

On-Line Detection of Shorted Turn in Generator Rotor Windings

金熙東* · 李泳俊** · 朴鍾丁** · 朱榮鎬***

(Hee Dong Kim · Young Jun Lee · Jeong Jung Park · Young Ho Ju)

Abstract - During start up and shut down, the generator is rotating at a low speed and copper dusts cause arcing between the turns in the slot. Shorted turns occurred primarily by the movement of these copper dusts between individual windings in the generator rotor. Detection of shorted turns was performed in five gas turbine generators in two combined cycle power plants. Two types of permanent and temporary flux probes were used in this paper. These flux probes have been used to develop a methodology for detecting shorted turns in an operating generator's rotor. The flux probes sense the rotor winding slot leakage flux and produce a voltage proportional to the rate of change of the flux. This pattern of flux variation is the signature unique to each rotor winding. An appropriate waveform analysis technique can identify the pole location, the slot number, and the number of shorted turns within each slot. Shorted turns in field winding of gas turbine generator(215.7 MVA) were detected to twelve turns on a total 190 turns.

Key Words : shorted turn, generator, flux probe, rotor winding, pole location

1. 서 론

가스터빈 또는 스팀터빈 발전기 회전자 권선의 층간단락으로 인해 출력제한, 진동증가 및 성능저하 등 비정상적인 운전의 원인을 제공하며, 심한 경우 발전기의 불시정지 및 장기간 정비를 요하는 고장을 일으키기도 한다. 이들 중에 복합화력발전소에 설치되어 운전중인 가스터빈 발전기는 특성상 일일기동정지 및 빈번한 출력 증감발로 인하여 기력이 나 원자력 발전기보다 운전조건이 가혹함으로써 운전중 불시정지 및 장기간 정비를 요하는 고장을 일으킬 소지가 증가하고 있는 추세이다[1]. 특히 회전자 권선의 층간단락에 의한 고장발생이 두드러지게 나타나고 있어 이의 예방대책 수립이 절실한 실정이다.

발전기 회전자 권선은 각각의 슬롯내에 적층된 개별권선 사이에 층간단락이 발생하면 자속의 불평형과 비대칭적인 발열 발생으로 인한 진동의 변화를 일으킨다. 따라서 이로 인한 비정상적인 운전의 예방과 고가의 권선교체 비용이 요구되는 심각한 절연과괴가 발생하기 이전에 회전자 권선의 층간단락 정도를 진단하여 효율적인 유지정비를 수행하기 위한 진단기법 연구가 활발히 진행되고 있다[2~3]. 회전자 권선에서 단락 탐지 및 위치를 검출하기 위해 발전기 통풍구를 통해 임시적으로 flux probe를 설치하여 교류 자속분

포 측정을 수행하고 있다[2]. 또한, 영구적으로 발전기 고정자 권선 슬롯에 air gap flux probe를 설치하여 회전자 권선의 단락 감지 및 위치를 운전중에 측정하여 사고를 사전에 예방할 수 있다[3].

따라서 발전기 회전자 권선의 층간단락 진단기법은 크게 정지중(off-line) 진단기법과 운전중(on-line) 진단기법으로 구분할 수 있다. 정지중 진단기법으로는 절연저항, 성극지수 및 분담전압 등을 측정하는데, 발전기의 운전 정지가 필수적이며 진단을 위해서는 많은 시간이 소요된다. 이에반해 운전중 진단기법에서는 발전기의 운전정지가 불필요하다는 큰 장점을 가지고 있다. 또한, 회전자 권선 층간단락은 주로 발전기 운전중에 동분의 이동에 의해 발생하므로 정지중에는 잘 나타나지 않는 경우가 많기 때문에 운전중 진단이 신뢰성면에서 매우 우수한 방법이다.

본 논문에서는 기동정지가 빈번하고 출력감발을 주로 시행하는 가스터빈 발전기 5대에서 상용화되어 있는 air gap flux probe에 디지털 오실로스코프와 진단시스템(H/W 및 S/W)을 연결하여 운전중에 회전자 권선의 층간단락을 측정하였다. 회전자 권선의 층간단락을 정확하게 판정하기 위해 무부하에서 전부하까지 다양한 부하별로 현장시험을 수행하였으며, 여기서 얻은 결과를 분석 및 검토하여 운전중 회전자 권선의 층간단락 발생 여부를 판정하고 진단기법의 신뢰성을 평가하였다.

2. 발전기 회전자 권선

발전기 회전자는 강(鋼)제의 원통형으로 단조시켜 슬롯을 만들고 슬롯절연, 턴절연 및 동도체로 구성된 권선을 집중권선 방식으로 삽입한 후 retaining ring을 사용하여 양쪽 끝

* 正 會 員 : 韓電 電力研究院 先任研究員 · 工博

** 正 會 員 : 韓電 電力研究院 先任研究員

*** 正 會 員 : 韓電 電力研究院 責任研究員

接受日字 : 1998年 8月 12日

最終完了 : 1999年 1月 21日

을 고정시킨다. 그림 1은 회전자 권선의 단면도와 구조를 나타냈으며, 슬롯내의 권선은 대략 7~18개 정도의 동도체로 이루어져 있다. 각각의 동도체 사이는 턴절연에 의하여 분리되어 있고, 슬롯절연에 의해 회전자 몸체와도 분리되어 있다. 턴절연의 재질은 글라스/에폭시(glass/epoxy) 복합재료, 글라스/폴리에스터(glass/polyester) 복합재료 및 nomex 등으로 구성되어 있고 수지(resin)의 함유량이 43% 정도이며, 두께는 0.3~0.5[mm]의 테이프 형태로 제작하고 있다. 발전기 회전자 권선의 절연재료는 높은 원심력 및 인접 권선에 의해 가열됨으로 충분한 기계적 강도와 내열특성을 갖고 있어야 한다. 따라서 발전기 회전자 권선 절연재료는 원심력을 감소시키기 위해 최대한 얇고 가벼운 재료를 사용하며, 실제적으로 215.7 [MVA] 발전기에서 직류 전류 1403 [A]와 직류 전압이 500 [V] 정도 인가됨으로 고정자 권선에서 높은 교류 전압에 의해 발생하는 대부분의 열화 과정은 발생하지 않는다.

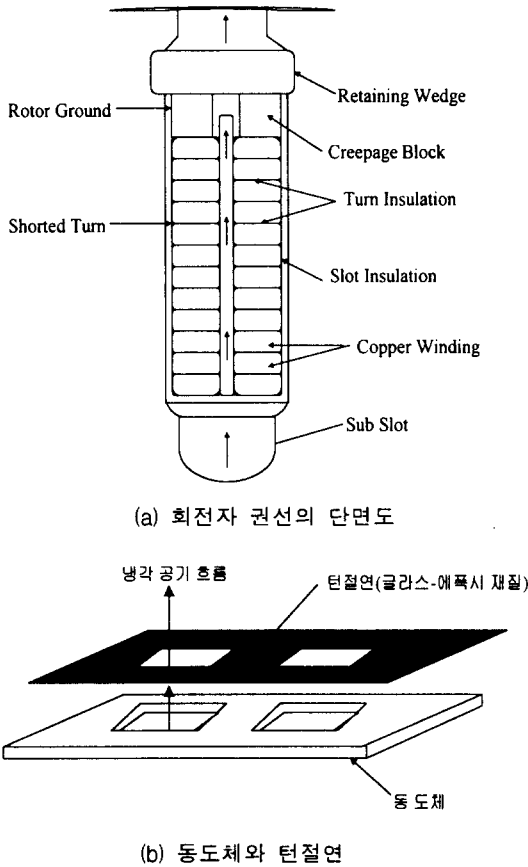


그림 1 회전자 권선의 개략도
Fig. 1 The diagram of rotor winding

2.1 단락발생의 메카니즘 및 대책

동도체 사이의 접촉면이 접동(摺動) 혹은 마모로 인해 발생된 동분의 퇴적이 증가하면 층간단락과 회전자 접지 사고 등이 발생한다[3]. 동분의 발생원인에 대하여 기초실험보다 확인된 결과 산화피막의 발생이 아니라 수소중에서 접동에

의해 발생한 현상이며, 원심력이 작은 터닝(turning)시에 발생하는 것으로 판명되었다[4]. 발전기의 누계 터닝 횟수로부터 회전자 권선의 동분 발생량을 추정하는 일이 가능하며, 슬롯 형상과 누계 터닝 횟수를 관찰하여 슬롯내를 점검할 필요가 있다. 턴절연은 동도체 사이에 설치하고 절연재료 자체에는 양면 테이프가 있어 조립시 각 슬롯에서 동도체와 양쪽 끝(end) 부위에 고정시킨다. 그러나 동도체는 원심력에 의한 응력하에서 열보다는 신축하기 위해 큰 압축강도가 필요하여 절연재료 손상에 영향을 미친다. 따라서 회전자 권선의 열화와 파손에 미치는 주된 기계적 요인은 회전시 발생하는 연속적인 원심력과 기동, 정지, 부하의 반복에 따른 주기적인 전자력에 의한 힘이다. 이러한 현상에 대한 대책으로는 권선을 전체적으로 분해하여 청소후에 동일 턴(turn)의 동도체가 적정하게 유지되도록 상대적인 움직임이 없는 방법을 강구한다.

2.2 층간단락의 진단기법

flux probe는 각각의 회전자 권선에서 발생하는 자속의 변화에 상응하는 전압을 유기하며, 이를 파형으로 나타낸다. 최대 자속밀도는 각 극의 leading edge 권선에 의해 발생되며, 극에서 멀어질수록 자속밀도의 크기는 점차적으로 작아진다. 즉, 각 극의 1번 권선에 의해 발생하는 전압파형의 크기가 나머지 권선들보다 크게 나타난다. 이 파형의 크기는 회전자 슬롯 주위의 누설자속 분포를 나타내며, 단락된 권선이 존재하는 슬롯은 파형의 크기가 감소함으로 파형 분석을 통해 층간단락이 발생한 극수의 위치와 권선 번호 등을 알 수 있다. flux probe는 발전기 고정자 권선 웨지(wedge)에 영구적으로 설치되는 자속시험 장치와 발전기 케이싱(casing)을 통해 고정자 철심의 냉각홀(vent hole)을 이용하여 진단시에만 임시로 설치하는 자속시험 장치로 분류할 수 있다.

flux probe로 부터 데이터는 초창기에 아날로그(analog) 또는 디지털 오실로스코프(digital oscilloscope) 화면에서 직접 포라로이드 사진(Polaroid picture)을 찍어 파형의 크기는 측정된 사진으로 부터 수작업을 통해 분석하였다. 최근에는 진단시스템(H/W 및 S/W)을 이용하고 있는데, 이는 데이터 수집이 순간적으로 이루어지기 때문에 진단시간을 대폭 감소시킬 뿐만 아니라 현장에서 직접 예비분석도 가능하게 되었다. 따라서 층간단락 진단은 발전기 운전중 무부하에서 전부하까지 다양한 부하별로 측정하여 상호 비교를 통해 진단결과를 정확하게 분석한다. 이와같은 방법으로 다양한 부하에서 flux probe로 부터 전압파형을 측정하여 각 극별, 권선별로 전압의 크기를 상호 비교함으로써 층간단락이 발생한 극수의 위치와 권선번호 등을 종합적으로 판정할 수 있다.

3. 시험방법

본 연구에서는 용량 112.3[MVA], 전압 13.8[kV], 회전자 권선수는 각 극별 7개이며, 각 권선은 17개의 개별권선으로 이루어진 가스터빈 발전기 4대와 용량 215.7[MVA], 전압 13.8[kV], 회전자 권선수는 각 극별 8개이며, 각 권선은 1번

권선이 11개의 개별권선, 2~8번 권선은 12개의 개별권선으로 이루어진 가스터빈 발전기 1대를 선정하여 운전중 계자 권선의 층간단락 발생여부를 확인하는 현장시험을 수행하였다. 용량 112.3[MVA] 발전기 4대에서는 그림 2와 같이 air gap flux probe가 발전소 건설당시 제작사에 의해 영구적으로 설치되었으며, 이 flux probe에서 유기전압 파형을 측정하기 위해 범용의 디지털 오실로스코프(Digital Oscilloscope, Yokogawa, DL 1200A)를 사용하여 수작업을 통해 결과를 분석하였다. 또한, flux probe가 설치되지 않은 용량 215.7[MVA] 발전기 1대에서는 시험을 위해 사전에 발전기 케이싱에 probe 삽입용 구멍을 가공하고 내부의 공극을 사용하여 전압파형을 검출하는 flux probe를 임시로 설치하였으며, 그림 3은 데이터 측정을 위한 진단시스템(H/W 및 S/W, GE사)의 개략도를 나타냈다. 극별, 권선별 전압 및 파형 신호는 발전기가 1회전시에 자속 및 자속밀도의 변화율을 관찰하였으며, 1회전 신호는 발전기 콜렉터 엔드(collector end)의 발전기 축에 영도(0°)를 나타내도록 반사테이프(reflective tape)를 붙여 반사되는 빛을 광센서(photonic sensor)로 인식하여 데이터를 측정한다. 광센서 위치는 임시로 설치된 flux probe의 입구측에 가능한 밀접하게 설치하며, 데이터는 2극의 슬롯에 상응하는 극별, 권선별 전압 및 파형 신호를 비교하여 분석한다. 따라서 그림 4는 flux probe로 부터 측정된 전압파형을 나타냈으며, 이 데이터를 분석하여 층간단락 여부를 판정하였다.

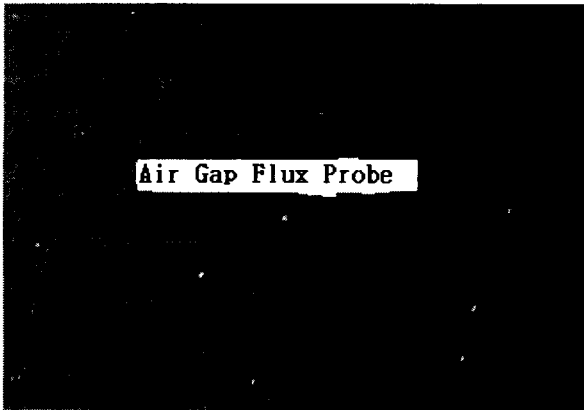


그림 2 air gap flux probe의 구조
Fig. 2 The structure of air gap flux probe

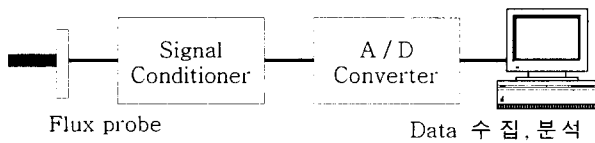


그림 3 현장시험의 개략도
Fig. 3 The diagram of field test

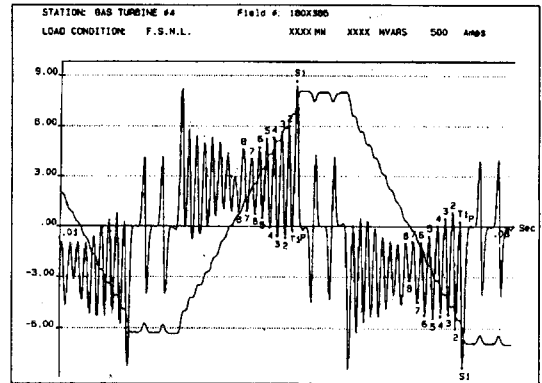
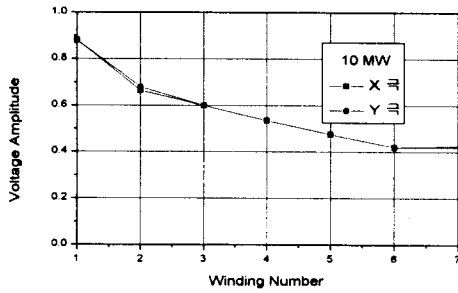


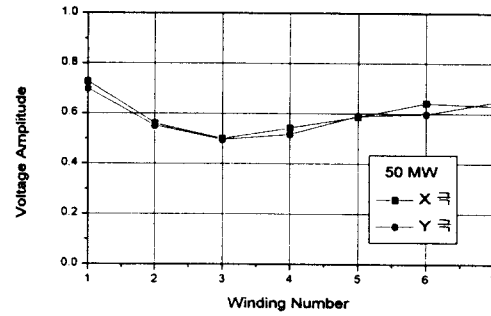
그림 4 Flux probe로 부터 얻은 전압파형
Fig. 4 Voltage waveform obtained from flux probe

4. 시험결과 및 고찰

운전중에 발전기 회전자 권선의 층간단락을 정확하게 판정하기위해 용량 112.3[MVA] 발전기 4대에서 10가지의 다양한 부하 즉, 무부하, 10[MW], 20[MW], 30[MW], 40[MW], 50[MW], 60[MW], 70[MW], 80[MW] 및 80[MW](+20Mvars, 지상운전)에서 진단시험을 실시하였다. 층간단락이 발생하지 않은 발전기에서 그림 4와 같은 전압 파형을 측정하여 회전자 X, Y극의 권선별 전압크기로 분석한 결과를 그림 5에 나타냈다. 이들 데이터에서 각 극별, 권선별로 전압 피크값의 일치 여부가 나타나 손쉽게 층간단락 여부를 판별할 수 있으며, 층간단락이 발생하지 않은 건전한 권선일 경우 두 선은 일치하게 된다. 그림 5 (a)는 10[MW] 부하에서 X, Y극 전압크기가 일치할 때는 층간단락의 발생 가능성이 없으며, 그림 5 (b)와 같이 50[MW] 부하에서 X, Y극 전압크기가 5번 권선과 같이 차이가 발생할 때는 층간단락 발생 가능성을 갖고 있다. 그림 6은 층간단락이 발생한 발전기의 전압크기를 분석하였는데, 그림 6(a)는 10[MW] 부하에서는 2, 3번 권선에서 층간단락 가능성이 있고 그림 6(b)는 50[MW] 부하의 6, 7번 권선에서 층간단락 가능성이 있는 것으로 나타났다. 그림 5와 그림 6의 결과를 토대로 X, Y극 전압값의 편차율을 계산한 결과 3대의 발전기에서는 표 1(a)와 같이 층간단락이 발생하지 않았다. 그러나 1대의 발전기에서는 표 1(b)와 같이 계산된 층간단락 편차율이 95[%]이상일 때 단락이 발생된 것으로 판정하고, 마이너스는 X극을 표시한다. X극에서 7번 권선은 1개가 층간단락으로 나타났으며, Y극에서 2, 3 및 6번 권선에서 각각 1개씩 총 4개 turn에서 층간단락이 발생하였다. 따라서 X, Y극의 총 238 turn 중에 4개 turn에서 층간단락이 발생되어 발전기 회전자 권선의 1.7%가 층간절연에 문제가 발생하였으나 현상태로 운전하는 데는 문제가 없는 것으로 나타났다.



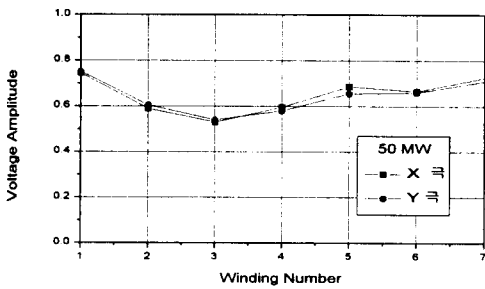
(a) 발전기[112.3 MVA] 부하 : 10[MW] 부하



(b) 발전기[112.3 MVA] 부하 : 50[MW] 부하

그림 6 회전자 단락이 발생한 발전기에서 전압크기와 권선수 사이의 관계

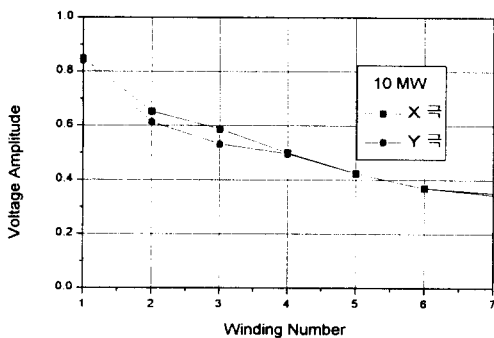
Fig. 6 Relationship between voltage amplitude and winding number in the generator[112.3MVA] of rotor shorted turns



(b) 발전기[112.3 MVA] 부하 : 50[MW] 부하

그림 5 회전자 단락이 없는 발전기에서 전압크기와 권선수 사이의 관계

Fig. 5 Relationship between voltage amplitude and winding number



(a) 발전기[112.3 MVA] 부하 : 10[MW] 부하

표 1 발전기[112.3MVA]에서 전압크기의 편차율

Table 1 The deviation rate of voltage amplitude in the generator[112.3MVA]

(a) 층간단락이 발생하지 않은 발전기[112.3 MVA]

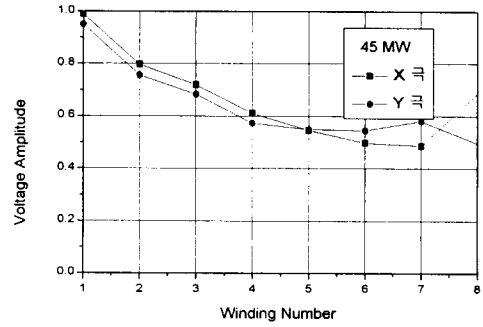
Test Load	Exciter			X, Y극 전압값의 편차율 [%]						
				Winding Number						
MW	Mvar	V	A	1	2	3	4	5	6	7
0	0	50	320	0	-2.60	0	0.81	5.50	0	2.38
10	0	50	320	0	-0.84	0	0	0	0	0
20	0	55	340	1.22	0	0	2.10	0	0	1.06
30	0	60	355	3.42	0	0	2.22	0	0.9	4.27
40	0	68	390	0	0	-2.0	0.99	0.9	1.6	2.38
50	0	78	430	0	-2.48	-1.86	2.58	4.58	2.3	2.11
60	0	85	470	0	-3.23	-4.35	0	0	0	0
70	0	92	520	3.24	0	0	0	0	0	3.79
80	0	102	560	1.80	0	0	0	0	0	3.7
80	+20	115	630	0	-0.65	-1.30	0	0	0	2.35
층간단락 발생 Turn수				0	0	0	0	0	0	0

◆ 층간단락 발생확률(X, Y극 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%

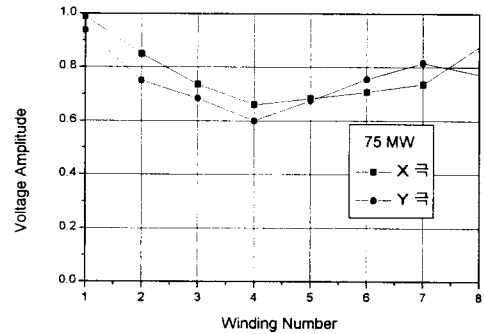
(b) 층간단락이 발생한 발전기[112.3 MVA]

Test Load	Exciter			X, Y극 전압값의 편차율 [%]							
				Winding Number							
	MW	Mvar	V	A	1	2	3	4	5	6	7
0	0	50	320	4.65	1.24	9.47	2.06	-0.52	0.94	-1.29	
10	0	50	320	0.53	6.44	10.15	0	0	0	-1.85	
20	0	55	340	2.81	5.75	4.21	0	0	4.24	-2.31	
30	0	60	355	1.51	5.75	0.95	0.90	-0.12	1.26	-0.18	
40	0	68	390	2.12	1.85	0.85	0	-0.78	7.22	-5.63	
50	0	78	430	4.07	3.22	0	5.02	-0.77	7.28	-2.63	
60	0	85	470	2.18	0.34	2.31	1.87	4.52	3.75	-5.10	
70	0	92	520	1.46	2.51	0	0	3.19	1.2	0	
80	0	102	560	2.52	1.04	1.77	2.81	1.55	2.99	-0.27	
80	+20	115	630	1.74	0.61	0	0	0.93	1.97	0	
층간단락 발생 Turn수				0	1	1	0	0	1	1	

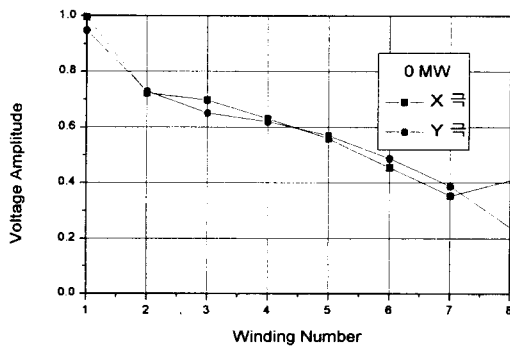


(b) 발전기[215.7 MVA] 부하 : 45MW

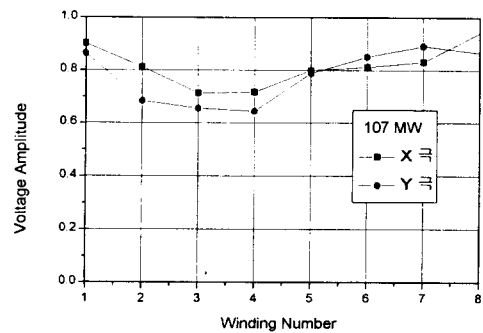
또한, 용량 215.7[MVA] 발전기 1대에서는 동일 용량의 다른 발전기에 비해 진동이 높게 나타나 13가지의 다양한 부하 즉 무부하, 10[MW], 15[MW], 30[MW], 45[MW], 60[MW], 75[MW], 90[MW], 107[MW], 120[MW], 135[MW], 153[MW] 및 153[MW](40Mvars, 지상운전)에서 진단시험을 실시한 결과 층간단락이 여러 권선에서 발생되어 측정결과를 세밀하게 분석하였다. 그림 7에서는 무부하, 45[MW], 75[MW], 107[MW] 및 153[MW] 등 5가지 부하에 대해서 분석하였으며, 층간단락 진단시 측정된 회전자 권선 슬롯의 전압파형 및 각 극별, 권선별 전압의 크기를 비교하였다. 부하별 전압크기의 비교에서 알 수 있듯이 발전기는 다소의 차이는 있으나 부분적으로 일부 권선에서 층간단락이 발생되고 있음을 쉽게 알 수 있다.



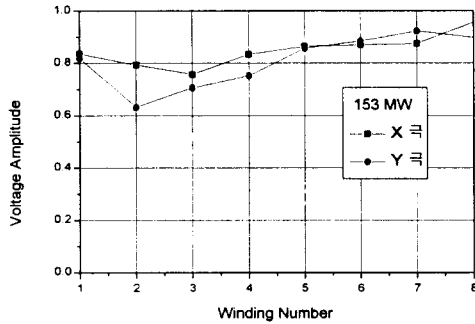
(c) 발전기[215.7 MVA] 부하 : 75 MW



(a) 발전기[215.7 MVA] 부하 : 0 MW



(d) 발전기[215.7 MVA] 부하 : 107 MW



(e) 발전기[215.7 MVA] 부하 : 153 MW

그림 7 회전자 단락이 발생한 발전기[215.7MVA]에 서 전압크기와 권선수 사이의 관계

Fig. 7 Relationship between voltage amplitude and winding number in the generator[215.7MVA] of rotor shorted turns

그림 7(a)의 무부하시에 권선별 전압크기를 보면 2번, 4번 및 5번 이외는 층간단락 가능성이 있으며, (b)의 45[MW] 부하, (c)의 75[MW] 부하 및 (d)의 107[MW] 부하에서는 5번 권선을 제외한 모든 권선에서 층간단락 가능성을 갖고 있다. 그리고 75[MW] 부하 이상에서 특징은 무부하시와 45[MW] 부하보다 5~8번 권선의 전압크기가 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. (e)의 153[MW] 부하에서는 1번과 5번 권선을 제외한 권선에서 층간단락 가능성을 갖고 있다. 153[MW] 부하의 특징은 X극이 대략적으로 직선형을 나타내고 있으며, 2번 권선이 X극과 Y극 사이에서 큰차이를 보이고 있다.

13가지의 부하별 권선의 전압크기를 현장에서 예비분석 결과 발전기 회전자 권선에서 층간단락이 명백하게 나타났다. 따라서 진단 프로그램으로 정밀분석 결과 전체적인 층간단락이 6.3[%]로 나타났으며, 다음은 개별권선(1~8번 권선)에서 층간단락 발생을 분석하였다. 표 2는 회전자 권선의 설계 파라메타(parameter)와 층간단락의 영향을 분석하기 위해서 그림 7에서 나타난 바와 같이 발전기가 무부하에서 전부하까지 운전되는 동안 13가지의 다양한 부하에서 flux probe를 통해 측정된 회전자 권선의 파형을 분석하여 층간단락 권선의 위치 및 단락 가능성을 퍼센트로 나타내었다. 1번 권선은 X, Y극의 편차율이 최대 5.22[%]로 1개 권선 층간단락시 9.09[%] 보다 작게 나타나 층간단락이 발생하지 않았으며, 5번 권선도 편차율이 영이므로 층간단락이 발생되지 않았다. 편차율 중에 마이너스는 X극을 표시하며, X극에서 6번 권선은 1개, 7번 권선은 2개가 층간단락으로 나타났다. Y극에서 2번 권선은 2개, 3번 권선과 4번 권선은 각각 1개 및 8번 권선의 경우 최대 41.3[%]의 층간단락이 일어났는데, 이는 12개의 turn중에 5개의 turn에서 층간단락이 발생되었음을 확인할 수 있었다. 또한, X, Y극의 총 190 turn 중에 12개 turn에서 층간단락이 발생되어 발전기 회전자 권

선의 6.3[%]가 층간단락에 문제가 발생한 것으로 나타났다. 일반적으로 발전기 회전자 권선에서 층간단락 발생율이 전체적인 turn중에 5~10[%]이상일 때 여자계통의 용량 제한, 성능저하 및 진동증가 등으로 인해 점검하도록 되어있다[5]. 따라서 본 발전기에서도 진동증가로 인해 정비가 필요하여 계획예방정비기간 동안 회전자 권선을 분해 및 점검한 결과 층간단락이 발생한 권선에서 다량의 동분을 발견할 수 있었다. 또한, 동분의 이동에 의해 절연재료가 손상되어 교체하였으며, 회전자 권선을 전체적으로 분해하여 청소하고 동일 턴(turn)의 동도체를 적절한 간격으로 유지시키는 작업을 완료 후에 발전기 진동 문제도 해결되어 현재는 양호한 상태로 운전되고 있다.

표 2 발전기[215.7MVA]에서 전압크기의 편차율

Table 2 The deviation rate of voltage amplitude in the generator[215.7MVA]

Test Load	Exciter				X, Y극 전압값의 편차율(%)								
					Winding Number								
	부하	MW	MVars	A	V	1	2	3	4	5	6	7	8
-	0	0	500	100	4.88	0	6.74	0	0	-6.81	-8.99	41.3	
10%	10	0	550	100	3.21	0	7.52	0	0	-8.37	-10.7	41.2	
20%	14.5	0	550	104	0	0	6.76	4.53	0	-8.52	-11.8	39.9	
30%	30	0	550	100	0	0	6.41	5.33	0	-6.87	-14.8	35.4	
40%	45	0	590	110	0	0	4.91	5.92	0	-8.55	-16.4	27.7	
50%	60	0	600	115	4.83	5.09	7.01	8.30	0	-7.45	-14.0	19.8	
60%	75	0	650	125	5.22	7.16	7.02	9.00	0	-6.46	-9.79	11.7	
70%	90	0	700	130	2.95	11.6	7.37	9.88	0	-5.39	-7.56	9.95	
80%	107	0	750	140	4.16	14.3	8.11	10.1	0	-4.64	-6.71	7.87	
90%	120	0	805	150	3.58	15.8	6.80	9.67	0	-2.71	-5.93	7.10	
90%	135	0	860	160	1.18	17.8	7.39	10.5	0	-1.99	-4.91	5.38	
Max	153	0	940	175	2.04	20.3	6.76	9.85	0	0	-5.15	5.94	
Max	153	+40	1080	210	4.16	15.3	7.37	10.3	0	0	0	0	
층간단락 발생 Turns수					0	2	1	1	0	1	2	5	
◆ 1번 권선 (11 Turns) - 1 Turn Short = 1/11 x 100% = 9.09% - 2 Turn Short = 18.18% - 3 Turn Short = 27.27% - 4 Turn Short = 36.36% - 5 Turn Short = 45.45% - 6 Turn Short = 54.54% - 7 Turn Short = 63.63% - 8 Turn Short = 72.72% - 9 Turn Short = 81.81% - 10 Turn Short = 90.90% - 11 Turn Short = 100%					◆ 2-8번 권선 (12 Turns) - 1 Turn Short = 1/12 x 100% = 8.33% - 2 Turn Short = 16.66% - 3 Turn Short = 25.00% - 4 Turn Short = 33.33% - 5 Turn Short = 41.66% - 6 Turn Short = 50.00% - 7 Turn Short = 58.33% - 8 Turn Short = 66.66% - 9 Turn Short = 75.00% - 10 Turn Short = 83.33% - 11 Turn Short = 91.66% - 12 Turn Short = 100%								
◆ Example : 8번 권선 Data중 최대 41.3% ≡ 5 Turn Short													

그림 8은 X, Y극에서 전압크기의 평균값과 유효전력 사이의 관계를 나타냈으며, 1번 권선과 5번 권선은 거의 직선적으로 변함으로 층간단락 발생 가능성이 없어 보이며, 이는 그림 7(e)에서 나타난 결과와도 일치하고 있다. 3번 권선, 4번 권선 및 6번 권선에서는 1개의 층간단락 발생으로 인해 약간씩 편차가 있으며, 2번 권선, 7번 권선 및 8번 권선은 2~5개의 층간발생으로 큰 편차를 나타내고 있다. 특히, 2번 권선은 낮은 부하에서 층간단락이 발생하지 않는 것처럼 보이다가 부하가 증가하면서 층간단락이 발생하고 있으며, 반면에 8번 권선은 낮은 부하에서는 X, Y극의 편차가 커서 층간단락이 발생되었음을 초기에 확인하였고 부하가 증가함

에 따라 X극과 Y극에서 편차가 줄어들고 있음을 확인하였다.

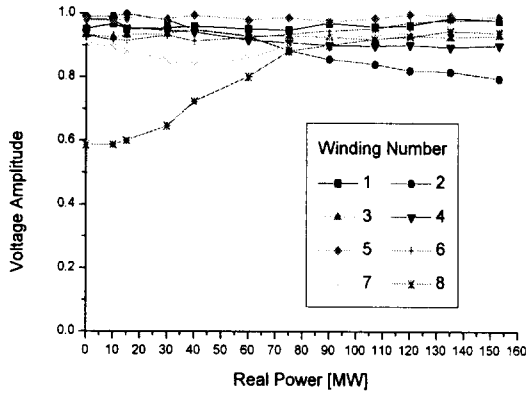


그림 8 회전자 단락이 발생한 발전기[215.7MVA]에서 전압크기의 평균값과 유효전력

Fig. 8 Relationship between average values of voltage amplitude and real power in the generator[215.7MVA] of rotor shorted turns

이와같이 가스터빈 발전기의 회전자 권선은 빈번한 기동 정지로 인하여 열적, 전기적 및 기계적인 복합응력(complex stress)으로 인해 절연재료가 손상을 주거나 원심력이 작은 터닝(turning)시에 회전자 권선의 표면 사이에 동분 누적으로 인해 누설전류가 흘러 층간단락이 발생된 것으로 분석되었다. 따라서 부하변동과 빈번한 기동정지를 시행하는 발전기에서 매년 층간단락 시험을 실시하거나 flux probe를 발전기에 설치하여 운전중에 상시감시할 수 있는 시스템이 필요하며, 회전자 권선에서 층간단락 발생으로 인해 진동이 변화한다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 발전기 회전자 권선의 층간단락 진단 및 건전성을 평가하기 위해 flux probe를 이용하여 발전기 운전중에 회전자 권선의 층간단락 진단방법을 제시하였다. 또한, 가스터빈 발전기 5대에 대한 현장시험과 실제적으로 분해 및 점검을 통해 층간단락 진단기법에 의한 신뢰성을 평가하였으며, 회전자 권선의 전압파형을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 발전기 회전자 권선에서 flux probe를 이용한 층간단락 진단기법은 운전중에 권선의 건전성 및 층간단락 여부를 판단할 수 있었으며, 이기법은 단락이 발생한 권선의 위치 및 슬롯 번호 등을 쉽게 확인할 수 있었다.

(2) 가스터빈 발전기 5대 중에 3대는 회전자 권선이 건전하게 나타났으며, 층간단락이 발생한 용량 112.3[MVA] 발전기 1대는 총 238 turn중에 4개 turn에서 단락되었으나 현상대로 운전하는데 있어 큰문제는 없었다. 또한, 용량 215.7 [MVA] 발전기는 총 190 turn중에 12개 turn에서 단락되어 전체적으로 층간단락 발생율이 6.3[%]로 나타나 진동이 높고 정비가 필요하여 회전자 권선 분해 및 점검 결과 단락권선에서 절연재료가 손상됨에 따라 실제적으로 층간단락이 발생하였다.

(3) 발전기 회전자 권선에서 층간단락 발생율이 총권선수의 5[%]이상 일 때 진동에 영향을 미치고 있음을 확인하였으며, 층간단락 발생이 정지중보다는 운전중에 더 신뢰성을 갖기 때문에 상시감시할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

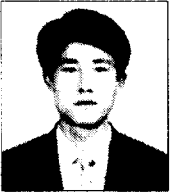
- [1] 전민호, 김병한, 김병래, 1997년도 기술지원 보고서(전기·자동제어분야), 한국전력공사 정비기획실, pp. 245-254, 1997.
- [2] E. Woschnagg, "Turbogenerator Field Winding Shorted Turn Detection by AC Flux Measurement", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No 2, pp. 427-431, 1994.
- [3] M. P. Jenkins, "On-Line Monitoring of Rotor Shorted Turns", IEE Conference Publication No. 401, pp. 55-60, 1994.
- [4] 近藤泰人, 小谷洋一, 발전기 회전자의 경년열화와 진단 기술, 일본 전기현장기술, pp. 51-60, 1987.
- [5] D. R. Albright, Interturn Short-Circuit Detection, Generatortech. Inc., pp. 1-8, 1993.

저 자 소 개



김 희 동(金熙東)

1961년 12월 15일생. 1985년 홍익대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1990년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 발전계전그룹 선임연구원



이 영 준(李 泳 俊)

1963년 2월 8일생. 1985년 홍익대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 발전계전그룹 선임연구원



박 종 정(朴 鐘 丁)

1961년 8월 3일생. 1988년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 발전계전그룹 선임연구원



주 영 호(朱 榮 鎬)

1956년 5월 1일생. 1981년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 발전연구실 발전계전그룹 책임연구원