

수력발전기의 절연보강 전·후 절연상태 비교평가

변 일 환, 이 은 웅
한국수자원공사, 충남대학교

Assessment of Insulation Condition between Diagnosis and Impregnation for Hydro-Generator

il-hwan Byun, Eun-Woong Lee
Korea Water Resources Corporation, Chungnam National University

Abstract - The measurements were performed to assess the insulation deterioration condition of the stator winding of Dae-Cheong hydro-generator #2 which had been in service after being constructed 1980. After repair of the stator winding insulation, we conducted insulation diagnostic tests which 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 the previous records. On the basis of these test results, this paper tried to present the importance of insulation repair for the generator stator winding.

Digital Insulation Tester에 의한 절연저항(Megger) 및 분극지수(P·I)시험을 하였고, 20kV(400kVA) Resonating형 교류고전압 발생장치에 의한 교류전류(AC Current)시험, Schering Bridge 및 Standard Capacitor(100pF)에 의한 유전정접(tan δ)시험, PD Detector 및 Coupling Capacitor(10nF)에 의한 부분방전시험(P·D)을 실시하였다.^[2,3]

1. 서 론

절연진단은 발전기 및 전동기 등의 고전압설비에 대한 과학적으로 설비상태를 분석·평가하고, 잔여수명을 예측하여 상태기준유지보수(Condition Based Maintenance)를 실시함으로써, 적정 유지보수에 의한 수명연장, 설비 개·대체 의사결정을 하여 돌발사고 예방, 설비상태진단·평가에 의한 운영신뢰성을 확보하는데 그 목적이 있다. 특히 대용량 수차발전기는 주파수조절, 피크 부하분담 등 전력계통에서 중요한 역할을 담당하므로 발전기의 안정적 운전을 위해서는 주기적인 절연진단에 의해 절연상태평가 요구된다. 또한, 수력발전기의 사고비율은 고정자권선의 절연열화가 주 사고부위로 나타나므로, 분해점검시에 고정자권선에 대한 절연보강 및 절연세척등의 보수계획을 수립하여, 절연열화원인을 최소화하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 20년 이상 장기간 운전중인 발전기에 대한 절연보강 및 절연세척을 실시한 후, 고정자권선에 대하여 off-line시험을 실시하고, 이전의 데이터와 그 변화추이를 비교·분석하였다. 또한, 여러 가지 절연상태평가기법을 적용하여 절연특성을 고찰하였다.

2. 절연진단 시험방법 및 결과

2.1 진단설비특성 및 시험방법

절연진단시험 대상은 13.2kV 수력발전기로서 설비 사양은 표1과 같다.^[1] 2002년도 절연진단결과 최대부분 방전량이 상당히 높은 값을 나타내고, 방전형태도 표면방전이 포함된 형태로 분석되었으며, 육안점검결과 고정자 권선 표면이 탄소성분 분진등에 의한 오손상태가 심한 것으로 나타났다. 따라서 2003년도에 고정자권선에 대해 절연세척 및 절연보강(바니쉬도포)을 실시한 후 다음과 같이 정밀절연진단시험을 실시하였다. 시험방법은 발전기 고정자 권선의 단로기, GPT, PT 및 중성점을 분리한 후 고정자 권선을 3상 일팔로 DC 및 AC전압을 인가하여 정밀절연진단을 실시하였으며, 5kV

표 1. 진단대상 발전설비 사양

구 분	내 용
정격용량(MVA)	50
정격전압(kV)	13.2
정격전류(A)	2,187
회전수(rpm)	150
역률(lag)	0.9
상업운전(year)	1980
누적운전시간(hr)	45,490

2.2 시험결과

(1) 절연저항시험 : DC 5,000[V] 5TΩ급 Megger 로 발전기 고정자 권선을 3상 일팔로 단자와 외함간에 5000[V] 전압을 인가하여 1분 후의 절연저항을 측정된 결과가 표2이다. 절연저항값은 주위환경에 영향을 많이 받기 때문에 절대값만으로 절연상태를 평가하기는 곤란하지만, 최소 절연저항값인 100MΩ이상이면, 양호한 값으로 판정하고 있다.^[4] 측정값은 절연보강 전·후 큰 변화 없이 양호한 값을 나타내었다.

표2. 절연저항 시험결과

구 분	절연저항값 [MΩ, 40℃기준]			
	공장시험	1996	2002	2003
3상일팔	589	416	286	277

(2) 분극지수시험 : DC 5,000[V] 5TΩ급 메가테스트(Megger Test)로 발전기 고정자 권선을 3상 일팔로 단자와 외함간에 5000[V] 전압을 인가하여 1분과 10분 값의 저항값 비를 측정된 결과가 표3이다. 이 측정값은 직류전류의 시간변화특성을 분석한 값으로 절연체의 흡습이나 오손등의 열화상태를 알 수 있으며, 2.0이상이면 양호한 상태로 판정한다.^[4] 측정값은 절연보강 전·후 큰 변화 없이 양호한 값을 나타내었다

표3. 분극지수 시험결과

구 분	분극지수			
	공장시험	1996	2002	2003
3상일팔	5.22	5.51	8.18	5.55

(3) 교류전류시험 : 발전기 고정자 권선을 3상 일팔로 단자와 대지간에 정격전압(13.2kV)까지 인가하면서 교류전압-전류(V-I)특성으로부터 변위전류를 조사한 결과가 표4이다. 전압인가시 절연체 내부에서 부분방전현상이 나타나면, 전류는 전압에 비례하지 않고 급증하게 되며, 이 전류증가를 ΔI 로 절연상태를 평가하는데, 측정값은 전류증가가 거의 없는 양호한 값으로 나타났다.^{5,6)}

표4. 교류전류 시험결과

구 분	ΔI			
	공장시험	1996	2002	2003
3상일팔	-	-	0.2	0

(4) 유전정접시험 : 발전기 고정자 권선을 3상 일팔로 단자와 대지간에 상전압1.25E₀(9.5kV)까지 인가하여 절연체의 손실량인 유전정접을 측정하는 결과가 표5이다. 유전손실은 $\tan \delta$ 에 비례하고, 절연체의 형상 및 크기와 무관한 절연물의 고유한 특성값으로 절연체의 열화정도를 표시하는데 사용한다.⁷⁾ 시험결과 $\tan \delta$ 의 증가율은 표5와 그림1,2와 같이 매우 작은 값으로 양호한 결과를 보여주고 있다.^{12,3)}

표5. 유전정접 시험결과

구 분	$\Delta \tan \delta$ [%]			
	준공시험	1996	2002	2003
3상 일팔	0.6	1.02	0.55	0.68

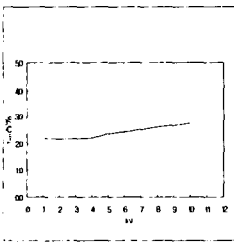


그림1 2002년도 시험결과

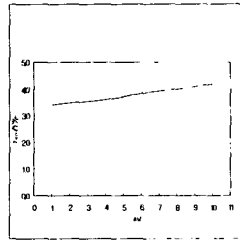


그림2 2003년도 시험결과

(5) 부분방전시험 : 발전기 고정자 권선을 3상 일팔로 대지간에 E₀(7.6kV) 까지 인가하여 절연체에서 발생하는 최대부분방전값(Q_{max})을 측정하였다. 측정된 부분방전의 패턴 및 크기에 따라 절연체의 결함위치를 어느정도 추정할 수 있으며, 현재 사용중인 진단법 중에서 가장 신뢰도가 높은 측정법이다.



그림3 2002년도 시험결과

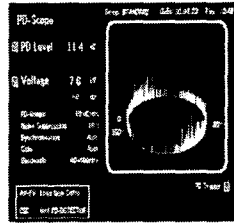


그림4 2003년도 시험결과

2002년 진단결과 부분방전패턴은 그림3과 같이 전압 peak 부분에서 방전이 발생하는 형태로, 표면방전을 포함하고 있는 것으로 나타났으며, 장기사용으로 절연열화가 어느정도 진전된 것으로 나타났다. 2003년 절연보강 후 진단결과는 그림4와 같이 최대부분방전량 및 DIV가

감소하였고 부분방전패턴도 표면방전이 감소된 형태를 보여주고 있다.^{8,9)}

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 평가법이다. 절연저항(M₀), 분극지수(PI), 교류전류(ΔI), 유전정접($\Delta \delta$), 부분방전시험(Q_{max}) 등의 5개항목에 대하여 기준값과 비교 판정한 결과 표2~6에서 보듯이, 절연보강 후 측정값의 큰 차이가 없이 양호한 값을 나타내었고,^{12,3)} 특히, 부분방전양은 절연보강 후 많이 감소하였음을 볼 수 있다.

표6 부분방전시험 결과

구 분	Back Noise (pC)	최대부분방전량 (Q _{max})	개시전압 (DIV)	소멸전압 (DEV)
		7.6kV		
1996	1,000	24,000	3.5	3.2
2002	1500	30,000	2.9	2.5
2003	400	11,400	4.2	3.6

3.2 D-map법에 의한 절연평가

D-map법에 의한 고정자권선의 잔여수명은 부분방전시험, 교류전류시험 및 유전정접시험 결과로부터 D-map Parameter(Q_{max}, ΔI , $\Delta \tan \delta$)를 이용하여 아래와 같이 잔여 절연내력 및 절연여유도를 구할 수 있다.^{12,3)}

D-map법에 의한 절연여유도 계산식은
 $V_R(\%) = 100 - 1.8(\Delta - 0.8) - 27.4 \log(Q_m / 1,500 \times 10^{-12})$
 $\Delta: \Delta I + \Delta \tan \delta$; Q_{max}(pC): $E/\sqrt{3}$ 에서 최대부분방전량

이 계산식은 신품 설비를 100%로 기준으로 볼 때 잔여 절연강도를 나타내는데, 결과값이 초기치의 40%점을 수명의 최종단계에 도달한 것으로 판정한다. 표7과 그림5에서 보듯이 59.4%에서 76.1%로 절연보강 후 절연여유도가 향상된 값을 나타내었다.

표7. D-map법에 의한 평가

구 분	Δ	Q _m	V _R (%)
2002	0.52	30,000	59.4
2003	0.68	11,400	76.1

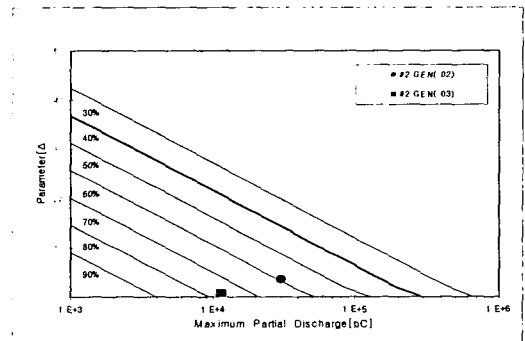


그림 5 D-map 법에 의한 절연상태평가 비교

3.3 절연내력추정에 의한 절연평가

사용중인 발전기 권선 및 모델권선 시험결과를 근거로 제시한 절연내력추정에 의한 절연평가법^[10]으로 아래 실험식을 이용하여 발전기 절연내력을 계산하여 절연내력 정도를 추정·평가하는 기법으로, 절연내력을 계산하면,

$$V_{BD}/E = 12.0 - 2.2 \log q_m - 280 (\tan \delta_0 / R_1 C_0)^{2.0}$$

$\tan \delta_0$: $\tan \delta$ at 2kV, q_m (pC): 최대부분방전량 at $E/\sqrt{3}$
 R_1 (M Ω): 절연저항 1분값, C_0 (μ F): 정전용량 at 2kV

절연특성 측정값으로 절연내력추정값을 계산한 값이 표 8과 그림 6에 나타내었다. 이 결과에 의하면, 절연내력이 보수전과 비교하여 매우 양호한 절연내력을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

표 8. 절연내력추정에 의한 절연평가결과

구분	q_m	$\tan \delta_0 / R_1 C_0$	V_{BD}/E
1996	24,000	0.004	2.36
2002	30,000	0.007	2.14
2003	11,400	0.002	3.07

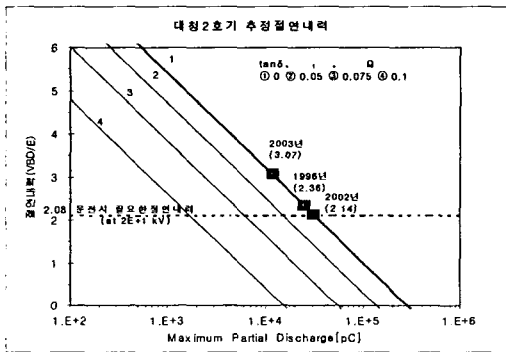


그림 6 절연내력추정에 의한 절연평가 비교

4. 결 론

수력발전기의 고정자코일에 대해 절연보강전·후 실시한 정밀절연진단 시험결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 직류 및 교류시험에서 측정전·후의 값은 큰 변화를 보이지 않았으나, 부분방전 시험에 있어서는 부분방전발생량이 감소하는 특성을 볼 수 있었고, 절연상태 평가결과에서는 절연내력이 매우 향상되었음을 알 수 있었다. 이는, 고정자에 대한 절연체척 및 절연보강을 실시하여, 절연체 표면의 오손상태가 제거된 결과로 나타나는 특성으로 판단된다. 또한 부분방전시험이 다른 진단법과 비교하여 민감하게 측정되는 것으로 나타났다. 따라서, 부분방전시험은 절연체의 절연상태를 진단하는 중요한자로 판단된다.

2) 절연체는 장기운영에 따른 열화요인에 의해 점진적으로 절연파괴전압이 저하되는 특성이 있으므로, 돌발사고 예방 및 적정보수에 의한 수명연장을 위하여 적정주기에 따른 절연진단 및 그 결과에 따라 상태기준유지보수가 바람직한 것으로 판단된다.

{참고문헌}

- (1) 한국수자원공사, "대청수력발전소 제2호 발전기 공장시험 성적서", 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.