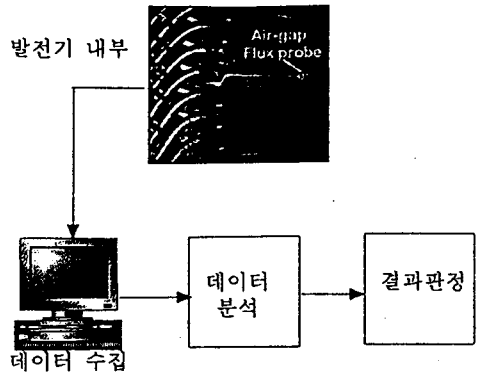
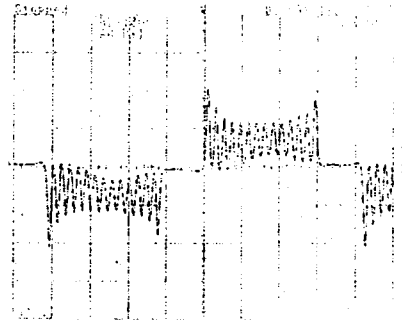


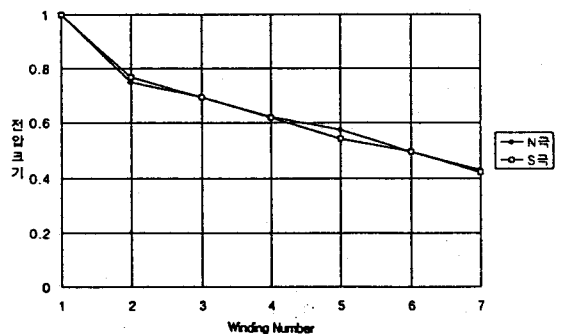
그림 3. 현장시험 업무흐름도

### 4. 시험결과 및 고찰

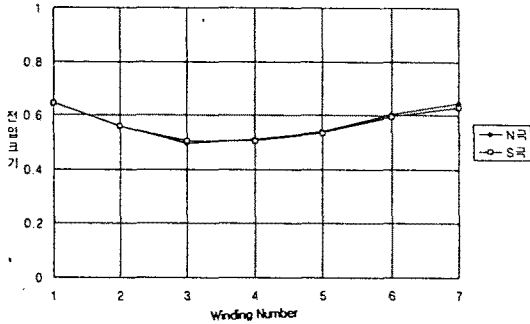
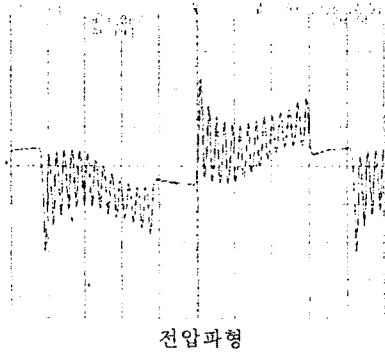
발전기 운전중에 회전자 계자권선의 중간단락 여부를 정확하게 판정하기 위해 10가지의 부하, 즉 무부하에서 전부하에 이르기까지 다양한 부하대에서 진단 시험을 실시하였다. 그림 4(a), (b), (c)는 10가지의 부하대에서 디지털 오실로스코프를 이용하여 측정된 flux probe 유기전압 파형 및 각 극별, 권선별로 전압의 피크값을 겹쳐서 나타낸 것이다. 정상적인 경우 두 선은 일치하여야 하며 그림에서 볼 수 있듯이 두 선의 편차가 거의 없는 것으로 보아 이 발전기는 회전자 계자권선에 중간단락이 발생되지 않아 건전한 상태를 유지하여 운전중인 것으로 나타났다.



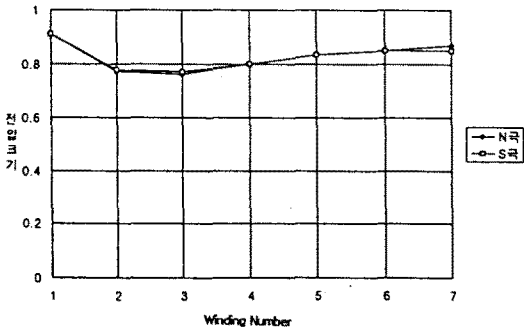
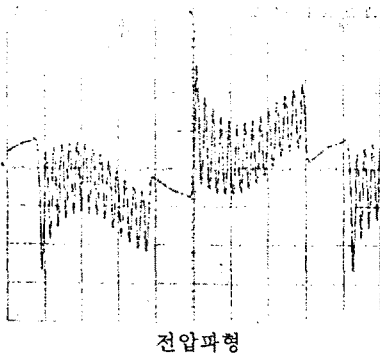
전압파형



각 극별, 권선별 전압크기 비교그래프 (a) 무부하시 (0 MW)



각 극별, 권선별 전압크기 비교그래프  
(b) 중간부하시 (40 MW)



각 극별, 권선별 전압크기 비교그래프  
(c) 전부하시 (80 MW)

그림 4. 각 부하별 전압파형 및 크기 비교그래프

표 1은 그림 4에서 나타낸바와 같이 발전기가 무부하에서 전부하까지 운전되는 동안 10가지의 다양한 부하대에서 측정된 전압파형을 분석하여 층간단락이 발생된 권선의 위치 및 단락 가능성을 퍼센트로 나타낸 것이다. 또한 이것은 오실로스코프에 의해 측정된 전압파형을 일일이 수작업을 통해 각 권선별, 출력별로 전압값의 크기를 계산하여 얻어진 것이다. 이 표에서 N, S극 편차를 값중 "-"로 표시된 것은 층간단락이 N극에서의 발생확률을 나타내는 것이고, "+" 값은 S극에서의 발생확률을 나타내는 것이다. 표 1에서 볼 수 있듯이 1번권선은 N, S극의 최대 편차율(단락발생 확률)이 3.4%, 2번권선은 3.3%, 3번권선은 4.4%, 4번권선은 2.5%, 5번권선은 5.5%, 6번권선은 3.7%, 7번권선은 4.2%로서 1개 권선 층간단락 발생시의 편차율인 5.5%보다 작게 나타나 각 권선에서 층간단락이 발생되지 않았음을 알 수 있었다.

표 2는 발전기 출력변화에 따른 발전기 베어링의 진동변화 상태를 나타낸 것으로 회전자 계자권선에 층간단락이 발생되었을 경우 계자전류의 증가에 따라 비 대칭적인 발열로 진동이 상승하는 경향을 나타내는 것이 보통이나 이 발전기는 출력변화에 따른 계자전류의 변화에 상관없이 발전기 베어링의 진동치가 매우 안정된 상태로 운전되는 것으로 보아 층간단락이 발생되지 않았음을 뒷받침해주고 있다.

표 1. 전압파형 분석결과

Test Load	Exciter			N, S극 전압값의 편차율 [%]						
				Winding Number						
MW	MVAR	V	A	1	2	3	4	5	6	7
0	0	50	320	0	-2.6	0	0.8	5.5	0	2.3
10	0	50	320	0	-0.8	0	0	0	0	0
20	0	55	340	1.2	0	0	2.1	0	0	1.0
30	0	60	355	3.4	0	0	2.2	0	0.9	4.2
40	0	68	390	0	0	-2.0	0.9	0.9	1.6	2.3
50	0	78	430	0	-2.5	-1.9	2.5	4.5	2.3	2.1
60	0	85	470	0	-3.3	-4.4	0	0	0	0
70	0	92	520	3.2	0	0	0	0	0	3.7
80	0	102	560	1.8	0	0	0	0	3.7	2.9
80	+20	115	630	0	-0.7	-1.3	0	0	0	2.3
층간단락 발생 Turn수				0	0	0	0	0	0	0

◆ 층간단락 발생확률(N, S극 전압 편차율)

- 1 Turn Short = 1/17 = 5.88 %
- 2 Turns Short = 11.7%
- 3 Turns Short = 17.6%
- 4 Turns Short = 23.5%
- 5 Turns Short = 29.4%
- 6 Turns Short = 35.2%
- 7 Turns Short = 41.1%
- 8 Turns Short = 47.0%
- 9 Turns Short = 52.9%
- 10 Turns Short = 58.8%
- 11 Turns Short = 64.7%
- 12 Turns Short = 70.5%
- 13 Turns Short = 76.4%
- 14 Turns Short = 82.3%
- 15 Turns Short = 88.2%
- 16 Turns Short = 94.1%
- 17 Turns Short = 100%

표 2. 부하변동에 따른 발전기 배어링의 진동변화

부하 [MW]		0	10	20	30	40	50	60	70	80	80/ +20	
진동	터빈측	#1	3.0	2.8	2.7	2.9	2.7	2.6	2.6	2.4	2.4	2.4
		#2	3.8	3.4	3.4	4.8	3.4	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
	반대측	#3	4.6	4.8	4.7	3.5	5.0	4.8	4.8	4.7	4.6	4.6

(단위 : mm/s)

#### 4. 결 론

본 연구에서는 발전기 회전자 계자권선의 층간단락 진단 및 건전성을 평가하는 연구로써 flux probe 및 디지털 오실로스코프를 이용한 발전기 운전중 회전자 계자권선의 진단방법을 제시하였고, 평택화력 #4 가스터빈발전기에 대한 현장시험을 통해 on-line 진단 기법에 대한 신뢰성을 평가하고 회전자 계자권선의 절연상태를 진단하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Flux probe 및 디지털 오실로스코프를 이용한 회전자 계자권선의 층간단락 진단기법은 발전기의 정지없이 건전성 및 층간단락 여부를 신뢰성 있게 판정할 수 있다.

(2) 평택화력 #4 가스터빈발전기에 대하여 무부하 및 여러 부하대에서 flux probe 및 디지털 오실로스코프를 통해 측정된 각 권선의 전압파형 분석결과 "N", "S"극 총 238 Turn에서 단 한 개의 층간단락도 발생되지 않아 회전자 계자권선의 층간절연 상태가 매우 양호한 상태로 운전되고 있음을 알 수 있었다.

(3) 향후 발전기 회전자 계자권선의 건전성 및 절연 상태 진단시 본 논문에서 제시한 flux probe를 이용한 진단기법의 확대적용이 기대되며, 더 많은 발전기에 대한 현장시험 및 분석을 통해 더욱더 향상된 진단기법 및 진단시스템을 국산화 개발할 예정이다.

#### (참 고 문 헌)

[1] 전력연구원 수화력발전연구소, "발전기 권선 및 철심 진단기법", pp79-85, Sep. 1996.

[2] E. Woschnagg, "Turbogenerator Field Winding Shorted Turn Detection by AC Flux Measurement". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.9, No2, pp.427-431, June 1994.

[3] J. Penman, H.G Sedding, B.A. Lloyd and W.T. Fink, "Detection and Location of Interturn Shorted Circuits in the Stator Windings of Operating Motors". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.9, No 4, pp. 652-658, June 1994.

[4] M.P. Jenkins, "On-Line Monitoring of