

# 고압 유도전동기 고정자 권선의 절연 신뢰성 평가에 관한 연구

황 돈 하 · 심 우 용 · 강 동 식 · 강 도 현 · 김 용 주  
한국전기연구원 산업전기연구단

## A Study on Evaluation of Insulation Reliability for High-Voltage Motor Stator Windings

Don-Ha Hwang · Woo-Yong Shim · Dong-Sik Kang · Do-Hyun Kang · Yong-Joo Kim  
Industry Applications Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

**Abstract** - Recently, domestic electrical parts and materials without safety and reliability are avoided by consumers and introducing the product liability (PL) law. Therefore, the dependence on import product of electrical machines will be increased in the future.

In this paper, high-voltage induction motor ensures reliance that can maintain the performance of machines for a long time. Furthermore, the test of reliability evaluation that predicts a remaining life and breakdown test of the stator winding are performed. Also, this paper introduces various reliability assessment tests for getting reliability of the stator winding insulation in high-voltage motor.

리고 고정자 권선의 성능평가를 위한 성능시험, 절연 신뢰성 평가를 위한 시험항목, 시험방법 및 평가기준 등을 제안한다.

### 2. 고압 전동기의 신뢰성 및 절연열화

#### 2.1 Bath tub 곡선

일반적으로 전력설비의 가동시간이 증가함에 따라 발생하는 고장율  $\lambda(t)$ 의 특성에 따른 수명분포는 그림 1에 나타난 Bath-tub 곡선의 고장발생 형태인 Bath-tub failure rate (BTR)를 따른다. 초기 고장기는 고장 감소형(Decreasing failure rate : DFR) 특성으로서 양·불량 제품이 같이 이용되는 초기 사용기이므로 제조공정에서의 불량요인을 줄이는 방법이 유효하다. 우발적 고장기는 고장 일정형(Constant failure rate : CFR) 특성으로 열화에 의한 고장이 아닌 우발적 사고에 의하여 나타나는 것이다. 마모 고장기는 고장증가형(Increase failure rate : IFR) 특성으로서, 절연재료 가 마모·열화 등에 의해 본질적으로 수명 종료점에 근접되는 시기로서 고장발생 확률이 급속히 증가한다.

신뢰성이 확보된 선진국 제품의 경우 초기 사용기간이 지나면 시간에 따라 고장율이 감소하지만, 국산제품은 초기 사용기간이 지나도 고장율이 크게 감소하지 않는 것으로 나타나고 있다. 이는 부품·소재의 신뢰성이 취약하여 고장발생 부위를 수리하여도 다른 취약 부위가 고장나거나, 교체한 부품이 다시 고장나기 때문으로 조사되고 있다.

국산제품이 세계 일류제품으로 도약하기 위해서는 5년 누적 고장율을 선진국 수준인 10 [%] 이하로 저감시키는 것이 시급한 과제이다.

### 1. 서 론

새로 개발된 부품·소재의 시장 진입시에 최대 걸림돌이 되는 것이 신뢰성 문제이다. 또한, 제조물책임법(PL법)의 2002년 7월 시행으로 제품의 안정성 확보 및 제조업체의 위험분산 확보대책이 시급한 현안으로 대두되고 있다. 따라서 신뢰성이 확보되지 않은 국내 부품·소재의 경우 매출자세가 어려워질 것으로 예상된다. 그러므로 주어진 환경에서 고장없이 일정기간 동안 원래의 성능을 유지할 수 있도록 하는 신뢰성 확보의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 하지만 국내의 경우 아직 신뢰성을 객관적으로 확인할 수 있는 평가기술과 Infra 등의 부족으로 개발된 부품·소재의 신규 시장진입에 곤란을 겪고 있는 실정이다. 선진 외국과 같이 신뢰성 평가·인증제도가 도입될 경우 벤처기업 부품·소재의 국내 대기업 및 해외 기업에 납품을 촉진하는 계기가 될 수 있고, 인터넷을 통한 전자 상거래 활성화를 통한 경쟁력 제고에도 도움이 될 것으로 예상된다.

국내의 경우 1960년대 후반부터 경제개발 계획의 추진에 따라 전력수요가 급격히 증가되어 많은 전력설비가 설치되었다. 현재 이들 설비중 일부가 노후화 되어 대체 전력설비의 도입이 검토되고 있으므로 향후 이들 제품의 수요가 크게 증가할 것으로 예상된다. 하지만 안전성 및 신뢰성이 확보되지 않은 국내 부품·소재는 사용기피가 예상되어 향후 핵심 전기부품·소재의 수입의존도가 심화될 우려가 있다. 따라서 전기 부품·소재에 대한 고장발생과 사용수명 등에 대한 평가 및 인증기술을 확립하기 위한 신뢰성 평가기술을 적극 개발해야 한다.

본 논문에서는 산업 전 분야에 걸쳐 핵심 동력원으로 사용되는 전압 6.6 [kV] 이하, 용량 75~500 [kW]의 일반용 고압 3상 유도전동기를 대상으로 한 고정자 권선의 절연 신뢰성 평가기술을 소개한다. 먼저 고압 전동기의 고장발생 형태, 고정자 권선의 구조, 절연 시스템, 열화 메커니즘, 절연파괴 원인 등을 분석하였다. 그

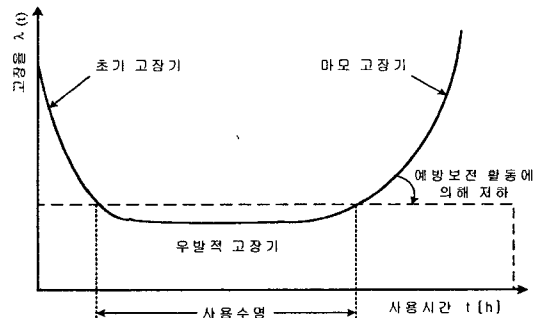


그림 1. Bath-tub 곡선 (일반적인 전기설비의 고장발생 형태)

#### 2.2 고압 전동기의 고장 원인

전기 부품·소재 및 설비의 고장율을 감소시키기 위해서는 고장원인을 명확히 파악할 필요가 있다. 고압 유도

전동기의 고장원인은 전기적인 결함, 기계적인 결함, 유지보수의 미비 등 크게 3가지로 나눌 수 있다. 그림 2는 고압 전동기의 고장 원인을 나타낸 것으로서, 고정자 권선의 절연열화 및 배어링이 전체 고장원인의 60 [%] 이상을 점유하고 있고, 나머지는 유지보수 미비, 운전과 실 등에 따른 고장이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 고장 원인 중에서 고정자 권선의 절연열화인 경우, 절연재료가 열화되면 절연물을 전부 교체하던가 새로운 설비로 대체해야 하므로 고정자 권선의 절연성능에 대한 신뢰성 확보가 가장 중요함을 알 수 있다.

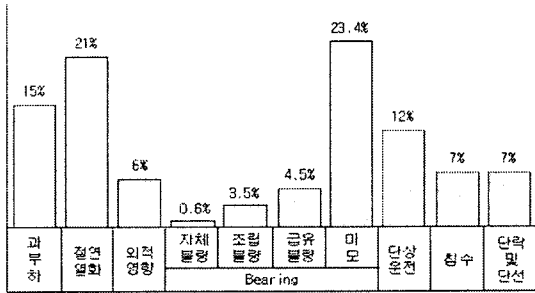


그림 2. 고압 전동기의 고장원인

### 2.3 고압 전동기 고정자 권선의 구조

대부분의 고압 유도전동기 고정자 권선은 그림 3과 같은 다중 턴 코일로 이루어져 있다. 절연재료는 소선절연(Strand insulation), 턴절연(Turn insulation) 및 주절연(Groundwall insulation)으로 분류할 수 있다. 소선절연 재료는 주로 합성 에나멜(Synthetic enamel)이 사용되고, 턴절연 재료는 마이카 테이프(Mica tape), 내코로나성(Corona resistant) 에나멜, 폴리이미드 필름 테이프(Polyimide film tape) 등으로 제작한다. 소선절연과 턴절연이 구분된 경우, 턴절연은 단락과 큰 순환전류로부터 턴을 보호해야 하므로 소선절연보다 보통 두껍다. 주절연 재료는 마이카에 결합재를 혼합하여 테이프 형태로 제작된 마이카 테이프를 사용한다. 결합재는 폴리에스터(Polyester)와 에폭시(Epoxy) 수지로 분류되고, 습기와 화학성분에 대한 내구성, 기계적 및 절연특성이 우수하여 대부분의 고압 전동기 제작업체가 이를 사용하고 있다. 고정자 권선의 함침방식은 진공가압 함침(Vacuum pressure impregnation; VPI) 방식을 사용하며, 절연재료와 권선 제조기술의 진보에 따라 대용량화, 고전압화, 소형 경량화 등이 이루어지고 있고, 절연계급도 F중 이상으로 제작되고 있다.

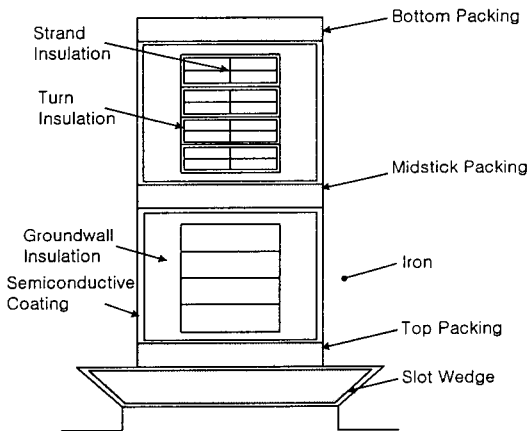


그림 3. 고압 전동기의 고정자 슬롯 단면도

### 2.4 절연열화 메카니즘

고압 유도전동기 고정자 권선의 절연은 제작시 보이드(Void)가 거의 존재하지 않는 치밀한 절연조직으로 되어 있지만, 그림 4와 같이 전동기의 운전이력에 따라 열적 열화, 히트싸이클 열화, 기계적 열화, 전기적 열화 및 환경적 열화 등에 의한 열화로 인하여 절연층 전체에 다수의 작은 보이드와 국부적으로 큰 보이드가 발생된다. 더욱이 운전시간이 길어지면 보이드 내에서 부분방전이 발생하여 열화가 진행되어 보이드 양이 더욱 증가하고, 절연내력은 시간이 따라 급격히 감소하게 된다. 이러한 부분방전과 보이드는 커패시턴스와 저항으로 구성된 모델로 설명이 가능하다[7].

그림 3의 고정자 권선의 구조와 그림 4에 나타난 절연열화 메카니즘에서 보는 바와 같이 소선 사이에 있는 고정자 슬롯을 통해 누설자속이 흘러서 소선에 와전압 및 와전류가 발생하기 때문에 소선 사이에는 전압차가 발생한다. 이로 인해 소선 사이의 절연이 약화되고 순환전류가 유도되고, 이 순환전류에 의해 온도가 상승함으로써 열화가 가속되며, 주위의 소선절연이 파괴되고 결국에는 주절연도 파괴되게 된다.

열적 열화도 역시 소선을 결합시키고 있는 유기질 수지를 약화시킨다. 이 결과 소선 사이의 상대적 이동으로 소선절연이 마모되어 파괴에 이른다.

기계적 피로는 구조적 손상을 야기시키고, 회전기에서 기계적 스트레인(Strain)은 기동과 정지중에 열-기계적 응력과 운전중에 전자력에 의해 발생된다. 기계적 피로는 마이카 크리스탈과 에폭시 영역에서 미소 균열을 생성시키며, 이들은 큰 결합 통로를 형성하여 바리로 진전된다. 전기적 응력은 결합부분에서 부분방전을 발생시키고, 부분방전은 또한 열적, 기계적 응력에 의해 발생된 바리에서 일어난다. 바리는 외부 전계에 대해 수직적으로 배향되는 얇은 공동(Thin cavity)이며, 침식은 가끔 마이카 자체의 높은 방전성에 의해 억제된다. 그래서 전기적 열화는 바리에 상대적으로 약하며, 한편 기계적 피로에 의해 야기된 균열은 외부 전계에 의존하고 가장자리에서 대개 집중된다. 그러므로 균열은 트리 생성과 낮은 파괴전압을 발생시키게 된다.

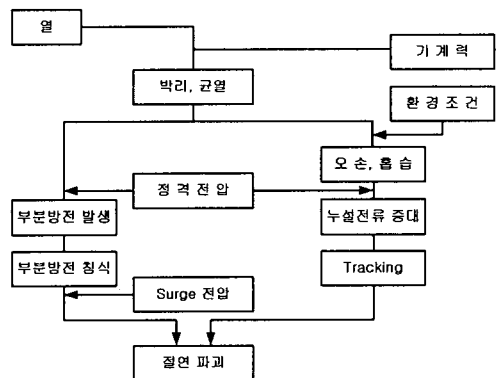


그림 4. 고압 전동기의 절연열화 메카니즘

### 2.5 절연파괴 원인

고압 전동기 고정자 권선의 주절연 재료로 사용되는 에나멜 혹은 마이카 테이프는 실제 운전중에 열적, 기계적, 전기적 및 환경적인 원인에 의해 절연열화가 진행된다. 열적 원인은 과부하, 주기적인 기동 정지, 소선절연의 손상, 마이카 테이프의 분리 등이고, 기계적 원인은 진동, 웨지(Wedge)와 권선 매듭(Tie)의 느슨해짐, 비동기화 등이 있다. 슬롯 웨지가 제대로 고정되어 있지 않으면 마모와 슬롯 방전에 의해 주절연이 손상된다.

전기적 원인으로는 부분방전, 슬롯방전, 불평형 전압, 스위칭 써지와 전력계통의 난조에 의해 발생하는 과도적인 응력(Stress) 등이 있다. 환경적 원인에는 도전성 물질, 습기, 먼지와 기름 등이 유입됨에 따라 절연열화 및 파괴가 발생한다. 그리고 절연재료는 사용연수가 증가함에 따라 복합적인 열화요인으로 인하여 마이카 테이프 내부 및 테이프 사이에 층간계면에서 균열(Crack), 공극 및 박리(Delamination) 등이 확장되어 절연파괴로 진전되는 것으로 알려져 있다.

### 3. 고압 유도전동기의 성능 및 신뢰성 평가

#### 3.1 성능평가 기준

고압 유도전동기에 대한 성능평가 시험의 항목과 기준은 표 1과 같다.

표 1. 성능평가 시험항목

시험항목	평가
온도상승	KS C 4203 8.2의 방법에 따라 시험시 KS C 4203 5.1의 값 이하이어야 하며 H중 절연인 경우 저항법으로 측정하였을 경우 130 °C 이하이어야 함
전부하 특성	KS C 4203 5.2의 표준 농형 보호형 및 표준 농형 전폐형의 기준을 따름
소음	전동기를 정격전압, 정격 주파수에서 무부하 운전했을 경우 소음도 측정
내전압	온도시험 직후 직류 1000 (V) 절연 저항계로 전동기 권선의 절연저항을 측정하여 1 [MΩ] 이상임을 확인한 후, 주파수 60 [Hz]의 정현파에 가까운 정격전압의 두 배에다 1000 (V) 높은 시험전압을 1차 권선과 철심 및 대지 사이에 1분간 가했을 때 전이어야 함
진동 시험	전동기를 정격전압, 정격 주파수에서 무부하 운전했을 경우 진동을 측정했을 때 표 2 이하이어야 함
무부하 시험	이상 진동 및 소음 미발생

표 2. 전동기의 진동시험 기준

회전속도 [rpm]	진동값 [μm]
3,000 이상	25.4
1500~2999	50.8
1000~1499	63.5
999 이하	76.2

#### 3.2 신뢰성 평가기준

고압 유도전동기에 대한 신뢰성 평가항목과 평가기준은 표 3과 같다.

표 3. 고압 전동기의 신뢰성 평가시험 기준

시험항목	평가기준
열화	6.900 [V] 이하의 전동기에 적용되는 평균 고정자 코일의 절연에 대해 5개 시료의 평균 예상수명 20,000시간 이상
진동	진동방법은 열화 사이클마다 시작전에 진동 테이블에서 1시간 동안 60 [Hz]로 진동시키고 진동의 크기는 0.2 [mm] (peak to peak)로서 1.5 [g]에 해당
습기 노출	열화 주기마다의 진동 이후에 각 시료를 48시간 동안 95~100 [%]의 상대습도 조건에서 수분에 노출시키고 이때 전압은 인가하지 않음
전압 인가	사이클마다 열화-진동-침수의 과정을 거친 시료에 전압을 인가하며 절연유지

### 3.3 신뢰성 평가 시험방법

#### 3.3.1 열화 시험

열화시험 방법은 시험 시편에 대해 열화를 가한 후, 기계적 진동 및 습기를 주고 주기적인 전압을 인가하여 절연 열화상태를 파악한다. 열화시험에 의한 평가는 다음에 나타낸 아레니우스식으로 적용한다.

$$L = Ae^{n/T}$$

여기서,

L : 고장까지의 시간

A : 종좌표(Ordinate)와 아레니우스 '수명'곡선과의 교차점을 나타내는 상수

b : 아레니우스 곡선의 기울기와 절연계의 고장 온도 시간과의 관계를 포함하는 비례계수

T : 절대온도

전동기 권선의 평균 수명시간(MTTF)이  $L_c$  시간으로 얻어지면 전동기 신뢰성 시험에서 신뢰도를 추정하기 위하여 지수분포로 가정하고, 각 신뢰수준에서 보증 수명 시간을 산출한다.

전동기 신뢰성 시험에서 사용된 시료 수량이 전부 5개가 사용되었고, 구해야 할 평균 수명시간(MTTF)이  $L_c$  시간이라면, 각 신뢰수준에 대한 권선의 보증 수명시간  $\theta_c$ 의 하한은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{2nL_c}{x_{\alpha}^2(2n)} \leq \theta_c$$

여기서, n은 시료의 수,  $x_{\alpha}^2(2n)$ 은 자유도가 2n인 카이제곱 분포의 100(1- $\alpha$ ) [%] 상위 백분위수,  $L_c$ 는 평균수명의 추정값이다. 요구되는 신뢰수준을 95 [%]와 90 [%]로 하면,  $\alpha$ 는 각각 5 [%]와 10 [%]가 되므로 이때의 보증수명  $\theta_c$ 는 표 4와 같다.

따라서 전동기의 절연 신뢰성 시험에서 평균수명의 추정값  $L_c$ 가 20,000 시간이라면, 95 [%]의 신뢰수준에서의 보증수명( $\theta_c$ )는 10,920 시간이 되고, 90 [%]의 신뢰수준에서는 16,580 시간이 된다.

표 4. 전동기 권선의 신뢰수준과 보증 수명시간과의 관계

신뢰수준	$\alpha$	$x_{\alpha}^2(2n)$	$\theta_c$ (hr)
95 [%]	0.05	18.307	0.55 $L_c$
90 [%]	0.1	15.987	0.83 $L_c$

#### 3.3.2 진동 시험

열화의 첫 번째 사이클 이전과 열화의 각 사이클 시작 전마다 각 시료를 진동시킨다. 진동방법은 열화 사이클마다 시작 전에 진동 테이블에서 1시간 동안 60 [Hz]로 진동시키고 진동의 크기는 0.2 [mm] (peak to peak)로서 1.5 [g]에 해당한다. 진동은 시료가 놓인 평면과 수직되게 이루어져야 하며, 코일의 리드선 부분은 흔들릴 수 있도록 자유로운 상태이어야 한다. 그리고 상온에서 전압이 인가되지 않은 상태에서 진동시험을 수행한다.

#### 3.3.3 습기노출 시험

열화 주기마다의 진동 이후에 각 시료를 48시간 동안 95~100 [%]의 상대습도 조건 혹은 수도물에 노출시키고, 이때 전압은 인가하지 않는다.

#### 3.3.4 전압인가 시험

사이클마다 열화-진동-침수의 과정을 거친 시료에 전압을 인가하며, 전압 인가조건은 표 5와 같다. 전압은 침수 후에 상온에서 대기간, 코일간 및 도체간 각각 10분 동안 인가한다.

표 5. 전압인가 조건

정격 선간 운전전압 $V_{rms}$	대지간과 코일간 시험 : 교류전압 $V_{rms}$	도체간 시험	
		임펄스 전압 $V_{peak}$	교류전압 $V_{rms}$
500 이하	1000	250	115
551~1000	1000	250	115
1001~1500	3000	250	115
1501~2000	4000	250	115
2001~2500	5000	250	115
2501~3500	7000	250	115
3501~4500	9000	250	115
4501~5500	11000	250	115
5501~6900	13800	250	115

3.3.5 전동기 보증수명

전동기는 권선과 베어링으로 구성된 직렬구조로서 두 요소 중 한 요소라도 고장나면 시스템이 고장나는 구조이다. 이때 전동기의 권선과 베어링의 신뢰수준이 각각 90 [%]와 95 [%]이라면 전동기의 신뢰수준은 85.5 [%]가 되고, 권선의 보증수명  $\theta_c$ , 베어링의 보증수명  $L_b$  가 주어지면, 전동기의 보증수명  $T$  는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{\theta_c \cdot L_b}{\theta_c + L_b}$$

따라서 전동기 고정자 권선의 절연 신뢰성 시험에서 평균수명의 추정값  $L_c$ 가 20,000시간( $\theta_c = 16,580$ )이고, 전동기의 베어링 신뢰성 시험에서 수명의 추정값  $L_b$ 가 12,400시간( $L_b = 241,700$ )이라면, 85.5 [%]의 신뢰수준에서 전동기의 평균수명  $T$ 는 다음 식과 같이 15,515시간이 된다.

$$T = \frac{16580 \cdot 241700}{16580 + 241700} = 15,515 \text{ 시간}$$

3.3.6 아레니우스 수명곡선

고압 전동기 고정자 권선의 열화가속 수명시험 결과는 그림 5에 나타낸 아레니우스 식으로 그려진다. 예상 사용온도에 대한 수명은 그림 5에서와 같이 추정값 3개의 점을 연결하여 예측하고, 예상 사용온도는 전동기의 정격부하에서 고정자 권선 단부의 중앙에 열전대로 측정하는 온도 값으로 한다. 165 [°C]에서 전동기를 사용할 경우는 20,000시간을, 180 [°C]에서 전동기를 사용할 경우에는 6,000시간을 수명으로 예측한다.

4. 결론

본 논문에서는 국내 전기 부품·소재 업체 및 전동기 제작 업체들이 향후 제조물 책임법(PL법)의 시행으로 시장 진입시 문제가 되는 당면과제인 신뢰성 인증을 위해서, 고압 유도전동기 고정자 권선의 절연 신뢰성 평가 기술을 소개하였다. 이러한 신뢰성 인증을 통해 국내 대기업 및 해외 기업에 납품을 촉진하는 계기가 될 수 있고, 인터넷을 통한 전자 상거래 활성화를 통한 경쟁력 제고에도 도움이 될 것으로 기대된다.

본 논문에서 제시하는 고압 유도 전동기의 신뢰성 확보를 위한 신뢰성 평가 시험방법과 평가기준을 통하여 국산 부품·소재의 신뢰성을 세계적 수준으로 향상하여 국내 고압 유도 전동기 핵심 부품·소재의 수입 의존도를 탈피하여 고압 전동기의 고성능화와 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

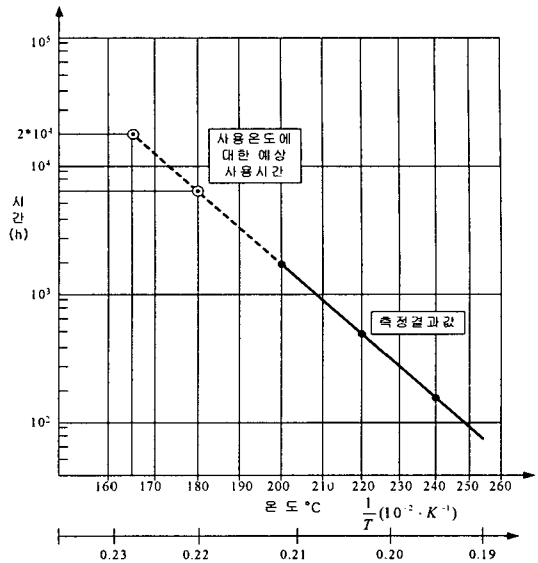


그림 5. 열화시험 결과를 이용한 수명시간 예측곡선

(참고 문헌)

- [1] KS C 4201, "3상 유도 전동기의 특성 시험 방법"
- [2] KS C 4203, "일반용 고압 3상 유도 전동기"
- [3] IEC 60034-1, "Rotating electrical machines, Part 1. Rating and performance"
- [4] IEC 60034-9, "Rotating electrical machines, Part 9. Noise limits"
- [5] IEC 60172, "Test procedure for the determination of the temperature index of enamelled winding wires"
- [6] IEEE Std 275, "IEEE Recommended practice for thermal evaluation of insulation systems for alternating-current electric machinery employing form-wound pre-insulated stator coils for machines rated 6900 V and below"
- [7] 황돈하, 구대현, 강도현, 김용주, "고압 전동기 고정자 권선의 절연 신뢰성 평가", 제1회 전기 부품·소재 신뢰성 평가기술 심포지움, pp. 153~156, 2002. 3. 15.