

발전기 운전중 회전자 진단에 관한 연구

이영준*, 공태식, 김희동, 주영호
한국전력공사 전력연구원

On-Line Diagnosis Method for Generator Rotor Windings

Young-Jun Lee*, Tae-Sik Kong, Hee-Dong Kim, Young-Ho Ju
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)

Abstract - A shorted-turn test was performed at the Sininchon combined cycle power plant on gas turbine generators. The test was conducted using a permanent flux probe and on-line diagnosis system. 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 voltage waveform analysis technique that can identify the pole location, slot number and number of shorted-turn with each slot.

1. 서 론

발전기 회전자 권선은 자속을 발생하여 고정자 권선에서 전력을 생산하도록 하는 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 회전자 권선에 문제가 발생할 경우 전력생산의 차질은 물론 발전기의 안정운전에 해로운 영향을 미칠 수 있다. 특히 최근에 일일기동정지를 주로 담당하는 복합화력 발전기가 국내에 많이 설치되어 운전중인 이유로 인하여 발전기 회전자 권선의 층간단락, 접지, 권선간 단락 고장 등의 발생이 증가하는 추세에 있다.

발전기 회전자에 대한 진단기법은 전세계적으로 정지중 진단기법인 절연저항, 성극지수, 분담전압 측정 등이 널리 활용되어 왔으나, 진단을 위해서는 반드시 발전을 정지해야 하는 문제점을 안고 있으며, 그 진단결과에 대한 신뢰성도 매우 낮은편이다. 이러한 문제점을 해소하고자 근래에 들어 발전기 정상 운전중 회전자 권선의 건전성을 진단하는 방법에 대한 연구개발이 매우 활발히 진행되고 있다.^{[1]~[2]}

본 논문에서는 현재 전세계적으로 널리 활용되고 있는 발전기 정상 운전중 회전자 권선의 건전성 진단기법인 flux probe test에 대한 소개와 실제 전력연구원에서 국산화 개발에 성공한 회전자 권선 진단용 센서와 진단시스템을 활용하여 국내 최대의 복합화력인 신인천복합 가스터빈 발전기 5대에 대한 현장진단을 통해 얻은 결과를 분석, 검토하여 발전기 정상 운전중 회전자 진단기법의 신뢰성을 평가하고, 회전자 계자권선의 층간단락 여부를 판정, 그 결과를 제시하고자 한다.

2. 층간단락 감지 센서 및 진단시스템

2.1 층간단락 감지 센서

층간단락 감지 센서는 회전자 권선의 슬롯 누설자속을 감지하는 센서로서 발전기 고정자 윗지에 설치되어 발전기 정상 운전중 회전자 각 권선에서 발생하는 자속의 변화에 상응하는 전압을 유기하며 이를 전압파형으로 나타낸다. 이 전압파형의 크기는 회전자 각 슬롯의 누설자속 분포를 나타내며 단락된 권선이 존재하는 슬롯은 파형의 크기가 감소되어 나타나, 이를 통해 층간단락이나 권선간 단락이 발생한 권선의 위치 및 발생 수 등을 알 수 있다.^{[3]~[4]}

그림 1은 발전기 고정자 윗지에 설치된 층간단락 감지 센서이며, 상부에 설치된 것이 국산개발품이며, 하부에 설치되어 있는 것은 기존에 설치된 외산제품이다. 그림 2(a), (b)는 동일 발전기의 같은 출력에서 동시에 얻은 센서 전압파형이며, 그림 2(a), (b)에서 보는바와 같이 국산개발품의 감도가 오히려 외산에 비해 향상 되었음을 알 수 있다.

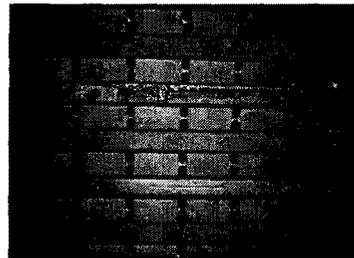
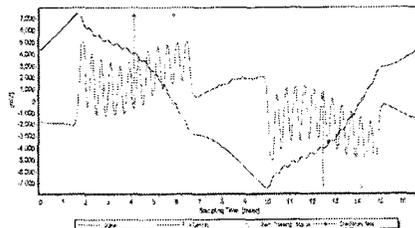
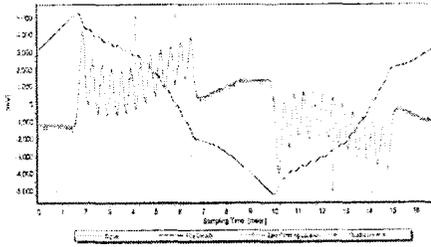


그림 1. 층간단락 감지 센서



(a) 국산개발 센서의 전압파형



(b) 외산 센서의 전압파형
그림 2. 국산 및 외산의 센서 전압파형

2.2 중간단락 진단시스템

중간단락 감지 센서로부터 유기되는 전압파형을 수집, 분석하는 회전자 중간단락 진단시스템은 범용의 PC환경에서 사용할 수 있는 H/W와 S/W로 구성되어 있다. 중간단락 진단시스템은 센서의 출력신호를 증폭, 처리해주는 signal conditioner, 그리고 DSP module, CPU module, power supply 등으로 구성되어 있다. 중간단락 감지 센서에서 출력되는 전압파형 신호는 signal conditioner를 통해 필요한 신호만이 증폭되어 DSP와 CPU module로 보내져서 단락진단 알고리즘 계산을 통해 시험결과를 디스플레이 컴퓨터로 보낸다. 디스플레이 컴퓨터는 현장시험의 편리성을 고려하여 운반하기 편한 노트북을 이용하여 발전기 회전자에서 중간단락이 발생한 권선의 위치와 발생 수 등의 정보를 제공하며, 다양한 그래프와 도표로 사용자가 사용하기에 편리하도록 그래픽을 구성하였다.

그림 3은 전력연구원에서 개발 완료한 회전자 중간단락 진단시스템의 실물 사진이다.

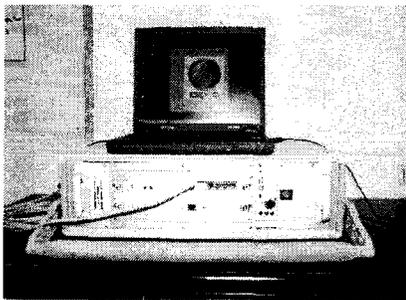


그림 3. 중간단락 진단시스템

3. 현장 진단시험

3.1 시험 대상설비

전력연구원에서 국산화 개발한 중간단락 감지 센서 및 진단시스템을 이용하여 국내 최대의 복합화력인 신인천 복합화력발전소 가스터빈 발전기 5대에 대한 현장 진단 시험을 수행 하였다. 표 1은 시험을 수행한 발전기의 사양이다.

표 1. 시험대상 발전기의 사양

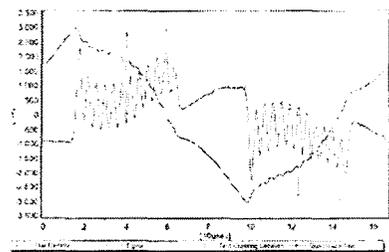
항 목	규 격	항 목	규 격
정격용량	229.7 MVA	회 전 수	3,600 rpm
정격전압	18 kV	절연등급	F 종
정격전류	7,369 A	냉각방식	수소냉각
역률	0.9	상업운전	1997
계자전압	375 V	제 작 사	G.E
계자전류	1,819 A	회전자권선수	6 (극당)
극 수	2	권선 층수	12 (슬롯당)

3.2 시험방법

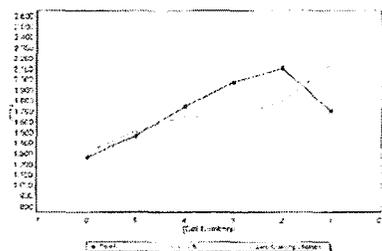
각 발전기 5대(가스터빈 #9,#10,#11,#12,#14호기)에 대하여 발전기 기동시부터 전부하 출력까지 10MW 단위로 출력을 증발시키면서 다양한 부하대에서 중간단락 감지 센서로 부터의 전압파형을 진단시스템을 이용하여 측정, 분석 하였다.

3.3 시험결과 및 고찰

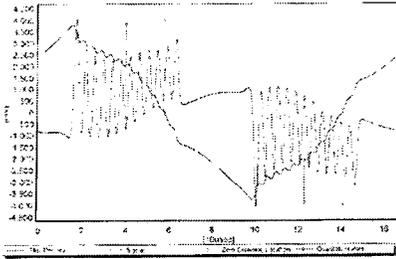
발전기 정상 운전중 회전자 중간단락 현상을 정확하게 판정하기 위해 각 발전기별로 무부하에서 전부하에 이르기까지 17가지의 다양한 부하대에서 측정된 전압파형을 분석한 결과 3대의 발전기는 중간단락이 존재함이 발견되었고 나머지 2대의 발전기는 건전하였다. 그림 4(a), (b)는 중간단락이 발생한 9호기 가스터빈 발전기의 전압파형이며, 그림 4(c), (d)는 중간단락이 발생하지 않은 12호기 가스터빈 발전기의 전압파형이다. 그림에서 보는바와 같이 중간단락이 발생한 경우 각 극별 비교한 전압파형의 편차가 있음을 쉽게 알 수 있으며, 건전한 경우 각 극별 편차가 발생하지 않음을 알 수 있었다.



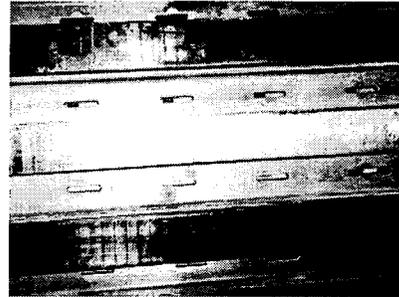
(a) 센서 전압파형(중간단락이 발생한 경우)



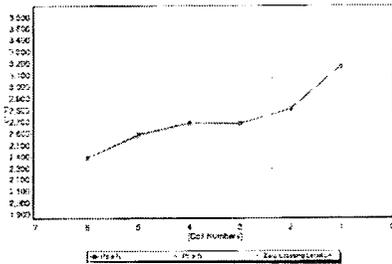
(b) 각 극별 전압파형 비교(중간단락이 발생한 경우)



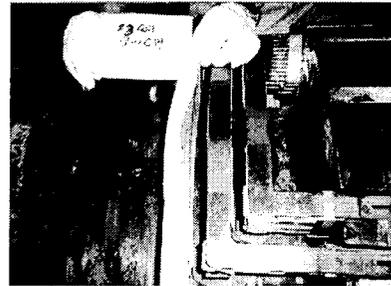
(c) 센서 전압파형(건전한 경우)



(a) 층간절연지가 밀려 통풍구가 막힌 모습



(d) 각 극별 전압파형 비교(건전한 경우)



(b) 권선 엔드턴 부근의 절연지가 밀린 모습

그림 4. 센서 전압파형(층간단락 발생 및 건전한 경우)

표 2는 발전기 5대에 대한 시험결과를 나타낸 것으로 9호기는 전체 회전자 권선 144개중 2.78%, 10호기는 2.08%, 11호기는 5.55%의 층간단락 발생율을 보였으며, 12호기 및 14호기 가스터빈 발전기는 아주 양호한 상태를 나타내었다.

표 2. 각 발전기별 층간단락 발생율

호기	층간단락 발생 수												발생율 [%]	
	Winding Number													
	1		2		3		4		5		6			계
N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S			
#9	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	4	2.78
#10	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	3	2.08
#11	3	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	8	5.55
#12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
#14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



(c) 건전한 경우

그림 5. 회전자 정비시의 사진

그림 5(a), (b)는 본 진단시험이 완료된 이후 발전기 정비시에 회전자를 인출하여 권선의 상태를 확인한 그림으로 5(a), (b)는 층간단락이 발생한 9호기 사진으로 층간절연지가 손상되어 한쪽으로 밀리거나 끊어진 상태를 보여주며, 5(c)는 12호기 사진으로 매우 건전함을 쉽게 알 수 있었다. 이러한 발전기 정비중 실제 층간절연지에 대한 확인을 통해, 본 층간단락 진단시험의 신뢰성 및 정확성을 확인할 수 있었으며, 아울러 전력연구원에서 국산화 개발 완료한 층간단락 감지 센서 및 진단시스템의 신뢰성 및 우수성도 확인할 수 있는 계기가 되었다.

4. 결 론

전력연구원에서 국산화 개발한 층간단락 감지 센서 및 진단시스템을 이용하여 신인천복합 가스터빈 발전기 5대에 대한 현장 시험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

[1] 각 발전기별 회전자 권선에 대한 층간단락 시험결과 9호기는 회전자 총 권선의 2.78%, 10호기는 2.08%, 11호기는 5.55%의 층간단락이 발생한 상태로 운전중이며, 12, 14호기는 양호함을 알 수 있었다.

[2] 진단시험 후 발전기 정비시 회전자 권선을 인출하여 확인한 결과 층간단락이 발생한 발전기의 층간절연지가

밀리거나 찢어져서 실제로 층간단락이 존재함을 확인할 수 있어 실제 현장 진단시험의 결과와 상호 일치함을 알 수 있었으며, 국산화 개발 층간단락 감지 센서 및 진단 시스템의 신뢰성을 확인하는 계기가 되었다.

[3] 본 진단시험의 결과는 발전기 세삭사인 GE측과의 하자 처리시 근거자료로 활용되어 층간단락이 발생한 발전기 회전자 권선에 대해서는 전량 무상 교체를 시행하여 외화절감에 기여하였으며, 향후 타 발전소에도 확대 적용하여 발전기의 예측정비 체제 구축 및 안정운전에 기여할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] 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.

[2] 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.

[3]"Generator Field Winding Shorted Turn Detector", GET 6987A, Apr. 1992, General Electric, USA.

[4]전력연구원 발전연구실 '발전기 회전자 On-line 단락 감시시스템 개발' 최종보고서, Apr. 2000.