

대용량 수차발전기의 절연진단에 의한 절연상태평가

이 광 호*, 박종진*, 김 기 원**, 이 은 웅***
 한국수자원공사 수자원연구소*, 총주댐**, 충남대학교***

Assessment of Insulation Condition for Hydro-generator

Kwang-Ho.Lee*, Jong-Jin.Bak*, Ki-Won.Kim**, Eun-Woong.Lee***
 Korea Water Resources Corporation*, Chungnam National University***

Abstract - This test was performed to assess the insulation deterioration condition of the stator winding of Chung-Ju hydrogenerator #4 and Dae-Cheong hydrogenerator #2 which had been in service after being constructed 1980. The insulation diagnostic tests include resistance, polarization index(P.I), AC current, dissipation factor(Tan δ) and partial discharges(Q_{max}). The results of diagnostic tests were compared to factory test measurements.

시험방법은 발전기 고정자 권선의 단로기, GPT, PT 및 중성점을 분리한 후 고정자 권선을 3상 일괄로 DC 및 AC전압을 인가하여 정밀절연진단을 실시하였으며, Resistance Ohmmeter에 의한 권선저항(mΩ)시험, 5kV Digital Insulation Tester에 의한 절연저항(Megger) 및 성극지수(P·I)시험을 하였고, 그림1과 같이 20kV(400kVA) Resonating형 교류고전압 발생 장치에 의한 교류전류(AC Current)시험, Schering Bridge 및 Standard Capacitor(1000pF)에 의한 유전정접(tan δ)시험, PD Detector 및 Coupling Capacitor(10nF)에 의한 부분방전시험((P·D)을 실시하였다.

1. 서 론

다목적댐에 설치된 대용량 수차발전기는 주파수조정, 피크 부하분담 등 전력계통에서의 역할을 한다. 발전기의 안정적 운전을 위해서는 주기적인 절연진단에 의한 기본적인 절연상태 유지평가가 실시가 요구된다.

특히 발전기 고정자권선의 전기적 절연진단을 통해 절연열화의 상태를 파악하고 그 결과 추이를 분석하여 효율적인 유지보수계획 수립에 만전을 기하여야 한다. 이미 선진국에서는 절연저항(MΩ), 성극지수(P·I), 권선저항(mΩ), 교류전류(ΔI), 유전정접(tan δ), 부분방전시험(Q_{max}) 등의 6개 점검항목을 선정하여 주기적으로 변화추이를 진단함으로 절연열화 정도를 판정한다.¹⁾²⁾ 절연상태평가 기법으로는 절연열화 판정기준값과 비교하는 법, 방전파라미터를 이용한 D-Map법, 운전이력을 이용한 NY-Map법이 있으며, 이 판정기법으로 절연상태와 권선의 열화정도를 평가·분석하여 발전설비의 분해점검, 대점검, 절연보강, 절연Cleaning 등의 보수계획을 수립한다.

본 논문에서는 80년대 초에 건설되어 운영중인 국내 수력발전소 중 최대규모인 총주수력 제4호기 및 대청수력 제2호 발전기 고정자 권선에 대한 off-line진단시험을 통해 취득한 결과를 근거로 초기값인 발전기 출고시의 공장시험값과 비교분석하여 절연특성을 고찰하였다.

2. 절연진단 시험과 분석

2.1 진단대상 및 시험방법

절연진단시험 대상 발전기는 총주수력 4호기 및 대청수력 제2호기 발전기로서 설비사양은 표1과 같다.³⁾⁴⁾

표 1. 진단대상 발전설비 사양

구 분	총주수력 4호기	대청수력 2호기
정격용량(MVA)	117	50
정격전압(kV)	13.8	13.2
정격전류(A)	4,920	2,187
회전수[rpm]	128.5	150
역률[lag]	0.85	0.9
상업운전(year)	1985	1980

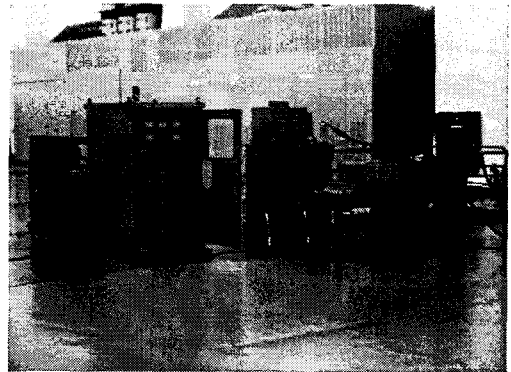


그림 1. 절연진단시험

2.2 시험결과 및 분석

(1) 권선저항시험 : 총주4호기 및 대청2호기 권선의 층간단락 및 단선상태를 검출하고 권선이 병렬로 되어 있는 회로의 개방이나 연결점의 접촉저항여부를 검출하기 위하여, 중성점과 각 상의 권선저항을 각 상별로 측정한 결과 표2와 같다. 이 표에서 총주 및 대청댐 발전기의 권선저항은 허용편차(±5%) 이내로 층간단락 등의 이상이 없는 양호한 상태로 판정되었다.⁵⁾

표2. 권선저항 시험결과

구 분	권선저항값 [mΩ, 20℃기준]			
	총주 4호기		대청 2호기	
	공장시험	2002	공장시험	2002
A 상	4.04	4.08	12.50	12.46
B 상	4.04	4.18	12.40	12.36
C 상	4.04	4.21	12.50	12.46

(2) 절연저항시험 : DC 5,000[V] 5TΩ급 Megger 로 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 외함간에 5000[V] 전압을 인가하여 1분 후의 절연저항을 측정 한 결과 표3을 얻었다. 이 표3에서 절연저항은 양호하지만 공장시험값에 비하여 저하되었음을 확인하였다. ⁶⁾

표3. 절연저항 시험결과

구 분	절연저항값 [MΩ, 40℃기준]			
	충주 4호기		대청 2호기	
	공장시험	2002	공장시험	2002
3상일괄	440	65	589	286

(3) 성극지수시험 : DC 5,000[V] 5TΩ급 메가테스트(Megger Test)로 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 외함간에 5000[V] 전압을 인가하여 1분과 10분 값의 저항값을 측정 한 결과 표4를 얻었다. 이 표에서 기준치인 2.0이상으로 절연체의 오손이나 흡습이 없는 양호한 상태로 판정 되었다. ⁶⁾

표4. 성극지수 시험결과

구 분	성극지수			
	충주 4호기		대청 2호기	
	공장시험	2002	공장시험	2002
3상일괄	4.83	7.04	5.22	8.18

(4) 교류전류시험 : 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 대지간에 정격전압(13.8kV)까지 인가하면서 교류전압-전류(I-V)특성으로 부터 변위전류를 조사한 결과 표5와 같다. 이 전류증가값인 ΔI값이 기준치 이하로서 양호하였다.

표5. 교류전류 시험결과

구 분	ΔI (%)	
	충주 4호기	대청 2호기
	공장시험	2002
3상 일괄	0.93	2.50

(5) 유전정접시험 : 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 대지간에 정격전압(13.8kV)까지 인가하여 절연체의 손실량인 유전정접을 측정 한 결과 표6과 같다. 유전정접시험값은 기준치인 6.5[%]이하로서 상태가 양호하게 나타났으며 Δtan δ 값이 공장시험치(초기치)와 비교하여 조금 증가함은 장기운전으로 인한 것으로 분석된다.

표6. 유전정접 시험결과

구 분	Δtan δ [%]			
	충주 4호기		대청 2호기	
	준공시험	2002	준공시험	2002
3상 일괄	1.15	1.79	0.6	1.02

(6) 부분방전시험 : 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 대지간에 상전압 E₀(7.9kV) 및 1.25E₀(9.9kV) 까지 인가하여 절연체 내부에서 발생하는 최대부분방전값(Q_{max}) 및 N_q를 측정하여 절연체의 국부결함 정도를 표7에 나타내었다. 시험결과 충주4호기의 경우 최대부분방전값은 10,000[pC], N_q 2.55 그리고 대청2호기는 30,000[pC], N_q는 0.67로 나타났으며, 특히 대청 2호기는 장기사용으로 절연열화가 어느정도 진행된 내

부방전으로 판단되나, 부분방전패턴은 그림2와 같이 표 면방전을 포함하고 있는 것으로 판단된다. ⁷⁾

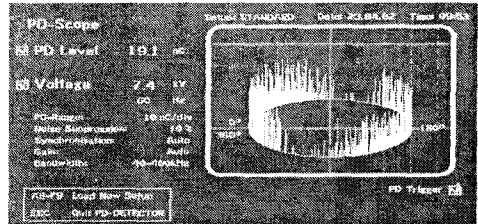


그림 2. 대청2호기 부분방전 패턴

표7. 부분방전 시험결과

구 분	충주 4호기	대청 2호기
Q _{max} (pC)	10,000	30,000
N _q	2.55	0.67

3. 절연상태 평가

3.1 절연열화판정기준에 의한 절연평가

절연열화 판정기준에 의한 절연평가는 현재까지 연구·발표된 판정기준값을 기준하여 양·불량을 판단하는 진단기법으로 이 방법은 절연진단 초기부터 적용되어온 고전적 절연열화 평가방법이다. 절연저항(MΩ), 성극지수(PI), 권선저항(mΩ), 교류전류(ΔI), 유전정접(Δδ), 부분방전시험(Q_{max}) 등의 6개항목에 대하여 기준값과 비교 판정한 결과 대부분 양호한 것으로 나타났다. ⁸⁻¹⁰⁾

3.2 D-map법에 의한 절연평가

D-map법에 의한 고정자 권선의 잔여수명은 D-map Parameter를 이용하여 표8과 같은 파라메타(Parameter)를 이용하여, $V_R(\%) = 100 - 1.8(\Delta - 0.8) - 27.4 \log(Q_{max}/1,500 \times 10^{-12})$ 로써, 고전압설비는 정량적 산출결과에 대해 어느정도 분포형태를 나타내므로 초기치의 40%인 경우를 수명한계의 최종단계에 도달한 것으로 판정한다. D-map법에 의해 발전기 고정자권선의 잔여 절연강도를 구하면 신품 설비를 100%로 기준으로 볼 때 표8과 그림3에 의해 73.9% 및 59.4%로 추정된다.

표8. D-map법에 의한 평가

구 분	ΔI	Δtan δ	Q _{max} (pC)	V _R (%)
충주수력 제4호기	0.93	1.79	10,000	73.9
	2.72			
대청수력 제2호기	2.50	1.02	30,000	59.4
	3.52			

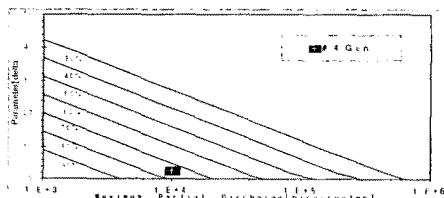


그림3. D-Map법에 의한 잔여절연내력

3.3 운전이력에 의한 절연평가(NY-map법)

발전기권선의 절연열화는 기동·정지 횟수(N) 및 운전시간(Y)에 의해서 발생하는 기계적, 열적, 전기적 및 환경적 열화 등이 복합되어 발생한다. 이와같은 발전기의 운전이력에 의한 권선의 잔여 절연내력을 추정하는 방법으로,

$$V_r(\%) = (1-aY)(1-bN) \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, Y : 운용년수,

N : 등가 기동·정지횟수

a = 7×10^{-3} 운전시간

b = 8×10^{-5} 기동·정지횟수

따라서, NY-map법에 의한 잔여 절연강도는 표9과 같이 68.6% 및 62.1%로 추정된다. 위 NY-map법에 의한 잔여 절연강도가 D-map법에 의한 잔여 절연강도(73.9%)보다 낮은 것은 절연평가 대상인 두 발전기가 첨두부하 분담기능을 위해 운전시간에 비하여 기동·정지 횟수가 잦은 때문으로 판단된다.

표9 . NY-map법에 의한 평가

구 분	운전시간 (Y)	기동·정지 횟수(N)	V _R (%)
충주수력 제4호기	33,281	9,219	68.6
대청수력 제2호기	43,205	11,140	62.1

4. 결 론

충주수력 제4호기 및 대청수력 제2호 발전기에 대한 비파괴 정밀절연진단 시험결과에 대한 분석은 다음과 같다.

i) 정밀절연진단 6개 시험항목중 고장자 권선의 절연상태는 양호한 것으로 판단되나, 절연저항 측정치가 65MΩ 및 286MΩ으로 측정되어 준공시험치 및 기준값(100MΩ)과 대비하여도 점차 저하되는 특성을 보이고 있다. 이는 수력발전기의 냉각방식이 전폐형 공기냉각방식으로 발전기실내 브레이크 슈(Brake Shoe) 및 슬립 링(Slip Ring) 마찰에 의한 카본 등의 분진에 의한 오손이 주 원인으로 분석된다.

ii) 준공시험결과와 금번 진단결과를 대비하면 절연체의 평균적 품질을 나타내는 유전정접값 및 절연체의 국부적인 결합정도를 나타내는 부분방전값이 장기적인 운전으로 점차 열화되는 징후가 나타나고 있으며, 또한 D-Map 및 NY-Map 평가에서도 잔여절연내력이 점차 저하함을 알 수 있다.

이상의 분석에서 절연체는 장기운영에 따른 열화요인에 의해 점진적으로 절연파괴전압이 저하됨으로 돌발사고 예방 및 적정보수에 의한 수명연장을 위하여 주기적인 절연진단시험으로 경년열화 변화추이관리가 필요할 것으로 판단되며, 또한 기기의 열화 및 이상현상으로 진단되는 특성을 조기에 발견할 목적으로 On-Line 상시진단 기술의 도입이 요구된다.

[참고문헌]

[1] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21

No.6, pp. 1021-1025, 1986.
 [2] Y. Ikeda and H. Fukagawa, "A Method for Diagnosing the Insulation Deterioration in Mica-Resin Insulated Stator Windings of Generator", W88046, 1988. 6.
 [3] 한국수자원공사, "충주수력발전소 제4호 발전기 공장시험 성적서", 1983.
 [4] 한국수자원공사, "대청수력발전소 제2호 발전기 공장시험 성적서", 1980.
 [5] IEEE Std 62-1995, "IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power", 1995.
 [6] IEEE Std 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", 2000.3.
 [7] Dieter Konig, Y.Narayana Rao, "Partial discharge in electrical power apparatus", pp. 97-113, 1993.
 [8] Y. Takikawa, etc, "Technology for Preventive Maintenance of Turbine Generators", Hitachi Review, Vol. 72, No.8, pp. 35-42, 1990.
 [9] K. Matsunobu, M.Taniguchi, "Preventive Maintenance and Diagnosis of Generator & Motors", EPRI Hydro O&M Workshop/Seminar Pumped Storage Major Unit Overhauls, pp. 1-7, Oct. 1986.
 [10] K. Kadotani, T. Hakamada, S. Yamatake, "An Approach for Insulation Diagnosis of Mica-Resin Coils", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No.9, pp. 4136-4141, 1981.