

전자식 계량/계전기의 신뢰성평가 방법 연구

이도훈*, 이용희, 신양섭, 김영근, 신영준
LS산전 전력연구소

김민 박정원
KAIST KTL

A Study on Reliability Estimation for Electricity Meter and Digital Protection Relay

D.H. Lee*, Y.H. Lee, Y.S. Sin, Y.K. Kim, Y.J. Sin
LSIS ELECTROTECHNOLOGY R&D CENTER

M. Kim
KAIST

Abstract - 21세기의 무한 경쟁 환경에서 기업의 생존은 고객 만족에 의해 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 한편, 고객 만족을 달성하기 위해서는 고객의 욕구가 어떻게 변화하고 있는가를 충실히 파악하여야 한다. 현재의 고객은 제품의 기본 기능과 가격 등의 요소뿐만 아니라, 제품의 품질, 특히 신뢰성에 매우 민감한 반응을 보이고 있으며, 각 기업은 이러한 추세를 반영하여 제품의 보증기간을 경쟁적으로 연장하고 있다.

신뢰성이란 제품이 얼마나 오랫동안 고장 없이 의도한 기능을 발휘할 수 있는가를 나타낸다. 즉, 신뢰성이란 시간적 품질을 의미하며 제품이 충분한 신뢰성을 가지고 있지 못할 경우, 과도한 클레임으로 인한 보증비용의 증가와 같은 단기적인 손해뿐만 아니라, 고객 불만족, 고객 이탈, 기업 경쟁력 상실 등으로 야기되는 장기적인 손실에 이르기까지 매우 큰 피해를 감수해야 한다. 따라서 제품의 신뢰성은 기업의 생존과 경쟁력 우위를 확보하기 위한 중요한 전략적 요소로 다루어 져야 한다.

신뢰성 활동은 크게 신뢰성 평가와 신뢰성 설계 두 가지로 나눌 수 있다. 전자는 현재 개발 또는 양산 중인 제품의 신뢰성 수준이 어느 정도인가를 파악하고자 하는 활동이며, 후자는 제품에 신뢰성을 높이기 위한 일련의 활동을 포함한다. 한편, 신뢰성 평가는 모든 신뢰성 업무에서 앞서 선행적으로 이루어 져야 하는 기초적 활동이며, 본 과제에서는 자사의 전자식 전력량계(LSEW12)와 디지털 보호계전기(GIPAM2200)를 대상으로 신뢰성 평가에 관한 연구를 수행하였다.

1. 서 론

과학기술의 진보로 제품의 수명이 길어짐에 따라, 정상 사용조건하에서는 가용한 시간 내에 제품의 신뢰성에 대한 정보를 얻는 것이 어렵거나 불가능하게 되었다. 따라서 시험시간을 단축시키기 위해 정상 사용조건보다 더 열악한 환경 하에서 시험을 수행하는 가속수명시험의 도입이 필수적이라 할 수 있다.

가속수명시험은 사용조건과 가속조건에서의 고장모드(Failure Mode)와 고장메커니즘(Failure Mechanism)이 동일해야 하며, 시험의 경제성을 도모하기 위해서는 주요 고장 메커니즘을 효과적으로 촉진시키는 적절한 가속변수와 그 수준, 시료수, 시험 기간 등에 대한 시험계획을 최적화할 필요가 있다. 따라서 온도, 습도, 전압, 주파수, 진동, 충격, 고조파, 정전횟수 등 전자식 전력량계와 디지털 보호계전기의 고장을 가속시킬 수 있는 유효한 가속 변수를 찾아내고, 하나 혹은 둘 이상의 가속변수를 이용한 가속수명시험법의 개발이 필요하다.

가속수명시험을 계획/진행하기에 앞서 가속변수와 그

수준을 결정하고, 제품의 설계 결함 및 취약 부분을 발견하기 위해서 HALT(Highly Accelerated Life Test)를 수행하였다.

한편, 신뢰성이 매우 높은 제품은 가속수명시험을 이용해서도 한정된 시험 기간 안에 수명 정보를 얻기 힘든 경우가 있을 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 제품의 고장 시간이 아닌 열화량을 관측 특성으로 하는 가속열화시험을 이용할 수 있다. 이때, 제품의 고장과 밀접한 관련을 가지는 열화 특성치를 발견하고, 이를 측정할 수 있어야 하며, 적절한 가속열화모형이 수립되어야 한다. 또한, 신뢰성이 매우 높은 제품의 경우, 제품을 단위로 시험을 수행할 때 고장을 발견하거나 고장과 밀접한 관련을 갖는 열화특성치를 찾는 것이 어려울 수 있다. 따라서 구성 부품을 우발고장모드를 가지는 부품과 마모고장모드를 가지는 부품으로 나누어 우발고장모드를 가지는 부품에 대해서는 신뢰도 예측 기법을 통해 고장률을 추정하고, 마모고장모드를 가지는 부품에 대해 가속 신뢰성시험을 수행하여 수명을 계산한 후, 두 결과를 합쳐 전체 제품의 신뢰도를 평가하는 방안에 대한 연구도 필요하다. 이 때, 가속조건에서 얻은 결과로부터 사용조건에서의 신뢰성을 산출하기 위해 통계 기법을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 연구 대상 제품인 전자식 전력량계와 디지털 보호계전기는 여러 부품으로 구성된 제품으로서 주요 구성품의 가속계수를 산출한 후, 이로부터 제품의 유효 가속계수를 산출해야 하는 상황이다. 따라서 현장에서 쉽게 응용 가능한 제품의 유효 가속계수 산출 방법을 개발할 필요가 있다.

2. 이론적 신뢰도 예측

2.1 신뢰도 예측의 목적

신뢰도 예측은 제품의 운용 및 사용조건을 고려하여 고장률 또는 MTBF와 같은 신뢰성 척도값을 예측하는 과정이다. 신뢰도 예측은

- 초기 설계규격, 계획서 및 제안서를 요청하기 위한 신뢰성 요구조건 수립
- 신뢰성 요구조건에 대한 설계 적합성과 실현 가능성 평가
- 설계 대안들의 비교 및 절충안 제시
- 잠재적인 신뢰성 문제의 확인과 우선순위의 설정
- 하위 아이টে็ม으로의 신뢰도 목표값 배분
- 보증계획수립, 예비부품 수요예측, 시험평가 등을 위한 입력 자료의 제공

등과 같은 목적을 위해 수행된다. 본 연구에서는 사용현

장에서의 제품의 신뢰성을 개략적으로 파악하고 향후 진행될 마모 고장 형태를 갖는 구성부품의 수명 시험 결과와 결합하여 제품의 신뢰성을 평가하기 위해 전자식 전력량계(LSEW12)와 디지털 보호계전기(GIPAM2200)에 대한 신뢰도예측을 수행 하였다.

2.2 신뢰도 예측의 동향

전자부품의 신뢰도 예측을 위한 규격으로는 IEEE Std. 1413 (IEEE Standard Methodology for Reliability Predictions and Assessment for Electronic Systems and Equipment), IEC 62380 TR Edition 1 (Reliability Calculation Guide for Electronic Components and Optical Cards) 등이 있으며, 이들을 바탕으로 보다 구체적인 내용을 담고 있는 여러 방법론들 중 대표적인 것으로서 MIL-HDBK-217 (Reliability Prediction of Electronic Equipment)와 Telcordia SR-332 (Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment)가 있다.

MIL-HDBK-217은 1960년 미국방성에서 제정된 이래 40여 년간 널리 쓰여 온 방법론으로서 이후 만들어진 다양한 신뢰성 예측 방법론의 근간이 되었다. 그러나, 1995년 예측의 부정확성으로 인해 폐기되어 update가 중단되었고, 현재 RAC (Reliability Analysis Center)에서 MIL-HDBK-217을 대체할 방법론을 개발하기 위해 EPRD (Electronic Parts Reliability Data), NPRD (Non-electronic Parts Reliability Data)와 같은 데이터를 수집하고 있다. 한편, 1985년까지 MIL-HDBK-217을 신뢰성 예측 방법론으로서 사용해온 Bellcore (Bell Communication Research)사에서 군수부품을 위주로 개발된 MIL-HDBK-217을 적용할 때 상용 부품들의 수명이 극단적이고 비현실적으로 예측된다는 사실을 발견, Bellcore사의 현장 경험과 필드 데이터를 반영하고 MIL-HDBK-217의 각종 계산 모델을 변경하여 새로운 신뢰성 예측 모델인 Bellcore TR-332를 제정하였다. 이후, Bellcore사가 1997년 SAIC에 인수되어 1999년 Telcordia Technologies로 개명되면서 Bellcore TR-332를 개정 보완한Telcordia SR-332가 발간되어 최근까지도 꾸준히 update 되고 있으며, 군수용 제품 생산업체를 제외한 통신, 가전 등 상용 제품 생산업체로부터 널리 채택되고 있는 추세이다. 따라서, 본 연구에서는 상용 제품에 대해 MIL-HDBK-217보다 정확한 신뢰도 예측값을 제공하는 것으로 평가되는 Telcordis SR-332를 사용하여 전자식 전력량계(LSEW12)와 디지털 보호계전기(GIPAM2200)에 대한 신뢰성 예측을 수행하였다.

2.2 전자식 전력량계(LSEW12)의 신뢰성 예측

신뢰성 예측은 (주)포톤티스에서 개발한 HandyMTBF를 사용하였으며, 본 연구에서 신뢰성 예측에 사용한 방법은 각 부품에 인가되는 스트레스 수준을 평균값으로 가정하고, 운영환경, 품질등급 만으로 고장률을 계산하는 Parts Count Analysis 이므로, 나머지 항목들은 default 값을 그대로 사용하고, 부품등급을 Level 2로 선택하였다. 정상 사용 온도인 23℃에서 LSEW12의 각 부품등급별 신뢰도 예측 결과는 표 2.1과 같다.

표 2.1 신뢰도 예측 결과 (23℃, 부품등급 Level 2)

구분	모델명	고장률 (FITs)	MTBF (hours)	Reliability (MT:7년)
System	LSEW12	388.921	2571216.064	0.976433494
Unit 1	전류신호 검출부	45.4147	22019311.82	0.997219046
Unit 2	전압신호 검출부	17.385	57520884.4	0.99893452
Unit 3	POWER SUPPLY	122.1015	8189910.931	0.992540699
Unit 4	LCD	1.6572	603438392	0.999898388
Unit 5	Reference 전압부	106.7365	9368869.831	0.993476293
Unit 6	TEST I/O	1.3209	757076775.2	0.999919008
Unit 7	LED 구동전원	3.4183	292540509.5	0.99979041
Unit 8	CLOCK CH-308	54.4537	18364235.14	0.99666647
Unit 9	PROGRAM DOWNLOAD	30.8525	32412336.78	0.998109916
Unit 10	MSP430	5.581	179180642.8	0.999657834

주위 온도에 따른 신뢰성 추도의 변화를 살펴보고, 향후 진행될 온도를 가속변수로 삼는 가속신뢰성시험 결과와의 비교를 위해 여러 온도에 대한 신뢰도 예측 결과를 표 2.2에 정리하였다. 이 때, 부품등급은 기본 설정 값인 Level 2로 고정하였다.

표 2.2 주위 온도에 따른 신뢰도 예측 결과

주위 온도 (℃)	MTBF (years)	Reliability (MT:7년)	B10 수명 (years)
-15	1246.06	0.9944	131.29
0	754.50	0.9908	79.49
25	268.74	0.9743	28.31
55	69.45	0.9041	7.32
70	35.66	0.8218	3.76
85	18.70	0.6877	1.97
100	10.05	0.4983	1.06
125	3.79	0.1575	0.40
150	1.53	0.0105	0.16

2.2 디지털 보호계전기(GIPAM2200) 신뢰성 예측 정상 사용 온도인 23℃에서 GIPAM2200의 각 부품등급별 신뢰도 예측 결과는 표 2.3과 같다.

표 2.3 신뢰도 예측 결과 (23℃, 부품등급 Level 2)

구분	모델명	고장률 (FITs)	MTBF (hours)	Reliability (MT:7년)
System	GIPAM2200	7369.9282	135686.5318	0.937479328
Unit 1	BASE	48.4513	20639289.61	0.999575657
Unit 2	MAIN	1057.5877	945548.0351	0.990778314
Unit 3	I/O	3303.6984	302691.0689	0.971474365
Unit 4	CT/PT	357.1293	2800105.978	0.996876435
Unit 5	Power-AI	1737.811	575436.566	0.984892063
Unit 6	COM	628.0924	1592122.433	0.994513019
Unit 7	DISPLAY	237.1581	4216597.15	0.997924652

GIPAM2200 제품의 주위 온도에 따른 신뢰성 속도의 변화를 살펴보고, 향후 진행될 온도를 가속변수로 삼는 가속신뢰성시험 결과와의 비교를 위해 여러 온도에 대한 신뢰도 예측 결과를 표 2.4에 정리하였다.

표 2.4 주위 온도에 따른 신뢰도 예측결과

주위 온도 ($^{\circ}$ C)	MTBF (years)	Reliability (MT:7년)	B10 수명 (years)
-15	52.10	0.8743	5.49
0	33.30	0.8104	3.51
25	14.43	0.6156	1.52
55	4.60	0.2182	0.48
70	2.48	0.0594	0.26
85	1.32	0.0049	0.14
100	0.70	0.0000	0.07
125	0.25	0.0000	0.03
150	0.09	0.0000	0.01

2.4 HALT(Highly Accelerated Life Test) 결과

HALT는 각 단계별로 시료 1개씩, 총 5개의 시료를 사용하여 수행되었으며, 예비시험으로부터 LCD가 온도 변화에 취약한 것으로 드러났기 때문에, HALT 시험 결과를 LCD Display의 정상적인 표시 여부와 LCD 이외 부분에서 전력량이 측정되고 있음을 나타내는 LED의 동작 여부로 나누어 나타내었다.

2.4.1 Cold Step Stress Test

Cold Step Stress Test로부터 얻어진 LOL은, LCD 경우 -40° C, LCD를 제외할 경우 -55° C이었다. LDL은 시험 장비의 한계로 측정되지 못하였으나, LSL이 -20° C임을 감안할 때, LSEW12는 저온 조건에서 충분한 강건성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

2.4.2 Hot Step Stress Test

Hot Step Stress Test로부터 얻어진 UOL은, LCD 경우 100° C, LCD 이외 부분의 경우 155° C이었다. UDL은 LCD의 경우 125° C, LCD 이외 부분의 경우 180° C이었다. USL이 55° C임을 감안할 때, LSEW12는 고온 조건에서도 강건한 것으로 판단된다.

2.4.3 Rapid Thermal Stress Test

Rapid Thermal Stress Test에서는 15 cycle 후에도 LCD와 LED가 모두 정상 동작하는 것이 확인되었다. LSEW12는 저온과 고온뿐만 아니라 급격한 온도 변화에 대해서도 강건한 것으로 판단된다.

2.4.4 Random Vibration Step Stress Test

Random Vibration Step Stress Test로부터 얻어진 VOL은 LCD와 LCD 이외 부분 모두 40 Grms였으며, VDL은 시험장비의 한계로 측정되지 못했다. 일반적으로 제품의VOL이 30 Grms 이상일 경우 매우 강건한 것으로 평가되므로, LSEW12는 진동에 대해서도 내성을 가지고 있다고 판단된다.

2.4.5 Combined Environmental Test

Combined Environmental Test에서는 Vibration

Stress는 10 Grms에서 VOL을 Thermal Stress는 LOL과 UOL 사이를 동시에 인가하여 15Cycle 동안 진행한 결과 고장이 나지 않았다.

3. 결 론

본 연구에서는 전자식 전력량계 (LSEW12)와 디지털 보호계전기 (GIPAM2200)에 대한 신뢰도 예측과 LSEW12에 대한 HALT 시험을 수행하였다. LSEW12의 신뢰도 예측 결과, MTBF, 임무시간이 7년일 때의 신뢰도, B10 수명이 부품등급이 Level 2일 때는 293.52년, 0.9764, 30.93년인 것으로 나타났다. GIPAM2200의 신뢰도 예측 결과, MTBF, 임무시간이 7년일 때의 신뢰도, B10 수명이 부품등급이 Level 2일 때는 15.49년, 0.9375, 1.63년인 것으로 나타났다. 아울러, 주위 온도 변화에 따른 신뢰도 예측 결과의 변화와 제품 단위의 시험 결과와의 비교를 위해 여러 온도에 대한 신뢰도 예측도 수행되었다.

LSEW12의 HALT 시험 결과, LSEW12는 고온, 저온, 온도변화, 진동 스트레스에 대해 강건성을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 온도를 스트레스로 하는 가속신뢰성 시험을 설계할 때, LCD 및 전체 제품에 대해서는 최대 온도 스트레스 수준을 100° C 이하, LCD 이외 부분에 대해서는 155° C 이하로 설정해야 함을 확인할 수 있다.

향후 현재 진행 중인 가속수명시험 및 열화시험 데이터를 분석한 결과와 신뢰도 예측 결과를 결합하여 전체 제품의 신뢰도를 예측하기 위한 방법과, 시험비용을 최소화하고, 의사결정에 충분한 정보를 제공하며, 추정량의 정밀도를 확보할 수 있도록 가속수준, 시료수, 시험 기간 등을 결정하여 최적화된 가속신뢰성시험 및 평가방법을 개발할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Chan & Englert (2001), *Accelerated Stress Testing Handbook*, IEEE Press.
- [2] Nelson (1990), *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Park (1998), "Design of Accelerated Degradation Tests for Reliability Assessment", Ph. D. Thesis, KAIST.