

6.6 kV 전동기 고정자 권선의 절연진단과 절연파괴 특성

김희동^{1,a}, 공태식¹

¹ 한국전력공사 전력연구원 기술전문센터

Characteristics of Insulation Diagnosis and Failure in 6.6 kV Motor Stator Windings

Hee-Dong Kim^{1,a} and Tae-Sik Kong¹

¹ Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, Daejeon 305-760, Korea

(Received March 5, 2012; Revised March 15, 2012; Accepted March 22, 2012)

Abstract: To assess the condition of stator insulation, nondestructive and overpotential tests were performed on four high voltage motors. The stator windings under these tests have nominal ratings of 6.6 kV. After completing nondestructive tests, the AC overvoltage applied to the stator windings was gradually increasing until insulation failure in order to obtain the breakdown voltage. No. 1, No. 2, No. 3 and No. 4 of 6.6 kV motors failed near rated voltage of 18.4 kV, 19.8 kV, 19.7 kV and 21.7 kV, respectively. The breakdown voltage of four motors was higher than expected for good quality coils (14.2 kV) in 6.6 kV motors. Almost all of failures were located in a line-end coil at the exit from the core slot. The breakdown voltages and the types of defects showed strong relation to the stator insulation tests such as in the case of AC current, dissipation factor ($\tan\delta$) and partial discharge magnitude.

Keywords: High voltage motor, Nondestructive test, Overpotential test, Stator winding, Breakdown voltage, Dissipation factor

1. 서 론

발전소 주요설비에서 장기간 운전 중인 고압전동기 고정자 권선의 절연열화로 인한 절연파괴 사고는 전력공급의 신뢰성을 크게 저하시킨다. 주로 운전 중에 열적, 기계적, 전기적 및 환경적인 스트레스 (stress) 가 복합적으로 작용하여 절연재료에서 공극 (void)과 같은 결함이 발생한다. 이러한 결함 부분에 지속적으로 여러 가지 스트레스가 복합되어 절연열화 가속으로 인해 공극 크기가 점점 커진다. 따라서 공극이 커짐에 따라 부분방전 크기도 점차적으로 증가하며, 복합적인 열화 과정이 반복되면서 결함이 진전되어 절

연내력이 급격하게 감소함에 따라 최종적으로 절연파괴가 일어나고 있다 [1-3].

미국 EPRI (Electric Power Research Institute)는 정격전압이 2.3 kV 이상의 대용량 고압전동기가 설치되어 운전 중인 발전소에서 7,500대를 조사한 결과, 37%는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다 [4]. 일본에서는 정지 중에 고압회전기 고정자 권선의 절연상태를 평가하기 위해 1970년대 중반과 1980년대에 제작사를 중심으로 절연진단 시험에 관해 활발한 연구를 수행함으로써 절연열화 평가기준을 정립하였다 [5]. 절연진단 시험은 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등에 의하여 절연열화 정도를 판정하고 있으며, 정격전압까지 인

가하는 비파괴시험을 주로 사용하고 있다. 국내에서도 1990년대부터 발전소를 중심으로 절연진단 시험을 활발하게 진행하고 있으며, 최근에는 민간기업에서도 적극적으로 도입하고 있는 실정이다. 특히, 운전연수가 10년 이상된 고압전동기는 대략 3년 주기로 계획예방정비 기간 중에 진단시험을 시행하고 있으며, 일본에서 개발한 절연열화 평가기준을 국내에서 재정립하여 사용하고 있다 [5].

본 논문은 화력발전소에서 12년 동안 사용된 4대의 고압전동기 (290 kW, 6.6 kV) 고정자 권선에서 정지 중 절연진단과 절연파괴 시험을 수행하였다. 그리고 고압전동기 고정자 권선에서 절연진단 결과와 절연파괴전압 사이의 상관관계를 분석하여 절연열화 상태를 판정하였다.

2. 실험 방법

본 논문은 화력발전소에서 12년 동안 사용된 6.6 kV 전동기 고정자 권선의 정지 중 절연진단과 절연파괴 시험을 수행하였다. 고압전동기 절연진단 데이터는 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전을 포함한다. 교류전압을 인가하기 전에 고압전동기 고정자 권선에서 삼상 일괄로 절연저항 시험기 (automatic insulation tester, AVO International)를 사용하여 직류 5 kV를 인가하면서 절연저항과 성극지수를 측정하였다. 고압전동기 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험을 위해 웨링브리지 (Schering Bridge), 커플링 캐패시터 (Coupling Capacitor) 및 부분방전 측정기 (Partial Discharge detector, Tettex Instruments DDX-9103)를 사용하였다. 웨링브리지는 전원장치 (HV supply, type 5283), 브리지 (Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터 (Resonating Inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 고압전동기 고정자 권선에 웨링브리지 (Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하였으며, 커플링 캐패시터 (Coupling Capacitor, Tettex Instruments, 9,000 pF)는 권선에서 유입되는 신호를 광대역 매칭 유닛 (Broadband Matching Unit, Tettex Instruments 9103)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기 및 패턴을 분석하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 30~400 kHz이다. 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 크기는 발전소 현장에서 측정하였으며, 외부잡음은 150~170 pC 정도를 나타내고 있다. 정지 중 절연진단 시험을 완료하고 교류 전원장치 (HV Supply, 50

kV)와 브리지 (Bridge, Type 2819)를 사용하여 1 kV씩 증가시키면서 절연파괴가 발생할 때 까지 교류전압을 인가하면서 교류전류, 유전정접 및 캐패시턴스를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

화력발전소에서 12년 동안 사용된 유인통풍기 (induced draft fan)용 고압전동기 No. 1~No. 4 (290 kW, 6.6 kV)는 동일한 정격용량과 부하를 갖고 있다. 고압전동기 절연등급은 F종이며, 1997년에 국내에서 제작되었다. 그림 1은 No. 1~No. 4의 고압전동기 고정자 권선 A, B, C상을 삼상 일괄로 결선하고 외부 전원장치에서 교류전압을 1 kV씩 증가하면서 절연파괴 전까지 전류의 변화를 측정하여 나타내었다. 6.6 kV와 14.2 kV에서 고압전동기 No. 1~No. 4의 교류전류 증가율(ΔI)은 참고문헌 [6]에 의해 계산하였다.

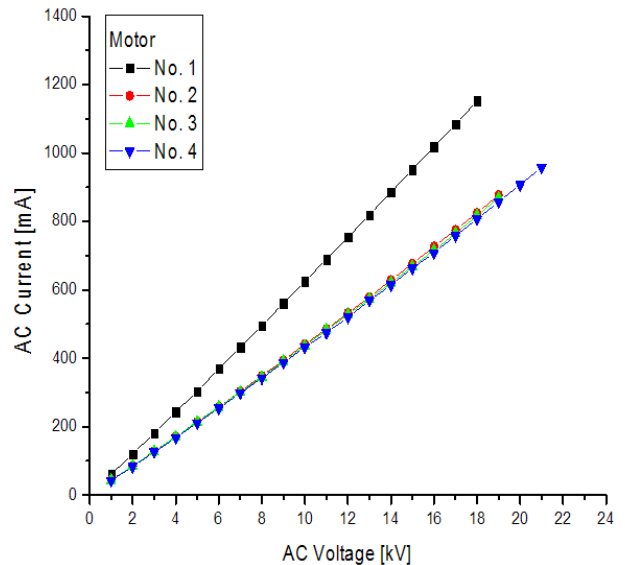


Fig. 1. Comparison of AC current-voltage characteristics in high voltage motor.

이상적인 절연재료에서 교류전압을 증가하면서 전류를 측정하면 직선적으로 비례하여 증가한다. 그러나 그림 1에서 나타난 바와 같이 실제로 고압전동기 고정자 권선은 어떤 전압 이상에서 전류가 직선적 비례 관계를 벗어나면서 증가하게 된다. 따라서 ΔI 는

Table 1. Characteristics of AC current in 6.6 kV motor stator windings.

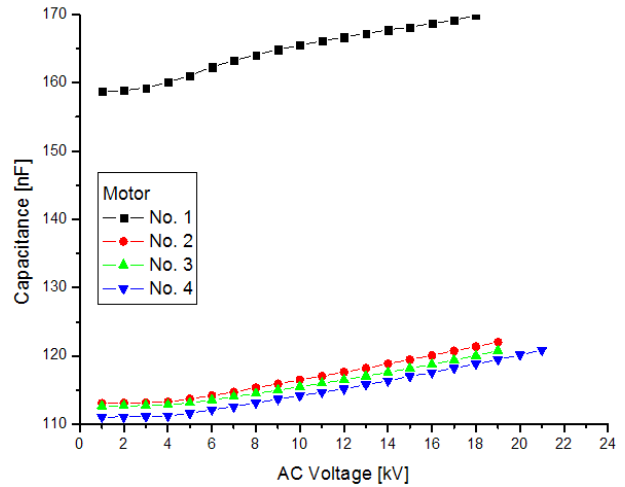
Motor No.	PI	ΔI [%] at 6.6 kV	ΔI [%] at 14.2 kV	P_{11} [kV]	P_{12} [kV]
1	8.47	2.41	6.10	3.0	8.3
2	6.74	1.44	4.87	4.8	11.2
3	6.92	1.15	4.32	5.0	11.0
4	6.83	1.28	4.72	5.1	12.2

이상적인 절연재료의 직선적 비례관계를 기준으로 했을 때 실제로 비례관계를 벗어나면서 증가하는 비율을 나타낸다. 또한, 교류전압에 대해 전류가 이상적인 비례 특성을 보이는 것 같지만 확대하고 직선형 자를 사용하여 0점을 기준으로 실측하면 제1차 전류급증점 (P_{11})이 나타나고 다시 제1급 증점을 기준으로 실측하면 제2차 전류급증점 (P_{12})이 나타난다 [6].

고압전동기 성극지수 (polarization index: PI)는 1.5 이상인 경우에 양호하게 판정한다 [5]. 표 1에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 1~No. 4의 성극지수는 6.74~8.47로 측정되어 모두 양호하게 나타났다. 6.6 kV에서 고압전동기 No. 1~No. 4의 ΔI 는 1.15%~2.41%이며, 14.2 kV에서 4.32%~6.10%로 증가하였다. 6.6 kV 전동기의 경우 ΔI 는 10% 이상이면 불량으로 판정하고 있다 [7]. 고압전동기 4대 모두 6.6 kV에서 ΔI 가 1.15%~2.41%로 측정되어 양호한 절연상태를 나타내고 있다.

또한, 고압전동기 No. 1, No. 2, No. 3, 및 No. 4의 제1차 전류급증점이 나타나는 전압은 각각 3.0 kV, 4.8 kV, 5.0 kV, 및 5.1 kV이며, 제2차 전류급증점이 나타나는 전압도 각각 8.3 kV, 11.2 kV, 11 kV 및 12.2 kV를 나타내었다. 제1차 전류급증점과 제2차 전류급증점이 나타나는 전압이 다른 전동기에 비해 상대적으로 No. 1은 가장 낮고 No. 4는 가장 높게 나타났다. 그 이유는 전동기 No. 4의 절연상태에 비해 No. 1의 절연상태가 더욱 더 열화가 진행되었기 때문으로 생각된다. 발전기와 고압전동기 고정자 권선에서 절연상태의 열화정도가 심할수록 제1, 2차 전류급증점이 낮은 전압으로 이동하게 된다 [6].

그림 2는 고압전동기 고정자 권선에서 교류전압 (voltage: V)을 절연파괴 전까지 증가하면서 캐패시턴스 (capacitance: C)의 변화를 측정하였다. 캐패시턴스-전압 특성 그래프에서 나타낸 바와 같이 캐패시

**Fig. 2.** Comparison of capacitance-voltage characteristics in high voltage motor.**Table 2.** Characteristics of $\tan\delta$ and capacitance in 6.6 kV motor stator windings.

Motor No.	ΔC [%] at 6.6 kV	ΔC [%] at 14.2 kV	$\Delta \tan\delta$ [%] at 6.6 kV	$\Delta \tan\delta$ [%] at 14.2 kV
1	2.77	5.58	1.40	2.18
2	1.42	5.09	1.01	2.58
3	1.19	4.37	0.83	2.22
4	1.39	4.78	0.92	2.28

턴스가 서서히 증가하는 점의 전압도 3.0~5.0 kV 정도로 측정되었다. 이와 같은 측정결과는 표 1에서 나타낸 바와 같이 제1차 전류급증점이 나타나는 전압과 거의 유사하게 분석되었다. 실제로 교류전류는 $I_c = 2\pi fCV$ 에 의해 결정되며, 주로 캐패시턴스 측정값에 의해 영향을 받기 때문에 상호 관련성이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 캐패시턴스값이 고압전동기 No. 1은 158 nF이며, No. 2~No. 4는 113 nF를 나타내었다. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 No. 1의 교류전류가 가장 높은 것도 No. 1의 캐패시턴스값이 No. 2~No. 4에 비해 45 nF가 높기 때문이다.

6.6 kV와 14.2 kV에서 고압전동기 No. 1~No. 4의 캐패시턴스 증가율(ΔC)은 참고문헌 [8]에 의해 계산하여 표 2에 나타내었다. 정격전압 6.6 kV에서 고압전동기 No. 1~No. 4의 ΔC 는 1.19~2.77%이며, ΔI 와 마찬가지로 14.2 kV에서 계산한 No. 1~No. 4의 ΔC 는 4.37~5.58%를 나타내고 있다. 6.6 kV와 14.2 kV

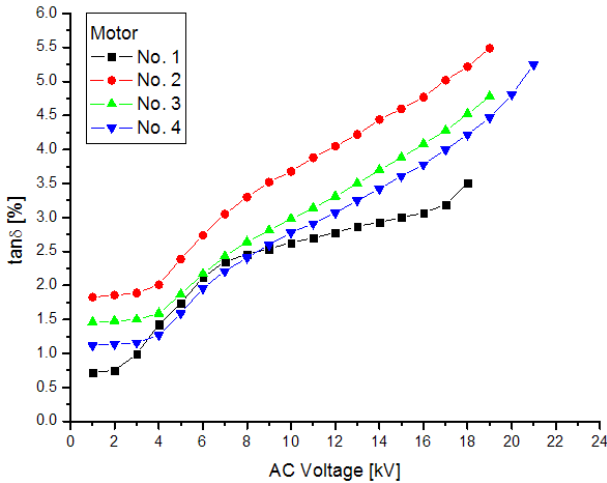


Fig. 3. Comparison of $\tan\delta$ -voltage characteristics in high voltage motor.

에서 계산한 ΔC 를 비교해 볼 때 No. 1이 가장 높고 No. 3이 가장 낮게 분석되었다.

그림 3은 고압전동기 고정자 권선에서 교류전압을 절연파괴 전까지 증가하면서 유전정점($\tan\delta$)의 변화를 측정하였다. $\tan\delta$ -전압 특성 그래프에서 나타낸 바와 같이 유전정점의 급격한 증가점도 3.0~5.0 kV 정도로 측정되었다. 6.6 kV와 14.2 kV에서 고압전동기 No. 1~No. 4의 유전정점 증가율 ($\Delta\tan\delta$)은 참고 문헌 [6]에 의해 계산하였다. 6.6 kV 고압전동기의 경우 정격전압에서 $\Delta\tan\delta$ 는 8.5% 이상이면 불량으로 판정하고 있다 [7].

표 2에 나타낸 바와 같이 정격전압에서 고압전동기 No. 1~No. 4의 $\Delta\tan\delta$ 는 0.83%~1.40%로 측정되었으며, 고압전동기 4대 모두 $\Delta\tan\delta$ 가 8.5%이하로 측정되어 절연상태가 양호하게 분석되었다. ΔI 및 ΔC 와 마찬가지로 14.2 kV에서 계산한 고압전동기 No. 1~No. 4의 $\Delta\tan\delta$ 도 2.18~2.58%로 낮게 나타나기 때문에 절연파괴전압도 높을 것으로 예상할 수 있다.

그림 1~그림 3에서 나타낸 바와 같이 교류전류, 캐패시턴스 및 유전정점의 특성을 종합적으로 비교해보면 No. 2~No. 4는 전압 증가에 따라 그래프 패턴이 일치성을 갖고 있다. 즉, 교류전류, 캐패시턴스 및 유전정점의 크기를 비교해 보면 No. 2는 가장 크고, No. 4는 가장 낮게 나타났다. 그러나 No. 1은 No. 2~No. 4에 비해 교류전류와 캐패시턴스는 높게 나타났으며, 유전정점의 크기는 오히려 가장 낮게 분석되었다. 표 1에 나타낸 바와 같이 그림 1을 근거로 측

Table 3. Characteristics of partial discharge in 6.6 kV motor stator windings.

Motor No.	Noise [pC]	PDIV [kV]	PD[pC]			
			3.81 kV	4.76 kV	6.0 kV	6.6 kV
1	150	2.9	4,500	5,300	7,500	10,000
2	170	4.5	500	1,900	8,600	9,600
3	170	4.5	900	2,100	3,800	5,000
4	170	4.5	500	2,500	3,000	3,500

정된 제2차 전류급증점이 나타나는 전압이 No. 1은 8.3 kV로 측정되었고 그림 2와 그림 3을 비교해 볼 때 캐패시턴스와 유전정점이 각각 3 kV에서 급증하다가 다시 증가율이 완만해지는 전압이 둘 다 8 kV 정도를 나타내고 있다. 따라서 교류전류, 캐패시턴스 및 유전정점과 전압 사이의 특성을 비교해 볼 때 상호 연관성이 있는 것으로 판단할 수 있다. 제1차 전류급증점이 나타나는 전압은 캐패시턴스와 유전정점의 급증하는 전압과 일치하고 제2차 전류급증점이 나타나는 전압은 캐패시턴스와 유전정점이 급증하다가 다시 증가율이 완만해지는 전압과 거의 일치하고 있다.

표 3에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 고정자 권선에서 삼상 일괄로 교류전압을 인가하면서 부분방전 크기, 외부 노이즈 및 부분방전 개시전압을 측정하였다. 고압전동기 고정자 권선에서 부분방전을 시험할 때 외부 노이즈가 150~170 pC로 측정되었다. 고압전동기 상전압 ($E/\sqrt{3}$, 3.81 kV), 상전압의 1.25배 (4.76 kV), 6.0 kV 및 정격전압 (6.6 kV)에서 부분방전 크기를 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선의 부분방전 패턴은 4대 모두 주절연물 내부에 공극이 존재하는 내부방전을 나타내었다 [3]. 외부 노이즈에서 시작하여 부분방전 크기가 1,000 pC 이상으로 나타날 때 전압을 부분방전 개시전압 (partial discharge inception voltage: PDIV)이라 한다. 그림 2와 그림 3에서 나타낸 바와 같이 캐패시턴스와 유전정점이 3 kV~5 kV에서 급격하게 증가하고 있기 때문에 부분방전 개시전압도 이 부분에서 발생할 것으로 예측할 수 있었다.

실제적으로 발전소 현장에서 측정한 부분방전 개시전압은 2.9 kV~4.5 kV에서 발생되었다. 다시 말하면

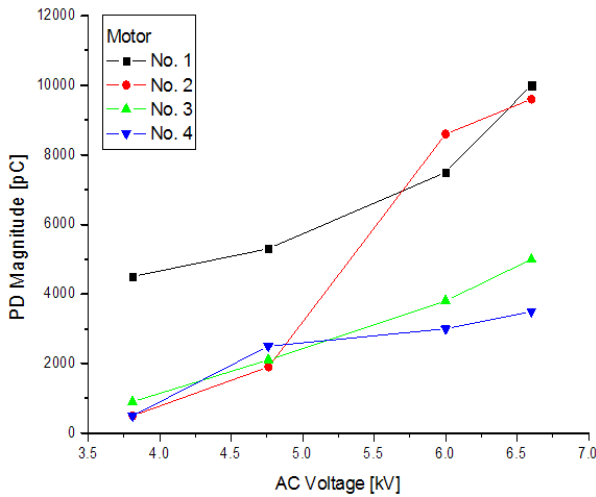


Fig. 4. Comparison of PD magnitude-voltage characteristics in high voltage motor.

캐패시턴스-전압 특성과 $\tan\delta$ -전압 특성에서 캐패시턴스와 $\tan\delta$ 가 급격하게 증가하는 전압이 부분방전 개시전압과 거의 일치하게 된다. 이 전압은 다시 그림 1의 교류전류-전압 특성에서 교류전류의 제1차 전류급증점을 나타내는 전압과도 일치한다. 따라서 고압전동기 고정자 권선에서 절연상태가 양호하면, 유전정점의 급증점, 제1차 전류급증점 및 부분방전 개시전압 등이 높은 전압으로 이동하고 절연과피 자체도 높은 전압에서 발생하는 것을 확인할 수 있다 [6].

그림 4는 부분방전 크기-전압 특성을 나타내었으며, 6.6 kV 고압전동기는 4.76 kV에서 부분방전 크기가 10,000 pC이하의 양호하게 판정하고 있다 [7]. 고압전동기 상전압의 1.25배 즉 4.76 kV에서 No. 1~No. 4의 부분방전 크기가 1,900 pC~5,300 pC으로 나타났으며, 모두 10,000 pC이하로 측정되어 절연상태가 양호하게 판정되었다. 6.6 kV에서 No. 1의 부분방전 크기가 10,000 pC이며, No. 4는 3,500 pC을 나타내고 있다.

표 4는 제1차 전류급증점이 나타나는 전압, 캐패시턴스가 급증하는 전압 (capacitance raise voltage), 유전정점이 급증하는 전압 ($\tan\delta$ raise voltage), 부분방전 개시전압 및 제2차 전류급증점이 나타나는 전압 등을 나타내었다. 고압전동기 No. 1, No. 2, No. 3, 및 No. 4의 제1차 전류급증점이 나타나는 전압은 각각 3.0 kV, 4.8 kV, 5.0 kV, 및 5.1 kV, 캐패시턴스 급증전압은 각각 3.0 kV, 5.0 kV, 5.0 kV, 및 5.0 kV, 유전정점 급증전압도 No. 1은 3.0 kV이고 No. 2~No. 4

Table 4. Characteristics of insulation failure in 6.6 kV motor stator windings.

Motor No.	P_{i1} [kV]	Capacitance raise voltage [kV]	$\tan\delta$ raise voltage [kV]	PDIV [kV]	P_{i2} [kV]	Break-down voltage [kV]
1	3.0	3.0	3.0	2.9	8.3	18.4
2	4.8	5.0	5.0	4.5	11.2	19.8
3	5.0	5.0	5.0	4.5	11.0	19.7
4	5.1	5.0	5.0	4.5	12.2	21.7

는 5.0 kV를 나타내었다. 또한, 고압전동기 No. 1, No. 2, No. 3 및 No. 4의 부분방전 개시전압은 각각 2.9 kV, 4.5 kV, 4.5 kV 및 4.5 kV를 나타내었다. 고압전동기 No. 2~No. 4는 제1차 전류급증점이 나타나는 전압, 캐패시턴스 급증전압, 유전정점 급증전압 및 부분방전 개시전압을 분석한 결과 유사하게 나타났습니다.

고압전동기 No. 1, No. 2, No. 3, 및 No. 4의 제2차 전류급증점이 나타나는 전압은 각각 8.3 kV, 11.2 kV, 11 kV 및 12.2 kV를 나타내었다. 그리고 고압전동기 No. 1, No. 2, No. 3, 및 No. 4의 절연과피전압도 각각 18.4 kV, 19.8 kV, 19.7 kV 및 21.7 kV를 나타내었다. 따라서 고압전동기 제2차 전류급증점이 나타나는 전압이 가장 낮은 No. 1은 절연과피전압도 가장 낮게 나타났으며, 제2차 전류급증점이 나타나는 전압이 가장 높은 No. 4에서 절연과피전압도 가장 높게 분석되었다. 고압전동기 제2차 전류급증점이 나타나는 전압은 절연과피전압과 밀접한 관련이 있는 것으로 분석되었다.

일반적으로 6.6 kV 전동기의 절연내력은 $2E+1$ kV 즉 14.2 kV이상이면 절연상태가 양호하여 운전이 가능하다. 고압전동기 No. 1~No. 4는 모두 14.2 kV 이상에서 절연과피가 발생하여 운전에 문제가 없다는 것을 최종적으로 확인할 수 있었다. 따라서 고압전동기 수명평가를 위해서는 최소한 정격전압 이상을 인가할 필요가 있으며, 본 논문에서는 제2차 전류급증점을 분석한 결과 정격전압의 1.25배 즉 8.3 kV 이상을 제시하고자 한다. 향후 제시된 전압을 보완하기 위해 재권선으로 판정된 고압전동기 고정자 권선의 절연과피시험을 지속적으로 수행하여 인가전압을 제

정립하고자 한다. 4대의 고압전동기 고정자 권선 모두 슬롯단부에서 절연과피가 발생하였다. 고압전동기 혹은 발전기와 같은 고압회전기 고정자 권선의 슬롯단부가 전기적 및 기계적 응력이 집중되어 대부분의 절연과피가 주로 슬롯단부에서 발생하고 있다 [2,9].

고압전동기 정격전압에서 절연진단 결과 제1차 전류급증점이 나타나는 전압, 캐패시턴스와 유전정점의 급증점이 나타나는 전압 및 부분방전 개시전압이 가장 낮은 고압전동기 No. 1은 절연과피전압도 가장 낮게 나타났으며, 이들 전압이 가장 높은 고압전동기 No. 4는 절연과피전압도 가장 높게 나타났다. 그리고 고압전동기 고정자 권선에서 절연열화가 진행할수록 낮은 전압으로 이동한다고 보고하고 있다 [6]. 현재 고압전동기 정격전압에서 절연진단이 시행되고 있으므로 이러한 전압을 분석함으로써 고정자 권선의 절연열화 상태를 확실하게 판정할 수 있다.

4. 결 론

화력발전소에서 12년 동안 운전한 4대의 6.6 kV 전동기 고정자 권선의 정지 중 절연진단과 절연과피 시험을 시행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 4대의 6.6 kV 전동기 고정자 권선에서 절연진단 결과 성극지수, 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기 등이 모두 양호하였으며, 절연내력도 $2E+1$ kV 즉 14.2 kV 이상 견디기 때문에 절연상태가 매우 양호하게 판정되었다.

(2) 고압전동기 고정자 권선에서 제1차 전류급증점을 나타내는 전압, 캐패시턴스와 유전정점이 급증하는 전압, 부분방전 개시전압 등이 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 고압전동기 No. 1은 교류전류-전압 특성에서 제2차 전류급증점을 나타내는 전압과 유전정점-전압 특성에서 유전정점이 급증하는 전압은 각각 8.3 kV와 8 kV로 거의 일치하였다. 고압전동기 No. 1과 No. 4의 제2차 전류급증점을 나타내는 전압이 각각 8.3 kV, 12.2 kV이며, 절연과피전압은 각각 18.4 kV, 21.7 kV를 나타내었다. 따라서 제2차 전

류급증점을 나타내는 전압과 절연과피전압은 밀접하게 상관성이 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 고압전동기 고정자 권선의 절연진단과 절연과피전압을 비교함으로써 향후 정격전압까지 인가한 진단결과를 종합적으로 분석하여 절연열화 상태를 판정할 수 있다. 또한, 제2차 전류급증점을 분석한 결과 20년 이상 운전한 고압전동기 고정자 권선의 수명평가를 수행할 때 인가전압은 정격전압의 1.25배 즉 8.3 kV 이상을 제시하고자 한다. 향후 제시된 전압을 보완하기 위해서 재권선으로 판정된 고압전동기 고정자 권선의 절연과피시험을 지속적으로 수행하여 인가전압을 재정립할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010-1010-10027B)

REFERENCES

- [1] H. D. Kim, *J. KIEEME*, **15**, 119 (2002).
- [2] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, and J. E. Hayward, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **38**, 577 (2002).
- [3] C. Hudon and M. Belec, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 297 (2005).
- [4] G. Stone and J. Kapler, *IEEE Trans. Ind. Appl. Mag.*, 15 (1998).
- [5] H. Yoshida and K. Umemoto, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **21**, 1021 (1986).
- [6] Y. Takikawa, T. Watanabe, H. Kamiya, M. Sakeda, I. Nanai, and H. Miyao, *Hitachi Review*, **72**, 35 (1990).
- [7] H. D. Kim, *Trans. KIEE*, **58**, 788 (2009).
- [8] H. Zhu, C. Morton, and S. Cherukupalli, *Conf. IEEE Int. Sympos. Electr. Insul.*, 384 (2006).
- [9] H. G. Sedding, R. Schwabe, D. Levin, J. Stein, and B. K. Gupta, *IEEE Electr. Insul. and Electr. Manufacturing & Coil Winding Conf.*, 455 (2003).