

대용량 수차발전기의 절연진단과 절연보수 상관관계 평가

오봉근*, 정진달, 이광호, 김현일, 곽희진,
한국수자원공사

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

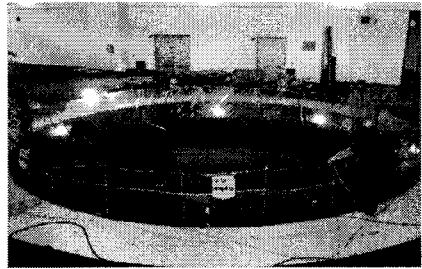
Bong-Keun Oh, Jin-Dal Jung, Kwang-Ho Lee, Hyun-Il Kim, Hee-Jin Kwak
Korea Water Resources Corporation

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.

표1. 진단대상 수차발전기 주요사항

구 분	사 양
정격용량[MVA]	50
정격전압[kV]	13.2
정격전류[A]	2,187
회전수[rpm]	150
역률[lag]	0.9
상업운전[year]	1980

그림1. 고정자 절연보수 전경



1. 서 론

수차발전기 및 전동기 등의 고전압설비에 대한 과학적 상태진단으로 설비상태를 분석·평가하고, 잔여수명을 예측하여 적절한 상태기준유지보수(Condition Based Maintenance)를 실시함으로써, 설비 개·대체 의사결정의 과학화로 경제적인 유지보수, 적정 보수에 의한 수명 연장, 돌발사고 예방 그리고 설비상태진단·평가에 의한 운영신뢰성 확보 등에 그 목적이 있다. 수력발전기 사고는 고정자 권선의 절연열화가 주 사고원인으로 보고되고 있어, 발전기 분해점검(Overhaul)시에 고정자권선에 대한 절연보강 및 절연세척 등의 보수계획을 수립하여, 절연열화원인을 최소화하는 것이 필요하다.

특히 대용량 수차발전기는 주파수조절, 피크 부하분담 등 전력계통에서 중요한 역할을 담당함으로써 발전기의 안정적 운영을 위해서는 주기적인 절연진단에 의한 절연상태평가 실시가 요구된다.

본 논문에서는 20년 이상 장기간 운전중인 수차발전기에 대한 절연보강(Impregnation) 및 절연세척(Cleaning)을 실시하고 절연보수 전·후의 off-line 절연특성 진단데이터와 그 변화추이를 비교·분석하여 절연진단과 절연보수의 상관관계를 평가하고자 한다.

2. 진단설비 특성 및 시험방법

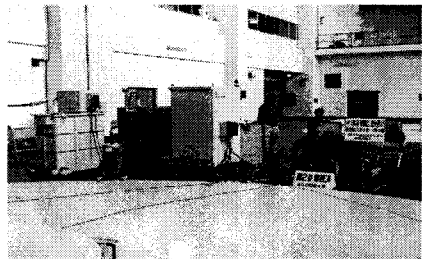
2.1 진단설비 특성

절연진단시험 대상은 장기 운영중인 13.2kV급 수력발전기로서 세부사항은 표1과 같다.⁽¹⁾ 절연보수 전에 2회의 절연특성시험결과 최대부분방전량이 상당히 높은 값으로 측정되고 또한 부분방전형태도 표면방전이 포함된 형태로 나타나 육안점검결과 고정자 권선 표면이 탄소성분의 분진 등에 의한 오손으로 판단되어 고정자권선에 대해 절연세척(Cleaning) 및 절연보강(Impregnation)을 그림1과 같이 실시하였다.

2.2 시험방법

Off-Line 정밀절연특성시험을 그림2와 같이 발전기 고정자 권선의 단로기, GPT, PT 및 중성점을 분리한 후 고정자 권선을 3상 일팔로 DC 및 AC전압을 인가하여 정밀절연진단을 실시하였으며, 5kV Digital Insulation Tester에 의한 절연저항(Megger) 및 성극지수(P·I)시험을 실시하였고, 20kV, 20A(400kVA)공진형 교류고전압 발생장치를 이용한 교류전류시험(ΔI), Schering Bridge 및 Standard Capacitor(1000pF)에 의한 유전정접(tan δ) 시험, 부분방전검출장치(PD Detector) 및 Coupling Capacitor(10nF)를 이용하여 부분방전시험(Q_{max})을 실시하였다.^(2,3)

그림2. 절연진단시험 전경



3. 절연특성시험

3.1 절연저항시험

DC 5,000[V] 5TΩ급 Megger로 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 외함간에 5000[V] 전압을 인가하여 1분 후의 절연저항을 측정된 결과 표2와 같다. 절연저항 값은 주위환경에 영향을 많이 받기 때문에 절대값만으로 절연상태를 평가하기는 곤란하지만, 최소 절연저항값이 100MΩ이상이면, 양호한 값으로 판정하고 있으며,⁽⁴⁾ 측정값은 절연보강 전·후 큰 변화 없이 양호한 값을 나타내고 있다..

표2. 절연저항 시험결과

절연보강 전		절연보강 후	- MΩ단위 - 40℃기준
1차	2차		
416	286	277	

3.2 성극지수시험

DC 5,000[V] 5TΩ급 메가테스트(Megger Test)로 발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 외함간에 5000[V] 전압을 인가하여 1분과 10분 값의 저항값 비율을 측정된 결과가 표3과 같다.

표3. 성극지수 시험결과

절연보강 전		절연보강 후
1차	2차	
5.51	8.18	5.55

이 측정값은 직류전류의 시간변화특성을 분석한 값으로 절연체의 흡습이나 오손 등의 열화상태를 알 수 있으며, 2.0이상이면 양호한 상태로 판정하며,⁽⁴⁾ 측정값은 절연보강 전·후 큰 변화 없이 양호한 값을 나타내었다

3.3 교류전류시험

발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 대지간에 1.25E₀(9.58kV)까지 인가하면서 교류전압-전류(V-I)특성으로부터 변위 및 누설전류를 시험한 결과가 표4이다.

표4. 교류전류 시험결과

절연보강 전		절연보강 후	인가전압 =1.25E ₀ ΔI(%)
1차	2차		
-	0.2	0	

전압인가시 절연체 내부에서 부분방전현상이 발생하면, 전류는 전압에 비례하지 않고 급증하게 되며, 이 전류증가율 (ΔI)로 절연상태를 평가하는데, 측정값은 전류증가율이 거의 없는 양호한 값으로 나타났다.⁽⁵⁶⁾

3.4 유전정점시험

발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 단자와 대지간에 상전압의 1.25E₀(9.5kV)까지 인가하여 절연체의 손실량인 유전정점을 측정된 결과가 표5와 같다.

표5. 유전정점 시험결과

절연보강 전		절연보강 후	인가전압 =1.25E ₀ Δtanδ(%)
1차	2차		
1.02	0.55	0.68	

유전손실은 tanδ에 비례하고, 절연체의 형상 및 크기와 무관한 절연물의 고유한 특성값으로 절연체의 열화정도

를 표시하는데 사용한다.⁽⁷⁾ 시험결과 그림3,4와 같이 tanδ의 증가율이 매우 작은 양호한 결과를 보여주고 있다.⁽²³⁾

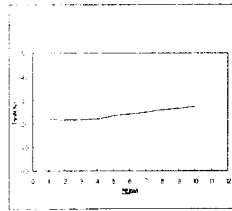


그림3. 절연보강 전

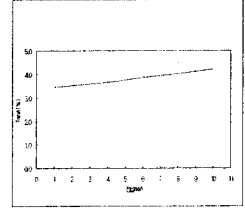


그림4. 절연보강 후

3.5 부분방전시험

발전기 고정자 권선을 3상 일괄로 대지간에 시험전압을 인가하여 절연체에서 발생하는 최대부분방전값(Qmax)을 표6과 같이 측정하였다. 측정된 부분방전 패턴 및 크기에 따라 절연체의 결함위치를 추정할 수 있으며, 현재 사용중인 진단법 중에서 가장 신뢰도가 높은 시험항목으로,

표6. 교류전류 시험결과

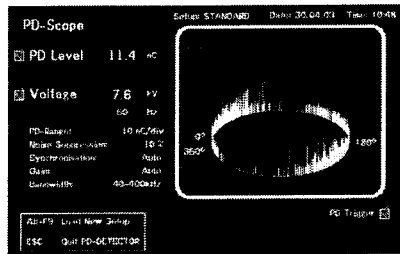
절연보강 전		절연보강 후	인가전압 (E ₀) Qmax(pC)
1차	2차		
24,000	30,000	11,400	

표7. 방전개시전압 시험결과

절연보강 전		절연보강 후	개시전압 (kV)
1차	2차		
3.5	2.9	4.2	

절연보강 후 부분방전값이 상당히 감소하였고, 방전패턴은 그림5와 같이 일반적인 내부방전형태이며 방전개시전압(DIV)이 표7과 같이 4.2kV로 향상된 상태로 측정되었다.⁽⁸⁹⁾

그림5. 부분방전패턴



4. 절연상태 평가

4.1 절연열화판정기준에 의한 절연상태평가

절연열화 판정기준에 의한 절연상태평가는 현재까지 연구·발표된 판정기준값을 기준으로 절연상태의 양·불량을 판단하는 진단기법으로 이 평가법은 절연진단 초기부터 적용되어온 고전적 절연열화 평가법이다. 절연저항(MΩ), 성극지수(PI), 교류전류(ΔI), 유전정점(Δδ), 부분방전시험(Qmax) 등의 5개 항목의 기준값을 근거로 절연보강 전후를 비교 평가한 결과는 표9와 같이 절연보강 전·후 측정값의 큰 차이 없이 양호한 값이 나타났다,⁽²³⁾ 특히 부분방전시험에서 부분방전량, 방전

개시전압, Nq값이 절연보강 후 많이 감소하였음을 알 수 있다.

표9. 절연보강 전·후의 절연특성값 비교

시험 종류	절연특성값	인가전압	판정 기준	진 단 시 험		
				보 강 전	후	
직류 시험	R(MΩ)40℃	5 kVdc	>100	416	286	277
	성극저수		>2.0	5.51	8.18	5.55
교류 전류	전류 증가율 (%)	ΔI_1	$1.25 E/\sqrt{3}$	<5.0	-	0.2
		ΔI_2	E	<12	2.502	-
	전류 급증점 P ₁₁ (kV)		< E/√3	-	7.33	없음
유전 정접	tanδ ₀ (%)	2kV	<10	1.81	2.17	3.52
	Δtanδ ₁ (%)	$1.25 E/\sqrt{3}$	<2.5	-	0.81	0.68
	Δtanδ ₂ (%)	E	<6.5	1.016	-	-
	C ₀ (μF)	2kV		1.051	1.054	1.093
	R ₁ C ₀ (ΩF)		>100	437.2	301.4	302.8
	tanδ ₀ /R ₁ C ₀ (%/ΩF)		<0.05	0.004	0.007	0.002
부분 방전	Qmax (pC)	Qm1	E/√3	<30,000	24,000	30,000
		Qm2	$1.25 E/\sqrt{3}$	0	35,000	35,000
		Qm3	E		-	-
	Nq ¹⁾ (Qm-V)	$1.25 E/\sqrt{3}$	<2.0	1.64	0.67	0.22
	방전개시전압(kV)	(1,000	pC)	3.5	2.9	4.2
	방전소멸전압(kV)			3.2	2.5	3.6

4.2 절연내력추정에 의한 절연상태평가

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

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

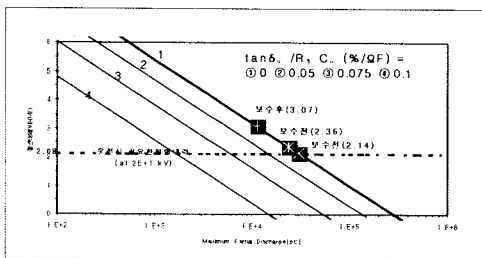
tan δ₀ : tan δ at 2kV, q_m(pC) : 최대부분방전량

R₁(MΩ): 절연저항1분값, C₀(μF): 정전용량 at 2kV

표10. 절연내력추정에 의한 절연상태평가 결과

구 분	q _m	tan δ ₀ /R ₁ C ₀	V _{BD} /E
보 강 전	24,000	0.004	2.36
	30,000	0.007	2.14
보 강 후	11,400	0.002	3.07

그림6. 절연내력추정에 의한 절연상태평가 그래프



절연특성 측정값으로부터 절연내력을 추정계산한 값은 표10 및 그림6과 같이, 정격전압에 대한 절연내력이 절연보수 전에 2.36배, 2.14배에서 절연보수 후에 3.07 배로 절연내력이 향상된 것으로 평가되었다.

4. 결 론

장기간 운전으로 절연특성값이 한계에 도달한 발전기에 대하여 절연세척(Cleaning) 및 절연보강(Impregnation)을 실시한 후, off-line 절연특성시험을 재실시하여 절연보수 전·후의 절연상태를 평가하고 절연보수와 절연진단의 상관관계를 평가·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절연특성시험의 직류 및 교류시험에서 보수 전·후의 특성값은 큰 변화를 보이지 않았으나, 부분방전시험에 있어서는 부분방전량(Qmax) 및 방전개시전압(DIV)이 향상되는 특성을 알 수 있어, 부분방전시험이 절연체의 절연상태를 평가하는 중요 시험인자이며, 또한 부분방전 패턴이 보수방안과 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

2) 절연상태 평가결과 보수 후에 절연내력이 상승되었음을 알 수 있으며, 이는 고장자에 대한 절연세척 및 절연보강을 실시하여, 절연체 표면의 오손상태가 제거된 결과로 나타나는 특성으로 판단된다.

3) 절연체는 장기운영에 따른 각종 열화요인에 의해 점진적으로 절연내력이 저하하는 마모특성이 있으므로, 돌발 사고 예방 및 적정보수에 의한 수명연장을 위하여 일정한 주기로 절연진단을 실시하고 그 결과에 따른 상태기준 유지보수가 필요하며, 또한 발전설비의 운전신뢰도 향상을 위하여 부분방전을 이용한 상시진단(On-Line)시스템 도입이 바람직한 것으로 판단된다.

【참고문헌】

- [1] 한국수자원공사, "수력발전소 제2호 발전기 공장시험시험성적서", 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.