

세척과 절연보강에 따른 고압전동기 고정자 권선의 절연상태 분석

김희동^{1,a}

¹ 한국전력공사 전력연구원 기술전문센터

Analysis of Insulation Condition in High Voltage Motor Stator Windings Following Cleaning and Insulation Reinforcement

Hee-Dong Kim^{1,a}

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

(Received May 13, 2012; Revised May 24, 2012; Accepted May 25, 2012)

Abstract: Diagnostic tests were performed on two high voltage(HV) motor stator windings. These tests included the measurement of insulation resistance, polarization index, AC current, dissipation factor($\tan\delta$) and partial discharge(PD) magnitude. Surface contamination of HV motor stator windings has an effect on the AC current and $\tan\delta$. When the stator windings were finished cleaning and insulation reinforcement, the increase rate of AC current(ΔI) and dissipation factor($\Delta \tan\delta$) were very small compared to those before cleaning. However, the PD magnitude remained the same. These tests show that cleaning and insulation reinforcement of HV motor stator windings can reduce the insulation failure.

Keywords: High voltage motor, Stator winding, Dissipation factor, Partial discharge, Contamination, Cleaning, Insulation reinforcement

1. 서론

발전소에서 운전 중인 고압전동기는 주로 공기냉각 방식을 사용하기 때문에 먼지와 같은 이물질이 유입된다. 심할 경우는 먼지와 베어링 오일이 혼합되어 단말권선(endwinding)을 검게 오손시킬 뿐만 아니라 표면 트래킹(surface tracking) 발생의 원인이 되고 있다. 특히, 단말권선에서 표면 트래킹이 장기간에 걸쳐 서서히 진전되다가 최종적으로 고정자 철심에 도달하여 상과 접지(phase-to-ground) 사이에서 갑자기 절연파괴가 발생한다 [1].

운전 중인 고압전동기의 갑작스런 절연파괴 사고는

전력공급의 신뢰성을 저하시키고, 단시간에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 경제적인 손실이 매우 크게 된다. 따라서 대용량 고압전동기 고정자 권선에서 절연파괴가 발생하기 전에 열화정도를 판정하기 위해 주기적인 정밀점검과 절연진단 시험을 수행하고 있다. 계획예방정비 기간 중에 시행하고 있는 절연진단 시험은 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하여 절연열화 상태를 종합적으로 평가한다 [2-5]. 또한, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정한 시험결과를 세밀하게 분석함으로써 이물질 유입 여부를 판정할 수 있다.

본 논문은 18년 이상 동안 운전되고 있는 2대의 보일러 급수 펌프용 고압전동기(1,400 HP, 6.6 kV) 고

a. Corresponding author; hdkim@kepco.co.kr

정자 권선에 이물질이 과다 유입되어 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 절연진단 시험결과를 비교하여 절연상태의 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

고압전동기 정밀 절연진단 시험은 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 350~550 pC 정도를 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 화력발전소에서 18년 동안 운전한 2대의 보일러 급수펌프용 고압전동기 (1,400 HP, 6.6 kV)의 정격을 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선에서 정밀 절연진단 시험을 시행한 결과 내부에 먼지 혹은 베어링 오일과 같은 이물질 유입이 예측되어 분해점검을 권고하였다. 그림 1(a), (b)에 나타난 바와 같이 회전자를 인출하고 내부를 점검한 결과 특히 단말권선 (endwinding)에 많은 먼지 유입이 확인됨에 따라 세척작업 후에 재진단 시험결과는 먼지 제거로 인해

Table 1. Nominal ratings of HV motors.

HV motors	Capacity	Voltage	Current
	1,400 HP	6.6 kV	103 A
No. 1, 2	Insulation class	Year	Manufacturer
	F	1993	Westinghouse

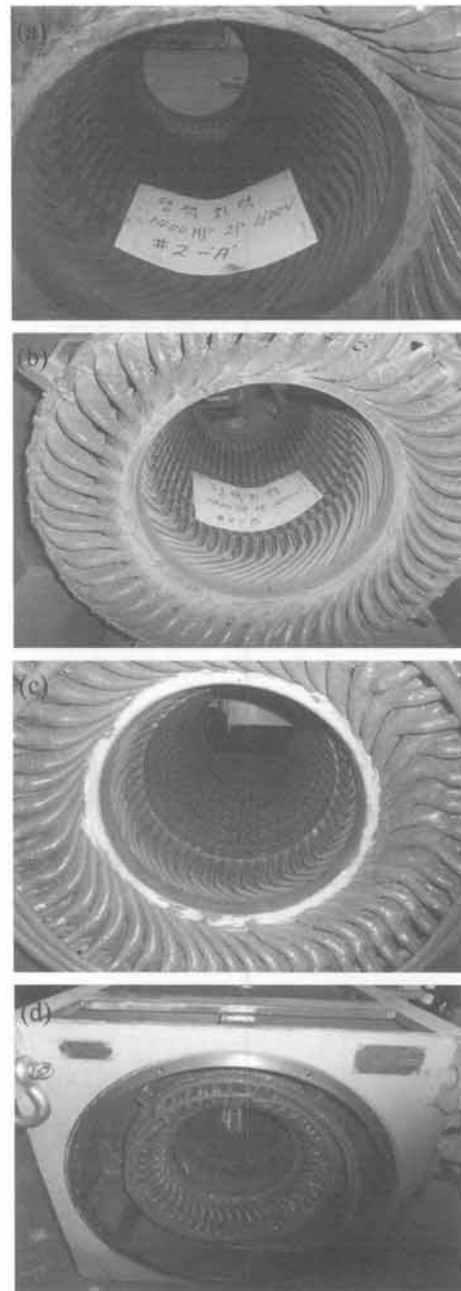


Fig. 1. Environmental influences of HV motor stator windings. (a) No. 1, (b) No. 2, before cleaning, (c) No. 2, after cleaning, (d) No. 2, after insulation reinforcement.

Table 2. Insulation resistance and polarization index in HV motor stator windings.

HV motors	Insulation resistance [GΩ]			PI	
	1 min.	5 min.	10 min.		
No. 1	Before cleaning	6.36	9.30	9.76	1.54
	After cleaning	19.0	68.2	74.3	3.90
No. 2	Before cleaning	0.63	0.845	0.977	1.55
	After cleaning	17.2	64.0	97.5	5.67

유전정접은 양호하였다. 세척작업은 스팀 세척기를 사용하여 먼지를 제거하고 전기로 (130℃)에서 10시간 이상 동안 건조하였다. 세척작업 후에 교류전류는 고압전동기 본래의 특성을 되찾았지만 교류전류 증가율이 불량으로 판정되었다. 교류전류가 불량으로 판정되고 세척작업 전에 비해 부분방전 크기도 변화가 없었다. 그림 1(c)에 나타난 바와 같이 절연보강 작업을 마치고 최종적으로 수행한 절연진단 시험결과는 세척작업 후에 측정된 시험결과에 비해 교류전류 증가율은 크게 변화되어 양호한 상태를 나타내었으나, 부분방전 크기는 거의 변화가 없이 일정하게 측정되었다.

표 2는 2대의 보일러 급수 펌프용 고압전동기 (No. 1, No. 2) 고정자 권선 세척작업 전과 세척작업 후에 절연저항과 성극지수 (polarization index, PI)의 변화를 나타내었다. 고압전동기 No. 1, 2는 세척작업 전과 세척작업 후의 절연저항이 각각 6.36 GΩ에서 19.0 GΩ, 0.63 GΩ에서 17.2 GΩ로 크게 증가하였다. 또한, 세척작업 전과 세척작업 후의 성극지수가 각각 1.54에서 3.90, 1.55에서 5.67로 크게 증가하였다. 성극지수는 절연저항 10분 값을 1분 값으로 나누면 얻을 수 있다. 세척작업 전과 세척작업 후를 비교해 볼 때 먼지 제거로 인해 세척작업 후에 절연저항과 성극지수가 모두 높게 나타났다. 그리고 고압전동기 고정자 권선에서 측정된 절연저항과 성극지수는 1.5 이상이 되면 흡습되지 않고 건조한 상태를 나타내기 때문에 운전이 가능하거나 혹은 외부에서 고전압을 인가해도 문제가 없다는 것을 의미한다.

표 3은 동일한 정격과 부하를 갖고 있는 2대의 보일러 급수 펌프용 고압전동기 (No. 1, No. 2) 고정자 권선 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 교류전류, 캐패시턴스 및 유전정접의 변화를 나타내었다.

Table 3. Characteristics of AC current, capacitance and $\tan\delta$ in HV motor stator windings.

HV motors	ΔI [%]	ΔC [%]	$\Delta \tan\delta$ [%]	
No. 1	Before cleaning	-1.61	-1.75	-2.80
	After cleaning	11.18	10.94	8.12
No. 2	After insulation reinforcement	5.00	5.15	4.48
	Before cleaning	-6.38	-6.48	-3.90
No. 2	After cleaning	10.21	10.34	7.50
	After insulation reinforcement	4.63	4.64	3.80

표 3과 그림 2에 나타난 바와 같이 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 계산된 고압전동기 No. 1의 교류전류 증가율 (ΔI)은 각각 -1.61%, 11.18%, 5.00%이며, 고압전동기 No. 2의 ΔI 는 각각 -6.38%, 10.21%, 4.63%로 측정되었다. 이상적인 절연물은 교류전압 증가에 따라 교류전류가 직선적으로 증가하지만 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 세척작업 전에는 권선 내부에 먼지가 유입되어 표면의 누설전류가 증가함에 따라 고압전동기 No. 1, No. 2의 ΔI 는 직선부분에 비해 -1.61%와 -6.38% 만큼 저감되었다. 고압전동기 No. 1, No. 2의 교류전류 증가율 ΔI 를 비교해 볼 때 No. 1에 비해 No. 2는 더 많은 먼지가 유입되었음을 판단할 수 있었다. 세척작업 후에는 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 먼지가 제거됨에 따라 고압전동기 No. 1, No. 2의 ΔI 는 직선부분을 기준으로 각각 11.18%와 10.21% 증가했으며, 10.0% 이상을 나타냄에 따라 불량으로 판정되었다 [6]. 그래서 절연보강을 권고하였으며, 그림 1(c)에 나타난 바와 같이 절연보강 후에는 고압전동기 No. 1, No. 2의 ΔI 가 직선부분을 기준으로 각각 5.00%와 4.63%가 증가되고 10% 이하로 측정되어 양호한 절연상태를 나타내었다. 교류전류-전압 특성 그래프에서 나타난 바와 같이 고압전동기 No. 1, No. 2는 세척작업과 절연보강 후에 교류전류가 직선을 벗어나는 전압도 2대 모두 3.81 kV, 4.76 kV로 측정되었다. 따라서 세척작업 전과 세척작업 후를 비교해 볼 때 먼지가 제거되어 표면의 누설

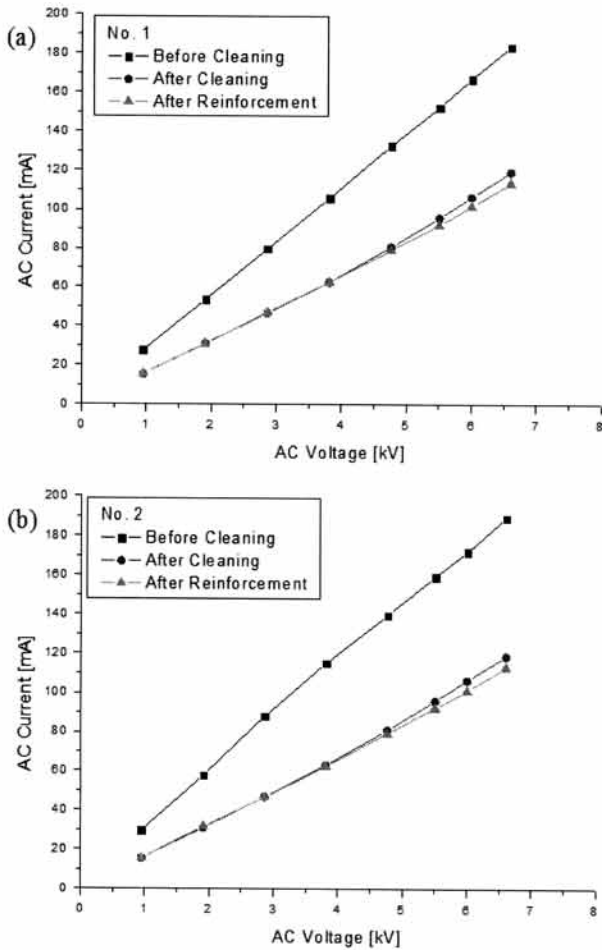


Fig. 2. Comparison of AC current-voltage characteristics in HV motor stator windings. (a) No. 1, (b) No. 2.

전류가 감소하여 교류전류는 본래의 절연특성을 되찾았지만 ΔI 가 10% 이상을 나타내어 불량으로 평가되었다. 고압전동기 고정자 권선을 재함침하는 과정인 절연보강을 마치면서 교류전류는 다시 큰 변화가 일어나 ΔI 는 2배 이상 현저하게 감소하여 최종적으로 절연상태가 양호하게 평가되었다.

표 3은 동일한 정격과 부하를 갖고 있는 2대의 고압전동기 (No. 1, No. 2) 고정자 권선 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 캐패시턴스의 변화를 나타내었다. 표 3과 그림 3에 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 1의 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 계산된 ΔC 는 각각 -1.75%, 10.94%, 5.15%이며, 고압전동기 No. 2의 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 계산된 ΔC 는 각각 -6.48%, 10.34%, 4.64%로 측정되었다. 이상적인 절연물은 교류전압 증가에 따라 캐패시턴스가 서서히 증가하지만 세척작업

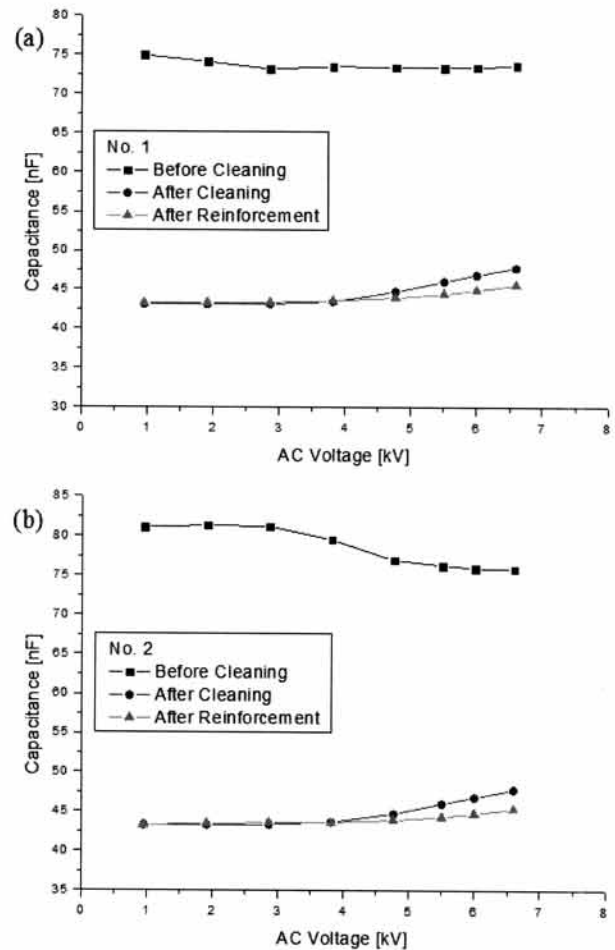


Fig. 3. Comparison of capacitance-voltage characteristics in HV motor stator windings. (a) No. 1, (b) No. 2.

전에는 권선 내부에 먼지 유입으로 인해 오히려 감소하여 고압전동기 No. 1, No. 2의 ΔC 가 각각 -1.75%, -6.48% 만큼 저감되었다. 세척작업 후에는 먼지가 제거됨에 따라 고압전동기 No. 1, No. 2의 ΔC 는 각각 10.94%, 10.34%로 증가하였다. 절연보강 후에는 고압전동기 No. 1, No. 2의 ΔC 가 각각 5.15%, 4.64%로 측정되었다. 따라서 세척작업 전과 세척작업 후를 비교해 볼 때 먼지가 제거되어 캐패시턴스 본래의 특성을 되찾았지만 높게 분석되었다. 캐패시턴스-전압 특성에서 전압이 증가함에 따라 캐패시턴스도 어느 전압 이상에서 증가한다 [7]. 따라서 고압전동기 고정자 권선을 재함침하는 과정인 절연보강을 마치면서 ΔC 는 현저하게 감소하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 고압전동기 No. 2는 No. 1에 비해 ΔI 와 ΔC 가 거의 유사하게 분석되었다. 따라서 세척작업 전에는 고압전동기 No. 2는 No. 1에 비

해 먼지가 많이 유입되어 진단결과는 나쁘게 분석되었으나 세척작업과 절연보강 후에 절연상태는 훨씬 더 양호하게 평가되었다. 그림 3은 고압전동기 고정자 권선에서 교류전압 (voltage: V)을 정격전압까지 증가하면서 캐패시턴스 (capacitance: C)의 변화를 측정하였다. 캐패시턴스-전압 특성 그래프에서 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 1, No. 2는 세척작업과 절연보강 후에 캐패시턴스가 서서히 증가하는 점의 전압도 2대 모두 3.81 kV, 4.76 kV로 측정되었다. 이와 같은 측정결과는 그림 2에서 나타낸 바와 같이 교류전류가 직선을 벗어나는 전압과 거의 유사하게 분석되었다. 실제로 교류전류는 $I_c=2\pi fCV$ 에 의해 결정되며, 주로 캐패시턴스 측정값에 의해 영향을 받기 때문에 그림 2와 그림 3에 나타낸 바와 같이 고압전동기 No. 1, No. 2의 상호 관련성이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 고압전동기 No. 1, No. 2는 교류전류-전압 특성과 캐패시턴스-전압 특성이 유사한 경향을 나타내고 있다.

표 3과 그림 4에 나타낸 바와 같이 2대의 고압전동기 (No. 1, No. 2) 고정자 권선 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 유전정점의 변화를 나타내었다. 고압전동기 No. 1의 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 계산된 고압전동기 No. 1의 $\Delta \tan\delta$ 는 각각 -2.80%, 8.12%, 4.48%이며, 고압전동기 No. 2의 $\Delta \tan\delta$ 는 각각 -3.90%, 7.50%, 3.80%로 측정되었다. 그림 4와 같이 유전정점은 현저한 차이를 보이고 있는데 세척작업 전에는 먼지 유입에 따라 $\tan\delta$ -전압 특성이 교류전압 증가에 따라 감소하고 있으며, 고압전동기 No. 1, No. 2의 $\Delta \tan\delta$ 는 각각 -2.80%와 -3.90%를 나타내었다. 교류전류의 증가율 (ΔI), 캐패시턴스의 증가율 (ΔC) 및 유전정점의 증가율 ($\Delta \tan\delta$)을 종합적으로 비교해 볼 때 고압전동기 No. 1에 비해 No. 2는 더 많은 먼지가 유입되었음을 판단할 수 있었으며, 그림 1(a)에 나타낸 바와 같이 고압전동기 (No. 1, No. 2)에서 다시 한 번 확인할 수 있었다. 세척작업 후에는 먼지가 제거됨에 따라 고압전동기 No. 1, No. 2의 $\Delta \tan\delta$ 는 각각 8.12%, 7.50%로 양호하게 분석되었다. $\Delta \tan\delta$ 는 8.5% 이하를 양호하게 판정한다 [6]. 절연보강 후에 고압전동기 No. 1, No. 2의 $\Delta \tan\delta$ 는 각각 4.48%와 3.80%로 측정되어 더욱 더 양호하게 나타났다. 세척작업 전과 세척작업 후를 비교해 볼 때 먼지가 제거되어 유전정점은 본래의 패턴을 되찾았으며, 절연상태도 양호하게 평가되었다. $\tan\delta$ -전압 특성 그래프에서 나타낸 바와 같이 고압전동기

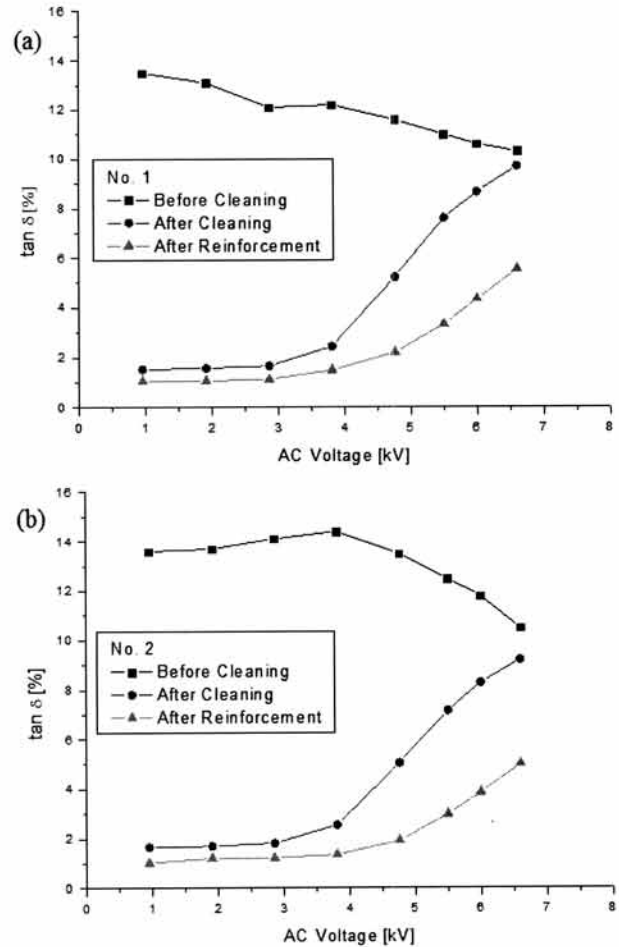


Fig. 4. Comparison of $\tan\delta$ -voltage characteristics in HV motor stator windings. (a) No. 1, (b) No. 2.

No. 1은 세척작업과 절연보강 후에 $\tan\delta$ 가 서서히 증가하는 점의 전압도 동일하게 2.86 kV이며, 고압전동기 No. 2는 세척작업과 절연보강 후에 $\tan\delta$ 가 서서히 증가하는 점의 전압이 각각 2.86 kV, 3.81 kV로 측정되었다. 따라서 고압전동기 고정자 권선을 재함침하는 과정인 절연보강을 마치면서 유전정점은 큰 변화가 일어나 $\Delta \tan\delta$ 는 현저하게 감소하여 절연상태가 양호하게 평가되었다. 특히 고압전동기 고정자 권선의 절연상태가 양호하게 평가되어도 단말권선에 먼지 혹은 베어링 오일 등과 같은 이물질 유입으로 인해 도전로가 형성되면 표면 트래킹이 직접적인 원인이 되어 절연파괴가 발생한다 [1].

표 4는 동일한 정격과 부하용량을 갖고 있는 2대의 고압전동기 (No. 1, No. 2) 고정자 권선 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 부분방전 크기의 변화를 나타내었다. 세척작업 전에 상전압 (3.81 kV)과 상

Table 4. Comparison of PD magnitude in HV motor stator windings.

HV motors	PD magnitude [pC]			
	Noise [pC]	PDIV [kV]	3.81 [kV]	4.76 [kV]
No. 1	Before cleaning	400	2.1	
	After cleaning	350	2.5	35,200 38,600
	After insulation reinforcement	530	2.7	
No. 2	Before cleaning	400	2.2	
	After cleaning	530	2.5	36,100 37,000
	After insulation reinforcement	550	2.7	

전압의 1.25배인 4.76 kV에서 고압전동기 No. 1의 부분방전 크기는 각각 35,200 pC, 38,600 pC이고 고압전동기 No. 2의 부분방전 크기는 각각 36,100 pC, 37,000 pC을 나타내었으며, 세척작업 후와 절연보강 후에도 부분방전 크기는 변화가 없었다. 부분방전 개시전압 (partial discharge inception voltage, PDIV)은 세척작업 전에 비해 세척작업과 절연보강 후에 점차적으로 증가하였다.

그림 5는 2대의 고압전동기 (No. 1, No. 2) 고정자 권선에서 상전압 (3.81 kV)을 인가하면서 부분방전 크기를 측정하여 나타내었다. 통상적으로 부분방전 크기도 먼지와 같은 이물질이 유입되어 있으면 초기에 크게 나타나다가 고전압에 의해 먼지가 타면서 연기가 발생하고 어느 정도 시간이 경과하면 부분방전 크기는 오히려 감소한다 [1]. 고압전동기 No. 1, No. 2는 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 측정된 부분방전 개시전압은 세척작업 전에 비해 세척작업과 절연보강 후에 점차적으로 증가하였다. 부분방전 개시전압이 높다는 것은 고압전동기 고정자 권선의 절연상태가 양호하다는 것을 의미한다.

앞에서 설명한 바와 같이 정지 중에 고압전동기 No. 1, No. 2의 부분방전 크기는 각각 35,200 pC, 36,100 pC으로 높게 나타나기 때문에 향후에는 단자 박스에서 상별로 세라믹 커플러 (ceramic coupler,

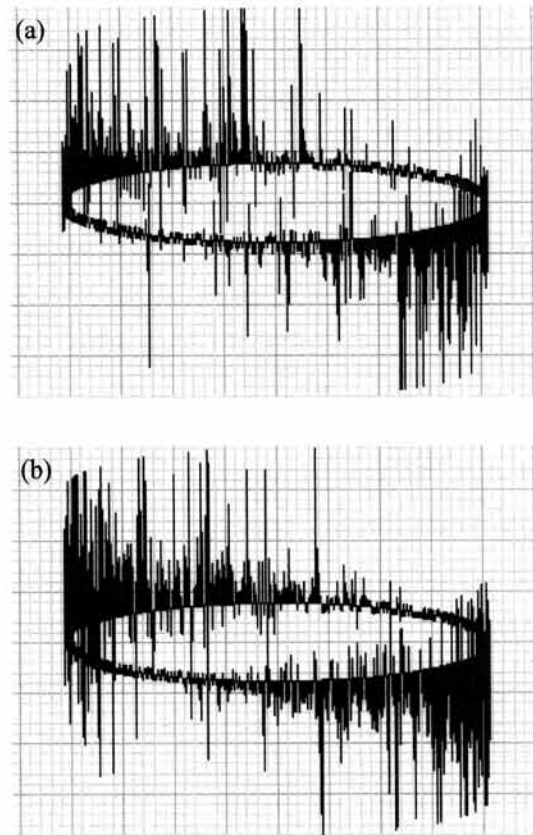


Fig. 5. PD magnitude of HV motor stator windings. (a) No. 1, discharge= 35,200 pC, voltage= 3.81 kV, (b) No. 2, discharge= 36,100 pC, voltage= 3.81 kV.

110 pF)를 설치하고 운전전압 (3.81 kV)에서 부분방전 크기를 측정하여 비교할 예정이다.

4. 결론

2대의 고압전동기 고정자 권선에서 교류전류의 증가율 (ΔI), 캐패시턴스의 증가율 (ΔC) 및 유전정점의 증가율 ($\Delta \tan \delta$)을 종합적으로 비교해 볼 때 고압전동기 No. 1에 비해 No. 2가 더 많은 먼지가 유입되었음을 확인할 수 있었다. 고압전동기 No. 1, No. 2는 세척작업과 절연보강 후에 캐패시턴스가 서서히 증가하는 점의 전압도 2대 모두 각각 3.81 kV, 4.76 kV로 측정되었다. 이와 같은 측정결과는 교류전류-전압 특성에서 교류전류가 직선을 벗어나는 전압과 거의 동일하게 분석되었다. $\tan \delta$ -전압 특성에서 고압전동기 No. 1은 세척작업과 절연보강 후에 $\tan \delta$ 가 서서히 증

가하는 점의 전압은 2.86 kV로 동일하며, 고압전동기 No. 2는 각각 2.86 kV, 3.81 kV로 측정되었다. 따라서 세척작업과 절연보강 후에 고압전동기 No. 2는 No. 1에 비해 절연상태는 훨씬 더 양호하게 평가되었다. 또한, 고압전동기 No. 1, No. 2는 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 부분방전 크기는 거의 변화가 없었으나 부분방전 개시전압은 세척작업 전에 비해 세척작업과 절연보강 후에 점차적으로 증가하였다. 고압전동기 고정자 권선 표면의 먼지를 제거하고 보완을 위해 세척과 절연보강 작업을 수행함으로써 표면 트래킹에 의한 절연파괴를 사전에 예방할 수 있었다. 또한, 세척작업 전, 세척작업 후 및 절연보강 후에 측정된 절연진단 시험결과는 다른 산업체에서 사용 중인 고압전동기 정비계획 수립에 활용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010-1-0101-0027B)

REFERENCES

- [1] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi and J. E. Hayward, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 38, 577 (2002).
- [2] H. D. Kim and B. H. Kim, *J. KIEEME*, 19, 1067 (2006).
- [3] H. D. Kim and T. S. Kong, *J. KIEEME*, 25, 309 (2012).
- [4] H. Yoshida and K. Umemoto, *IEEE Trans. Electri. Insul.*, 21, 1021 (1986).
- [5] G. Stone, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41, 91 (2005).
- [6] H. D. Kim, *J. KIEE*, 58, 788 (2009).
- [7] H. Zhu, C. Morton, and S. Cherukupalli, *Conf. IEEE Int. Sympos. Electri. Insul.*, 384 (2006).