

온도가속수명시험에 의한 고압전동기 신뢰성분석연구

김민규, 홍정표, 구대현
한국전기연구원

A Study on the Reliability Analysis of the Motor by Temperature Accelerated Life Test

Min-Kyu Kim, Jeong-Pyo Hong, and Dae-Hyun Koo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 고압전동기나 발전기의 사용수명은 절연시스템의 열화에 의해 좌우된다. 일반적으로 기기의 내구성을 확인하기 위해 국제규격이나 국내규격에서 적용하고 있는 방법으로는 온도에 의한 열화시험을 실시하여 절연계급에 대한 내구성을 평가한다. 본 논문에서는 현재 국내에서 제정된 신뢰성평가기준에 따른 국내 2개 회사의 일반유도전동기에 대해 실시한 온도 가속수명시험을 통해서 얻어진 자료를 이용한 시험방법의 개선 및 고장분석 등 신뢰성분석에 대해서 서술한다.

1. 서 론

전기기기의 신뢰성은 기기 절연시스템의 신뢰성에 직접적으로 연관되어 있다. 전동기나 발전기와 같은 전기기기의 고장은 전기적-열적 또는 열적-기계적 스트레스 하에서 절연물의 손상에 기인한다. 일반 유도형 전동기의 고장원인을 살펴보면 고장원인의 60% 이상이 권선의 절연상태 및 베어링에서의 고장이다. 특히, 전체 고장의 21%가 절연열화에 기인하고 있으며, 23% 정도가 베어링의 마모에 기인하고 있다. [1]

산업의 발달에 따라 사용량이 증대되고 있는 전동기에 대한 신뢰성을 확보하는 것이 전기기기 및 부품 소재분야에서, 그 중요성이 매우 높게 대두되고 있는 실정으로 현재 한국전기연구원이 전기분야의 신뢰성평가 실시기관으로 지정되어 신뢰성평가를 위한 평가 기준의 개발 및 평가 장비의 구축 등 제반 신뢰성평가 기반구축사업의 수행중에 있다. 일반 정현파 구동 전동기 및 인버터 구동 유도전동기에 대한 신뢰성평가 기준을 개발하였으며, 일반 유도형 전동기에 대한 신뢰성평가를 실시하여 얻어진 결과로부터 당초 개발한 신뢰성기준의 적합성을 평가하고 개선방안을 찾고자 하였다.

본 논문에서는 아레니우스 모형을 이용하여 전동기의 수명을 평가하는 시험방법과 전동기 절연의 사고에 관련한 완전 데이터를 가지고 통계적으로 분석한 결과를 서술한다.

2. 본 론

2.1 가속수명시험과 평가기준 검토

2.1.1 가속수명시험 모형

운전중에 있는 전동기는 열적-기계적 스트레스를 받고 있으며, 일반적으로 열적 열화에 의해 전동기 절연시스템의 절연이 손상을 받아서 절연내력의 저하로 수명이 다하는 것이 지금까지 알려진 결과이며, 열적 스트레스를 이용한 온도가속수명시험법을 적용하는 경우에는 널리 알려진 아레니우스 모형을 이용하게 된다. 아레니우스 식은 온도함수로 표현되는 화학반응의 속도론에서 유도되어 절연물의 수명과 온도 사이의 관계를 근사적으로 다음과 같이 표현한다.[2]

$$k = D \exp(-E/RT)$$

여기서, k는 반응속도, E는 반응의 활성화 에너지, R은

Boltzmann 기체상수, T는 절대온도, D는 빈도 요소, 절연물의 화학적 열화를 일으키는 분자 반응의 충돌수에 의존한다.

따라서 절연물의 메디안 수명은 화학반응 속도에 반비례하는 것으로 가정할 수 있으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\log(L) = constant + ((E/RT)/2.303)$$

여기서, log는 밑이 10인 로그함수이며, 이러한 아레니우스 식은 다음과 같은 기하학적인 형태로 표현될 수 있다.

$$M(X) = A + BX$$

여기서, M(X)는 log(L) = 평균로그 수명, X = 1/T, A는 상수로 절연물의 모집단, 시료, 시험방법, 고장모드의 특성을 표현, B는 E/(2.303R)이다.

2.1.2 평가기준 검토

신뢰성평가기준 RS C 0020[3]에 기술된 온도가속수명 시험에 대한 내용과 기타 국내 및 국제 시험규격에 나와 있는 사항을 비교한 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. 평가기준의 비교

구분	RS C 0020	KS	IEEE Std 98 2002	IEC 172
수준수	3점 이상	3점 이상	3점 이상	3 4점
시험시간	시험시간이 100시간 이상 되는 수준(예)	시험시간이 100시간 이상 되는 수준(예)	메디안수명이 100 500시간	100시간 이하가 되지 않도록
시험조건	열화시간이 28 49일 TI+20~40℃(예)	열화시간이 28 49일 TI+20~40℃(예)	평균수명이 5,000시간 이상 TI+25℃ 이하	메디안수명이 5000시간 이상
간격	20℃ 차이	20℃ 이하	20℃ 이하(>10) 동일간격	20℃ 이하
시료수	총 5개		각 수준에서 5개 (<11)	21(<11)
Cycle 수	8~20 cycle (예)	8~20 cycle (예)	메디안수명 10 cycle 되도록 (> 7cycle)	메디안수명 10 cycle
수명	20,000	20,000	20,000~40,000	20,000

TI : 내연지표(온도), 형; 형권, 예; 예나뎀

모든 시험규격에서 시험 온도의 수준수를 3점 이상으로 명시하고 있다. 또한 시험에 이용되는 시료의 수는 최저 5개 이상을 지정해 놓고 있다.

IEEE Std 275 - 1992는 형권선을 대상으로 하여 2개 이상의 절연물을 하는 것이 주 목적으로 신뢰성기준과 차이는 메디안 사이클이 10 이상으로 되어 있다는 점이다. 최종적으로 평가를 통해 예측하는 수명의 기준을 최

저 20,000시간으로 해서 이러한 기준에 따라 고장이 없이 시험을 통과하게 되면 20,000시간을 보증하게 된다.

2.2 신뢰성평가시험

2.2.1 시험방법

신뢰성평가 대상인 수중용 3상 유도전동기의 사양은 표 2와 같다.

표 2 신뢰성평가 대상 전동기 정격사양(A社)

구분	사양
출력	2.2[kW]
선간전압	380[V]
정격전류	7[A]
주파수	60[Hz]
정격회전수	3,450[rpm]
권선 절연계급	F종

권선의 구분은 에나멜선으로 온도가속수명시험의 내용 및 절연열화를 평가하는 기준은 표 3과 같다.

표 3. 온도가속수명시험 및 절연열화 평가기준

항목	구분	시험 항목	시험 방법	평가기준
절연 수명 가속 시험	에나멜선	열화 시험	RS C 0020 8.1.2 가	고정자 에나멜 권선에 대해 5개 시료의 평균 수명 20,000 시간 이상
			RS C 0020 7.1.5 나	사이클마다 열화 과정을 거친 시료에 전압 인가조건 7.1.5를 인가하며 절연유지

RS C 0020 8.1.2 가

에나멜선의 절연열화 평가시험도 형편과 같이 열화 시험 후 전압인가 시험이 실행된다. 이 시험도 반복적으로 행해지며, 시험회수는 진행 중 권선의 절연파괴가 발생할 수 있을 만큼 충분히 많은 회수로 결정된다. 열화시험의 시편은 권선작업이 된 고정자 혹은 권선 자체만을 시험할 수 있다.

RS C 0020 7.1.5

내전압 시험은 온도 시험 직후 직류 500V 절연 저항계로 전동기 권선의 절연저항을 측정하여 1MΩ 이상임을 확인한 후, 주파수 60Hz의 정현파에 가까운 표의 시험 전압을 1차 권선과 철심 및 대지 사이에 1분간 가한다. 단, 대량 생산하는 전동기에는 시험전압의 120% 전압을 1초간 가하여 이를 대신할 수 있다.

표 4. 시험온도별 추정 내열지표

시험온도 (℃)	추정 내열지표(℃)
	150 ~ 159
230	1
220	2
210	4
200	7
190	14
180	28
170	49

2.2.2 A회사의 시험결과

A회사의 시료를 가지고 온도가속수명시험을 실시하여 얻어진 수명자료는 표 5와 같다. 각각의 시험온도에서 절연파괴시간은 파괴사이클 구간의 1/2 사이클로 계산하여 절연파괴시간을 산출하였다.

표 5. 온도가속수명시험에서 획득한 수명자료

온도(℃)	190	190	190	190	190
절연파괴시간(h)	1848	1848	1512	1512	1848

온도(℃)	210	210	210	210	210
절연파괴시간(h)	720	720	528	528	624

온도(℃)	230	230	230	230	230
절연파괴시간(h)	108	156	132	156	108

가속수명시험 자료 분석결과는 다음과 같다. 먼저 최우 추정법으로 대수정규분포를 가정하여 분석하였다. [4]

가) 가속수명시험 분석

시험에서 얻어진 가속수명자료를 신뢰성분석 프로그램인 Minitab을 이용하여 수명분포가 대수정규분포를 따른다고 가정하고 최우추정법을 사용하여 아래니우스 관계식으로 수명을 해석한 결과 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

Regression Table

Predictor	Coef	Standard Error	Z	P	Lower	Upper
Intercept	-24.698	1.566	-15.77	0.000	-27.274	-22.123
HTemp	1.28687	0.06508	19.77	0.000	1.17983	1.39392
Scale	0.20502	0.03743			0.15184	0.27684

Table of Percentiles

Percent	HTemp	Standard Percentile	90.0% Normal CI Lower	90.0% Normal CI Upper
10	155	20296.01	4291.400	14334.01
50	155	26394.95	5435.432	18811.21
				37036.08

사용조건인 155℃에서 10%가 고장나는 시간인 B10 수명은 20296 시간으로 추정되고, 95 % 단측 신뢰수준의 하한은 약 14,334시간이며, median은 26,394 시간으로 추정되고, 95 % 단측 신뢰수준의 하한은 18,811 시간으로 추정되었다.

나) 아래니우스 용지 도식

아래니우스 용지를 이용하여 그림 1과 같이 각 시험점의 median값의 적합성을 살펴보았다.

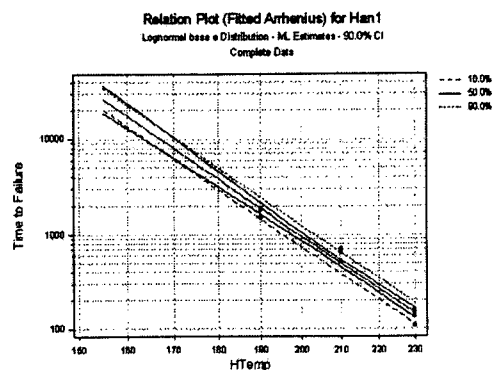


그림 1. 아래니우스 용지를 이용한 Median 값의 적합성

다) 가속성 성립

적합 직선의 기울기인 척도모수의 동일성을 검정하므로써 시험온도 3 수준에서 가속성 성립의 유무를 확인하였다. 그림 2는 속성이 성립함을 나타내고 있다. Minitab을 이용한 해석에서 시험온도 190℃, 210℃, 230℃ 수준 사이의 가속성을 검정한 결과를 표 6에 정리한다..

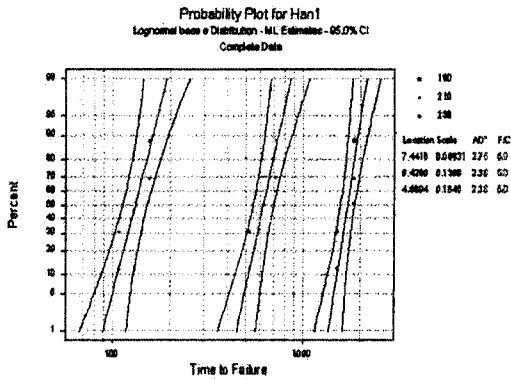


그림 2. 척도모수 가속성 검정(A社)

표 6. 가속성 검정결과

Test for Equal Scale Parameters		
Chi-Square	DF	P
1.379	2	0.502

P의 값이 0.1 보다 크고, 온도스트레스에 따른 기울기를 살펴보면 가속성이 성립함이 성립함을 알 수 있다.

라) 잔차 도시

추정된 수명분포와 가속모형이 적합한지를 살펴보기 위해 회귀분석으로부터 표준화 잔차를 그림 3과 같이 구하였다

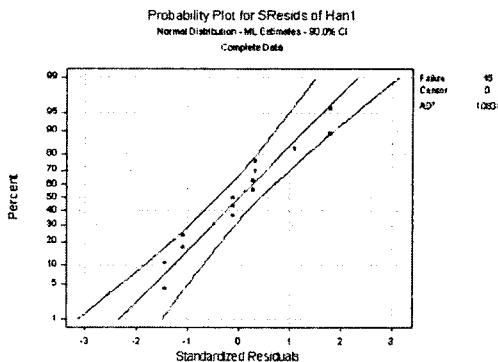


그림 3. 표준화 잔차도시

잔차도시 결과 추정된 직선에 잘 적합하고 있으며, 신뢰성구간 내에 존재하므로 수명분포가 적합하고 가속모형이 적절하다는 것을 의미한다.

마) 신뢰성평가 기준 검토

F종 절연물의 운전조건인 155°C에서의 median 수명이 26,324시간으로 기준에서 지시한 20,000시간을 초과 하지만 신뢰수준이 95%에 미치지 못하는 결과가 나왔다. 이러한 결과는 기준에서 또 하나의 시험조건으로 규정한 8 cycle 이상이어야 하는 조건을 만족하지 못한 결과이다. 한편 가속수명시험 분석과 선형성분석 결과를 볼 때 사용조건에 가까운 온도에서의 평균값을 연결하여 연장선으로 운전조건에서의 수명을 추정하기 보다 모든 시험온도에서의 값을 잘 통과하는 직선을 연장해서 수명을 추정하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

2.2.3 B회사의 시험결과

B회사의 전동기는 C종 절연을 사용한 것으로 운전 조건은 130°C가 최고이므로 시험온도의 3 수준을 170°C, 190°C, 210°C로 설정해서 온도가속수명시험을 실시하였다. 수명자료는 표 7과 같다.

표 7. B사 온도가속수명시험에서 획득한 수명자료

온도(°C)	170	170	190	190	210	210
절연파괴시간(h)	840	1176	144	336	36	84

가속수명자료를 이용해서 최우추정법으로 사용조건에서의 B10 수명을 추정해보면 23,996시간이 되고, 95% 신뢰수준의 하한은 12,174시간으로 나타났다. 또한 median은 37,198시간이고, 95% 신뢰수준의 하한은 19,011 시간으로 추정할 수 있다.

가속성의 성립여부를 확인하기위한 척도모수 동일성 검정에서 온도스트레스에 따른 기울기를 살펴보면 그림 4에서 보는 바와 같이 유사하므로 가속성이 성립한다고 볼 수 있으나, 210°C에서의 기울기가 다른 두 온도에서의 기울기와 차이가 있어 210°C 시험자료를 제외하고 가속수명자료를 분석해보면, 사용조건에서의 B10 수명은 9,054시간이 되고, 95% 신뢰수준의 하한은 4,413시간으로 나타났다. 또한 median은 11,873시간이고, 95% 신뢰수준의 하한은 5,8781시간으로 추정된다.

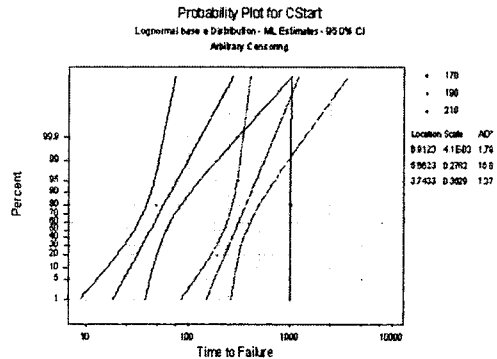


그림 4. 척도모수 가속성 검정(B社)

3. 결 론

본 연구에서는 현재 국내에서 제정된 신뢰성평가기준에 따른 국내 2개 회사의 일반유도전동기에 대해 실시한 온도 가속수명시험 결과를 신뢰성분석 프로그램을 이용하여 해석하였다. 결과적으로 신뢰성기준 설정시에 시험 온도 3 수준에서 시료 5개를 할당하여 평균값이 아닌 중앙값(5개이면 3번째)이 고장날 때 까지 시험을 하는 조건으로 인증조건을 변경하는 것이 타당하다고 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Robert C. Gleichman, "Failure Modes and Field Testing of Medium Voltage Motor Windings", IEEE trans. Industry Appl., Vol. 38, No. 5, 2002
- [2] ANSI, "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Thermal Life Test Data", 1987
- [3] "일반용 3상 유도전동기 신뢰성 기준(RS C 0020)", 산업자원부 기술표준원, 2002
- [4] 서순근, "MINITAB 신뢰성분석", 2002년