한국신·재생에너지학회 2008년도 춘계학술대회논문집 pp.142~145

소수력발전기 절연특성분석

*오 봉근[1], 장 정호[2], 이 광호[3], **강 동식[4]

Analysis of Insulation Characteristic for Small Hydro Generator

*Bongkeun Oh, Jeongho Chang, Kwangho Lee, **Dongsik Kang

Key words : Small Hydro Generator(소수력발전기), Stator Winding Insulation(고정자권선절연), Insulation Diagnosis test(절연진단시험)

Abstract : Electrical insulation of small hydro generator stator winding is one of the most important parts in generator facilities. Some stator winding insulation problems can be identified through analysis of insulation diagnostic test. So, Diagnosis of stator winding insulation is an important measure of ensuring the safe operation and extending the remaining life of small hydro generator. This paper presents case studies of insulation failure in generator stator windings and the results of insulation diagnostic test for small hydro generator stator windings. Especially, Conducting the insulation diagnostic test before the generator installed in site is very important process to keep the good insulation condition in service.

1. 서 론

국내 소수력발전은 현재 시설용량기준 57 MW 정도 운영중에 있으며, 연간 약 1억5천 kWh의 전력을 생산하고 있다. 특히, 소수력발전은 공해가 없는 청정에너지로 농업용 저수지, 하수처리장, 정수장, 다목적댐의 용수로 등에도 적용이 가능하여 국내의 경우 1,500 MW 정도의 부존량이 있으며 다른 대체 에너지원에 비해 높은 에너지 밀도를 가지고 있어 개발가치가 큰 부존자원으로 평가되고 있다. 우리공사에서 운영중인 소수력 발전소는 13개소로 시설용량기준 15 MW로 전체 소수력 시설용량의 23 %를 차지하고 있다. 이러한 소수력 발전기는 회전기기로 발전기 고정자권선은 운영중에 전기적, 기계적, 열적, 환경적 영향에 의한 다양한 스트레스에 노출되어 있다[(1,2)]. 이러한 스트레스들은 절연시스템의 국부적인 전계의 증가를 발생시켜 절연물의 절연내력과 절연특성을 점차 변화시키는데 정격전압이 1 kV보다 낮은 발전기의 경우 직류시험에 의해 일반적인 절연상태를 점검 할 수 있으며, 3.3 kV급 이상의 발전기 권선 절연물에 대해서는 직류 및 다양한 교류시험 방법으로 절연물의 열화상태 분석이 가능하다. 본 논문에서는 소수력발전기의 절연특성을 분석하기 위하여 발전기에서 발생한 고정자권선의 절연고장사례와 현재 우리공사에서 운영중인 소수력발전기에 대한 절연진단시험 결과를 분석하였으며, 신규설치 발전기에 대한 초기 절연진단시험의 중요성에 대하여 알아보고자 한다.

2. 소수력발전기 절연고장사례

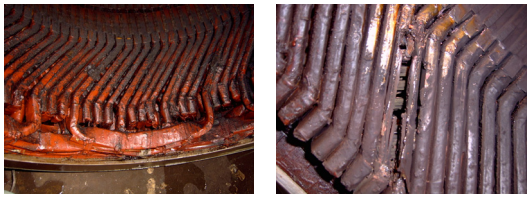
우리공사에서 운전중인 소수력발전기는 전압크기를 기준으로 보면, 1 kV 이하의 저전압으로 운영되는 발전기가 11대, 3.3 kV 급 고전압 발전기가 12대로 총 23대의 소수력발전기가 운영중에 있다. 소수력발전기의 주요 절연고장원인을 알아보기 위해 우리공사에서 발생한 절연고장사례를 조사하여 원인을 분석하였다.

1) 한국수자원공사 수자원연구원
E-mail : bongja@kwater.or.kr
Tel : (042)870-7672 Fax : (042)870-7699
2) 한국수자원공사 수자원연구원
E-mail : chany@kwater.or.kr
Tel : (042)870-7661 Fax : (042)870-7699
3) 한국수자원공사 수자원연구원
E-mail : khleee@kwater.or.kr
Tel : (042)870-7650 Fax : (042)870-7699
4) 한국전기연구원
E-mail : dskang@keri.re.kr
Tel : (055)280-1573 Fax : (055)280-1589

2.1 절연고장사례분석

2.2.1 고장사례 1 :

소수력발전기 A는 380 V, 500 kW로 설치 후 4년만에 절연고장이 발생하였다. Fig. 1은 고장원인을 조사하기 위하여 회전자 인출후 권선단말부의 절연파괴부위를 보여준다. Fig. 1(b)에서 보듯이 고정자권선 단말권선부에서 상간절연이 파괴된 것으로 나타났다. 다른 회전기 권선과 비교하여 특이한 것은 권선단말부의 권선간 지지부(bracing) 없이 제작되어 있었고, 권선표면이 상당히 흡습된 것으로 나타났다. 따라서 발전기 운전중 발생하는 전자기력에의해 권선단말부에서 기계적 진동이 발생하고, 진동에 의해 권선간 절연물이 마모되고 흡습환경이 열화를 가속시켜 상간에 도전로가 형성되어 최종적으로 상간절연파괴가 발생한 것으로 사료된다. 대상 발전기는 저압으로 고정자권선 초기절연내력은 양호하지만 기계적인 진동과 주변환경의 흡습조건은 절연물의 열화를 급속히 진전시킬 수 있는 요소임을 알 수 있는 좋은 사례로 판단된다.

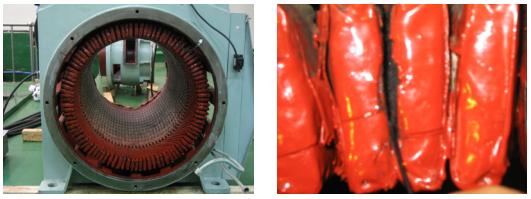


(a) 권선의 흡습상태 (b) 상간절연파괴위치

Fig. 1 절연고장권선 사진

2.2.2 고장사례 2 :

소수력발전기 B는 380 V, 500 kW로 설치후 7년만에 절연고장이 발생하였다. Fig. 2는 고정자권선 절연물에 대한 육안점검 중 발견한 권선 단부의 탄흔을 보여준다. 분석결과 턴간절연파괴에 의한 국부과열로 절연물이 탄화된 것으로 보이며 운전전압이 저압으로 절연파괴 사고까지는 다행히 진전되지 않았다. 대상 발전기의 경우도 권선단말간을 지지할 수 있는 지지물(bracing)이 설치되지 않아 권선간 진동에 의한 절연물 마모가 주요원인으로 사료되었다.

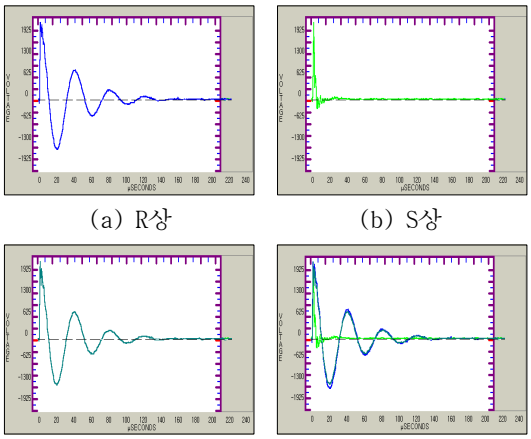


(a) 고정자권선 (b) 턴간절연탄화사진

Fig. 2 절연고장권선 사진

2.2.3 고장사례 3 :

소수력발전기 C는 600 V, 556 kW로 설치후 5년만에 절연고장이 발생하였다. Fig. 3은 발전기 고정자권선에 대한 써지(Surge) 시험결과를 보여준다. 써지시험은 턴간단락, 지락등 권선절연물의 절연상태를 진단하는 시험으로 Fig. 3(b)와 같이 고장권선의 경우 건전권선에 비하여 써지파형이 왼쪽으로 이동되고 주기가 짧은 특성이 나타난다. 따라서 S상 권선의 절연에 이상이 있는 것으로 나타났다. 고장 발전기의 경우 운전중 외부정전사고에 의해 년평균 50회 이상 비상정지가 빈번히 발생하고, 기계적 고장(베어링, 커플링, 기어부분)도 10회 정도 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 비상정지등 급격한 부하변동에 따른 과도한 진동, 과도전압등 전기 기계적 스트레스가 반복적으로 발생하여 고정자권선 절연물의 열화가 급속히 진전되어 절연고장이 발생한 것으로 사료된다.



(a) R상 (b) S상

(c) T상 (d)상별 응답신호비교

Fig. 3 상별 써지(Surge)시험결과

2.2 고장사례분석결과

소수력발전기에 대한 고장사례 분석결과 고전압전동기 보다는 저압 전동기에서 주로 절연고장이 발생한 것으로 나타났다. 비록 저압으로 운영되지만 상대적으로 운전전류가 크고 고속으로 회전하기 때문에 권선온도상승에 따른 도체와 절연물간의 열팽창계수 차이에 의한 절연물의 열적열화, 권선진동에 의한 기계적 열화, 윤활오일의 침투등 권선의 흡습에 따른 환경적 열화등이 권선 절연물의 열화진전을 가속킨 것으로 사료된다. 이러한 권선 절연물의 열화상태를 알기위해서는 절연진단시험이 필요한데, 저압전동기의 경우에는 직류시험에 의한 절연저항 및 성극지수시험만이 가능하여 정확한 절연물의 열화상태 분석하기에는 한계가 있다. 반면 고전압 전동기의 경우에는 직류시험을 포함하여 교류 고전압을 인가하여 시험할 수 있는 교류전류, 유전정접, 부분방전시험등이 가능하여 절연물의 열화상태관리를 보다 효율적으로 분석이 가능하다. 따라서, 우리 공사에서 운영중인 고전압 소수력발전기에 대하여 수행한 절연진단시험결과를 분석하였다.

3. 소수력발전기 절연진단시험

절연시스템의 절연상태는 전기적인 시험에 의하여 가장 잘 평가된다. 회전기에 사용되는 절연시스템에 대한 이러한 시험들은 크게 두가지

방식으로 절연내력시험과 절연물의 특성을 측정하는 절연진단시험이다. 절연내력시험은 정격전압보다 높은 교류 또는 직류전압을 인가하여 사용가능여부를 판정하는 시험이지만, 절연물의 절연상태를 알 수는 없다. 반면 절연진단시험의 경우 절연물의 흡습, 오손, 미소공극, 박리현상등과 같이 절연물을 열화시키는 현상들을 알 수 있다. 대표적인 절연진단시험으로는 절연저항시험, 성극지수시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험이 있다. 본 논문에서는 시험대상 전동기에 대하여 절연저항시험을 제외한 4가지 절연진단시험을 수행하고, 여기서 도출된 절연진단인자를 분석하였다. 특히, 발전기 신규제작 후 절연진단시험을 실시하여 소수력발전기 권선의 건전여부를 진단하고 현장에 설치한 발전기(A~E 발전기)와 절연진단시험 없이 설치된 발전기(F~I 발전기)를 구분하여 현재시점에서 절연진단시험의 절연특성값을 비교하였다.

3.1 절연진단시험

직류시험전압을 인가하여 시험하는 절연저항과 성극지수시험은 노출된 권선표면의 오손과 습기를 감지할 수 있는 시험법으로 권선이 깨지거나, 균열부분이 있을 경우에 더욱 민감하게 측정된다. 절연저항측정방법은 직류시험전압을 인가 후 일정시간(통상1분)이 경과하는 순간의 값을 계측하여 평가한다. 그리고 권선 절연물의 흡습, 오손등에 의하여 누설전류가 충전전류와 흡습전류의 값보다 크면 전전류와 절연저항은 시간에 따라 거의 변하기 않게 되는데 성극지수시험은 이러한 시간적 변화에 따른 누설전류의 변화량(1분후누설전류측정값/10분후누설전류측정값)을 측정하는 시험이다[3].

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 흡습 및 열화의 정도를 분석할 수 있다. 유전정접시험에서 사용되는 유전손실계수(Dissipation factor, tanδ)는 권선 절연물의 특성값이며 절연물의 전기적 손실정도를 나타내는 것이다. 절연물이 완전할 경우 유전손실은 인가전압이 증가하여도 증가하지 않는다. 하지만 고정자권선의 주절연이나 주절연과 철심사이에 공극(void)이 있어 권선에 고전압이 인가되면 이들 공극에서 부분방전이 발생하고 결국 유전손실도 증가하게 된다. 유전손실계수(tanδ)는 인가전압(V)에 따라 용량성전류(I_C)와 손실전류(I_R)의 비율을 측정하는 것으로 이 값은 대상절연물의 평균손실을 나타내지만, 국부적인 결함을 나타내지는 못한다[4].

반면, 부분방전시험은 고전압 절연물내 공극등과 같은 결함부에 고전계가 형성되어 국부적인 절연파괴에 의해 고정자권선을 통해 전송되는 빠른펄스를 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[5].

3.2 절연진단시험결과

Fig. 4는 직류시험 중 성극지수 시험결과를 보여준다. IEEE43-2000에서는 성극지수가 2.0 이상이면 절연물에 흡습특성이 없는 건전한 상태를 의미한다. 시험대상 발전기의 성극지수는 2.0 에서 6.9의 값으로 직류시험에 의한 권선의 절연특성은 양호하였다. Fig. 5는 교류시험전압을 인가하여 측정한 교류전류 및 유전정접시험결과를 보여준다. 시험전압을 0.5 kV 단위로 정격전압까지 상승시키면서 누설전류 증가율과와 유전손실계수(tanδ)를 측정하고 누설전류의 증가율과 유전손실계수의 변화(△tanδ)를 유도하였다. 측정결과 대상발전기별로 두 시험에서 유사한 특성값을 보이는 것으로 나타났다. A~E 발전기는 2 % 이내의 값을 가지고 있으며, F~I 발전기는 4~8 %의 값으로 약 2배에서 4배 정도 상대적으로 절연특성값이 크게 측정되었다. 따라서, 신규제작 후 진단시험을 수행하지 않은 F~I 발전기가 전체적인 절연물의 손실량이 큰 것으로 나타났다. Fig. 6은 부분방전시험결과로 Fig. 5의 시험결과와 유사한 분포특성이 나타났다. A~E 발전기는 3 nC 이내의 값을 가지고 있으며, F~I 발전기는 28.5~40.9 nC의 값으로 약 10배 이상 상대적으로 최대부분방전량이 크게 측정되어 신규제작 후 진단시험을 수행하지 않은 F~I 발전기에서 부분방전도 절연물에서 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 교류시험에서는 A~E 발전기의 경우는 절연물의 유전손실량도 적고, 부분방전크기도 작아 절연물의 열화정도가 미약한 것으로 나타났지만, F~I 발전기는 상대적으로 절연특성값이 크게 나타나 절연물의 열화가 진전된 것으로 사료된다.

이렇게 발전기 권선에 대한 절연특성값의 차이가 많이 발생하는 이유는 앞절에서 설명한것과 같이 A~E 발전기는 최근 5년이내에 설치된 발전기로 신규제작 후 절연진단시험을 통하여 절연물의 건전성 여부를 점검하고 절연특성값의 허용기준을 만족하였을 경우 현장에 설치되었다. 하지만, F~I 발전기는 이러한 기준이 정립되기 전에 이미 설치된 발전기로 절연진단시험 없이 절연저항 및 절연내력시험만을 수행하고 설치되어 발전기 권선 절연물의 초기절연상태 관리가 미흡하여 나타난 현상으로 판단된다.

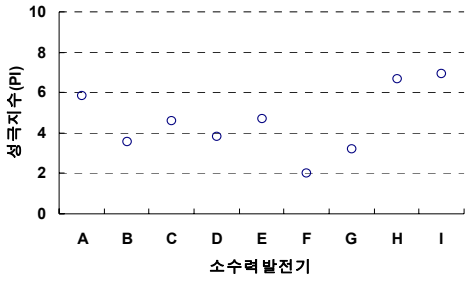


Fig. 4 성극지수 시험결과

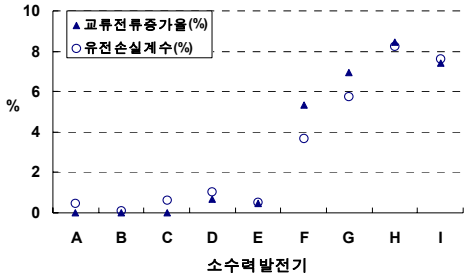


Fig. 5 교류전류 및 유전정접 시험결과

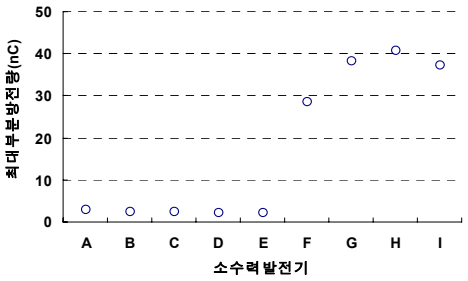


Fig. 6 부분방전 시험결과

Fig. 7은 이렇게 초기특성시험의 중요성을 알 수 있는 예를 보여준다. C~E 발전기의 경우 신규제작 후 초기 절연진단시험에서 최대부분방전량의 크기가 기준값을 초과하였다. 측정결과를 근거로 제작사에 권선 절연물의 보수를 요청하고 보수 후 부분방전시험을 수행한 결과 최대부분방전량의 크기가 C,D 발전기는 30 nF에서 3 nF으로 E 발전기는 10 nF에서 2.5 nF으로 크게 감소되었다. Fig. 8은 F,G 발전기에 대하여 절연보강(절연크리닝 및 바니쉬 도포)전·후 부분방전 크기의 변화를 보여준다. 절연보강 후 F 발전기는 3 nF, G 발전기는 5 nF정도 최대부분방전량의 크기가 감소되었다. 절연보강의 경우 내부 절연물의 열화요인을 변화시킬 수는 없지만, 절연물 외부에 의해 발생하는 열화요인은 효과적으로 감소시킬 수 있으므로, 절연보강 후 최대부분방전량의 크기가 감소되는 특성이 나타난 것으로 판단된다.

4. 시험분석 결과 및 고찰

소수력발전기 사고사례의 경우 사용전압이 저압이라도 운영조건에 따라 절연고장이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 열적스트레스 및 기계적 스트레스에 많이 노출되어 절연물의 열화가 급속히 진행되었음을 알 수 있었다. 그리고 신규설치 고전압 소수력 발전기에 대한 절연진단시험 결과에서는 초기 진단시험으로 권선절연물의 건전성 평가 수행여부에 따라 절연특성값의 차이가 크게 나타났으며, 이는 권선절연물의 열화정도와도 밀접한 관계가 있음을 의미한다. 따라서 초기 절연시험은 열화요인을 사전에 차단함으로써 설치 후 설비의 안정운영 및 수명관리에 매우 중요한 절차임을 알 수 있었다.

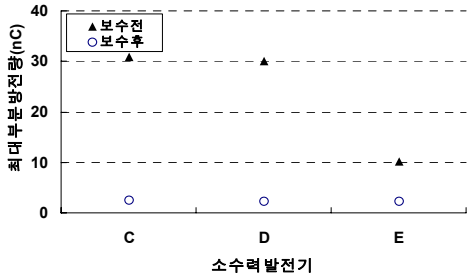


Fig. 7 절연보수 전·후 부분방전 시험결과

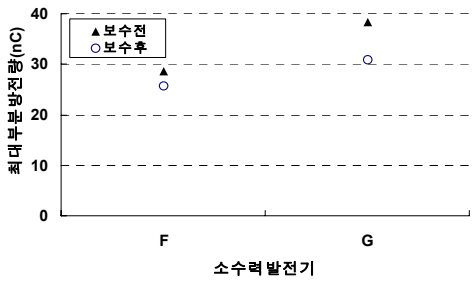


Fig. 8 절연보강 전·후 부분방전 시험결과

4. 결 론

소수력발전기 저압권선에 대한 절연상태관리는 진단시험으로는 한계가 있으므로 정기점검시 세밀한 육안점검이 필요하며 제작시 기계적진동 및 온도특성을 고려한 설계 적용여부 검토는 소수력 발전기 운영에 매우 중요한 요소로 판단된다. 고전압 권선 절연물에 대하여는 설치전 초기 절연시험을 통한 열화요인를 제거하고, 설치 후에는 설비운영의 안정성 확보 및 수명연장을 위하여 주기적인 절연진단을 실시하고 권선열화상태에 대한 경향관리를 근거로 체계적인 보수계획을 수립하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

References

[1] B. K. Gupta, G. C. Stone, J. Stein, "Use of AC and DC Hipot Tests to Assess Stator Winding Insulation," Pros, IEEE Electrical Insulation Conference, Chicago, 605-608.
[2] I. M. Culbert, H. Khirani, G. C. Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines," EL-5036, 16, EPRI, 5-14.
[3] IEEE 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery,"
[4] IEEE 286-2000, "Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation,"
[5] IEC 60270, 2000, "High-voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements,"