

고압전동기 고정자 권선에서 비파괴와 파괴시험의 비교

주영호
한전 전력연구원

Comparison of Nondestructive and Destructive Tests in High Voltage Motor Stator Windings

Young-Ho Ju
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Nondestructive and destructive tests were performed the stator windings of three high voltage motors prior to the rewind. Nondestructive tests included ac current increase rate(ΔI), dissipation factor($\Delta \tan \delta$), and maximum partial discharge(Qm). The destructive tests included breakdown at three phases with ac voltage. Flashover occurred between the connected winding of endwinding and the stator frame. In two cases creeping discharge occurred between the individual phase windings and the wedges in the stator ends. The results of destructive tests could rarely be determined the breakdown voltage.

1. 서 론

산업현장의 동력 에너지원으로 사용되고 있는 고압전동기는 사용년수가 증가함에 따라 열적, 기계적, 전기적, 환경적 열화요인들이 복합적으로 작용하여 열화를 진전시키게 되므로 절연내력의 감소는 피할 수 없다. 특히, 발전소 운전시스템에서 각종 펌프 또는 송풍기를 구동하는 고압전동기는 운전 특성상 단위용량이 커서 높은 기동전류와 기동 토크가 필요하고, 주말기동정지(WSS), 일일기동정지(DSS) 등 가혹한 운전환경으로 인해 열화피로(aging fatigue) 누적이 심하여 절연파괴 가능성이 타 산업설비에 비해 높다고 할 수 있다.

일본전기학회에서 조사한 자료에 의하면 고압전동기는 운전개시후 6년이 경과하면 절연열화에 의한 사고가 증가하기 시작하고 10년 이후부터 가장 많은 사고원인이 되고 있으며 20년 이후에는 기기의 수명점에 들어가는 것으로 보고되고 있다. 고압전동기는 대형화, 자동화되고 있는 산업설비의 핵심기로서 이의 돌발적인 운전정지는 제품생산에 막대한 지장을 초래하거나 생산중인 제품의 품질을 심각하게 저하시킬 수 있다. 따라서 이러한 절연파괴에 의한 고장을 사전에 예방하기 위해서는 철저한 예방정비와 과학적인 진단을 통해 전동기의 잔존수명을 예측하고, 각 전동기의 절연열화 상태를 정량적으로 관리하는 등 적극적인 고장예방 노력이 필요하다고 할 수 있다.

절연진단 시험법으로는 새로 제작된 발전기 또는 고압전동기 권선의 품질보증시험 수단으로 또는 권선의 정비후 복구여부를 확인하기 위한 방법으로 정격전압의 1.25 ~ 1.7배의 DC 또는 AC 고전압을 인가하는 절연내력시험(IEEE Std. 95-1977)이 사용되고 있으나[1] 공장시험, 검수시험 등 특별한 경우에 사용되는 방법이며 실제 산업현장에 설치되어 운전중인 기기에는 절연물에 상당한 손상을 주거나 절연상태를

악화시킬 수 있기 때문에 극히 제한적으로 사용되고 있다. 일반적으로 국내의 산업현장에서 사용중에 있는 고압전동기에 대하여는 절연저항시험(megger test), 직류전류시험(polarization index test), 교류전류시험(ac current test), 유전정접시험($\tan \delta$ test), 부분방전시험(partial discharge test) 등을 시행하는 절연열화 진단시험이 사용되고 있다. 특별히 일본의 중전기제조사인 히타치(Hitachi)사에서 실험을 통해 발표한 Discharge-map기법[2]이 정확도에 대한 논란에도 불구하고 전동기에 대한 잔여절연내력을 정량적으로 추정할 수 있다는 장점 때문에 우리나라에 도입되어 수명판정의 파라메타로서 산업현장에 적용되고 있다.

본 논문에서는 발전소의 고압전동기를 대상으로 비파괴시험 방법인 절연열화진단을 시행하여 열화판정 기준, 또는 D-map기법에 의해 불량(또는 한계수명)으로 판정된 3대의 고압전동기 고정자 권선에서 각각 실제 절연파괴시험을 시행하고 그 결과와 당해 전동기의 절연열화 진단시험에서 나타난 절연특성과 열화판정기준 사이의 상관성 그리고 D-map에 의해 추정된 잔여절연내력과의 차이점 등을 비교, 분석하였다.

2. 시험방법

절연열화 진단시험에 사용된 장비는 제원별로 스위스 Tettex instruments사의 12kV급 HV supply system(type 5283) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector : PDD, TE 571)와 독일 LDIC의 16kV급 HV control system(LDPS-25) 및 부분방전 측정기(PDD, LDS-5)의 2종류가 사용되었고, 절연파괴시험에는 50kV급, 30kV급의 2종류의 내압시험기를 사용하였다.

일차적으로 3대의 시험대상 전동기에 대하여 비파괴 절연열화 진단시험을 시행하여 절연특성값을 확보하고 절연파괴시험은 각각의 전동기에 대하여 국제규격인 IEEE에서 규정하고 있는 단계적 전압상승 파괴시험법과 상용주파 단시간 파괴시험법을 적용하였다.

3. 시험결과 및 고찰

운전 경과년수가 각각 2.3년, 2.6년, 18년이 지난 고압전동기에 대하여 절연파괴시험 결과와 절연열화 특성, 그리고 상호간의 상관관계를 비교, 분석하였다. 표 1은 각 시험대상 전동기의 사양을 나타냈다. 실제 절연파괴시험은 서로 다른 특별한 목적, 즉 1대는 D-map 적용의 타당성 검증을 위해, 나머지 2대는 절연열화 진단결과와 신뢰성 검증을 위해 시험시기와

장소를 달리하여 시행되었으며 편의상 시험목적별로 나누어 분석하였다.

표 1. 시험대상 전동기의 사양

기기명	정격 전압	정격 용량	절연 방식	제작사
COP-01P	13.2kV	1,773kW	F	ABB
Pulv. A	6.6kV	375kW	F	효성
Ash HP	6.6kV	600kW	F	SIEMENS

3.1 D-map에 의한 분석

전동기 COP-01P는 원자력발전소의 급수펌프 구동용 전동기로서 '90년에 ABB사에서 제작하여 운전기간이 2년 3개월인 전동기이다. 같은 시기에 설치된 동종의 타 전동기에서의 절연불량이 발견되어 동 전동기에 대한 절연상태를 확인하기 위해 절연열화진단을 시행하였으며 표 2에서 시험결과를 나타냈다. D-map에 의한 잔여절연내력을 추정한 결과 23%로 나타나 절연불량으로 판정되어 교체('97. 3)된 전동기로서 절연내력의 검증을 위해 절연파괴시험('99. 2)을 시행하였다. 시험은 50kV급의 내압시험기로 정격전압 인가 후 5kV씩 상승시키면서 1분간 유지하는 방법을 사용하였으며 내전압시험기의 용량부족으로 최대 48kV까지 인가하였으며 최종 절연파괴전압은 확인하지 못하였다. 절연파괴전압 인가시 측정된 누설전류는 표 3에 나타냈다. 이 전동기는 정격전압의 약 3.6배까지 절연내력이 유지되고 있는 아직 건전한 전동기로 확인되었으며 건전한 전동기가 불량으로 판정된 원인을 분석한 결과 D-map의 요소함수인 누설전류(I)와 유전정접($\tan \delta$)을 시험여건상(누설전류 변화율과 과다) 불가피하게 상전압($E/\sqrt{3}$)에서 측정하고 정격전압(E)의 누설전류와 유전정접을 추정하여 적용함으로써 발생한 오차에 기인한 것으로 분석되었다. 따라서 D-map기법의 적용에 있어서 추정치가 아닌 측정치를 사용할 경우 부정확한 결과가 초래할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 절연파괴시험 직전에 규정된 시험전압을 인가하여 실시한 절연진단시험(표 2의 2차시험 참조)에서 측정된 데이터로 D-map의 잔여절연내력을 추정한 결과 46.9%로 정격전압의 2배 정도의 절연내력을 가지고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 절연파괴시험

표 2. COP-01P의 절연진단 결과

구분	ΔI (%)	$\Delta \tan \delta$ (%)	Q_{max} (pC)
1차진단 ('97. 3)	21.01	4.685	25,000
2차진단 ('99. 2)	12.82	-0.61	22,000

주) 1차진단은 최초 절연진단 결과
2차진단은 파괴시험전 확인진단 결과

표 3. COP-01P의 누설전류 측정

인가전압 (kV)	20	25	30	35	40	45	48
누설전류 (A)	1.11	1.43	1.75	2.15	2.44	2.90	3.17

결과에서 이 전동기는 정격전압의 3.6배의 절연내력을 가지고 있었고 실제 절연내력과 D-map에 의한 추정치 사이에는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이것은 측정오차를 고려하더라도 D-map기법이 그 동안 발전해 온 절연재료 기술, 절연설계, 제작기술 및 제작사별 절연기술 특성차이 등을 반영하지 못하고 있는 것에 기인한 것으로 분석된다.

절연열화 특성에서 교류전류증가율(ΔI)은 12.82%로 판정기준(<12%) [3, 4] 이상으로 나타나기 때문에 불량상태로 분석되었다. 이것은 전동기의 구조상 외부 이물질이 전동기 내부로 쉽게 유입되도록 되어있어 권선이 전반적으로 오손되어 있거나 웻지이완, 전계완화층 손상, 도체와 슬롯사이의 이완 등으로 인해 절연시스템이 전기적으로 불안정한 상태에 있는 것으로 분석된다. $\Delta \tan \delta$ 는 -0.61%로 측정되었으며 이것은 판정기준(<6.5) 이하로 절연상태가 불량한 것은 아니지만 $\tan \delta$ 가 15% 정도를 유지하고 있어 정상적인 상태는 아니다. 제작사 절연시스템의 특성을 고려하더라도 일반적으로 건전한 마이카/에폭시 절연물의 $\Delta \tan \delta$ 는 1%, $\tan \delta$ 가 0.5% 내외인 점을 감안하면 크게 높은 수치이며 이것은 전동기 전체의 절연의 조성이 잘못되어 있거나 권선 단말부위의 오염 또는 반대편층의 손상에 의한 열화가 시작되고 있는 것으로 분석된다. 부분방전의 크기는 22,000pC로 판정기준(<30,000pC) 이내이나 주의를 필요(>10,000pC)로 하는 영역에 있으며 운전초기치에 대한 정보가 없어 예측이 어렵지만 절연열화진단 결과를 종합하면 이 전동기는 오손 및 구조상의 미흡(제작, 조립과정의 결함 등)에 의해 절연특성이 나쁘게 나타나고 있으나 절연열화가 심각하게 진행된 상태는 아니며 따라서 절연파괴시험에서도 정상적인 절연내력을 유지될 수 있었던 것으로 분석된다. 그러나 구조상의 결함으로 인해 절연열화의 진행속도는 정상적인 전동기에 비해 빠르게 나타날 것으로 판단된다.

3.2 절연열화 분석

표 4는 Pulv. A와 Ash HP A의 절연진단 결과를 나타냈으며, 각각 석탄화력발전소의 미분기 및 회이송 펌프 구동용 전동기로서 Pulv. A는 '95년 12월에 효성중공업에서 제작하여 운전기간이 2년 8개월 경과된 국산전동기이고, Ash HP A는 '80년에 SIEMENS에서 제작하여 운전기간은 약 18년이며 '90년에 권선을 교체하고, '97년에 절연보강을 시행한 전동기이다. 이 전동기들은 주기적인 절연상태를 확인하기 위해 '99년 계획예방정비기간중에 절연열화 진단시험을 실시한 결과 불량으로 판정[5]되어 권선교체가 결정되었고 판정결과의 검증을 위해 전동기 2대에 대하여 재권선 작업전에 절연파괴시험('99. 6월)을 시행하였다. 시험은 회전자를 인출한 상태에서 30kV급의 내압시험기로 먼저 절연내력시험(2E+1)을 실시한후 2kV씩 상승시키면서 10초간 유지하는 방법을 사용하였으며 전동기의 침식손상을 방지하기 위해 최종 절연파괴전압까지는 상승시키지 못하였다. 표 5와 표 6은 Pulv. A와 Ash HP A에서 절연파괴전압 인가시 측정된 누설전류를 나타냈다.

표 4. Pulv. A와 Ash HP A의 절연진단 결과

구분	ΔI (%)	$\Delta \tan \delta$ (%)	Q_{max} (pC)
Pulv. A	17.44	11.49	25,000
Ash HP	13.38	7.181	150,000

표 5. Pulv. A의 누설전류 측정

인가전압 (kV)	6	8	10	12	14.2
누설전류 (A)	0.25	0.38	0.50	0.62	0.76

표 6. Ash HP A의 누설전류 측정

인가전압 (kV)	12	14	16	18	18.5
누설전류 (A)	0.21	0.25	0.30	0.37	0.40

사진 1은 Pulv. A 전동기를 나타냈으며, 정격전압의 2.7배인 18kV에서 권선단말부 부근의 방풍판과 상간 연결선 사이에서 최초의 절연파괴(flashover)가 발생하였으며 재시험을 실시한 결과 절연파괴 발생전압이 16kV, 14kV, 13kV로 낮아졌다. 사진 2는 Ash HP A 전동기를 나타냈으며, 정격전압인 6.6kV를 인가할 때부터 상간부위, 그리고 단말선선과 슬롯사이에서 연면 방전(creeping discharge)이 시작되었으며 정격전압의 2.8배인 18kV에서 연면방전으로 인한 절연파괴 현상이 발생하였다.

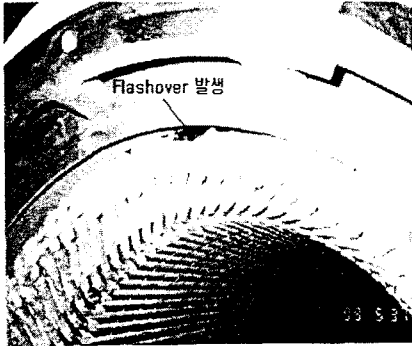


사진 1. Pulv. A의 절연파괴 현상

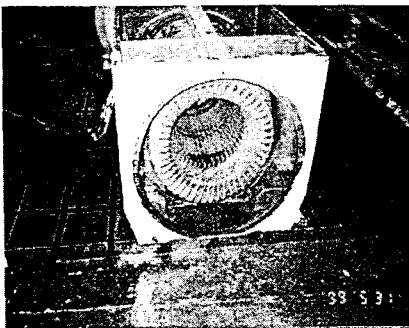


사진 2. Ash HP A의 절연파괴 현상

그림 1은 Pulv. A 전동기의 전류-전압 특성을 나타냈으며, 제1전류 급증점이 4.5kV에서 나타났다. 교류전류 증가율(ΔI)은 17.44%로 판정기준(<12%) 이상으로 분석되기 때문에 불량상태로 나타났다. 그림 2는 $\tan \delta$ -전압 특성을 나타냈으며, $\tan \delta$ 가 4.0kV에서 급증하고 있다. $\Delta \tan \delta$ 는 11.49%로 측정되었으며 이것은 판정기준(<6.5)보다 높게 나타나기 때문에 주절연 내부에서 보이드 등 절연열화가 심각한 상태인 것으로 분석된다. 부분방전의 크기는 25,000pC으로 판정기준(<30,000pC)보다 낮게 나타났으나, 요주의 상태로 분석되었다.

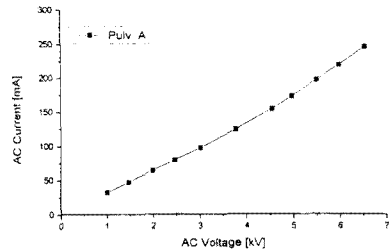


그림 1. Pulv. A의 전류-전압 특성

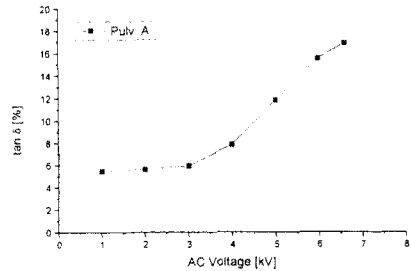


그림 2. Pulv. A의 $\tan \delta$ -전압 특성

그림 3은 Ash HP A 전동기의 전류-전압 특성을 나타냈으며, 제1전류 급증점이 3.81kV에서 나타났다. 교류전류 증가율(ΔI)은 13.38%로 판정기준(<12%) 이상으로 분석되기 때문에 불량상태로 나타났다. 그림 4는 $\tan \delta$ -전압 특성을 나타냈으며, $\tan \delta$ 가 4.0kV에서 급증하고 있다. $\Delta \tan \delta$ 는 7.18%로 측정되었으며 이것은 판정기준(<6.5)보다 높게 나타나기 때문에 주절연 내부에서 보이드 등 절연열화가 심각한 상태인 것으로 분석된다. 부분방전의 크기는 150,000pC으로 판정기준(<30,000pC)보다 훨씬 높게 나타나기 때문에 절연열화가 극부적으로 매우 심각한 상태로 분석되었다. 절연진단 결과를 종합하면 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등이 모두 나쁘게 나타나기 때문에 절연열화가 심각하게 진행될 상태로 판정된다. 따라서 절연파괴시험에서도 정상적인 절연내력을 유지할 수

없었던 것으로 분석되며 절연열화진단에 의한 불량판정이 적절하였던 것으로 판단된다.

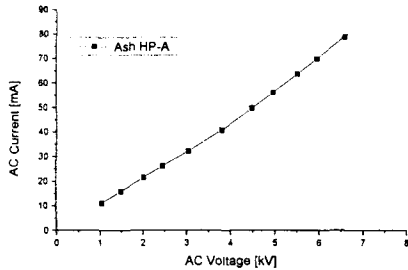


그림 3. Ash HP A의 전류-전압 특성

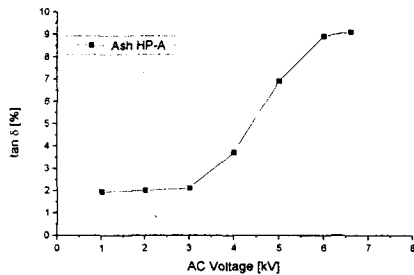


그림 4. Ash HP A의 tan δ-전압 특성

4. 결 론

발전소 현장에서 운전되는 고압전동기를 대상으로 절연열화진단을 시행하여 열화판정기준 또는 D-map 기법에 의해 절연상태가 불량으로 판정되어 전동기 교체 또는 재건설을 시행한 전동기 3대에 대하여 판정결과에 대한 검증차원에서 각각 실제 절연파괴시험을 시행하였다. 그리고 시험결과와 Discharge-map에 의한 잔여절연내력과의 차이점 및 절연열화 진단시험에서 나타난 절연특성과 열화판정기준 사이의 상관성을 비교, 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) D-map기법은 열화진단 측정값의 오차에 따라 잔여절연내력의 산정에서 큰 차이가 발생할 수 있으므로 특정 파라메타에 대한 추정치를 적용하여서는 안된다. 따라서 이 기법의 적용시에는 규정된 시험전압까지 인가되어야 하고 모든 파라메타는 정확하게 측정되어야 한다. 또한 한번의 측정값만으로 결과를 판정하는 경우 오류를 범할 수 있다.

(2) 전동기의 실제 절연내력과 D-map에 의한 추정치 사이에는 차이가 크다. 이것은 D-map기법이 그동안 발전해 온 절연재료 기술, 절연실계, 제작기술 및 제작사별 절연기술 특성차이 등이 반영되지 않은 것에 기인한다. 따라서 D-map기법을 산업현장에서 판

정기준으로 적용시에는 신중해야 하며 제한적으로 사용되어야 한다.

(3) 고압전동기의 절연열화 판정에 사용되는 파라메타 ΔI , $\Delta \tan \delta$, Q_{max} 중 어느 한개 또는 두개가 판정기준을 초과한다 하더라도 실제 절연내력은 낮아지지 않을 수 있다는 것을 절연파괴시험을 통해 확인할 수 있었다.

(4) 열화진단기법과 열화판정기준은 지속적으로 개선되어야 하며, 명확하게 확립되지 않은 기법이나 기준에 의해 진전한 전동기가 불량으로 판정되어 교체 또는 정비 될 수 있다. 따라서 열화진단에 의해 교체되는 전동기는 가급적 절연파괴시험을 통해서 검증되고 개선되어야 하며, 사용자(user)와 제작사(maker) 사이에 협력이 필요하다.

(5) 고압전동기 절연열화 판정기준의 신뢰도를 높이기 위해서는 체계적이고 종합적인 관리가 필요하다. 따라서 운전초기부터 주기적인 절연열화진단을 통해 절연특성의 추이(trend)를 관리하고 전동기의 사양과 운전특성, 그리고 고장, 정비 이력관리 등이 체계적이고 종합적으로 이루어져야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] "Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High direct Voltage", New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std. 95-1977, 1977
- [2] Y. Takikawa 外 5人, "Technology for Preventive Maintenance of Turbine Generator", Hitachi Review, Vol. 72, No. 8, pp. 35~42, 1990.
- [3] 일본전기학회, "특별고압 회전기·케이블의 절연열화 진단기술" 전기학회 기술보고(Ⅱ부), 제267호, 1988.
- [4] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation" IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 6, pp. 1021~1025, 1986.
- [5] 일본전기학회, "절연열화진단 시험방법" 전기학회 기술보고(Ⅱ부), 제182호, 1984.