

양수 발전 전동기 고정자 권선 절연진단 및 수명평가에 관한 연구

*박종정 *김희동 *이영준 *주영호 **한상옥
*전력연구원 수화력발전연구실 **충남대학교

A Study on The Insulation Diagnostic and Life Evaluation for the Pumped Storage Generator/Motor

*Jong Jeong Park * Hee Dong Kim * Young Jun Lee *Young Ho Ju **Sang Ok Han
*Korea Electric Power Research Institute **Chung Nam National University

Abstract - In pumped storage Generator - motor stator windings gradually deteriorates due to mechanical, thermal, electrical stresses. These stresses combine to result in loose windings, delamination of the stator insulation and/or electrical tracking of the endwinding, all of which can lead to stator insulation failures. Since the degradation of generator-motor is gradually occurred, regular inspection system is necessary to monitor degrading. The result of this diagnosis is a basic for the maintxnance of generator-motor

청평 양수 발전-전동기 #2 고정자 권선으로 자세한 사양은 표 1 과 같다.

표 1. 대상 발전기 사양

정격용량	220MVA	절연종류	Mica/Epoxy
정격(단자)전압	13.8kV	절연계급	F종
정격상전류	9,204A	역율	0.91

1. 서 론

양수 발전기의 특징은 저효율 화력 대체에 의한 연료비 절감, 무효전력 공급에 의한 조상설비 및 부하추종 운전과 운전 예비력 확보 차원에서 전력설비로서 중요한 역할을 한다. 이러한 대형 양수 발전-전동기 고정자 권선의 예기치 않은 절연파괴 사고는 불시의 운전 정지로 인한 전력공급의 불안과 복구에 따른 경제적 손실을 초래하기 때문에 고정자 권선의 정확한 절연상태, 더 나아가 사용 가능한 잔존수명을 예측하기 위한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되어 오고 있다 [1-3].

더욱이 국내의 많은 양수 발전-전동기는 장기간 운전으로 인해 노후화 되어 설계 수명에 한계에 와 있거나 초과되어 운전되고 있으며, 국가 경제의 어려움 때문에 신규 발전소의 건설이 어려워 발전기의 운전신뢰성 확보, 효율적인 운용계획 수립, 경제적인 예방정비 및 사용수명의 연장을 위해 고정자 권선의 절연열화 상태를 신뢰성있게 측정하는 기법이 절실히 요구되고 있다.

본 논문에서는 양수 발전-전동기 고정자 권선의 절연열화에 관한 진단 및 수명 평가에 관한 연구로써, 실제 운전에 의해 장기간 열화된 13.8kV급 Epoxy Resin/Mica 절연의 고정자 권선을 사용한 청평 양수 발전 전동기 #2의 비파괴 시험 결과이다.

2. 실험 방법

2.1 발전-전동기 사양

시험을 수행하기 위해 사용된 발전-전동기는 1979년 일본 FUJI사에 의해 제작 및 설치 되었으며, 실제 운전에 의해서 전기적, 기계적, 열적으로 열화된

2.2. 시험 항목

발전-전동기의 고정자권선을 중성점과 모선을 분리 후 권선을 각 상별로 정밀 진단을 수행하였다. 시험 항목은 현재 까지 세계적으로 널리 사용되고 있는 발전기 절연 진단시험 즉, 절연저항(Megger), 성극지수(P.I), 교류전류(A.C Current), 유전정접 및 정전용량(Tan δ & Capacitance Test), 부분방전(Partial Discharge) 시험 등의 비파괴 시험을 모두 실시 하였다.

2.3 측정 장치

각종 비파괴 시험을 위한 교류 고전압 인가와 ΔI , $\Delta \tan \delta$ 및 $\Delta C/C_0$ 시험은 Tettex사의 "Automatic 12kV Insulation Test System:Type. 2818-QA" 을 이용하여 수행하였고 부분방전 시험은 Swiss Haefley Trench 사에서 제작한 상용 부분방전 측정기(Partial Discharge Measuring System : TE-571)와 4,000 [PF] 의 Coupling Capacitor를 사용하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역은 40~400KHz의 bandwidth를 사용했다.

3. 측정 결과 및 검토

3.1 측정 항목

가. 절연저항 시험

발전기 고정자권선을 각 상별로 분리하여 1,000V Megger로 전압 인가후 1분후의 절연저항 값을 측정 한 결과 U,V,W상 모두 양호 하였다.

표 2. 절연저항 시험결과

상 (Phase)	절연저항값	측정시 주위온도
U 상	208 MΩ	19 ℃
V 상	173 MΩ	
W 상	156 MΩ	

나. 교류전류 시험

각 상별로 발전기 단자와 대지간에 교류전압을 1-9.96kV까지 인가시키면서 교류전류 변화상태를 측정하여 그림 1, 2, 3에 각 상별 교류전류-전압 특성을 그래프로 나타내었으며, 계산 결과 ΔI 값이 각 상별로 모두 기준치인 5.0[%] 이하로서 양호 하였다.

표 3. 교류전류 시험결과

인가전압 [kV]	전 류 [mA]		
	U 상	V 상	W 상
1	275	272	272
1.99 (25%)	542	542	540
3	813	810	814
4	1,090	1,090	1,090
5	1,360	1,350	1,360
6	1,630	1,630	1,620
7	1,900	1,900	1,910
7.98 (100%)	2,180	2,170	2,170
9	2,460	2,450	2,450
9.96 (125%)	2,730	2,730	2,720
I _o	2,165	2,155	2,155
ΔI [%]	0.688	0.691	0.691

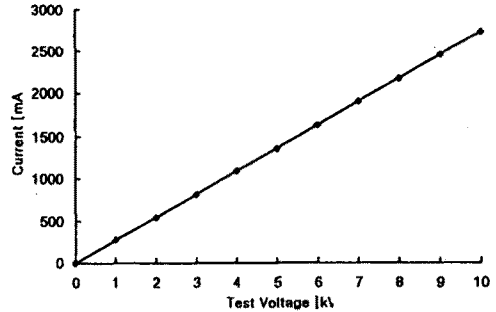


그림 2. 교류전류-전압 특성 (V 상)

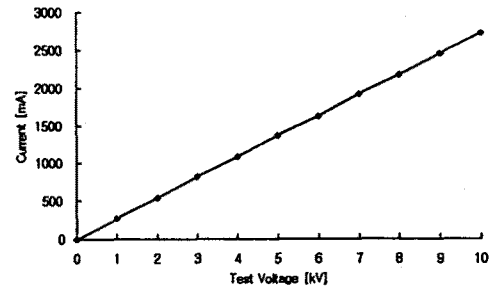


그림 3. 교류전류-전압 특성 (W 상)

다. 유전정접 및 정전용량 시험

각 상별로 발전기 단자와 대지간에 교류 전압을 1-9.96kV까지 인가시키면서 Tettex사의 Schering Bridge를 사용하여 유전정접 및 정전용량을 측정한 결과 기준치인 2.5[%] 이하로서 상태가 양호하게 나타났다. 그림 4는 tan δ-전압 특성을 나타낸 것으로 각 상별로 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

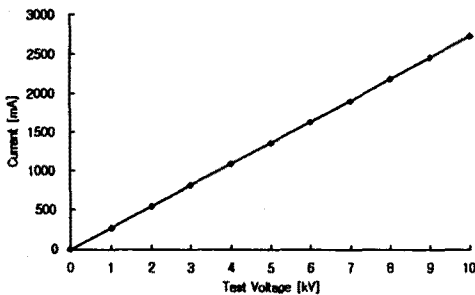


그림 1. 교류전류-전압 특성 (U 상)

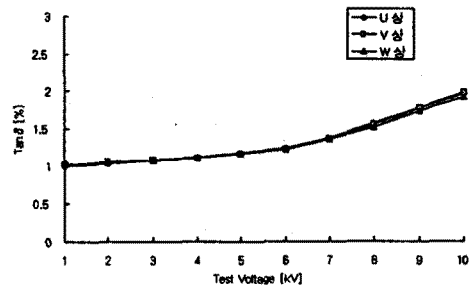


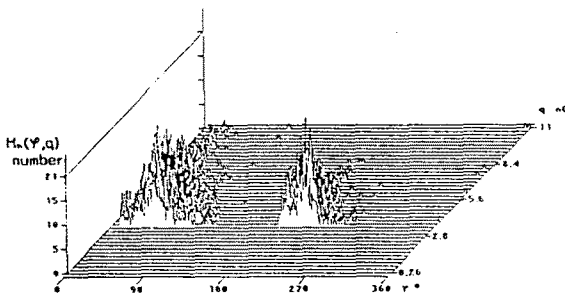
그림 4. tan δ-전압 특성

표 4. 유전정접 및 정진용량 시험결과

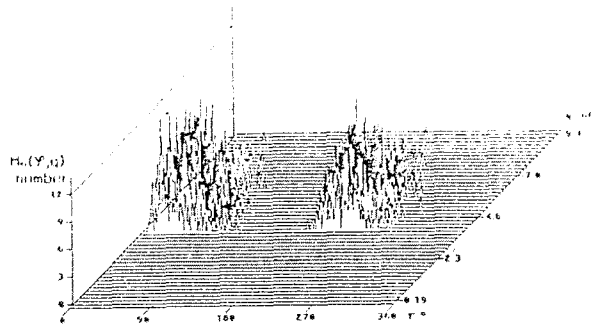
인가전압 [kV]	U 상		V 상		W 상	
	tan δ [%]	Cx [nF]	tan δ [%]	Cx [μF]	tan δ [%]	Cx [μF]
1	1.00	719.7	1.02	716.3	1.02	716.8
1.99	1.03	719.9	1.05	716.5	1.04	717.0
3	1.07	720.1	1.07	716.7	1.07	717.2
4	1.11	720.4	1.10	717.0	1.10	717.4
5	1.16	720.7	1.15	717.3	1.15	717.7
6	1.23	721.1	1.22	717.7	1.21	718.1
7	1.36	722.1	1.36	718.7	1.35	719.1
7.98	1.56	723.6	1.55	720.2	1.51	720.4
9	1.77	725.3	1.77	722.1	1.73	722.1
9.96	1.96	727.0	1.98	724.1	1.92	723.9
$\Delta \tan \delta$ [%]	0.96		0.96		0.90	

라. 부분방전 시험

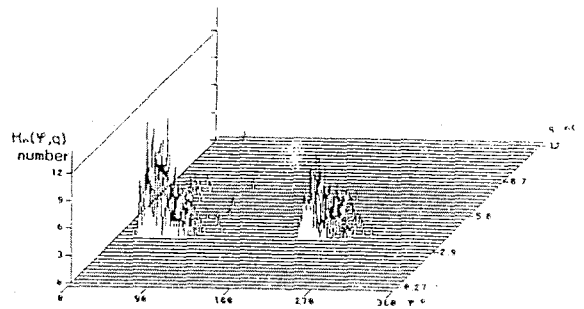
발전기 단자와 대지간에 교류전압을 상전압인 7.98kV까지 인가시키면서 PD Detecting System을 이용하여 각 상에 대하여 절연물 내부에서 발생하는 최대 부분방전 전하량을 측정 한 결과 U상을 제외하고는 요주의 기준치인 10,000[pC] 이하의 값이 측정되어 권선의 상태가 양호한 것으로 나타났으며 그림 5(a),(b),(c)는 부분방전의 크기, 발생빈도, 위상분포를 3차원적으로 나타낸 것으로서 0~90° 및 180~270° 사이에 부분방전이 많이 발생하고 그형태도 쉽게 볼 수 있다. 이는 임의의 주파수에 대한 60Hz 위상에 따른 부분방전 크기와 개수, 즉 위상분포 특성을 나타내므로 펄스의 위상분석도 가능하다. 일반적으로 부분방전 신호가 고정자 권선을 통하여 전파되면 고조파 성분은 급격히 감소되는 경향이 있다 [4]. 또한, 슬롯방전, 내부방전, 그리고 표면방전은 각각의 부분방전 신호에 포함된 주파수 특성이 다르다고 알려져 있다 [5].



(a) 부분방전의 3차원 그래프(U상)



(b) 부분방전의 3차원 그래프(V상)



(c) 부분방전의 3차원 그래프(W상)

그림 5. TE-571로 측정 한 부분방전 그래프

표 5. 부분방전 시험결과

항 목	Phase (상)		
	U 상	V 상	W 상
최대 부분방전 전하량(Qm1) [pC] (at 7.96 kV)	11,000	9,000	7,100

3.2. 시험결과 분석

금번에 실시한 청평양수 #2 발전-전동기 고정자권선에 대한 절연진단 시험결과를 요약하여 표 6에 나타내었다. 각각의 측정항목에 따라 불량 판정기준을 명시하였고, 측정치와 판정결과를 나타내었다.

표 6. 절연진단 시험결과

(참 고 문 헌)

측정항목	측정전압	불량판정 기준	#2 발전-전동기			결과
			U 상	V 상	W 상	
Megger [MΩ]	DC 1 [kV]	2E+1 [MΩ] 미만	208	173	156	양호
ΔI [%]	1.25x E/√3 [kV]	5 [%] 이상	0.688	0.691	0.691	양호
Δtan δ [%]	1.25x E/√3 [kV]	2 [%] 이상	0.96	0.96	0.90	양호
Qm [pC]	E/√3 [kV]	10,000-30,000 [pC] : 요주의 30,000 [pC] 이상 : 불량	11,000 (요주의)	9,000	7,100	양호

- (1) Y.Takikawa 외 5인, "Technology for Preventive Maintenance of Turbine Generators" Hitachi Review, Vol. 72, No8, pp.35-42, 1990.8
- (2) 한전전력연구원, 한국전기연구소, "발전기 Stator 수명에 측 및 절연진단에 관한연구" 한전전력연구원, 1992.11
- (3) I.M.Culbert, H.Dhirani and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation condition of Large Rotating Machine", EPRI EL-5036, Vol. 16, Project 2577-1, 1989
- (4) H.G Sedding, "The Partial Discharge Calibration problem in Rotating Machines", IEEE Panel Session on Digital Technique for Partial Discharge Measurment on Rotating Machines, 92 THO 424-9 PWR, pp. 24-28, 1992.
- (5) R.Miller, W.K. Hogg and I.A. Black, "Measuring Techniques for Identifying Partial Discharge in stator Windings of Electrical Machines" IEEE Dielectric Material Measurments and Applications, Conference Publication No.213, pp. 221-234, 1982.

절연저항 시험 결과로부터 고정자권선이 충분한 절연저항을 보유하고 있으며, 건조상태가 양호한 것으로 판단 되었고, ΔI 및 Δtan δ 값도 기준치에 비해 매우 낮게 측정되어 절연물내의 결함이나 오손상태가 없고 양호하여 절연열화의 정도가 미약함을 알 수 있다. 또한, 고정자권선에 대한 부분방전 측정결과 #2 발전-전동기의 경우 U상을 제외하고는 요주의 기준치인 10,000[pC]이하로 나타나 운전에 전혀 지장이 없는 것으로 판단된다.

4. 결 론

청평양수 #2 발전-전동기 고정자권선의 현재의 절연상태를 평가하고 잔존수명을 예측하기 위한 정밀 절연진단 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고정자권선의 절연상태는 전체적으로 양호하여 충분한 절연저항을 보유하고 있으며, 권선의 건조상태가 양호한 것으로 판단되며, 교류전류 및 유전정접, 부분방전 측정결과 양호한 결과를 나타내어 절연물의 열화상태가 많이 진전되지 않았다고 판단된다.
- (2) 고정자 권선에 대한 부분방전(PD) 측정 결과 각상 모두 대체로 양호한 단계이고, 슬롯 내 권선의 반도전층 절연 상태도 양호하여 운전에 지장이 없다고 추정된다.
- (3) 진단시험 결과를 종합적으로 분석한 결과 발전-전동기는 열적, 기계적, 전기적으로 양호하며 차기 A급 계획예방정비공사 기간까지는 운전하는 데 전혀 이상이 없을 것으로 판단된다.