

수차발전기 회전자 Coil 이탈 원인분석 및 방지대책

김승호 · 문형태
한국수자원공사

The preventive measure and the cause analysis for field coils breaking away from the rotor in hydro generator

Kim Seung Hyo · Moon Hyung Tae
Korea Water Resources Corporation(KOWACO)

Abstract - This paper presents the preventive measure and the cause for field coils breaking away from the rotor, which lately occurred when No.1 hydro generator was operating in Chung-Ju Dam No.2 Hydro Power Station. In findings, we ascertained the truth of contact between rotor rim and field coils, and think that field coils will break away from the rotor because of mechanical stress according as continuous operation after completion, 1985. Therefore, we conclude that the preventive measure for such a phenomenon is that stopper should be installed between rotor rim and field coils, and bolts should be tightened because of operating characteristic however there are not the design standards for installing stopper in generator rotor internationally.

- 정격전류:612A -역률:86%
- 회전수:180RPM -효율:96%
- 극수:42POLE
- pole core length:970mm
- pole core width:100mm
- pole coil width:40mm
- total pole coil height:120mm
- Brushless 여자기:
- AC여자기(144V, 394A)
- 회전정류기(185V, 458A)
- 설치년월일:'86.10

2.2.2 기기 운전사항

- 준공이후 고장전까지 발전기의 운전이력은 다음과 같다.
- 가동시간:36,124시간 35분
- 기동정지회수:6,764회
- 운전중 이상내용:없음

1. 서 론

1998년 11월 23일 15:30분경 충주 조정지댐 제2발전소 1호 수차발전기의 정상 발전중(출력: 6000Kw) 비상 정지 사고가 발생하여 그 원인을 조사한 결과 계자권선이 이완되어 회전자 테두리와 계자권선이 접촉상태인 것으로 확인되었다. 충주댐 제2발전

소는 조정지댐으로서 댐하류에 24시간 연속적으로 발전하여 일정량의 물을 방류하게 되어 있어, 이와 같은 사고 발생시 사고발생으로부터 복구까지 소요기간이 100일로 이 기간동안 무효방류와 복구비용을 고려해 볼 때 예기치 않았던 사고로 인한 발전정지의 손실은 국가적으로 큰 손실이 아닐 수 없고 또한 이러한 현상이 타 발전소 발전기에서도 진행될 수 있을 것으로 예상되어 예방차원의 정밀진단 계획 및 대책이 요구된다. 따라서 발전기의 연속적 운전에도 계자권선의 이탈을 원천적으로 봉쇄할 수 있는 방안과 사고복구 절차를 제시하여 타 발전소에서도 활용 가능토록 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 현상 및 원인파악

발전기가 정상운전(발전기출력: 6000Kw)중 86-1(전기적 고장) Fault 발생으로 비상 정지되었으며, 육안점검 결과 회전계자 Coil #31, 32, 34, 36이 원위치에서 Rim측으로 이탈되어 접지사고가 일어난 것으로 판단된다.

2.2 운영관리 현황

2.2.1 설비 재원

- 형식: 횡축 회전계자 교류 동기발전기
- 정격용량: 7MVA -정격전압: 6.6KV

2.2.3 정기점검 및 진단실시

- 수차발전기의 정기점검 및 절연진단은 다음과 같이 실시하고 있다.
- 주간점검: 발전기 진동, 이음, 이취 및 기내 배선상태 등 확인
- 월간점검: 회전여자기 및 정류기 등 상태확인
- 분기점검: 회전자 및 고정자 절연저항측정등
- 대점검: 대점검은 2년 주기로 실시하되 고정자는 철심의 손상, 코일단 절연물의 손상 및 변형, Wedges의 이완 및 손상 등을 점검하고, 회전자는 절연물의 균열 및 변형, 극간 연결부 이완 및 과열흔적, 회전자 리이드와 계자권선의 접촉부변색, 과열, 이완여부 등을 점검한다.
- 분해점검: 분해점검은 10년 주기로 실시하되 설비의 상태에 따라 주기를 단축 시행하고, 고정자 및 회전자의 전반적인 점검이 이루어지고 있으며, 철심, Coil 및 Wedge 등의 상태에 따라 부분적인 보수를 실시한다.
- 절연진단: 5년 주기로 실시하고 진단항목은 다음과 같다.
 - 고정자권선-절연저항, 권선저항, 직류누설전류, 교류전류, Tan δ, 부분방전시험
 - 회전자권선-절연저항, 직류전류, 권선저항, 분배전압시험

2.3 사고원인 분석

2.3.1 발전기의 절연열화

발전기 권선의 열화를 원인별로 세분하면 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 요인으로 나눌 수 있다.

가. 열적열화

발전기 운전중 도체의 주열열과 고정자코아의 와전류에 의한 열의 발생으로 절연 재료의 변질, 변형, 보이드 생성 및 박리가 일어나고 또한 부분방전 발생에 의한 침식과 기계강도의 저하, 흡습등과 같은 외부의 영향을 받게 된다.

나. 전기적열화

절연층내에 큰 보이드나 박리등이 존재하면 대지간 전압에 이들 보이드나 박리에서 부분방전이 발생하고 절연층은 부분방전에 의하여 침식된다. 부분방전에 의한 침식은 유기 절연재료에서 시작하여 보이드의 확대 또는 교락이 일어나 다음의 큰 방전으로 이행하여 간다. 그 결과 마이카나 유리섬유의 무기재료까지 침식이 발전하여 절연파괴에 이른다. 일반적으로 부분방전에 의한 절연체의 침식은 전계가 집중되기 쉬운 도체근방에서 발생하여 결국 절연파괴에 이른다. 권선의 운전중에 받는 전압 스트레스는 대지간 정격전압 이외에 이상전압인 개폐서어지, 뇌서어지 등이며 이들이 반복 침입하므로써 절연체에 트리등과 같은 충격성 절연열화가 발생하고 이것에 의한 충전절연의 절연내력 저하가 문제로 된다.

다. 기계적열화

발전기의 기계적 스트레스는 기동·정지시의 충격, 운전중의 열응력 및 전자진동이 있다. 급격한 부하변동이나 기동·정지시의 히트사이클에 의한 열화는 절연층 중에서 열응력이 반복적으로 걸리는 층에 균열, 박리나 보이드가 생성되는데 이러한 현상은 권선의 끝단부분에 집중적으로 발생하는 경향이 있어 눈으로 그 징후를 발견할 수 있다. 운전중의 전자진동에 의하여 절연층의 박리나 균열등이 발생하며, 권선의 고정인 느슨한 곳에서 권선의 진동에 의해 철심간에 마모 열화가 일어난다. 그 결과 전기적열화인 부분방전에 의한 진전으로 절연체의 손상이 일어나 절연파괴에 이른다. 또한 권선의 끝단부분에 있어서의 손상은 흡습, 오손등에 의해 열화가 촉진되어 절연저항의 저하나 절연파괴의 원인이 된다.

라. 환경적열화

환경적인 열화의 대표적인 것은 기름, 진애, 오존, 습기 등이 있다. 기름에 의한 열화는 절연재료의 팽윤에 의한 박리나 용해현상이 나타난다. 절연물 표면에 기름이 있으면 진애가 쉽게 부착되어 연면의 절연저항이 저하되고 2차적인 열화로 진전되는 경우가 있는데, 진애에 의한 오손은 Carbon, 철분등과 같은 도전성 물질 부착의 경우 절연저항을 극단적으로 저하시켜 진애 자체가 도전성이 없는 물질의 경우라도 흡습에 의해서 절연저항이 저하된다. 침수나 결로등에 의한 흡수는 절연파괴의 직접적 원인이 되지만 고습도 또는 장마기간중 발전기의 장기간 정지중에 흡습하는 것에 의해서도 절연내력을 저하한다. 또한 흡습상태 그대로 운전하면 흡습열에 의해 가수분해를 촉진하나 이것은 재 건조나 청소에 의해 어느 정도의 기능회복이 가능하다. 일반적으로 환경적 열화는 수력발전기에서 많은 영향을 받는다.

2.3.2 정밀점검 및 사고분석

가. 사고전 절연진단시험 결과
현재 운영중인 충주 조정지댐 제2발전소 1,2호 발전기에 대해 절연의 열화정도를 정밀진단하여 종합분석을 통한 발전기 안전상태, 개보수 필요여부 및 잔류수명을 평가 판정하고자 '98.10.12~15(4일간)까지 정기 절연진단시험을 실시하였다.
그 결과는 표 2-1, 2-2와 같다.

표 2-1 고전자권선 절연진단시험 결과

진단시험	측정항목	기준	측정치	결과
절연저항	절연저항	76MΩ이상	173	양호
직류전류	PI	2.0이상	1.87	주의
권선저항	권선저항	편차5% 이내	이하	양호
교류전류	ΔI	8.5%이하	0	양호

진단시험	측정항목	기준	측정치	결과
교류전류	Pi2 제2 변곡점	E이하에서 변화 없을것	없음	양호
Tan δ	Tan δ ₀ (2kV)	10%이하	1.50	양호
	ΔTan δ + ΔC/C ₀ (E)	12%이하	0.23	양호
부분방전	부분방전량 (E ₀)	10,000 pC 미만	6,000	양호
평가				양호

※ 직류시험결과 PI값이 기준을 만족시키지는 못하나 CT특성, 주위조건(습도 등)을 무시할 수 없으며 측정중 직류누설전류 파형의 특이한 변화가 발견되지 않음.
{판정기준}

- ▶ 절연저항: IEEE Std 43(40°C)
 - 최소기준치: 7.6MΩ(kV+1)(MΩ, 40°C)
 - 최소기준치 이하: 불량
 - 최소기준치의 10배 초과: 양호
- ▶ 권선저항: IEEE Std 62-1995준용
 - 이전 시험치의 변화 5% 이내: 양호
 - 각 상권선 편차 5% 이내: 양호
- ▶ 직류누설전류: IEEE Std 43(6.6kV이상)
 - PI(성극지수): 2.0 이상 양호
- ▶ 교류전류: 전류증가를 ΔI가 8.5% 이하를 나타내고
 - 제1변곡점: E/√3보다 높은 전압에서 발생하면 양호
 - 제2전류급증점: 정격전압(E) 이하에서 발생하면 불량
- ▶ Tan δ: Tan δ는 정격전압에서 6.5%이하, ΔTan δ + ΔC/C₀는 12% 이하일 경우 양호
- ▶ 부분방전(E₀): 6.6kV 고압회전기에 대한 제안치는 4.5kV에서 10,000pC 미만이면 양호

표 2-2 회전자권선 절연진단시험 결과

진단시험	측정항목	기준	측정치	결과
절연저항	절연저항	10MΩ이상	0.75	불량
직류전류	PI	-	1.04	참고
권선저항	권선저항	-	286 mΩ	참고
분배전압	Pole간 전압	편차±5% 이내	9.94 %max	불량
평가				주의

□ 시험결과 분석 및 평가

발전기 고정자권선은 이상이 없으며, 회전자는 회전자와 대지간 절연저항이 최소기준치(1.11MΩ) 이하인 0.75MΩ 이하로 측정되었고 회전자를 이등분하여 절연저항을 측정 한 결과 각각 1.62, 1.67MΩ을 나타내었고, 분배전압시험 결과 5개의 Pole에서 Pole간 편차 한계인 5%를 넘어 9%로 나타나고 있는 등 회전자 전체 절연에 이상이 있는 것으로 판단되었다. 따라서 회전자의 수차측에 발견된 카본 분진을 제거하는 등의 조치를 취한 후 발전기가 가동 되도록 요구되었다.

나. 정밀점검 결과

직류전압이 가해지는 회전자 권선에서는 절연열화 현상이 거의 나타나지 않으며, 또한 정상적인 회전자 권선의 전압은 일반적으로 매우 낮아서 기능이 저하된 절연체라도 열화가 진행되지 않으나 다음과 같은 전기적, 기계적 요

인에 의하여 절연파괴 현상이 발생할 수 있다.

① 권선표면의 흡습 및 오염 : 운전중인 발전기는 베어링에서 새어나온 오일과 구리분진 등이 혼합되어 응결되면 표면층에 의해 회전자 절연이 파괴될 수 있다. 이것은 도체표면의 흔적(Tracking)으로 인해 Turn간 단락이나 지락을 일으킨다.

② 원심력 : 회전자 권선의 절연물, 지지물 그리고 연결 부등에 가해지는 방사상의 원심력은 정상운전 속도에서 연속적으로 큰 응력을 가하게 된다. 이 힘들의 영향은 권선의 지지물, 사용된 재질의 특성 그리고 기동정지의 빈도와 밀접한 관계가 있다. 이것에 의한 영향으로 권선은 이완되고 상대운동에 의해 절연물은 마모되어 Turn간 단락 및 지락이 발생된다.

이상과 같은 사항을 점검하기 위해 회전자에 대한 정밀 육안검사가 고정자에서 회전자를 인출한 후 실시되었다. 정밀점검 결과는 회전자의 Pole Coil #31, 32, 34, 36이 원위치에서 Rim측으로 이탈되었고, 고정자는 권선의 변형 및 과열유무, 부분방전에 의한 절연물 표면의 손상유무, 권선 End부의 고정상태, Vibration Sparking 발생유무, Yellow Powder 발생, 철심의 손상, 고정상태 및 변색유무 점검결과는 이상이 없었으나 Wedge Stopper용 Grass Cord의 균열 및 장시간 운전으로 인한 모체(Coil 직선부)의 이완된 곳(30여개소)이 발견되었고 Stator Wedge Test 결과 장시간 운전으로 인하여 마모가 이루어지고 있었다.

다. 사고추정

1) 전기적 사고의 추정

-전압에 의한 고장:Coil과 대지간의 절연파괴로 절연저항의 저하 및 Turn간의 절연파괴에 의한 국부적 탄화에 의해 접지로 나타나고, Turn Short 단면이 클 경우 Short된 1 Turn이 완전한화 소손된다. 또한 Switching에 의한 경우, Surge전압은 투입과 차단 두 종류로써 투입 Surge 보다 차단 Surge의 값이 크고 발전기의 기동 및 정지의 특성으로 보아 투입에 의한 Surge의 유입은 생각할 수 없으며 만약 차단 Surge가 유입되었을 경우에도 Surge의 특성상 수신편의 1초로 Coil이 가진 임피던스로 인해 최초의 전압이 인가되는 Pole Coil로부터 손상을 받게되고 결과는 Coil Turn간의 Short로 인해 전류증가로 나타난다.

-전류에 의한 고장:정전압 운전중 Rotor의 기계적 구속, 발전기 용량을 초과한 부하등을 추정할 수 있으나 그 결과는 Stator, Rotor의 전면적 충격에 의한 전면열화 및 전면적 Coil의 변형 등으로 확인가능하다.

2) 기계적 사고의 추정

대부분 육안검사에 의한 추정이 가능하고 대별하면 베어링의 마모, Rotor, Stator, Frame 등의 장시간 운전에서 오는 기계적, 열적, 전기적 진동에 의한 Stress로 부품이 이탈되어 내부회전으로 인한 절연체, Coil 등을 손상시킨다.

라. 분석결과

회전자는 장시간 운전으로 Stress(열수축,고유진동, 상하위치 변동)에 의한 Bonding 강도의 지속적인 감소로 Pole Coil의 중량을 유지할 수 있는 한계점을 잃고 상하 교반작용에 의해 Rim측으로 이동되어 진 것으로 판단된다.

고정자 Wedge Stopper의 움직임 현상은 Stopper에 합침된 바니쉬의 운전에 의한 열화와 운전중 진동에 의한 움직임이 접착력에 작용되었기 때문으로, 이는 End Coil의 진동을 예측할 수 있는 정후로 판단된다.

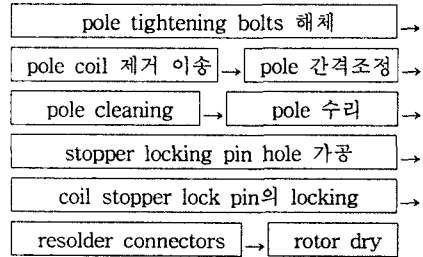
2.4 대책수립 및 사고복구

2.4.1 대책수립

회전자는 Rim과 Pole Coils 사이의 공간에 Stopper를 고강력본드(Rubber Cushion)로 Pole Coil 하부에 설

치하고 Pole Core Tightening Bolt로 조여 Pole Coil의 이탈을 방지하고, 고정자는 대체적으로 양호한 상태이나 장기적인 수명을 보장받을 수 있도록 Overhaul시 주기적으로 고정자 내부의 오염된 기름과 기타 오염물을 청소, 건조시키고 바니쉬등의 보완작업을 실시한다.

2.4.2 복구절차



2.4.3 복구후 진단시험 결과

표 2-3 회전자 절연진단시험 결과(복구후)

진단시험	측정항목	기준	측정치	결과
절연저항	절연저항	10MΩ이상	1.170	양호
직류전류	PI	2.0이상	3.75	참고
분배전압	pole간 전압	편차±5% 이내	-3.91 %max	양호
절연내력	(2E+1)×1.7×0.6[kV]에서 1분간	이상없을 것		양호
평가				양호

3. 결 론

수차발전기 회전자 Coil의 이탈은 기계적인 현상으로 장시간 운전에 따른 Stress에 의한 Bonding 강도의 지속적인 감소로 Pole Coil의 중량을 유지할 수 있는 한계점을 잃고 상하 교반작용에 의해 Rim측으로 이동되어 진 것으로 결론을 얻었으며, 방지대책으로 Pole Coil Stopper 설치에 대한 국제기준은 없고 제작사(Fuji) 설계기준에 의하면,

- ① pole core length:1500mm 미만
- ② pole core width:400mm 미만
- ③ pole coil width(depth):80mm 미만
- ④ total pole coil height:150mm 미만

의 조건에서는 Stopper를 설치하지 않는 것으로 되어 있어, 중주 수차발전기는 기준에 의하여 Stopper를 설치하지 않았으나 발전기의 연속적인 가동 특성때문에 Stopper를 설치하여 Pole Coils의 이탈을 방지하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] E.KUFFEL & W.S. ZAENGL, "HIGH VOLTAGE ENGINEERING", 1983.
- [2] 일본전기학회, "전기설비의 진단기술", 1988.
- [3] Y.WADA의 1인, "기술 수력발전설비의 예방보전", 日立評論 Vol 70, No.8, 1988. 8.
- [4] IEC-60"High Voltage Test Techniques"
- [5] 류희석외, "안동댐 발전설비 절연열화 판정 시험연구" 한국전기연구소, 1990.12.