

### 회전자 고정자권선의 절연보수후 절연특성변화 연구

오봉근, 최교남, 최형철, 임기조\*  
한국수자원공사, 충북대학교\*

### Change of the Insulation Characteristic for the Rotating machine stator winding after insulation reinforcement

Bong-keun Oh, Kyo-nam Choi, Hyung-cheol Choi, Kee-joe Lim\*  
Korea Water Resources Corporation, Chungbuk National University\*

**Abstract** - Our company(KOWACO) has periodically performed off-line diagnostic test for 14 hydro generators (rated 11 kV over) for 15 years. In this paper, we summarized results of dissipation factor tip-up test and partial discharge test about these generators. Among these, we chose two generators and performed insulation reinforcement (cleaning and varnish painting). We compared change of insulation condition for the stator winding based upon off-line diagnostic test result before and after repair. Test result shows that insulation condition was improved after insulation reinforcement. This insulation reinforcement has a function to reduce cause of deterioration, so we can know that it extends lifetime of generator and it is a very important factor for stable operation of facilities.

#### 1. 서 론

산업현장에서 사용되고 있는 수차발전기는 주파수조정, 피크 부하분담 등 전력계통에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 따라서, 주기적인 진단 및 유지보수를 통하여 설비의 안정적 운영은 필수적이라 하겠다. 수력발전기 고정자권선의 절연은 다중스트레스(기계적, 열적, 전기적, 환경적)로 인하여 점차 열화된다. 그래서 고정자권선 절연의 지속적인 열화는 피할 수 없으며 결국에는 절연과피가 발생한다. 절연과피에 의한 고장은 보수에 상당한 시간이 소요됨으로써 경제적인 측면에서 치명적인 손실을 발생한다. 따라서, 절연진단을 통하여 절연열화의 상태를 파악하여 예방보수를 실시하는 것은 매우 중요한 일이다. 우리회사의 경우 발전기에 대한 주기적인 보수가 수행되어져 왔으나, 주로 기계적인 부분에만 한정되어져 왔다. 발전기 고정자권선에 대하여 절연세척등 열화원인을 감소시키는 보수는 거의 이루어 지지 않았다. 이 논문에서는 우리회사의 11kV급 수력발전기에 대하여 현재까지 수행해온 정기중 진단시험을 정리하여 그 경향을 분석하여 보았으며, 이번 에 유지보수 기간이 도래한 2대의 발전기에 대하여 고정자권선에 대한 절연보강을 실시하였다. 그리고, 보강전후 정지중 절연특성시험 결과를 비교하여 절연상태의 변화를 알아보았다.

정지중 진단시험은 절연저항시험, 성극지수시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등이 있으며, 이러한 시험결과는 고정자권선의 절연상태 및 유지보수결정 시에 도움을 줄 수 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 진단설비특성

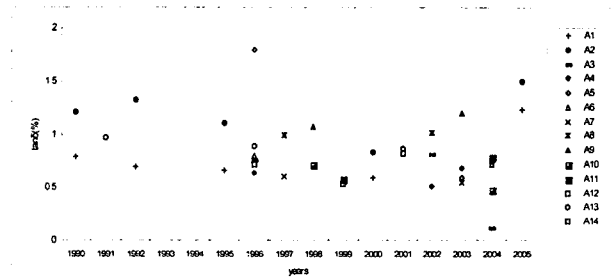
우리회사는 수력발전기 고정자권선의 절연상태를 알아보기위하여 주기적으로 정지중 진단시험을 수행하여왔다. 표1은 우리회사에서 운영중인 14대의 11kV급 수력발전기의 운전년수와 대수를 보여주고 있다. 20년 이상 인 발전기가 전체발전기의 반 이상이고, 30년 이상인 발전기도 2대가 포함되어 있다. 우리는 이들 발전기에 대하여 최대 5년 주기로 절연진단을 실시하고 있으며, 그 시험결과를 관리하여 왔다. 또한, 발전기에 대한 주기적인 보수도 함께 수행되어져 왔다. 하지만, 유편계통, 베어링부분등 기계적인 부분에 관한 유지보수가 주로 수행되어져 왔다. 최근까지, 이들 발전기들은 절연세척을 포함하여 고정자권선에 대한 절연보수가 거의 없었다. 그림1과 2는 이들 발전기들에 대하여 15년동안 측정되어온 정지중 절연진단 결과를 보여준다. 우리는 이들 각 발전기에 대하여 2번이상의 절연진단 시험을 수행하였다

그림1은 각 발전기에 대한 유전정접시험결과의 경향을 보여주고, 그림2는 부분방전시험결과를 보여준다. 그림1에서 보여주는 것처럼, 유전정접값( $\Delta \tan\delta\%$ )은 모든 발전기에서 큰 변화없이 2% 이하의 값을 나타내고 있다. 이것은 고정자권선 절연물에 대한 전체적인 유전손실의 증가가 현재까지 거의 없어 절연열화의 전전이 미소하다는 것을 의미한다. 그림2에서는 현재까지 측정된 최대부분방전량(Qmax)이 30000 pC 이하로 나타났으며, 측정주기 사이에 부분방전량이 급격히 증가하는 발전기는 없었다.

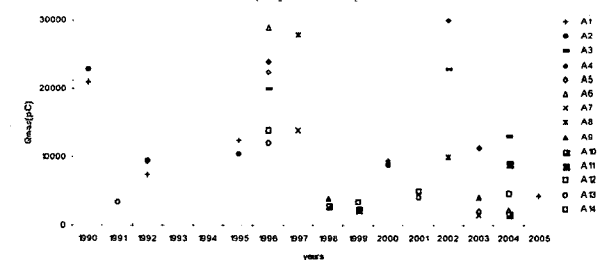
〈표 1〉 수력발전기의 운전년수 및 현황

발전기	운전년수	대수
A1, A2	30	2
A3-A8	20	6
A9-A14	10	6

현재까지 발전기 운영중 절연과피에 의한 고장은 발생하지 않았다. 하지만, 고정자권선 표면에 카본가루 및 분진등 같은 심각한 오손이 A3,A4 발전기 유지보수 기간 중에 육안점검에 의해 확인되었다. 그래서, 우리는 고정자권선에 대해 절연세척을 포함한 절연보강을 수행하기로 결정하였으며, 절연보수전후 고정자권선의 절연상태의 변화를 알기위하여 정지중 절연진단시험을 실시하였다.



〈그림 1〉 유전정접시험결과



〈그림 2〉 부분방전시험결과

#### 3. 절연특성시험

A3, A4발전기(13.2kV, 45MW)에 대한 특성은 표2와 같다.

〈표 2〉 발전기 특성

발전기	기동정지횟수	운전시간	제작년도
A3	12700	54200	1980
A4	12300	52100	1980

기동정지횟수는 10000회 이상이고, 운전시간은 5000시간이상, 그리고 운전년수는 약 25년이 경과한 수력발전기이다. 이들 발전기에 대한 절연진단시험이 보수 전후 행하여 졌다. 절연저항시험(IR), 성극지수시험(PI), 유전정접시험 그리고, 부분방전시험이 국제표준에 제시된 방법을 이용하여 수행되어졌다[1]-[3].

절연저항은 고정자권선 도체와 고정자철심간 절연물의 전기적 절연의 저항을 측정하는 것이다. 일반적으로, 낮은 저항값은 절연에 문제가 있음을 의미한다. 시험전압과 최소저항값은 IEEE43-2000[1]을 준용하였다. 성극지수 시험은 절연저항시험의 응용이고, PI는 시험전압이 인가된 상태에서 1분과 10분 절연저항값의 비로 나타내며, 낮은 PI값은 고정자권선이 오일과 먼지 등에 의해 오손된 것을 의미한다. PI값이 2.0보다 클 경우에는 전기적인 트래킹(Tracking)의 가능성이 매우 적음을 표시한다. 유전정접은 절연물에 있어서 전기적인 손실을 측정한다. 비정상적으로 높은 유전정접값은 절연물에 불순물 및 공극(void) 등에 의해 절연상태가 양호하지 않음을 의미한다. 부분방전시험은 고정자권선 주 절연물의 공극에서 발생하는 부분방전의 전류펄스를 직접 측정하는 것이다. 부분방전은 절연물에 직접 손상을 줄 수 있어, 고정자권선의 절연 열화의 상태를 알 수 있는 중요한 요소이다. 절연저항 및 성극지수는 직류전압 5kV에서 측정하였다. 유전정접시험은 2kV와 9.5kV의 유전정접값을 Schering Bridge를 이용하여 측정하였다. 최대부분방전량은 대기간전압인 7.6kV에서 측정하였고, 부분방전개시전압(PDIV)과 부분방전소멸전압(PDEV)은 부분방전검출기(TE571 by haefely Trench AG)를 이용하여 측정하였다[4].

#### 4. 시험 결과

측정결과를 표3-6에 나타내었다. 각 발전기에 대하여 진단시험결과를 나타내었고, 보수전후 절연상태를 평가하였다.

##### 4.1 절연저항시험 및 성극지수시험

DC 5,000[V] 시험전압을 인가하여 측정된 절연저항값과 성극지수시험결과가 표3에 나타내었으며, 결과는 보수전후 모두 양호하였다.

〈표 3〉 절연저항 및 성극지수시험결과

발전기	절연저항		성극지수	
	보수전	보수후	보수전	보수후
A3	417	138	5.55	7.36
A4	286	277	8.18	5.55

##### 4.2 유전정접시험

유전정접시험결과는 시험전압 2kV와 9.5kV에서 측정한 유전정접값의 차를 측정하였으며, 결과는 표4와 같다. 유전정접 및 부분방전시험을 위해 20kV, 400kVA의 시험용 내압기를 사용하였다.

〈표 4〉 유전정접시험결과

발전기	유전정접값	
	보수전	보수후
A3	0.77	0.12
A4	0.52	0.68

##### 4.3 부분방전시험

부분방전은 7.6kV까지 시험전압을 상승하고 하강시키면서, 부분방전개시전압(PDIV), 부분방전소멸전압(PDEV), 최대부분방전량(Qmax)을 측정하였으며, 그 결과를 표5와 표6에 나타내었다

〈표 5〉 부분방전 시험결과(PDIV&PDEV)

발전기	PDIV		PDEV	
	보수전	보수후	보수전	보수후
A3	3.0	3.6	2.9	3.5
A4	2.9	4.2	2.5	3.6

〈표 6〉 부분방전시험결과(Qmax)

발전기	최대부분방전량(Qmax)	
	보수전	보수후
A3	23,000	13,100
A4	30,000	11,400

시험결과와 같이, 보수후에 PDIV가 A3발전기는 3.0kV에서 3.6kV로 개시전

압이 상승하였고 A4발전기는 2.9kV에서 4.2kV로 상승하였다. 또한 PDEV도 보수후에 높은 전압에서 소멸되는 것이 측정되었다. 최대부분방전량(Qmax)도 A3발전기는 23,000 pC에서 13,100 pC으로 감소하였고, A4발전기는 30,000 pC에서 11,400 pC으로 감소하였다.

이상과 같이 절연진단시험결과 절연저항, 성극지수, 전정접값은 보수전후 큰 변화없이 양호한 상태가 나타났지만, 부분방전시험에서는 PDIV, PDEV, 그리고, 최대부분방전량(Qmax)이 보수 후 좀더 양호한 절연상태를 보유하고 있는 것으로 나타났다.

#### 5. 결 론

발전기 설치후 약 25년동안 A3, A4발전기의 고정자권선에 대한 절연보수는 거의 수행되어지지 않았다. 카본가루 및 먼지와 같은 오손이 이들 발전기에 대한 주기적인 점검 및 보수기간에 육안으로 확인되어 절연세척 및 바니쉬도포를 실시하였고, 그 결과 표면오손 요인이 제거되었다. 그리고, 이들 발전기에 절연진단시험을 실시하여 보수 전후의 절연특성을 비교하였다. 특히, 여러종류의 시험결과에서 부분방전시험이 보수후 좀더 양호한 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 이들 발전기에 대한 절연열화요소를 제거함으로 절연상태가 향상된 것을 의미한다. 따라서, 절연물의 내부에서 진행되는 절연열화의 진행은 제거할 수 없지만, 외부요소에 의한 절연열화요인은 절연보강으로 충분히 감소시킬 수 있었고, 발전기의 절연수명을 연장하는데 중요한 요소임을 알 수 있었다.

#### 〔참 고 문 헌〕

- [1] IEEE43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery"
- [2] IEEE286-2000, "Recommended Practice for Measurement of Power factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation".
- [3] IEEE1434-2000, "IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery".
- [4] Hafely Trench AG, Tettex Instruments Division, "Partial Discharge Detector TE571 operating instructions", switzerland, 1988.
- [5] I.M.Culbert, H.Dhirani, and G.C.Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines" (EPRI EL-5036, Vol16, June 1989)
- [6] B.K Gupta, and I.M.Culbert "Assessment of Insulation Condition in Rotating Machine Stators" (IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 7, No. 3, September 1992)