

대용량 수력발전기 고정자권선의 절연특성고찰

오봉근*, 이광호, 김현일, 변두균, 임기조**
한국수자원공사*, 충북대학교**

Insulation Characteristic of Stator Winding for Large Capacity Hydrogenerator

Bong-keun Oh*, Kwang-Ho Lee, Hyun-il Kim, Doo-Gyoon Byun, Kee-Joe Lim**
K-water*, Chungbuk National University**

Abstract - 수력발전기의 운전중 신뢰성 및 장기 사용된 발전기의 경우 노후도 평가를 위한 지표로 고정자권선의 물리적 절연상태를 평가하는 방법이 일반적으로 이용되고 있다. 시험방법은 크게 부분방전 특성을 검출하는 운전중(On-line) 진단기법과 정지중(Off-line) 진단기법이 있다. 운전중 진단기법은 발전기의 정지없이 상시 상태를 감시할 수 있는 장점이 있으므로 활용도가 증가되고 있고 정지중 진단기법은 고정자권선 절연상태를 정밀하게 평가할 수 있는 잘 알려진 시험법으로 권선의 절연상태를 모니터링하여 운영자에게 고장징후를 알려주고, 예측보전이 가능하도록 도움을 주고 있다. 이 논문에서는 장기간 운영된 대용량 수력발전기의 정지중 절연진단기법(성극지수, 교류전류, 유전정접, 부분방전) 결과의 통계적 추이변화 고찰을 통하여 대용량 수력발전기 고정자권선의 신뢰성평가를 실시하였다.

1. 서 론

전력공급의 증가와 더불어 전력공급의 신뢰성을 기반으로 하는 설비의 안정운영은 매우 중요한 요소가 되고있다. 장기간 사용된 수력발전 설비의 건전성에 대한 평가는 전력공급의 신뢰성뿐만 아니라, 적절한 유지보수와 장래에 막대한 비용이 수반되는 설비의 개·대체 의사결정 등 경제적인 운용에 있어서도 중요한 부분이다. 특히 수력발전기의 고정자권선의 물리적 상태는 발전기의 전체적인 수명을 결정하는 중요한 요소가 될 수 있으며, 일반적으로 고전압 대전류하에서 장기간 운용되는 수력발전기의 열화과정은 운전상태에서 복합적인 스트레스(열적, 전기적, 기계적, 환경적)에 의해 형성되고 절연물내의 점진적 열화로 인하여 고장으로 진행된다. 따라서 이러한 고정자권선의 절연열화상태 진단을 통한 추이변화는 고정자권선의 건전상태를 평가하는 중요한 지표가 될 수 있다. 또한 절연파괴에 의한 수력발전기의 고장은 설비에 치명적인 손상과 돌발정전 및 고장복구 등에 따른 경제적인 손실이 매우 크게 발생할 수 있으므로 발전기 권선절연의 건전상태를 주기적 진단을 통하여 변화 추이를 관찰함으로써 고정자권선절연의 상태를 평가할 수 있고 상태기 준유지보수를 가능하게 한다. 이 논문에서는 장기 사용된 수력발전기 고정자권선에 대하여 정지중 진단방법(성극지수, 교류전류, 유전정접, 부분방전)을 이용하여 진단한 결과의 추이변화 특성을 고찰하여 수력 발전기 고정자권선의 종합적 신뢰성을 평가하고자 한다.

2. 본 론

2.1 평가대상 설비특성 및 시험방법

2.1.1 설비특성

평가대상 수력발전기는 현재 다목적댐에서 운영중인 정격전압 11.0 kV급 이상의 대용량 수력발전기로 세부 설비사양 및 운전이력 특성은 표1 및 표2와 같다.

<표 1> 수력발전 사양

구 분	A-1, A-2	B-1, B-2	C-1, C-2
정격용량	50 MVA	110 MVA	50 MVA
정격전압	11.0 kV	15.4 kV	13.2 kV
정격전류	2625 A	4124 A	2187 A
극 수	38P	40P	48P
절연계급	B	B	B
설비제작	1975	1993	1980
제작사	Fuji	Fuji	Fuji

<표 2> 수력발전기 운전이력 특성

구 분	운전시간	기동정지횟수
A-1	62269 h	15135 회
A-2	61587 h	15299 회
B-1	53454 h	14129 회
B-2	37834 h	10563 회
C-1	54181 h	12692 회
C-2	56465 h	13316 회

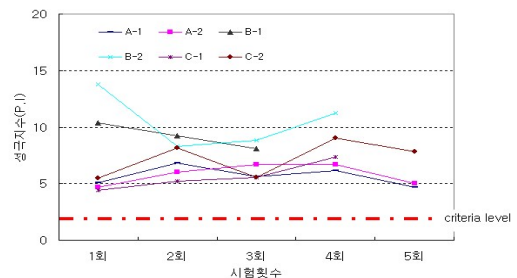
2.1.2 시험방법

절연시스템의 절연상태는 전기적인 시험에 의하여 가장 잘 평가될 수 있다. 회전기에 사용되는 절연시스템에 대한 이러한 시험들은 크게 두가지 방식으로 시험대상에 정격전압보다 높은 시험전압을 인가하여 절연물의 파괴유무로 설비의 사용가능여부를 판정하는 절연내력시험과 다양한 전기적 시험방법을 수행하여 절연물의 상태를 분석하는 절연진단시험으로 구분할 수 있다. 특히, 절연진단시험은 절연물의 오손, 흡습, 미소공극, 박리현상등과 같이 절연물을 열화시키는 현상들을 알 수 있으며, 대표적인 절연진단시험으로는 절연저항시험, 성극지수시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험이 있다. 본 논문에서는 수력발전기 고정자권선의 절연상태에 대한 데이터를 얻기 위해 약 5년 주기로 상기 설명한 시험항목에 대하여 절연진단시험을 수행하고 여기서 도출된 절연진단인자의 경향성을 분석하였다.

2.2 시험결과분석

2.2.1 성극지수시험결과

성극지수시험은 IEEE 43-2000을 준용하여 수행하였다. 시험대상설비에 직류시험전압 5000 V를 발전기의 도체와 대지간에 10분가 인가하여 절연물에 흐르는 누설전류를 측정하였다. 성극지수시험의 경우 권선 절연물의 흡습, 오손등에 의하여 누설전류가 충전전류와 흡습전류의 값보다 크면 충전전류와 절연저항은 시간에 따라 거의 변하지 않게 되는데 성극지수시험은 이러한 시간적 변화에 따른 누설전류의 변화량(1분경과후 누설전류측정값/10분경과 후 누설전류측정값의 비)을 측정하는 시험이다. 그림1은 시험대상설비에 대한 성극지수를 보여준다. IEEE 43-2000에서 B종 절연의 경우 성극지수가 2.0이상 이면 절연물은 양호한 것으로 판단하고 있어, 시험결과에서는 모두 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 시험회수마다 다소의 차이를 보이는 것은 측정환경(습도)에 의한 것으로 판단된다.

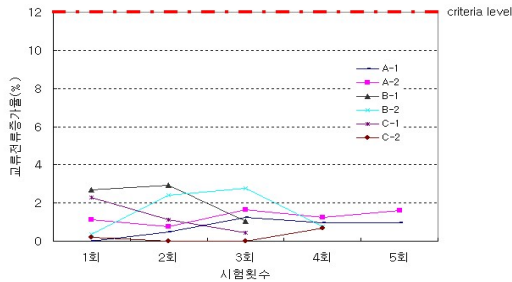


<그림 1> 성극지수(P.I.)시험결과와 추이그래프

2.2.2 교류전류시험결과

교류전류시험은 권선절연물에 교류시험전압을 인가하였을 때 흐르는 전류와 전압의 관계, 즉 I-V 특성으로부터 절연상태를 분석하는 시험으로 절연물내 결함이 존재하여 부분방전이 발생하면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가하는데 이러한 전압 및 전류 급증률로부터 절연물의 열화정도를 분석하는 방법이다.

교류전류시험은 발전기 정격전압까지 시험전압을 1 kV 단위로 상승시키면서 누설전류의 증가율을 측정하였다. 그림2는 시험대상 설비에 대하여 시험횟수별로 측정된 교류전류 증가율을 보여준다. 모든 발전기의 교류전류증가율이 4 % 이내의 값에서 증가특성없이 안정된 경향이 나타났다. 현재까지 교류전류시험에 대하여 규정화된 허용기준은 없지만, 일본 전력중앙연구소보고^[7]에 의하면 교류전류증가율의 허용기준을 12 % 이하로 제시하고 있어 이 값을 기준으로 하면, 현재 시험대상발전기는 양호한 절연상태인 것으로 사료된다.

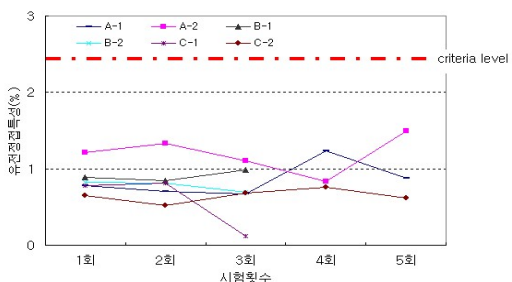


〈그림 2〉 교류전류시험결과 추이그래프

2.2.3 유전정점시험결과

유전정점시험에서 사용되는 유전손실계수(tanδ)는 권선 절연물의 특성 값이며 절연물의 전기적 손실정도를 나타낸다. 절연물에 결함이 없을 경우 유전손실은 인가전압이 상승하여도 증가하지 않지만, 고정자권선의 주절연이나 주절연과 철심사이에 공극이 있어 권선에 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생하고 결국 유전손실도 증가하게 된다. 유전손실계수는 인가전압에 따라 용량성전류와 손실전류의 비율을 측정하는 것으로 이 값은 대상절연물의 평균손실을 나타내지만 국부적인 결함을 나타내지는 못한다.

유전정점시험은 교류전류시험에서와 마찬가지로 선간전압까지 인가하여 $\Delta \tan\delta$ (경계시험전압에서의 tanδ - 시험전압 2kV에서의 tanδ)를 구하였으며 그림 3은 시험대상설비의 시험횟수에 대한 경향성을 보여준다. 참고논문에서 제시하는 $\Delta \tan\delta$ 의 허용기준은 2.5 % 이내로 제시하고 있으며^[7], 이를 참고하면 측정값은 허용범위에 있고, 시험횟수를 기준으로 근소한 범위내에서 경향성을 유지하는 것으로 나타났다. 특히, C-1 발전기의 경우 3회 측정값이 기존 시험결과보다 낮은 값으로 측정되었는데 그 이유는 해당 발전기에 대한 절연보강 실시 후 수행된 경우로 절연보강이 절연물의 외적 열화요인을 제거하는데 다소 효과가 있음을 나타내는 좋은 사례로 판단된다.

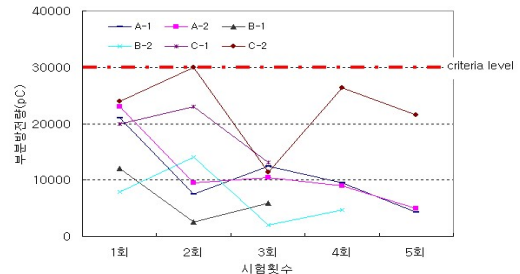


〈그림 3〉 유전정점시험결과 추이그래프

2.2.4 부분방전시험결과

부분방전시험은 고전압 절연물내 공극등과 같은 결함부에 고전계가 형성되어 국부적인 절연파괴에 의해 고정자권선을 통해 전송되는 빠른 펄스를 측정하여 절연물의 국부적인 열화상태를 분석할 수 있다. 부분방전이 발생하면 오존, 산화질소, 불안정한 여자 및 전리된 이온이 형성되어 공극주변의 절연체에 화학반응을 일으켜 절연체가 열화되므로 부분방전과 절연수명은 깊은 상관관계가 있다.

부분방전시험은 발전기의 상전압에 해당하는 $E_0(E/\sqrt{3})$ 의 시험전압을 인가하고 부분방전측정기(PD Detector)를 이용하여 최대 부분방전량을 측정하였다. 그림 4는 시험횟수에 대한 부분방전량의 경향성을 보여준다. 시험결과를 참고논문에서 제시하는 허용범위(30,000 pC) 이내를 유지하고 있지만^[7], 시험시마다의 측정결과가 다소 편차가 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 특징은 부분방전 시험 특성이 시험대상 설비의 오손상태, 상이한 측정장비 사용, 측정신호 보정(calibration), 노이즈문제 등 주변 환경에 따라 민감하게 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 부분방전 시험의 측정 및 평가에 있어 동일한 측정장비 사용, 시험환경 및 기술자의 숙련도도 신뢰성있는 시험에 중요한 인자임을 알 수 있다.



〈그림 4〉 부분방전량 최대치 결과 추이그래프

2.2.5 시험결과분석

직류시험인 성극지수 시험에서는 양호한 절연특성을 유지하고 있었다. 교류시험의 각 시험별 세부 시험결과 특성을 살펴보면 유전정점 및 교류전류 시험의 특성은 근소한 오차 범위내에서 추이를 유지하고 있으며, 상호 서로 유사한 상관관계의 특성을 나타내고 있으나 부분방전시험결과 각 시험시마다 편차가 발전기에 따라 상당히 크게 나타나는 것으로 조사되었다. 이는 부분방전 시험 특성이 설비의 오손상태, 기타 주변환경 등에 상당히 크게 영향을 받음에 기인한 것으로 보인다. 따라서 측정 및 평가에 있어 상당한 어려움이 따르고 세심한 주의를 기울이지 못할 경우 오류를 범할 우려가 있을 것으로 사료된다. 따라서 부분방전량의 최대치기뿐 아니라 부분방전의 분포패턴 및 위상 등 다양한 분석을 통하여 평가의 신뢰도를 높이기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 결 론

산업현장에서 약 15~33년 동안 장기간 운영되고 있는 대용량 수력발전기에 대하여 수회에 걸쳐 주기적으로 고정자권선의 절연상태에 대하여 실시한 각 시험결과의 추이변화 상태를 살펴보면, 전반적으로 절연물의 종합적 신뢰도는 현재의 운영에 이상이 없는 양호한 것으로 평가된다. 이와 같은 시험방법을 이용한 발전기의 절연상태 관리로 운영중 안정성 확보와 향후 지속적인 데이터의 경향관리를 통하여 설비의 개·대체 시기결정 등 수명관리에도 유용하게 이용하므로써 합리적인 자산관리의 측면에서도 큰 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 시험조건 및 시험방법의 조건을 항상 일정하게 유지가 어렵기 때문에 보다 신뢰성 있는 데이터 관리를 위해서는 상시 부분방전의 추이변화 감시를 통한 평가방법을 병행하므로써 정기중 진단시험 방법의 단점을 보완 할 수 있으므로 평가결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std 1434-2000, "IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery"
- [2] IEC 60270, "Partial discharge measurements", 1996.
- [3] I.M. Culbert, H. Dhirani and G.C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI publication EL-5036, 1989
- [4] IEEE Std 43-2000, 『IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery』, 2000.3
- [5] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21 No.6, 1986
- [6] Y. Ikeda and H. Fukagawa "A Method for Diagnosing the Insulation Deterioration in Mica-Resin Insulated Stator Windings of Generator", 전력중앙연구소보고, W88046 1988. 6.
- [7] 池田, "水車發電機 Coil의 劣化豫知와 壽命豫測의 調査研究", 전력중앙연구소보고, W95517 1996. 4.