

수력발전기 고정자권선의 단말부 절연파괴와 절연특성시험과의 관련성 분석

이동근, 이광호, 최교남, 김현일, 오봉근
한국수자원공사

Analysis of Correlation Endwinding Breakdown and Insulation Test for Stator winding of Hydro-Generator

D. K. Lee, K. H. Lee, K. N. Choi, H. L. Kim, B.K. Oh
Kowaco

Abstract - The test were performed to analyze the cause of endwinding breakdown of hydro-generator which had been in service after being constructed 1971. we conducted insulation diagnostic tests and checked visual inspection and operating condition of protective relays. On the basis of these test results, this paper tried to present the importance of service environment for the generator stator winding.

표1. 진단대상 수력발전기 주요사항

구 분	사 양
정격출력[MW]	7
정격전압[kV]	3.45
정격전류[A]	1,233
회전수[rpm]	189.5
역률[lag]	0.95
상업운전[year]/절연보강	1971/1996

1. 서 론

현재 산업현장에서는 수력발전기 및 전동기 등의 고전압 회전기에 대한 고정자권선의 절연상태를 진단하기 위하여 발전정지를 수반하는 절연특성시험인 정지중 시험(Off-line test)과 운전중에 발생하는 부분방전을 측정하여 절연상태추이(trend)를 분석하는 운전중시험(On-line test)이 활발히 수행되고 있으며, 이러한 시험을 통하여 측정된 데이터를 바탕으로 설비의 절연상태를 분석·평가함으로써, 적절한 상태기준유지보수(Condition Based Maintenance)가 가능하며, 경제적인 유지보수와 설비의 수명연장 및 돌발사고 예방등 운영의 신뢰성 확보에 기여할 수 있게 되었다. 또한, 수력발전기 사고 원인을 분석해보면, 고정자 권선의 절연열화가 주 사고 원인으로 보고되고 있어[1], 이러한 과학적 절연진단으로 발전기 분해점검(Overhaul)시에 고정자권선에 대한 절연보강 및 절연세척 등의 보수계획을 수립하여, 절연 열화원인을 최소화하는 것은 매우 중요하다. 하지만, 상기한 시험방법으로도 현재까지 절연물의 열화정도를 판단하는 판정기준은 제시되어 있지 못하고 있으며, 현장 여건상 권선단말부의 절연열화특성을 측정하기에는 다소 어려운 점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 30년 이상 장기간 운전중 권선 단말부의 절연파괴사고가 발생한 수력발전기에 대하여 고장원인을 알아보고, 고장전 및 고장권선 제거후 실시한 off-line 절연특성 진단데이터를 비교하여 절연파괴사고와의 관련성을 분석하여 보았다.

그리고, 이상징후 없이 정상운전 중 그림1과 같이 고정자권선 단말부의 상간에서 절연파괴사고(2004년)가 발생하였다.

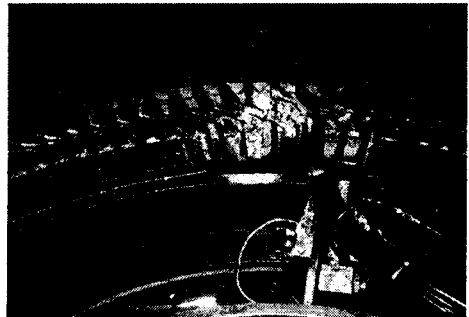


그림 1. 발전기 절연파괴사고 사진

2.2 시험방법

고장전후 실시한 절연특성값에서 고장원인을 알아보고자, 고장권선 제거후 Off-Line 정밀절연특성시험을 그림2와 같이 발전기 고정자 권선의 단로기, GPT, PT 및 중성점을 분리한 후 고정자 권선을 3상 일괄로 DC 및 AC전압을 인가하여 정밀절연진단을 실시하였다

2. 진단설비 특성 및 시험방법

2.1 진단설비 특성

절연진단시험 대상은 3.45kV급 수력발전기로서 세부 사양은 표1과 같다. 1) 진단대상 발전기는 절연보강(1996년) 및 절연특성시험(2001년)을 각각 1회 실시하였다. 절연보강 후 고정자권선에 대한 유지보수 이력은 없었으며, 절연특성시험결과 절연특성은 양호(표2참조)하였다.



그림 2. 발전기 절연특성시험 사진

5kV Digital Insulation Tester에 의한 절연저항 (Megger) 및 성극지수(P:I)시험을 실시하였고, 20kV, 20A(400kVA)공진형 교류고전압 발생장치를 이용한 교류전류시험(ΔI), Schering Bridge에 의한 유전정접($\tan\delta$)시험, 부분방전검출기(PD Detector) 및 Coupling Capacitor(10nF)를 이용하여 부분방전 시험(Qmax)을 실시하였다. ^(2,3)

3. 절연특성시험

고장발생 후 고장권선을 제거하고, 표 2와 같이 총 3차에 걸쳐서 절연특성시험을 실시하였으며, 준공 및 고장 전 실시한 절연특성값과 비교하였다..

표 2 절연특성시험 결과

시험 항목	절연 특성값	인가 전압	판정 기준	준공	2001	2004		
						1차	2차	3차
직류 전류	R(M Ω)	1kV _{DC}	>100	1,000	242	357	1,023	990
	P·I		>2.0	5.71	7.06	1.47	5.18	4.22
교류 전류	ΔI	E	<4.0	-	1.19	0	0	0
	P _{II}		-	-	-	-	-	
유전 정접	$\tan\delta_0$	1kV	<5.0	-	0.770	2.19	1.97	1.39
	$\Delta\tan\delta_1$	E	<3.5	-	0.28	-0.5	-0.4	0.16
부분 방전	Qmax(μC)	E	<5,000	-	3,500	3,600	1,200	4,300

*1차:고장권선제거 후, 2차:보수 중, 3차:보수완료 후

3.1 절연저항시험결과

절연저항시험은 주위환경에 영향을 많이 받기 때문에 절대값만으로 절연상태를 평가하기는 곤란하지만, 최소 절연저항값이 100M Ω 이상이면, 양호한 값으로 판정하고 있으며, ⁽⁴⁾ 측정값은 모두 양호한 값을 나타내고 있다.

3.2 성극지수시험결과

성극지수시험은 직류전류의 시간변화특성을 분석하기 위한 시험으로 절연체의 흡수이나 오손 등의 열화상태를 알 수 있으며, 2.0이상이면 양호한 상태로 판정하며, ⁽⁴⁾ 측정값은 1차 보수후의 측정값을 제외하고, 모두 양호한 값을 나타내었다

3.3 교류전류시험결과

시험전압을 단계적으로 상승시 절연체 내부에서 부분방전현상이 발생하면, 전류는 전압에 비례하지 않고 급증하게 되며, 이 전류증가율(ΔI)로 절연상태를 평가하는데, 측정값은 2001년도 측정값보다 양호한 값으로 나타났다. ^(5,6)

3.4 유전정접시험결과

유전손실은 $\tan\delta$ 에 비례하고, 절연체의 형상 및 크기와 무관한 절연물의 고유한 특성값으로 절연체의 열화정도를 표시하는데, ⁽⁷⁾ 시험결과 모두 양호한 결과를 보여주고 있다. ^(2,3)

3.5 부분방전시험

측정된 최대부분방전량(Q_{max})의 패턴 및 크기에 따라 절연체의 결함위치를 추정할 수 있으며, 현재 사용중인 진단법 중에서 가장 신뢰도가 높은 시험항목으로, 측정값은 큰 변화가 없는 양호한 상태로 나타났다. ^(8,9)

4. 사고원인분석

발전기 고정자 권선의 절연과파사고에 대해 ①발전기

분해 인출 후 육안검사 ②소손권선의 소손상태 분석 ③ 3차에 걸친 절연진단시험 ④사고발생시의 보호계전기의 동작상태를 종합적으로 분석하여 보았다.

4.1 육안검사

발전기 분해 인출후 고정자권선에 대한 육안점검결과 그림3과 같이 슬롯내부 및 단말권선 표면, 그리고 철심에서 발전기 회전부 윤활유등의 누유로 매우 심하게 오일이 흡착되어 있음을 알 수 있었다.

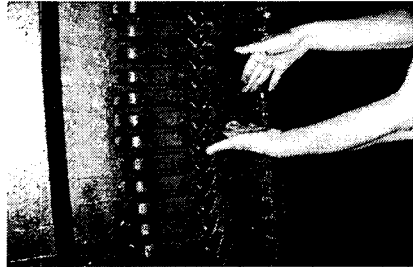


그림 3. 고장 후 권선표면상태

4.2 소손권선의 소손상태 분석

고정자권선의 소손부위(그림4의 ①)는 고정자 상부 권선의 단말부분으로 권선의 진동을 방지하기 위하여 인접 권선과 Binding된 부분(그림4의 ②와같이)으로 확인되었다.

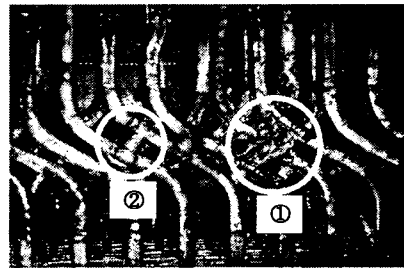


그림 4 고정자권선 고장부 확대사진

4.3 보호계전기의 동작상태 분석

고장중 변압기 1차측(6.6/3.45kV) 보호계전기에 기록된 동작특성을 그림5에 나타내었다. 측정결과를 분석해 보면, R-S상이 동상이고, 크기가 같으며, T상은 R-S상과 위상은 180도 이고 크기가 2배인 파형을 나타내었다. 이것을 변압기 2차측(발전기측)으로 환산하여 벡터도를 그리면, 그림6과 같이 사고 직후 고장전류는 R상과 T상에만 흐르고 그 위상차가 180°의 관계에 있는 전형적인 상간 단락현상으로 나타났다..

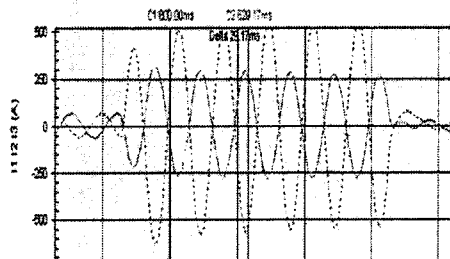


그림 9 고장시 보호계전기 동작특성(변압기 1차측)

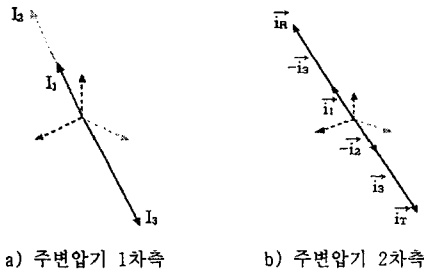


그림 6 고장시 변압기 1,2차측 벡터도

4.4 절연진단시험결과 분석

고장전(2001년도) 실시한 절연특성시험에서 절연 특성값은 모두 양호하게 나타났으며, 보수후 실시한 시험과의 특성값(표2 참조)과 비교해도 거의 유사하게 나타나 진단시험에 의한 결과는 절연상태가 모두 양호한 상태로 나타났다.

4.5 사고원인분석

4.1~3에서 분석한 결과를 바탕으로 고장원인을 분석해 보면, 고정자권선 단말부의 진동을 방지하기 위해 인접 권선간에 지지되어 있는 Binding부에서 상호연결된 권선간 절연물의 열화(aging)로 도전로가 형성되어, 그 결과 절연파괴에 의한 상간단락으로 고장이 발생한 것으로 판단된다. 절연물의 열화원인은 발전기가 횡축 원통형의 구조로 수차-발전기가 수중에 위치하여, 발전기 운전정지에 따른 발전기실 내부의 온도변화로 습도가 높은 상태에서 회전체인 수차 Runner Vane 등의 작동유·윤활유가 누유등으로 운전중 비산되어, 공기중의 높은 습도에 의한 수분을 함유한 상태로 발전기 권선에 오랜 기간 수분을 함유한 오일이 흡착됨으로써, 결국에는 발전기의 절연열화를 가속시켜 절연내력이 저하된 것으로 추정된다.

4.4에서 분석한 고장전(2001년) 실시한 절연진단시험에 의한 결과 절연상태가 양호한 것으로 나타났지만, 고장시점과는 다소 기간이 있었고, 고장부위가 상간절연파괴에 의한 것으로, 이러한 상간절연을 측정하기 위해서는 발전기 중성점의 상간분리가 가능하여야 하나, 발전기 구조상 중성점 분리가 불가능하여 상간의 절연특성값을 측정할 수 없는 시험상 어려움이 있었다. 따라서, 권선 단말부에 절연열화가 진행되어도, 그림 8과 같이 상기에서 실시한 절연진단방법(중성점미분리)으로는 권선의 단말부가 직접적으로 접지극과 연결되어 있지 않을 경우에도 발생할 수 있다.

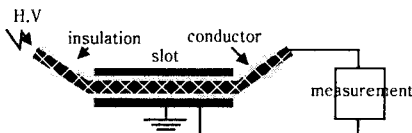


그림 8 고정자권선

4. 결 론

장기간 운전중 고정자권선의 상간절연파괴가 발생한 수력발전기에 대하여 고장원인 분석 및 고장전 및 고장권선 제거후 절연특성값의 변화를 알아보고자 실시한 절연특성시험을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시험대상발전기의 고장원인을 종합적으로 분석한 결과 밀폐된 발전기실 내에서 수분을 함유한 오일이 고정자권선에 장시간 흡착됨으로써 권선의 절연물에 점착적인 열화가 진행되어, 절연내력이 약한 부위에서 절연파괴가 발생한 것으로 판단된다.

2) 고장전 및 고장권선 제거후 실시한 절연특성시험을 비교 분석한 결과, 직류 및 교류시험에 의한 절연특성시험에서는 고장발생원인을 찾아 볼 수 없었다, 또한 현장여건등으로 중성점 분리가 불가능하여 상간에 대한 고정자권선의 절연특성값을 측정 할 수 없어, 금번 고장원인인 상간절연파괴와의 관련성을 찾을 수 없었다.

3) 따라서, 4.5절에서 설명한 것과 같이, 발전기의 운전환경은 권선의 열화에 영향을 주는 매우 중요한 요소이며, 절연특성시험결과가 현장여건에 따라 절연물 전체에 대한 절연특성을 나타내지 않을 수도 있으므로, 절연특성값에 대한 절대적인 의존성을 피하고, 운전환경을 고려하여 고정자권선에 대한 주기적인 육안점검으로, 열화요인발생시 열화를 최소화 할 수 있도록 대책을 강구하는 것이 돌발사고 예방 및 고정자권선의 절연수명 연장에 매우 중요한 요소로 판단되었다.

[참고문헌]

- [1] 한국수자원공사, "수력발전소 제2호 발전기 공장시험시험서적", 1980.
- [2] Y. Ikeda, "大容量 水車發電機의 絶縁診断技術의 現況 및 問題點", 電力中央研究所報告, W87013, 1987.
- [3] Y. Ikeda and H. Fukagawa, "A Method for Diagnosing the Insulation Deterioration in Mica-Resin Insulated Stator Windings of Generator", 電力中央研究所報告, W88046, 1988. 6.
- [4] IEEE Std 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power Engineering Society, 2000.3
- [5] IEEE Std 56-1977, "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating Current Rotating Machinery(10,000kVA and Large)", IEEE Power Engineering Society, 7~p23, 1997
- [6] IEEE Std 432-1992, "IEEE Recommended for Insulation Maintenance for Rotating Electric Machinery(5 hp to less than 10000 hp)", IEEE Power Engineering Society, 1992
- [7] IEEE Std 286-1975, "IEEE Recommended Practice for Measurement of Power-Factor Tip-Up of Rotating Machinery Stator Coil Insulation", Power Engineering Society, 1975. 7
- [8] F.H.Kreuger, "Partial discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths &Co Ltd 1989
- [9] IEC 270, "Partial discharge measurements", Second edition, 1981
- [10] 池田 易行, 金神 雄樹, "水車發電機 Coil의 劣化豫知와 壽命豫測의 調査研究", 電力中央研究所報告, W95517, 1996. 4.