

원자력 고압터빈 베어링 및 발전기 송풍기 손상 원인분석

Analysis for Damages of HPT Bearings and Generator Blower

고우식, 김계연, 이우광
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 터빈-발전기 정격출력 운전 중 고압터빈 베어링의 Gap Volt가 증가하였고, 예방정비를 위해 출력을 감발하는 중 터빈 과속보호계통 작동으로 자동 정지되어, 분해점검 결과 고압터빈 베어링 전식발생 및 배빗이 용융되었고, 발전기 수소 순환용 송풍기 5, 6단 동익 및 고정익이 절손되었다. 원인분석 결과 발전기 수소누설로 인한 긴급 발전정지 시 발전기 수소 긴급배기 및 CO₂ 주입을 실시하여 유체 불안정에 의한 Surge 또는 Stall이 발생하였다. 이때 발전기 송풍기 동익에 역방향 부하가 발생하여 5단 동익 2~3개가 절손되었고, 이후 기동 및 정지 시 이차적인 손상이 발생하였다. 발전기 내부 손상부품의 마찰로 축전류가 증가하였고, 증가된 전류가 고압터빈 베어링을 통해 흐름으로서 전식이 발생하였으며, 과도상태에서 베어링 유막이 파괴되어 베어링이 용융되었고 축 저어널을 손상시켰다. 정확한 원인분석 및 대책으로 원자력 터빈-발전기 안정운전을 지속하였다.

Abstract

During normal operation of nuclear turbine-generator, we have found the gap volt increased on the HP turbine bearings. After a week, turbine-generator was tripped due to activating the mechanical overspeed trigger during coast down operation for refueling. On disassembling, we have found the HPT bearings melted and generator blower blades broken. Reviewing the operation and vibration data and damaged components, we have concluded 2~3 blades were broken during transient operation, when generator was vented and filled with CO₂ in short time after tripping of turbine-generator due to leaking hydrogen from generator 2 months ago. At this time, the surge or stall through generator blower made reverse force on the rotating blades and made 2~3 blades broken. Blower blades were broken and damaged more during additional transient operation and made rotor current increased due to rubbing of damaged parts. The HPT bearings were corroded electrically and melted down by breaking minimum oil film during speed down operation. The analysis and actions were properly performed and made safe operation of nuclear turbine-generator.

1. 서 론

원자력 터빈-발전기 정격출력 운전 중 고압터빈 #1, #2 베어링의 Gap Volt가 증가하였고, 계획 예방정비를 위하여 출력을 감발하는 중 터빈-발전기가 자동 정지되었다. 터빈-발전기 분해점검 결과, 고압터빈 베어링이 전식발생 및 배빗이 용융되었고, 발전기 수소 순환용 송풍기 5, 6단 동익 및 고정익이 절손되어, 운전자료 및 손상부품에 대한 면밀한 검토 및 진단으로 손상발생 원인을 정확하게 분석하여 조치함으로서 원자력 터빈-발전기 안정운전을 기하고자 한다.

2. 본 론

운전 중인 터빈-발전기에서 축전류가 생성되었고, 고압터빈을 통해 흐름으로서 베어링 전식이 발생하였으며, 과도상태에서 유막이 파괴되어 베어링 및 축 제어널이 손상되었다. 또한 발전기 송풍기 동익 및 고정익도 손상된 것으로 나타나, 손상 초기에 어느 부품에서 무슨 원인으로 손상이 발생되어 어떻게 파급되었는지를 운전 및 진동자료, 손상 부품의 위치, 형태, 파단면 및 재질 등을 토대로 정확하게 규명하고자 한다.

가. 운전현황

(1) 터빈-발전기 운전 이력

일 시	내 용	비 고
2002. 6. 20	예방정비 후 터빈-발전기 기동	
2003. 2. 6	발전기 수소누설 수동정지	
2003. 2. 8	수소누설 정비 후 기동	발전기 진동 큰폭 증가
2003. 2. 8	제어밸브 제어모드 전환 중 정지	
2003. 2. 13	운전절차 변경 후 재 기동	
2003. 4. 24	RCP Card 고장에 의한 정지	
2003. 4. 26	RCP Card 정비 후 재 기동	발전기 진동 감소
2003. 5. 3	터빈-발전기 축 접지장치 정비	베어링 Gap Volt 1차 증가
2003. 5. 4		베어링 Gap Volt 2차 증가
2003. 5. 9	출력감발 중 터빈-발전기 정지	

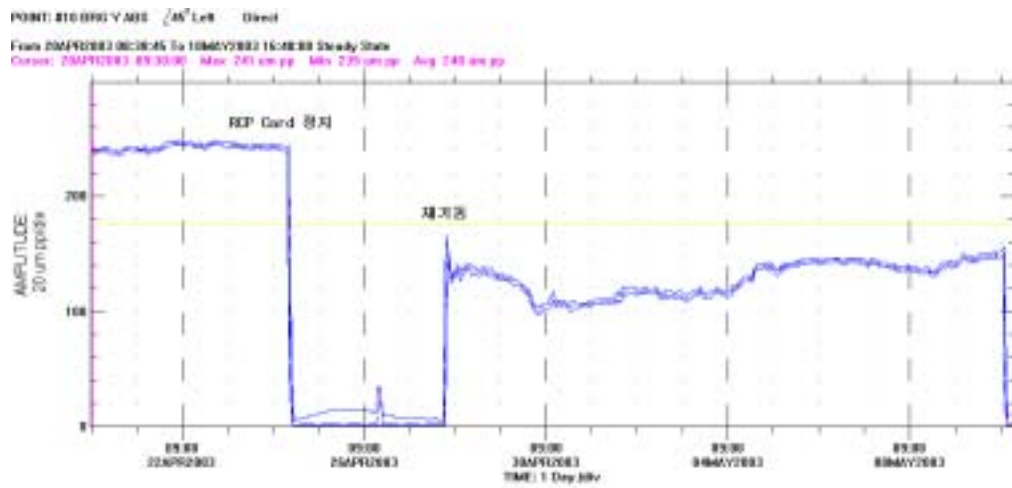
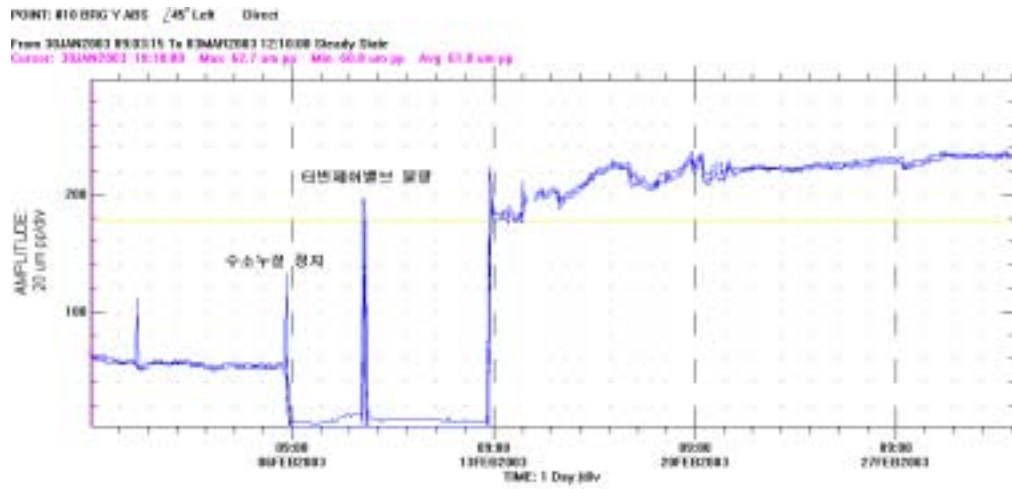
(2) 발전기 베어링 진동변화

(가) 발전기 진동변화량

(정격출력, Y-abs p-p μm)

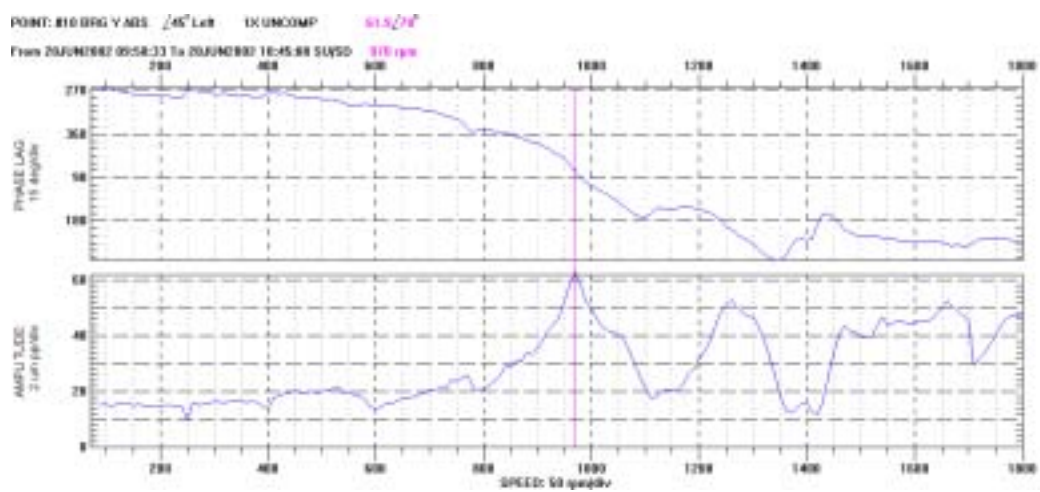
운전조건	#9 베어링		#10 베어링	
	진동값	진동변화	진동값	진동변화
수소누설 정지전	41 34 $\angle$ 216	기준	73 41 $\angle$ 4	기준
수소누설 정지후 재기동	212 204 $\angle$ 57	220 $\angle$ 62	202 183 $\angle$ 193	200 $\angle$ 190
RCP Card 정비후 재기동	120 110 $\angle$ 51	136 $\angle$ 51	120 93 $\angle$ 172	120 $\angle$ 175

(나) #10 베어링 진동 Trend

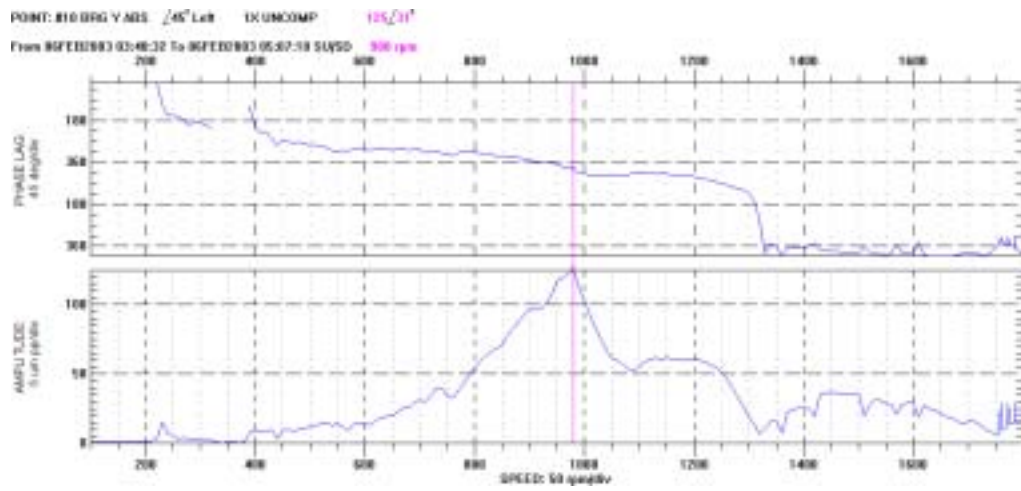


(다) 발전기 베어링 Bode Plot

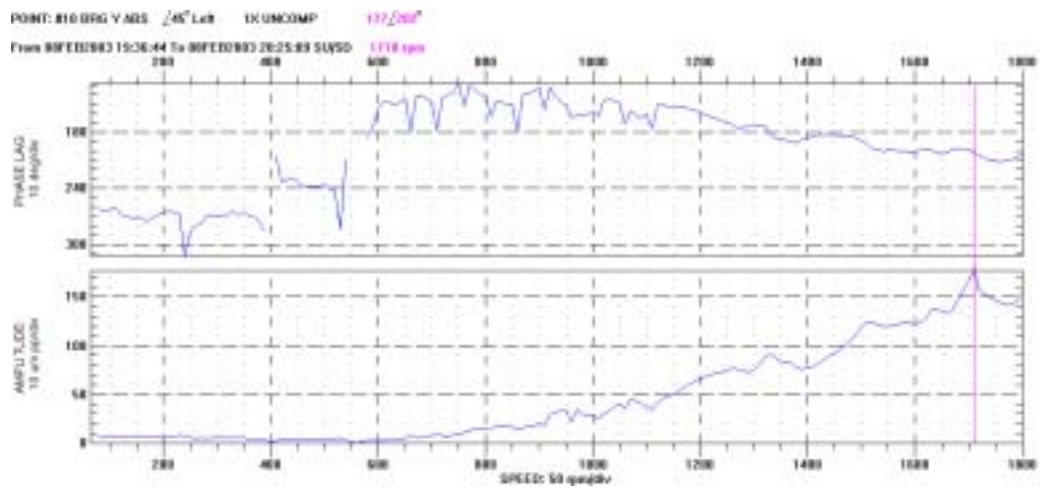
- 2002. 6. 10 기동시



- 2003. 2. 6 수소누설 정지시



- 2003. 2. 8 수소누설 정비후 기동시



(3) 축전압 변화



터빈-발전기 축 전압 측정 및 축 접지장치 교체는 매 2~3주 마다 수행하고 있었으며, '03.4.28일 이전에는 축 전압이 0.3V 이하로 정상 수준이었으나, RCP Card 정비 후 '03.5.2 재기동 후 최초로 측정시 축 전압이 급격히 상승한 것으로 나타났다.

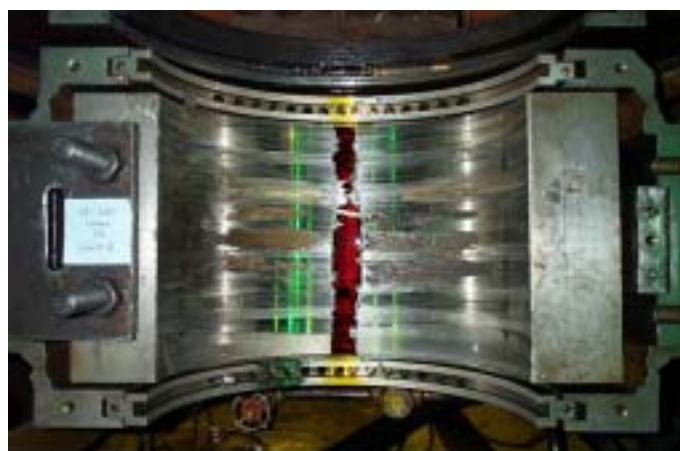
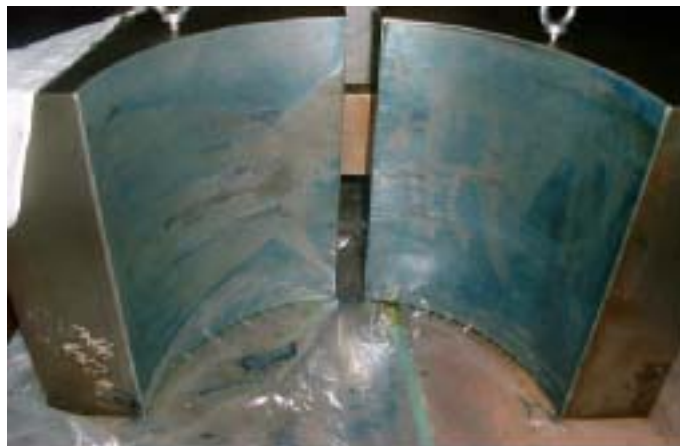
(4) 발전기 H2 Cooler 냉각수 온도변화

운전조건	냉각수 유입온도(℃)	냉각수 배출온도(℃)	온도차(℃)
수소누설 정지전 '03. 2. 6	31.2	36.2	5
수소누설 정비후 '03. 2. 22	38.9	46.2	7.3
RCP Card 정비후 '03. 4. 30	36.7	45.1	8.4

나. 분해점검 결과

(1) 고압터빈 축 및 베어링

고압터빈 베어링 상부는 축전류의 흐름 형상에 따라 전식이 발생되었으며, 하부는 과도상태에서 유막파괴로 인한 배빗 용융으로 전식 흔적이 일부분만 나타났다.



고압터빈 축 저어널은 하부 배빗이 용융된 축 저어널은 전식흔적이 거의 보이지 않고 깊은 골 형상의 손상을 나타냈으며, 배빗에 전식만 나타난 축 저어널은 전식 손상이 나타났다.



고압터빈 베어링 전식 및 용융발생으로 축 위치가 변화하면서 간극이 작았던 부위의 고정체가 축과 간섭으로 마모가 심하게 나타났다.

- 고압터빈 베어링 Oil Deflector 손상
- 고압터빈 Gland Seal 손상
- 고압터빈 내부 Radial Seal 마모
- MOP Wearing Ring 및 Seal 손상

(2) 발전기 송풍기(Blower)

발전기 송풍기 동익은 각 단별 174개로, 29개씩 6개의 그룹으로 그룹과 그룹사이 원주방향 고정볼트에 의해 지지되고 있으나, 분해결과 5단 동익 고정볼트 1개와 동익 34개(270~340°부근)가 이탈되었으며, 이탈되지 않은 5단 및 6단 동익은 전량 절손된 것으로 나타났다. 이탈된 동익 34개중 29개를 수거하였으나, 대부분 심하게 구부러지고 마모되었으며 일부는 일부 배면에 균열이 나타나 있었다.



- 발전기 Blower 5, 6, 7단 고정익 손상



다. 터빈-발전기 손상원인 분석

(1) 발전기 Blower 동익 손상시기

- 수소누설에 의한 발전정지('02.2.6) 및 기동시('03.2.8) 발전기 베어링 진동 Bode Plot상의 진동특성 차이가 현저하게 나타났는데, 정지시는 기존의 Bode Plot와 유

사한 반면에 재기동시는 회전수가 증가할수록 이차함수적으로 진동이 증가하여 질량 불평형이 증가하여 나타났다.

- 수소누설에 의한 발전정지 전의 정격출력 진동에 비해 터빈 제어밸브 제어절차를 변경하고 기동 후 정격출력에서 발전기 베어링 진동이 크게 상승하였는데, 진동 변화를 질량 불평형으로 계산할 때 4차례의 과도상태에서 11~13개의 동익이 절손 혹은 이탈된 것으로 판단된다.
- 수소누설에 의한 발전정지 후 터닝기어 운전시 불규칙하게 발전기 베어링에서 진동 Peak가 발생한 것은, 이탈된 동익이 회전체와 고정체 사이에 끼어 터닝기어 운전시 불규칙한 진동 Peak를 나타낸 것으로 판단된다.
- 발전기 Blower 동익 고정볼트의 파단면 분석결과, 금속성 광택이 유지되고, 산화층이 거의 없으며 수소 환경속에서 운전을 고려했을 때 파단시기는 1~3개월 정도 이전인 것으로 추정된다.
- 발전기 분해시 Blower 5단 동익 Root가 이탈된 것은 34개이나 손상부품 수거물 중 Root 부위가 확인된 것은 24개로, 나머지 10개 정도는 조기 이탈 후 오랫동안 운전되면서 충격 및 마모로 분말형태로 발전기 내부에 남아 있었던 것으로 판단된다.
- 발전기 수소 냉각기 입구 및 출구 온도차가 수소누설에 의한 발전정지 전·후에 5℃에서 7.3℃로 증가한 것은, Blower 동익 손상에 의한 수소 유량변화로 수소냉각기 냉각수 입·출구 온도차가 증가된 것으로 판단된다.
- 동익 절손 또는 이탈로 다량의 손상 부품들이 내부에 잔존하면서 고정익을 손상 (Blade Salad or Domestic Object Damage)시키고, 축 표면과의 마찰로 축 전압이 상승한 것으로 판단된다.

위의 상황을 종합하면, 발전기 Blower 절손 및 이탈시기는 발전기 수소누설로 인한 긴급 발전정지시 최초로 2~3개(11~13개/4회 과도상태)의 동익이 절손 혹은 이탈되어 이후 계속되는 발전정지 및 기동과 같은 과도상태에서 추가로 절손 혹은 이탈된 것으로 판단된다.

○ 진동변화에 의한 질량 불평형 계산

㉓ 질량 불평형 발생위치 계산 : #10 베어링 진동변화 기준

- $\Psi_{BW} = (\Psi_{CAL} + \Psi_M \pm \Psi_{RG}) - 90(HSNo.-1) \pm 180^\circ$
- $\Psi_{BW} = (0^\circ + 198^\circ + 0^\circ) - 90(1.7.-1) \pm 180^\circ = 315^\circ$

㉔ 질량 불평형량 계산 :

- 질량 불평형량 : $232\mu m \div (11\sim15)\mu m \times 100g \div (300\sim310)g/개 = 5\sim7개/in$
each fan Ring이므로 한쪽(#10 베어링 측)에서만 발생했을 경우는 10~14개 정도가 이탈된 것으로 판단된다.
- 동익 무게 : 300~310g /개당
- 진동변화 벡터 (Y-abs) :

구 분	#9 베어링	#10 베어링	비 고
'03. 1. 10	35 26∠260	55 19∠2	수소누설 정지 전 정격출력
'03. 2. 14	214 205∠58	198 180∠195	수소누설 정비 후 정격출력
'03. 3. 5	214 206∠57	233 215∠200	수소누설 정비 후 정격출력
진동변화 백터	230∠60	232∠198	'03. 3. 5 기준

(2) 발전기 Blower 동익 손상 추정원인

(가) 발전기 수소누설 발전정지시 유체불안정에 의한 동익 비정상적 부하

- 발전기 수소누설 및 화재발생 시 폭발 가능성을 최소화하기 위해 긴급히 발전정지('03.2.6)하고 수소 긴급배기 후 CO₂를 주입하여 외국사와 같은 대형사고를 방지하였으나, 단시간의 압력변화로 Blower 동익을 통과하는 유체흐름이 불안정하여 Surge 또는 Stall 현상이 나타나, 동익에 역방향 부하가 작용하여 균열이 발생하였거나 절단되었을 가능성이 매우 크며, 또한 이때 동익에 미치는 과도한 교번하중이 원주방향의 고정볼트에 전달되어 구조적으로 취약한 고정볼트 나사골부위에서 절손되고 과도상태에서 동익이 이탈되었을 가능성이 크다.
- 동익이 절손되지 않고 이탈된 것의 배면에 균열이 나타나 있어, 정상 회전시 발생하는 과부하나 과편에 의한 충격시 동익에 나타나는 균열발생 부위와 반대로, 이탈되기 전 과도한 역방향 부하에 의한 균열이 발생된 것으로 판단된다.



- 절손된 동익 파단면을 정밀검토한 결과, 일부 5단 동익균열 방향이 정상적인 동익 부하시 균열방향과 반대인 회전방향으로 1회 또는 2~3회에 걸쳐 피로균열이 진행된 것으로 나타난 것은 역방향 부하가 작용하였음을 나타낸다.
- 동익 5단 및 6단의 잔존하는 고정볼트 사각와서 측면은 인접 동익 Root에 의해 과도한 힘이 작용하여 압흔이 깊게 발생하였으며, 면과 평행하지 않아 고정볼트에 비틀림 및 굽힘응력을 가했을 것으로 판단되며, 따라서 고정볼트의 균열진행 방향이 원주방향과 다르게 나타난 것으로 판단된다.

위의 상황을 종합하면, 발전기 수소누설에 의한 발전정지시 비상사태에서 긴급 조치로 수소 긴급배기 및 CO₂ 주입을 실시하였으나, 유체 불안정에 의한 Surge 또는 Stall 현상 발생으로 동익에 역방향 부하가 발생하여 균열되었거나 절단되었을 가능성이 매우 크며, 또한 이때 동익에 미치는 과도한 교번하중이 원주방향의 고정볼트에 전달되어 구조적으로 취약한 고정볼트 나사골부위에서 절손되고 과도 상태에서 동익이 이탈되었을 가능성이 크다.

- 동익 및 고정볼트의 절손 후 터빈속도 감소로 동익 고정상태가 느슨해져 동익의 일부가 이탈되었고, 터닝기어 운전시 회전체와 고정체 사이에 끼어 간헐적으로 진동 Peak를 나타냈다.
- 터빈 제어밸브 고장 전후의 저속에서 추가로 이탈되었으며, 고속에서 이탈된 동익의 간섭 또는 파편 충격에 의해 일부 동익의 균열 또는 절손이 발생한 것으로 판단된다.

(나) 발전기 Blower 동익 설치 구조상 취약

- 발전기 Blower는 축류형으로 발전기 Rear측에 설치되어 있으며, 동익 설치구조는 총 6단으로 각 단마다 6개의 그룹으로 나뉘어 있고 그룹별 29개의 동익이 설치되어 단별 총 174개의 동익이 설치되어 있고, 그룹과 그룹사이에 원주방향 고정볼트가 설치되어 있다.
- 동익 설치구조는 반경방향 및 원주방향으로 약간의 간극이 있지만 정격속도에서는 원심력에 의한 밀착으로 움직임이 없으나, 저속에서는 원심력 상실로 약간의 움직임이 있어 인접 동익과 마찰 및 충격발생으로 마모 및 피로균열 발생 가능성이 크고 고정볼트 절손시 동익이탈 가능성이 큰 구조이다.
- 동익 고정볼트는 Seat에 완전히 안착되지 않을 경우 인접 동익 Root와 간극이 있어, Root에 의해 전달되는 원주방향 부하 및 충격에 의해 굽힘응력을 받아 피로균열이 발생하기 쉬운 구조이다.

(다) Blower 동익 고정 볼트 결함 가능성

- 절손된 동익 고정 볼트 단면을 검토한 결과, 2~3차례에 걸친 피로파괴로 나타났고 수소 환경 운전조건으로 볼 때 1~3개월 전에 짧은 기간에 파단된 것으로 추정되며, 손상된 볼트 재질조사 결과도 특별한 결함을 나타내지 않아, 고정볼트 자체의 결함 가능성은 매우 적다.
- 절손된 동익 고정 볼트 단면을 검토한 결과, 균열 진행방향이 원주방향이 아닌 사선방향이나 동익 Root의 형상이 평행사변형으로서 고정볼트에 미치는 힘은 고정볼트 전후의 접촉상태 및 힘의 크기에 따라 달라질 수 있으며, 또한 볼트 균열 부위가 나사산의 골 부분으로 노치효과에 의해 균열방향이 다르게 나타날 수 있다.
- 그러나, 발전기 수소누설 정지시 수소 긴급배기 및 CO₂ 주입시 온도변화로 열팽

창 차이에 의한 열응력 가능성도 일부 있으나, 당시 내부온도 감소가 크지 않았고
과단면 형상이 피로균열을 나타내 가능성이 적다.

(3) 고압터빈 베어링 손상

- 터빈-발전기의 축전압은 터빈의 습분, 회전체와 고정체의 마찰, 베어링 윤활유의 마찰, 발전기 및 여자기의 전기적 불평형에 의해 생성된다.
터빈의 축전압은 보통 0.3V 이하로서 저압터빈 No.3와 발전기 사이의 축을 2개소에서 접지시켜 방전되도록 되어 있고, 발전기 및 여자기 축의 축전압은 20~30V 정도로 발전기 및 여자기의 베어링을 절연하여 축전류 흐름을 방지한다.
- 발전기 Blower 동익 절손 초기에는 그 수량이 적어 내부 공간에 끼어 있거나 회전체와 충돌로 미세파편 형태로 발전기 내부로 배출되나 RCP 제어카드 고장으로 발전정지 및 재기동시 다량의 이탈 또는 절손된 동익과 손상된 고정익이 배출되지 못하고 서로 접촉되어 운전됨으로서 회전자에 유기된 축전압이 손상된 고정날개 및 발전기 Frame을 통하여 방전되면서 흐른 전류가 축접지 브러시를 통하여 순환되었고, 과도한 순환전류가 지속적으로 흐르면서 브러시를 손상시키고 결국 축접지 기능이 상실되었다.
- 또한 발전기의 손상된 고정익과 회전자가 접촉되어 운전되면서 방전된 축전압은 터빈 베어링에 인가되었고, 터빈 운전중 베어링의 유막이 취약한 부위를 통하여 축전압이 방전되면서 고압터빈 베어링에 전식이 발생하여 손상되었다.
- 베어링 전식은 축 전위 및 유막상태에 따라 달라질 수 있으며 접지상태 정비 후 이차적으로 전식이 발생한 것은, 발전기 내부에서 지속적인 마찰로 축 전류가 높은 상태에서 고압터빈 베어링 일차 전식으로 유막이 감소하여 이차 전식이 발생하였다.
- 고압터빈 베어링 이차적 전식 발생 후 출력감발에 의한 축 위치변화로 고압터빈 베어링과 축과의 간극이 충분히 유지하여 전식발생이 중단되었다.
- 이후 출력운전 중 고압터빈 베어링 전식현상은 나타나지 않았지만 정비를 위한 출력감발시 정지되어 과도상태에서 전식된 베어링 표면의 최소 유막유지가 불가능하여 베어링이 용융되고 축 저어널을 손상시켰다.

라. 조치 방안

(1) 고압터빈

- 축 저어널 및 Seal 부 가공
- 고압터빈 베어링 교체
- 고압터빈 내부 Radial Seal 교체
- 고압터빈 Gland Seal 교체
- Oil Deflector 교체
- MOP Seal 및 Wearing Ring 교체

(2) 발전기

- Blower 동익 및 고정익 전량 교체 : 발전기 수소 누설정지시 유체 불안정에 의한 비정상적 부하로 잔류응력에 의한 Blade의 건전성 저하
- Blower 동익 고정볼트 전량 교체 (적정 토크 적용)
- Blower Hub 교체 : 동익 손상에 따른 Root 부위 마찰로 간극 증가 및 불균일
- 발전기 내부 이물질 점검 및 제거
- 로터 내부 이물질 점검 및 제거

(3) 향후 운전 및 정비시 주의사항

- 터빈-발전기 축 전류 주기적 감시
- 터빈-발전기 진동상태 지속적 감시
- 발전기 Blower 동익 고정볼트 건전성 주기적 점검

마. 조치 결과

‘라’항의 조치방안에 따라 조치 후 터빈-발전기 기동결과, 무부하 상태에서 #8 베어링에서 축 진동이 $131\mu\text{m}$ 로 최고치를 나타냈지만 이것은 저압터빈 구조상 측정될 상태에 따른 진동으로 검토되었으며, 발전기 베어링에서 축 진동은 각각 $76\mu\text{m}$, $73\mu\text{m}$ 로 발전기 송풍기 손상 이전과 유사한 진동을 나타내 조치가 적절히 수행되었음을 나타냈다.

터빈-발전기 진동, 베어링 온도, 로터 위치 및 터빈 차동팽창, 발전기 수소온도 및 각종 운전자료 등이 손상이전과 유사하게 나타나 정확한 원인분석과 조치로 원자력 터빈-발전기 안정운전을 기하였다.

3. 결 론

원자력 터빈-발전기 정격출력 운전 중 고압터빈 베어링의 Gap Volt가 증가하였고, 고압터빈 베어링 전식 및 배빗 용융이 발생하였으며, 발전기 수소 순환용 송풍기 5, 6단 동익 및 고정익이 절손되어 이에 대한 정확한 원인분석 및 대책수립으로 조기에 원자력 터빈-발전기를 정상화하고자 하였다.

발전기 송풍기 동익 절손 및 이탈시키는 발전기 수소누설로 인한 긴급 발전정지시 최초로 2~3개의 동익이 절손 혹은 이탈되어 이후 계속되는 발전정지 및 기동과 같은 과도상태에서 추가로 절손 혹은 이탈되었다.

발전기 송풍기 동익 절손 및 이탈 원인은 발전기 수소누설에 의한 수동정지 시 긴급 조치로 수소 긴급배기 및 CO₂ 주입을 실시하였으나, 유체 불안정에 의한 Surge 또는 Stall 현상 발생으로 동익에 역방향 부하가 발생하여 균열되었거나 절단되었으며, 이때 동익에 미치는 과도한 교번하중이 원주방향의 고정볼트에 전달되어 구조적으로 취약한 고정볼트 나사골부위에서 절손되고 과도상태에서 동익이 이탈된 것으로 검토되었다.

이후 발전정지에 따른 기동 및 정지시 추가로 동익이탈 및 절손, 고정익 손상이

진행되었으며, 손상부품이 다량 내부공간에 잔존하면서 나머지 동익 및 고정익을 손상시키는 이차적인 손상이 발생하였고, 손상된 고정날개가 발전기 회전자(동익 Hub)와 접촉되어 축 전류가 증가하고 고압터빈 베어링에 인가되어, 베어링의 유막이 취약한 부위를 통하여 방전되면서 베어링 전식이 발생되었다.

조치 후 터빈-발전기 기동결과, 무부하 상태에서 #8 베어링에서 축 진동이 $131\mu\text{m}$ 로 최고치를 나타냈으며, 발전기 베어링에서 축 진동은 각각 $76\mu\text{m}$, $73\mu\text{m}$ 로 발전기 송풍기 손상 이전과 유사한 진동을 나타냈다.

터빈-발전기 진동, 베어링 온도, 로타 위치 및 터빈 차동팽창, 발전기 수소온도 및 각종 운전자료 등이 손상이전과 유사하게 나타나 정확한 원인분석과 조치로 원자력 터빈-발전기 안정운영에 기여하게 되었다.