

가스터빈 발전기의 계자권선 손상에 관한 역학적 분석

한석우 권영동 최규하
 평택공과대학 전기과 한국전력공사 건국대학교 전기공학과

Mechanical Analysis of Field Coil Deformation in Gas Turbine Generator

Seok-Woo Han Young-Dong Kwon Gyu-Ha Choe
 Pyongtaek Institute of Technology, Korea Electric Power Corporation, Konkuk University

Abstract - This paper presents mechanical analysis of gas turbine generator (113MVA, 3 ϕ , 2P, 0.9PF, F class, 3600rpm, 60Hz, 13.8kV, 4.72kA, Air-Cooling) field coil deformation. Rotor end coil deformation is only appeared on turbine end but collector end coil is normal. Expansion direction of end coil is tangential not axial. Deformation appears more severe at top turn. Retaining ring is expanded by centrifugal force of coil and itself. In case friction coefficient between coil top surface and retaining ring insulation inner surface is small, coil end length l does not change. However, in case friction coefficient big condition, coil end is expanded Δl due to start and stop. Deformation is assumed about 30mm by watching photograph inner surface of retaining ring is coated by Teflon at manufacturing condition. Usually Teflon coating insulation surface is small friction coefficient. It's value 0.08~0.15. However it's value exceeds more than 0.297. Since top turn deformation appears. The distortion and subsequent failure have occurred because of the lack of a sufficient slip-plane between the top field coil conductors and the inside surface of the retaining ring insulation on the turbine end of the field-winding

회전 기기의 절연 열화 형태는 매우 다양하다. 크게 열적, 기계적, 전기적, 환경적 원인의 4가지로 분류한다. 이러한 열화 요인은 단순적 열화와 복합적 열화로 분류되며 절연 시스템의 종류에 따라 열화 요인의 영향도 다르게 나타난다.

단순적 열화는 사용 재료의 내열성, 온도 상승, 온도 분포, 기계적 스트레스, 과전압, 화학 물질, 도전성 물질, 수분, 오손 등의 원인을 들 수 있다. 복합적 열화는 온도 상승에 따른 재료의 물성변화 및 부분 방전으로 전압 열화, 유전손등이 촉진되고 절연 층에 균열이나 박리가 생기면서 환경 물질이 내부에 침입하여 열화를 촉진시킨다. 그리고 절연물질의 마찰(friction)에 관련된 발전기 계자권선과 리테이너링 팽창은 계자 상부 권선 표면과 리테이너링 내부 절연물 표면과의 상호 마찰력이 작은 경우는 권선 끝부분이 변화되지 않으나 클 경우는 빈번한 기동 정지에 따른 권선의 원주 방향으로 팽창이 발생된다. 여기서 마찰(friction)이란 한 물체가 다른 물체 위에서 미끄러지거나 미끄러지려할 때 두 물체의 접촉면에서 그 면에 나란하게 일어나는 운동이나 일어나려는 운동을 방해하는 두 물체간의 힘을 말한다[4, 5].

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 국민 생활 향상은 전력 수요의 급격한 변화를 가져왔다. 즉 주중과 휴일간 및 주야간의 전력 사용량 격차가 점차 증가되고 있다. 따라서 전력 계통 운용에 있어서 가스터빈은 침투부하시 또는 비상시에 빈번하게 기동, 정지가 이루어지는바 권선 열화로 인한 절연 파괴 사례가 종종 보고되고 있다[3].

전력 수요의 증가와 더불어 기술적 경제적인 관점에서 회전 기기도 고전압 대응화되고 있다. 이에 따라 회전 기기 설계 및 제작 기술의 향상과 고성능 전기 재료의 개발을 통하여 기기의 성능과 신뢰성이 지속적으로 향상되었으나, 운전 조건이 보다 가혹 화되고 또한 기기의 장기 운전에 따른 여러 가지 원인으로 발전기의 절연 파괴 사고는 발전 출력 감발 및 비상 정지로 경제적 손실 뿐 아니라 전력 계통에 악영향을 미치므로 고신뢰성이 요구된다[1, 2, 3].

본 논문은 사례 연구로 가혹하게 운전되는 가스터빈 발전기의 계자권선중 터빈 중단측 리테이너링과 접촉해 있는 모든 슬롯의 상부 1, 2층 권선 끝부분이 주로 원주 방향으로 팽창 변형되어 권선단락된 사례로 역학적 분석을 통하여 설비의 신뢰성 향상 및 돌발 사고의 미연 방지에 기여코려한다.

2.2 계자권선의 손상에 관한 분석

본 연구의 대상인 가스터빈 발전기(113MVA, 3 ϕ , 2P, 0.9PF, F종, 3600rpm, 60Hz, 13.8kV, 4.72kA, 개방 통풍형)의 기동정지중 진동 상승 및 운전 중에 점진적인 진동 상승후 발전기 계자점지 경보 발생으로 발전 정지 되었다.

발전기 출력 67[MW]일 때 계자전압 120[VDC] 운전 상태에서 계자전원과 발전기 프레임간의 전압을 측정 한 결과 (+)전원과 프레임 사이는 90[VDC], (-)전원과 프레임 사이는 35[VDC]가 측정되어 계자권선의 접지가 발생 되었음을 알았다.

발전기 계자 분해 결과 계자권선의 단락 및 접지가 검출되었고, 그림 1은 당시 발전기 진동 트렌드이며, 전기적 검함은 일반적으로 전력 계통 주파수의 2배에서 큰 진동이 발생된다[6, 7].

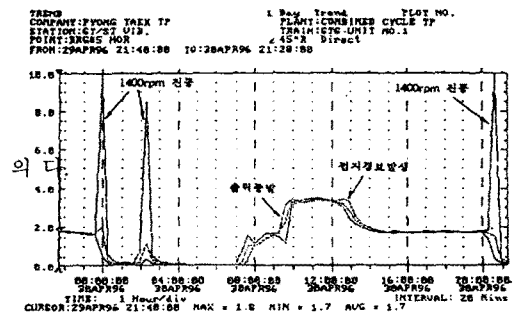


그림 1 발전기 진동 트렌드

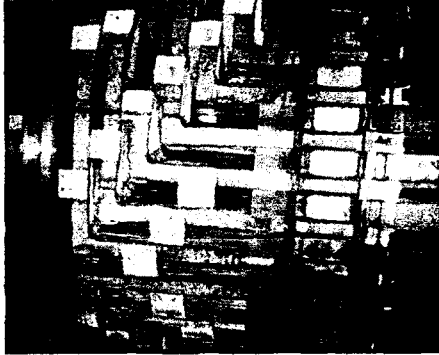
2. 본 론

2.1 회전 기기의 절연 열화 요인 및 특성

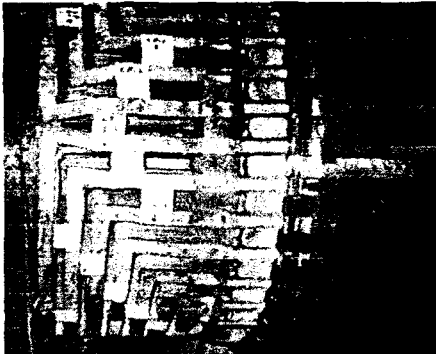
2.2.1 계자권선 분담 전압 측정

계자권선 분해 결과 콜렉터 종단 부는 정상이고 터빈 종단 부위만 손상되었음을 그림 2에 보여준다.

계자권선의 분담 전압은 그림 3과 같이 전원을 연결하여 측정한 결과 (-)측(S극) #3~#6번 권선에서 층간 단락 및 #5번 권선에서 접지가 확인되었으며 측정 결과는 표 1과 같다.



(a) 콜렉터 종단 부



(b) 터빈 종단 부

그림 2 발전기 계자권선 종단 부

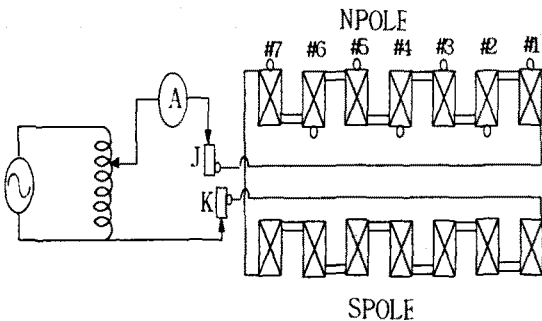


그림 3 계자권선 분담 전압 측정

표 1 계자권선 분담 전압 측정 결과

coil pole	1~2	3~4	5~6	7(N)~7(S)	비 고
+측(N극)	4.888	5.833	6.346	6.078	공급 전압 : 34.18VAC 공급 전류 : 4.0A N-G : 25.05VAC S-G : 9.11VAC
-측(S극)	4.600	2.470	2.920		

2.2.2 역학적 분석

터빈 종단 부 계자권선의 소성변형 및 층간 단락을 분석하였다. 운전시 리테이너링은 권선과 함께 원심력으로 팽창되며 이때 상부코일면과 리테이너링의 내부 절연면사이의 마찰계수가 적을 시는 코일 종단 부의 길이 l 은 변하지 않으나, 마찰계수가 큰 경우 코일 종단은 빈번한 기동 정지로 그림 4처럼 원주 방향으로 Δl 만큼 팽창한다.

이와 같이 권선에 힘이 작용하면 변형을 일으키게 되는데 변형된 Δl 과 변형전 길이 l 과의 비를 단위변형률(unit strain)이라 한다[4, 5].

그림 5에서 Δl 의 소성변형은 30mm로 기동 정지 횟수가 100회 정도로 추정된다.

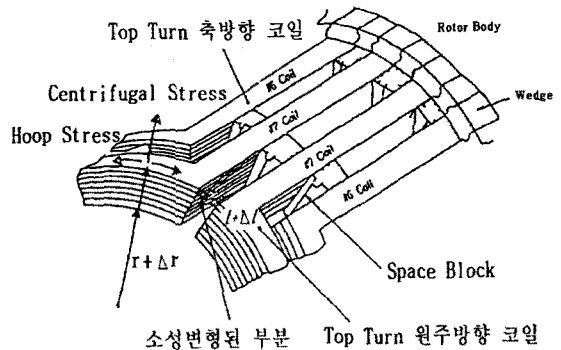


그림 4 리테이너링을 제거한 계자권선 종단 부

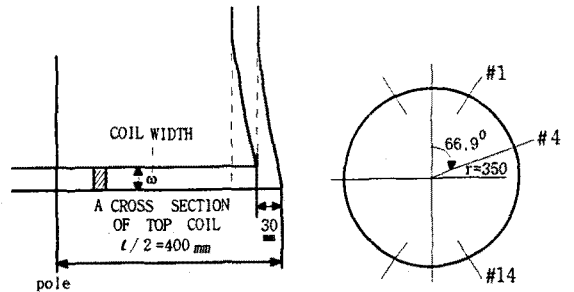


그림 5 계자권선의 소성변형량

발전기 운전시 리테이너링의 팽창 Δr 은 약 0.5mm이고, 그림 5에서 처럼 변형된 코일은 변형 전을 기준으로 약 66.9° 만큼 벗어나 있으며 코일의 원주 방향 팽창 Δl 은 식 (1)과 같다.

$$\Delta l = \frac{2\pi \Delta r \times 66.9^\circ \times 2}{360^\circ} \quad (1)$$

$$= 2.32 \Delta r = 2.32 \times 0.5 = 1.16 \text{ mm}$$

그리고 코일의 응력과 변형률과의 관계는 탄성의 법칙(law of elasticity)을 적용하면 식 (2)와 같다.

$$\sigma = \epsilon E = \frac{\Delta l}{l} E$$

$$= \frac{1.16}{800} E = 330 [\text{kg/cm}^2] \quad (2)$$

σ : 응력도(stress intensity) [kg/cm²]
 E : 세로 탄성 계수 [kg/cm²]
 l : 변형전 권선의 원주 길이 [mm]
 Δl : 변형후 권선의 원주 길이 [mm]
 ϵ : 세로 변형도(longitudinal strain)

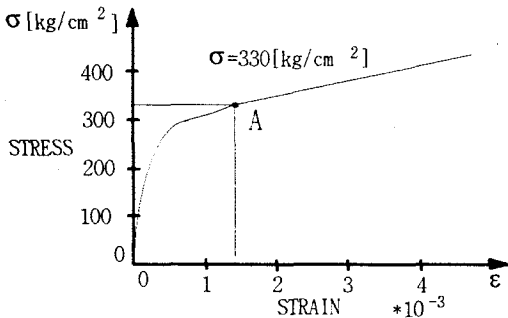


그림 6 가열 냉각된 권선의 응력 변형률 선도

그림 6에서 응력이 탄성 한도를 넘어 점 A에 도달하면 힘이 가해지지 않아도 소성 신장이 일어난다. 즉 탄성 한도내에서 응력도 σ 는 변형도 ϵ 에 비례하며 응력이 일정한 값을 초과하지 않는 한 응력도와 변형도와의 비는 일정한 값을 가지며 이것을 후크의 법칙(Hooke's law)이라 한다.

코일의 저항력 F_c 는 식 (3)과 같다.

$$F_c = S\sigma = 2 \times 0.3 \times 330 = 198 [\text{kg}] \quad (3)$$

F_c : 코일의 저항력 [kg]
 S : 코일의 단면적 [너비×두께]
 σ : 응력도(stress intensity) [kg/cm²]

테프론 코팅이 안된 권선의 경우 상부 권선과 두 번째 권선의 마찰계수 μ_b 는 0.3이다. 리테이너링 내부 절연 면과 상부코일면 사이의 마찰계수 μ_t 와 코일 저항력 F_c 관계를 그림 7에 나타낸다.

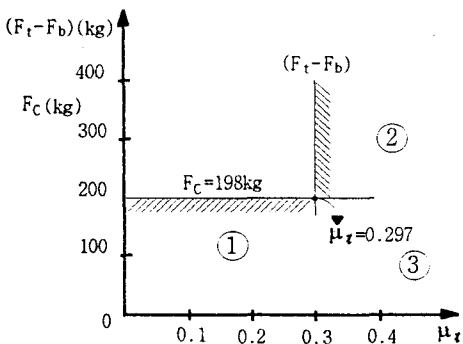


그림 7 μ_t 와 F_c 관계도

①지역: $F_t - F_b < F_c$ 이고 테프론 코팅시 손상 없음 (μ_t 0.08~0.15)

②지역: $F_t - F_b > F_c$ 이고 상부 코일 손상 발생

③지역: $F_t - F_b < F_c$ 이고 $\mu_t > 0.297$ 일 때 비정상

F_b : 상부 권선과 두 번째 권선 면사이의 마찰력

F_c : 코일 저항력

F_t : 리테이너링과 상부 권선 면사이의 마찰력

μ_t : 리테이너링과 상부 권선 면사이의 마찰계수

3. 결 론

본 논문은 가스터빈 발전기 계자권선 손상에 관한 역학적 분석 사례 연구로 발전기 계자권선과 리테이너링 자체의 팽창은 상부 코일 표면과 리테이너링 내부 절연물 표면과의 상호 마찰력이 작은 경우는 코일 종단 부의 변화가 없으나, 클 경우는 기동 정지에 따른 권선의 원주 방향으로 팽창이 발생된다.

상부 코일 손상은 리테이너링 절연 면과 상부 코일 표면 사이의 마찰계수에 관련되고 리테이너링의 내부 표면은 테프론으로 코팅되어 있다. 일반적으로 테프론 코팅된 절연 표면의 마찰계수는 0.08~0.15 정도로 작다. 이번 사례는 테프론 코팅의 불량으로 마찰계수가 0.297을 초과하여 그림 7에서 처럼 상부 코일이 손상되었다. 따라서 리테이너링 내부면의 마찰계수가 터빈 종단 부와 컬렉터 종단 부가 서로 다를 수 있으며, 발전기의 진동은 기계 및 전기적인 것과 추이를 중시하여야 한다.

상부 코일과 두 번째 코일 사이의 절연이 테프론 코팅이 된 경우 μ_b 가 0.1 이하시 손상이 발생되므로 두 번째 코일의 마찰계수 상태를 0.08~0.15 범위로 유지시켜야 한다. 그리고 본 연구의 대상인 개방 통풍형 발전기는 오염이 심하여 증간 및 단부 절연 저하 발생 우려가 크기 때문에 주기적인 분해점검과 전기적 시험으로 코일 변형 상태 및 오염 상태 점검 정비가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 원종수, "전기설계학", 동일 출판사, P23~26, 1994
- [2] 추진부 외4, "다양한 발전원 계통에서의 연간 발전계획 전산화 시스템 개발[I]", 대한 전기 학회 96 하계 논문집, P707~710, 1996
- [3] 김길용 외2, "회전 전기 기기의 절연 진단 기술 연구", 전력 연구, P9~22, 1990
- [4] 임정순 외1, "최신 응용 역학", 동명사, P174~211, 1994
- [5] 곽한근 외1, "공업 역학", 청문각, P115~135, 1996
- [6] 한석우, "발전소용 고압 전동기 진동 감시 장치 설계", 한전기술정보 교류집, P78~81, 1995
- [7] 이병준 외8, "회전 기계의 상태 감시 및 분석", 한전, P201~254, 1996