



# 환경변화에 따른 고압전동기 절연특성 고찰

공태식 선임연구원, 김희동 책임연구원 (한전 전력연구원 기술전문센터)

## 1. 서론

고압전동기 고정자 권선 절연물의 결함은 제작 시 발생하거나 혹은 장기간 운전되는 동안 열적, 기계적, 전기적 및 화학적 열화 등에 의해 나타나며, 고장원인 중 절연물 손상에 의해 발생하는 것이 약 37%에 이른다 [1]. 고압전동기 고정자 권선은 장기간 운전되면 복합적인 영향으로 인해 절연재료 내부에 공극(Void)이 발생하여 열화가 계속 진행되면서 결국 절연 파괴에 도달하게 된다 [2].

고압전동기 절연파괴로 인해 대용량 발전소가 정지되면 막대한 경제적 손실뿐만 아니라 안정적인 전력공급에도 영향을 미치게 된다. 따라서 고압전동기 절연물에 대한 건전성을 평가하는 절연진단의 중요성은 날로 높아가고 있다. 절연상태에 대한 건전성을 확인하는 방법으로는 고압전동기 정격전압의 2배 +1 kV의 전압을 1분 동안 인가하여 절연이 파괴되지 않고 견디는가를 보는 절연내력 시험법이 있으나, 신규 제작된 고압전동기 고정자 권선의 품질보증을 위한 공장시험과 재권선된 고압전동기 검수시험 등 특별한 경우에만 사용되고 있다. 보통 현장에서 운용 중인 고압전동기에 대해서는 정격전압의 1.25~1.5배를 1분간 인가하는 시험도 절연특성에 문제가 있는 경우에 제한적으로 사용되고 있다 [3,4]. 일반적으로

로 국내 산업현장에서 사용하는 고압전동기에 대한 진단방법으로는 시험전압을 정격전압 이내에서 실시하고 있으며, 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험 등이 주로 수행되어지고 있다 [5].

발전소, 제철소 및 화학설비 등 산업현장에서 고압전동기는 바닷물의 염분, 석탄가루, 먼지 등 다양한 오염 환경에서 운전되고 있으며, 고정자 권선의 온도 또한 냉각방식이나 주변의 온도에 따라 다양하게 나타난다. 따라서 고압전동기 고정자 권선이 흡습된 경우, 세척건조 및 온도 변화에 따라 어떠한 특성을 나타내는지 알아보기 위해 여러 가지 절연진단 시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

## 2. 흡습과 세척건조 상태에 따른 절연특성 변화

### 2.1 시험방법

고압전동기 주변 환경에 따라 절연진단 시험 항목인 절연저항, 성극지수, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 특성이 어떻게 변화하는지 알아보기 위하여 고정자 권선이 흡습된 상태 그리고 세척작업을 마치고 건조가 완료된 상태 일 때 각각 시험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 시험에 사용된 고압전동기는 발전소에서 석탄을 분쇄하는데 사용되는 미분기용 전

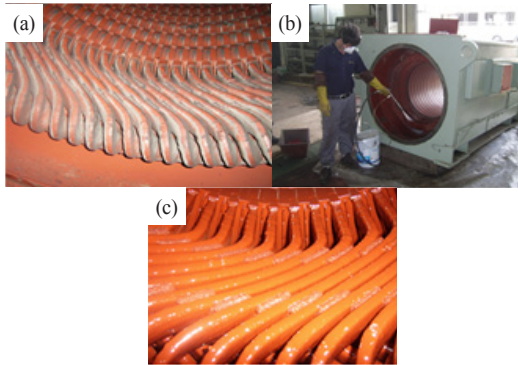


그림 1. 고압전동기 고정자 권선의 상태 (a) 오염상태, (b) 세척정비, (c) 가열건조 완료.

표 1. 절연저항과 성극지수 시험결과.

시험항목	흡습	세척건조
절연저항 [M $\Omega$ ]	160	42,600
성극지수	1.21	4.08

동기로서 미분탄 및 먼지 등에 의해 권선이 오염된다. 권선표면의 이물질 등을 고압 분사된 물로 세척하고 24시간 동안 자연건조 하였으나 아직 권선이 흡습된 상태에서 1차 시험을 수행하였다. 110℃ 건조로에서 48시간 가열건조 후 대기온도 20℃까지 자연냉각을 시킨 상태에서 2차 시험을 수행하였다.

## 2.2 시험결과 분석

금번에 시험한 고압전동기 고정자 권선의 흡습상태 및 세척작업을 마치고 건조된 상태일 때의 절연저항과 성극지수의 시험결과는 표 1과 같다. 시험결과 권선이 흡습상태에서는 누설전류가 커져 절연저항과 성극지수 모두 낮게 측정되었으며, 세척작업을 마치고 가열건조 완료 후에는 절연저항과 성극지수 모두 흡습상태일 때보다 크게 증가하여 양호하게 나타났다. 다행히 흡습상태에서 절연저항은 최소 권고치인 100 M $\Omega$ 보다 충분히 높게 측정되어 고전압을 인가하면서 교류전류, 유전정점 및 부분방전을 측정하였다. 절연저항이 매우 낮은 경우에 절연진단을 위해 고전

표 2. 교류전류 시험결과.

전압 [kV]	교류전류 [mA]	
	흡습	세척건조
0,95	21,28	15,64
3,81	87,66	63,71
6,6	156,6	125,8
$\Delta I$ [%]	5,93	15,81

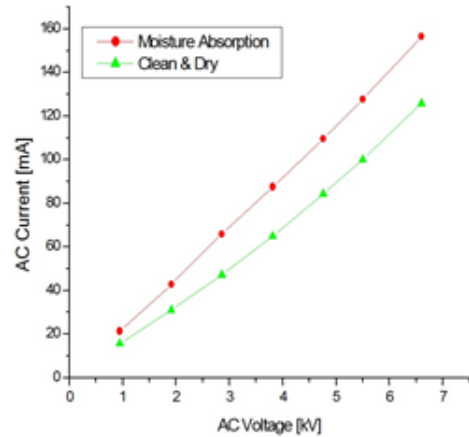


그림 2. 교류전류-전압 특성.

압을 인가하면, 절연파괴가 발생할 수 있다.

표 2는 교류전류 시험결과를 나타내었으며, 시험전압에 따른 교류전류 측정값과 전류급증율 ( $\Delta I$ )을 계산하였다. 시험전압을 증가시키면 절연시스템 내의 미소공극들에서 부분방전 등이 발생하여 절연거리가 짧아지는 역할을 하게 된다. 그림 2는 교류전류-전압 특성을 나타내었으며, 낮은 전압에서는 부분방전이 발생하지 않거나 크기가 작기 때문에 교류전류-전압의 증가율이 낮지만 시험전압을 높이면 부분방전 크기가 증가하여 낮은 전압에 비해 전류가 급증하게 된다. 정격전압까지 시험하는 중에 낮은 전압일 때의 증가율에 비해 전류가 얼마나 더 급증하였는가를 나타내는 전류급증율 ( $\Delta I$ )을 구하고 이를 분석하여 절연물 전체의 평균적인 절연상태를 평가하게 된다.

동일 시험전압에서 전류 값은 흡습상태일 때가 높게 측정되었으며, 전압 증가에 따른





전류증가율 ( $\Delta I$ )은 세척건조보다 흡습상태일 때가 낮게 나타났다. 흡습된 상태에서는 부분방전이 발생할 수 있는 미소공극이나 권선 표면과 슬롯 사이의 틈 등에 습분이 존재할 경우에 낮은 전압에서부터 전류값이 크게 측정된다. 그리고 전압을 더욱 더 증가하면 틈 사이가 단락되어 부분방전은 발생하지 않고 그냥 전류가 흘러버려 전류급증율이 낮은 것으로 분석되었다. 세척작업을 마치고 건조 후에 측정한 전류급증율은 흡습상태에 비해 높게 분석되었다.

표 3은 유전정접 시험결과를 나타내었고 그림 3은 유전정접-전압 특성을 나타내었다. 유전체에 교류전압을 인가하여 나타나는 전류는 전압보다 90° 앞선 충전전류와 전압과 동상인 누설전류로 나눌 수 있으며 누설전류를 충전전류로 나눈 값을 유전정접이라 한다. 교류전류 시험과 마찬가지로 전압을 상승시키면 부분방전이 발생하게 되고 이에 따라 누설전류가 증가하며 유전정접이 증가하게 된다. 따라서 유전정접 값과 초기전압에 비해 정격전압에서 유전정접이 얼마나 증가했는가를 나타내는 유전정접 증가율 ( $\Delta \tan \delta$ )을 통하여 절연물 전체의 평균적인 절연상태를 판단할 수 있다.

시험결과 유전정접 ( $\tan \delta$ ) 값은 흡습상태일 때는 낮은 시험전압에서도 13.2%로 높게 측정되었으며, 세척작업을 마치고 건조 상태일 때보다 더 높게 측정되었다. 이와는 반대로 시험전압 증가에 따른 유전정접 증가율 ( $\Delta \tan \delta$ )은 흡습상태일 때보다 세척작업을 마치고 건조 상태가 더 높게 측정되었다. 이는 흡습상태일 때는 낮은 전압에서부터 누설전류가 많이 흘러 유전정접 값이 높게 측정되었으며, 교류전류 증가율과 마찬가지로 시험전압 증가에 따라 부분방전이 발생하는 미소공극에 습분이 있어 전류가 도통되어 나타나는 현상으로 분석된다.

유전정접 ( $\tan \delta$ )은 낮은 시험전압에서도 권선의 흡습상태에 따라 민감하게 반응하며 건

표 3. 유전정접 측정결과.

전압 [kV]	$\tan \delta$ [%]	
	흡습	세척건조
1,91	13,2	0,70
3,81	13,8	3,10
6,6	16,2	13,6
$\Delta \tan \delta$ [%]	3,0	13,6

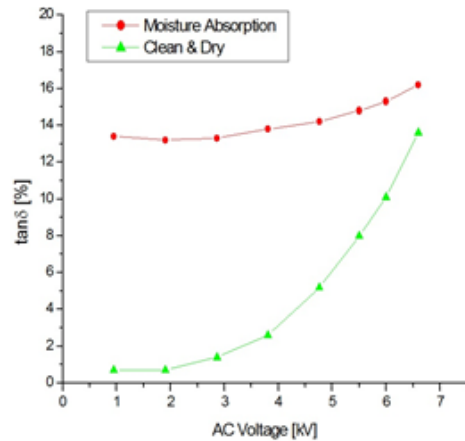


그림 3. 유전정접-전압 특성.

조에 따라 값이 크게 개선되었다. 이를 통하여 권선의 흡습여부 판단에 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 만일 초기 전압부터 유전정접 값이 높게 측정되면 흡습된 상태로 절연물의 정확한 상태를 알기 어렵다. 따라서 고전압 시험을 수행하면서 절연파괴의 우려가 있으므로 충분히 건조 후 재시험을 수행해야 한다.

표 4는 부분방전 시험결과를 나타내었다. 부분방전 시험은 매 순간 발생하는 부분방전 펄스들 중에서 가장 큰 값이 측정되며 가장 큰 방전 값은 가장 큰 결함에서 발생하는 것으로써 이를 통하여 절연시스템의 가장 큰 결함의 정도를 추정할 수 있다. 부분방전 시험결과 흡습상태일 때 보다 세척작업을 마치고 건조 후에 측정한 부분방전 크기가 더 높게 측정되었다. 그리고 부분방전 개시전압도 흡습상태일 때 보다 세척작업을 마치고 건조 후에 측정한 결과가 낮게 분석되었다. 또한,



표 4. 부분방전 시험결과.

전압 [kV]	부분방전 크기 [pC]	
	흡습	세척건조
방전개시전압 [kV]	5.1 kV	4.0 kV
4.76 kV	900	2,600
6.6 kV	2,400	6,600

흡습상태에서는 교류전류, 유전정접 시험과 마찬가지로 수분으로 인해 전류가 흘러 버려 부분방전이 잘 나타나지 않는 현상으로 분석된다.

절연저항과 성극지수 값은 흡습상태일 때 저하되고 교류전류 시험결과 흡습상태에서  $\Delta I$  값은 양호하게 나타나지만, 누설전류 (I) 값은 세척작업을 마치고 건조되었을 때보다 높게 나타내었다. 따라서 건조된 동일규격의 권선을 비교시험하지 않는 이상 교류전류 시험만으로 권선의 흡습상태를 파악하기는 어렵다. 유전정접 시험결과 흡습상태일 때  $\tan\delta$  값이 낮은 전압에서도 크게 증가하여 흡습에 민감한 특성을 갖는 것으로 나타나 흡습판정에 용이하게 사용될 수 있다. 부분방전 시험결과 부분방전 개시전압 및 크기는 오히려 흡습상태일 때 양호하게 나타내었다. 따라서 부분방전 시험결과가 양호하다면 실제로 절연상태가 좋은 것인지 혹은 흡습이 발생되어 방전현상이 줄어든 것인지는 유전정접 시험 결과 등을 종합적으로 분석해야 확인이 가능하다.

### 3. 온도에 따른 절연특성 변화

고압회전기 고정자 권선 절연물의 수명을 결정짓는 중요한 요인 중 하나는 절연물의 온도이며, 절연물의 재질에 따라 차이가 있지만 통상 절연물의 온도가 10℃ 증가할 때 마다 수명은 50%로 감소한다고 알려져 있다 [6]. 따라서 운전 중 고압전동기 고정자 권선의 온도가 증가하게 되면 절연열화를 가속시켜 불시고장의 원인이 되기 때문에 주요한

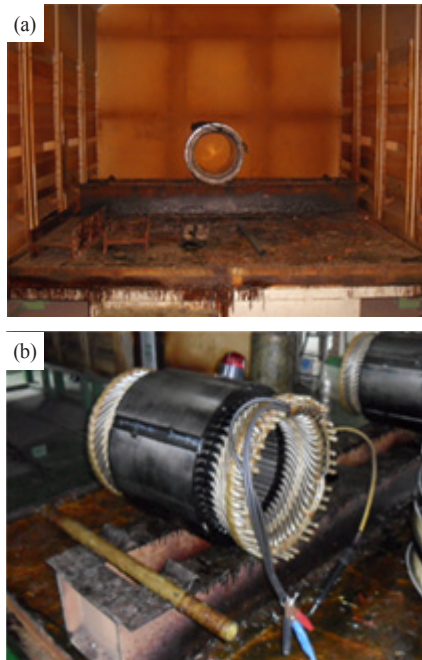


그림 4. 고정자 권선 건조 및 시험장면 (a) 가열 건조, (b) 고정자 권선.

감시항목으로 관리하고 있다 [7]. 3.3 kV 급 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40~80℃로 변화시키면서 절연저항, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 측정하여 절연특성을 분석하였다.

#### 3.1 시험방법

그림 4(a),(b)에 나타난 바와 같이 3.3 kV 급 고압전동기 고정자 권선을 건조로에서 120℃로 12시간 동안 가열 건조한 다음 대기 온도 24℃에서 자연냉각 되는 과정에서 온도별로 절연진단 시험을 수행하였다. 온도에 따른 절연특성 변화를 알아보기 위해 절연진단 시험은 절연저항, 교류전류, 유전정접 및 부분방전을 측정하였다. 각각의 시험항목에 대하여 온도에 따른 특성변화를 분석한 결과 절연상태를 평가하는데 있어서 고정자 권선 온도의 중요성을 확인할 수 있었다.



표 5. 절연저항 측정결과.

권선온도 [°C]	절연저항 [M $\Omega$ ]
40	10,600
50	8,610
60	5,370
70	2,580
80	865

표 6. 교류전류 시험결과.

전압 [kV]	전류 [mA]				
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0.475	7.573	7.670	7.823	8.045	8.457
2.40	38.57	39.22	40.65	41.44	43.80
3.30	56.04	57.72	59.32	61.71	65.22
$\Delta I$ [%]	6.52	8.31	9.14	10.41	11.01

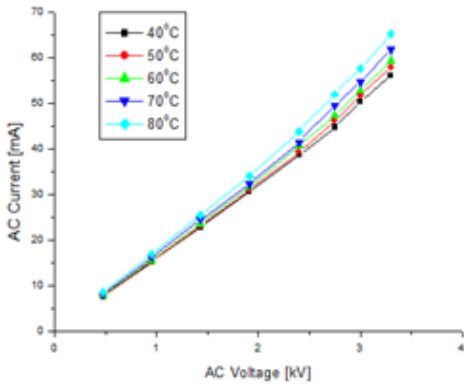


그림 5. 교류전압-전류 특성.

### 3.2 시험결과 분석

고압전동기 고정자 권선의 온도에 따른 절연저항 시험결과는 표 5에 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40~80°C로 변화시키면서 절연저항을 측정한 결과 온도가 증가함에 따라 반비례하는 특성을 보였다. 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 절연저항은 12.3배로 감소하였으며 이는 권선의 온도가 10°C상승 마다 절연저항은 약 1.88배 감소하는 것으로 분석되었다.

고압전동기 고정자 권선은 온도 변화에 따른 교류전류 시험결과는 표 6과 같으며, 그

표 7. 유전정접 시험결과.

전압 [kV]	유전정접(tan $\delta$ ) [%]				
	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
0.475	1.26	1.47	1.98	2.69	3.93
2.40	1.95	2.76	4.06	5.19	7.15
3.30	7.02	8.32	9.33	10.47	12.05
$\Delta \tan\delta$ [%]	5.73	6.83	7.33	7.75	8.10

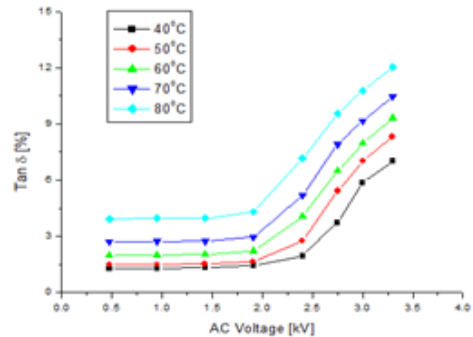


그림 6. 교류전압-유전정접 특성.

림 5는 온도에 따른 교류전압-전류 특성을 나타내었다. 시험결과 동일전압에서의 교류전류 값은 온도가 높을수록 커졌으며, 전압 증가에 따른 전류의 증가율 ( $\Delta I$ ) 또한 온도에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있었다.

고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 0.475 kV와 3.3 kV에서 교류전류 값의 변화율은 각각 1.12배, 1.16배로 약간 증가하였다. 그리고 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40°C에서 80°C로 2배 증가했을 때 교류전류 증가율 ( $\Delta I$ )은 1.69배로 증가하여 전류 값이 증가하는 것보다 더 크게 온도에 따라 변하는 것을 알 수 있었다. 그림 5에서 나타낸 바와 같이 낮은 시험전압에서는 교류전류 값의 차이가 크지 않지만 전압이 올라갈수록 전류의 증가하는 폭이 온도가 높을수록 크게 나타났다.

고압전동기 고정자 권선의 온도 변화에 따른 유전정접 시험결과는 표 7에 나타내었다. 그림 6은 고정자 권선의 온도를 40~80°C로 변화시키면서 교류전압-유전정접 특성을 나



표 8. 부분방전 시험결과.

권선온도	부분방전 [pC]			
	Noise [pC]	DIV [kV]	$E/\sqrt{3}$	$1.25E/\sqrt{3}$
40℃	500	1.9	1,000	4,000
50℃	500	1.8	1,200	8,500
60℃	500	1.6	1,400	16,000
70℃	500	1.4	2,500	20,000
80℃	750	1.1	3,300	27,000

타내었다. 시험결과 동일전압에서의 유전정접 값은 온도가 높을수록 커졌으며, 전압증가에 따른 유전정접 증가율 ( $\Delta \tan \delta$ ) 또한, 온도에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 권선온도가 40℃에서 50℃로 10℃ 상승하였을 때 보다 70℃에서 80℃로 상승하였을 때가 유전정접 값이 더 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

고압전동기 고정자 권선의 온도변화에 따른 부분방전 시험결과는 표 8에 나타내었다. 고압전동기 고정자 권선의 온도를 40℃에서 80℃로 2배 증가했을 때 상전압 (2.4 kV) 과 상전압 1.25배 (3.0 kV)에서 부분방전 크기의 변화율은 각각 3.3배, 6.75배로 전압이 높을수록 온도에 따라 부분방전이 더 크게 변화하는 것을 알 수 있었다. 그리고 고압전동기 고정자 권선에서 측정된 부분방전 개시 전압 (Partial discharge inception voltage : PDIV)도 온도를 40℃에서 80℃로 2배 증가했을 때 1.73배로 감소하였다.

고압전동기 고정자 권선의 온도를 40℃에서 80℃로 증가함에 따라 절연저항은 온도에 반비례하여 감소하고 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기는 온도에 비례하여 증가하였다. 이러한 현상은 온도가 올라갈수록 고압전동기 고정자 권선 절연물 내부에서 전하의 이동도가 높아지기 때문에 적은 에너지만으로도 쉽게 이동하여 나타나는 현상으로 사료된다.

고압전동기 고정자 권선의 온도를 40~80℃로 변화시키며 온도에 따른 절연특성을 알아보기 위한 실험결과는 다음과 같다. 절

연저항은 온도에 반비례하여 감소하고 교류전류와 유전정접 값은 온도에 비례하여 증가하였다. 이는 절연물의 온도가 증가하면 전하의 이동이 수월해져 전류가 쉽게 흐를 수 있어 나타나는 현상이다. 또한, 전압증가에 따른 교류전류 증가율 ( $\Delta I$ ), 유전정접 증가율 ( $\Delta \tan \delta$ ) 및 부분방전 크기도 역시 온도에 비례하여 증가하였다. 이는 온도증가에 따라 쉽게 방전이 발생하여 나타나는 현상이다. 따라서 고압전동기 고정자 권선에서 절연진단의 모든 시험항목들이 온도에 따라 변하는 특성을 보이고 있기 때문에 진단결과 분석에 오류를 방지하기 위해 정지 후에는 대기온도 정도로 충분히 냉각 후 시험할 필요가 있다.

#### 4. 결론

고압전동기 고정자 권선 절연물의 상태를 평가하기 위한 절연진단 시험결과는 흡습상태, 세척작업을 마치고 건조 후 및 권선의 온도 변화에 따라 절연특성 값이 모두 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 권선이 흡습된 경우에는 낮은 전압에서부터 유전정접 값이 높게 나타나 흡습여부 판단에 유용하게 사용될 수 있었다. 또한, 권선의 온도가 높아지면 절연저항, 교류전류, 유전정접 및 부분방전 시험결과가 모두 악화되는 특성을 보였다. 이렇게 환경적인 요인들로 인해 고압전동기 절연특성 값들이 변화함으로 과거 시험결과와 비교하는 추이관리는 과거 시험당시 조건들이 현재와 유사하여야 그 의미가 있다.

외부의 환경적인 요인들을 배제하고 고압전동기 절연시스템 자체만의 특성을 파악하기 위해서는 대기온도에서 고정자 권선이 흡습이나 오염되지 않은 상태에서 시험을 하여야 정확한 진단이 이루어질 수 있다. 따라서 운전하던 고압전동기를 정지하고 바로 시험하는 것은 권선 온도가 높기 때문에 바람직

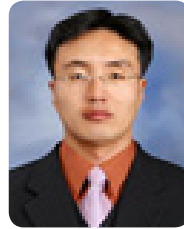


하지 않으며, 오염이나 흡습된 지역에서 운전하던 고압전동기들은 분해하여 권선을 세척하고 건조 후 시험을 하는 것이 필요하다. 이러한 결과가 산업현장에서 사용되는 고압전동기 절연진단 시험과 결과 분석의 신뢰성 향상에 도움이 되기를 기대해 본다.

### 참고 문헌

- [1] Motor Reliability Working Group, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installation", Parts I and II, IEEE IAS Transaction Vol I A-21, No4, pp. 863, 1985.
- [2] Hee-Dong Kim, "Analysis of Insulation Aging Mechanism in Generator Stator Windings", Journal of the KIEEME, Vol. 15, No2, pp. 119-126, 2002.
- [3] "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, pp. 13, 1977.
- [4] IEEE Standard "IEEE Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery (10,000kVA and Larger)" ANSI/IEEE Std 56-1997, pp. 12, 1997.
- [5] Hee-Dong Kim, Tae-Sik Kong, Young-Ho Ju, Byong-Han Kim "Analysis of Insulation Quality in Large Generator Stator Windings", Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 6, No. 2, pp. 384-390, 2011.
- [6] IEEE Std 43-2000 "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery" pp.10~11, 2000.
- [7] EPRI Research Project 2814-35 Final Report, "Electric Motor Predictive and Preventive Maintenance Guide" p.4-2, 1992.

### 저자약력



성명 : 공태식  
 ◆ 학력  
 • 1997년  
 충북대학교 공과대학  
 전기공학과 공학사  
 • 2004년  
 충남대학교 대학원  
 전기공학과 공학석사

◆ 경력  
 • 현재

한전 전력연구원 기술전문센터  
 선임연구원



성명 : 김희동  
 ◆ 학력  
 • 1985년  
 홍익대학교 공과대학  
 전기공학과 공학사  
 • 1987년  
 홍익대학교 대학원 전기공학과  
 공학석사  
 • 1998년  
 홍익대학교 대학원 전기공학과  
 공학박사

◆ 경력  
 • 2002년  
 • 현재

일본 큐슈공업대학교  
 초빙연구원  
 한전 전력연구원 기술전문센터  
 책임연구원

