

전자식전력량계 경년특성 및 수명예측 연구

설일호*, 박재덕*, 조성현*, 박정원*
한국전력공사*, 산업기술시험원**

The Study on Aging Feature and Estimated Life-time of a Digital Watt Hour Meter

leelho Seol, Jaeduck Park, Seonghyeon Cho, Jungwon Park
KEPCO, Korea Testing Laboratory

Abstract - 최근 IT산업의 눈부신 성장과 고성능 전자소자가 개발됨에 따라 전력계량분야에서도 많은 변화가 있었다. 전자소자를 사용하여 다양한 기능들을 구현할 수 있는 전자식전력량계가 이미 10여년 전부터 도입하여 운용하고 있으며, 다양한 요금제도를 통한 전력사용의 합리화 및 수요관리, 원격검침 등에 기여하고 있다. 전자식전력량계는 현행 관련법령에 따라 전력량계의 검정유효기간이 7년으로 규정되어 있어 검정유효기간의 조정에 대한 필요성이 제기되어 왔다. 검정유효기간은 제품의 수명과 경제적 교체 주기에 따라 결정할 사안이므로 이에 대한 기초자료로 활용하고자 가속열화시험 등 몇 가지 수명예측기법을 이용하여 현재 운영중인 전자식전력량계의 수명을 예측하고 그 결과를 제시하고자 한다.

1. 서 론

한국전력공사(이하 한전)에서는 고압용 전자식전력량계는 '93년도부터 고압수전고객을 대상으로 부설하기 시작하였으며, 2005.11월말 현재 고압수전 고객 132千호 중 99.5%인 131千대를 부설하여 운영하고 있으며, 저압 전자식전력량계의 경우에는 주택용 전력량 및 심야전력 계량을 동시에 계량하는 복합 전자식 전력량계가 개발되어 '03.07월부터 사용되고 있다. 또한, 계약전력 30kW이상의 저압고객을 대상으로 무효전력량을 계량할 수 있는 역률관리용 저압전자식전력량계를 부설하고 있으며, 저압고객 16,960千호 중 156千호에 전자식전력량계를 부설하여 2005.11월말 현재 0.92%를 점유하고 있는 상태이다.

2005년도 연말을 시작으로 2010년까지 전자식전력량계 507만대를 부설하여 사용하는 전력계량장치 선진화 계획을 수립하여 추진하고 있다. 전자식 전력량계 도입초기에는 GE, ABB 등 주로 수입제품이 부설되었으나, '97이후부터 국내개발제품이 개발·사용되었다. 도입초기에는 전자식전력량계에 적합한 시험기준이나 시험장비가 부족한 실정이었기에 그 당시 신기술이었던 전자식전력량계에 대해 충분한 수명평가를 거치지 못한 상태에서 검정 유효기간(7년)이 적용되어 왔으며, 국내에서 제품을 개발하여 국산화가 시작된 이후에도 마찬가지로 제조업체에서도 자체적인 신뢰성, 경년변화 및 수명평가에 관한 연구가 수행된 적이 거의 없는 실정으로 파악되고 있다.

이러한 실정에서 전력량계의 최대수요자인 한전에서는 최근 고·저압 전자식전력량계의 구매규격을 표준화한 바 있다. 전자산업의 눈부신 발전으로 전자제품을 구성하는 각 부품의 질적향상은 물론 생산공정의 자동화로 제품의 신뢰성이 대폭 개선되어 현 시점에서 이에 대한 적절한 수명평가가 이뤄져야 하고 이를 기반으로 유효검정년한이 조정될 필요가 있다고 여겨졌다. 이에 따라 검정유효기간 조정을 위하여 전자식전력량계의 수명을 평가하여 보았다.

2. 본 론

2.1 연구대상 시료 선정

한전의 최근 구매규격 개정내용에는 전자제품에 취약한 EMC분야 인성시험 강화를 비롯하여 써지보호 장치 구비, 비휘발성 메모리 적용 등 많은 부분을 개선하였고 모든 전자부품의 품질은 10년 이상 교환하지 않고 사용할 수 있는 특성과 내구성을 보유하도록 규정하였다. 구매규격의 강화와 함께 제조업체의 기술개발과 전자부품의 성능향상으로 이전에 납품된 전자식전력량계와 비교하면 수명부분에서도 개선될 것으로 예상되나, 현재 변경된 구매규격에 알맞게 전자식전력량계 개발이 진행중인 단계로서 전자식전력량계 형식인증을 통과하여 상용화된 제품이 없어 어느 제품을 대상으로 수명평가를 해야 하는지가 문제가 되어 연구대상 시료는 2004년도 이후에 한전에 납품된 제품으로 선정하였다. 한전 이외의 장소에서 사용되는 전자식전력량계는 제작사의 품질관리에만 의존할 수 밖에 없으나 한전에 납품되는 제품들은 구매규격에 의해 철저한 인성시험, 검수시험 및 사후관리가 잘 되어 있으므로 제품의 수준이 정착되어 있다고 판단하였기 때문이다.

세부 규격으로는 '04.01-'05.08기간중에서 가장 많이 납품된 3개 제작사의 제품을 선정하였다.

〈표 1〉 시험대상 시료

구분	규격	제조사
고압용	기록형 3P4W 110V 5/2.5A	2개 업체
저압용	역률관리용 3P4W 220V 120/30A	1개 업체

2.2 수명평가 방법

수명평가 방법으로 외국의 운영사례, 과거 연구과제의 결과, 이론적 수명예측 기법, 고장이력Data를 이용한 수명예측 기법 및 가속열화시험방법을 사용하였으며, 본 논문에서는 고장이력Data를 이용한 수명예측 기법 및 가속열화시험방법에 의한 결과를 제시하고자 한다.

2.2.1 고장이력Data에 의한 수명평가 방법

고장이력Data를 이용한 수명평가방법은 현장에서 전자식전력량계를 사용하면서 수리, 교체된 이력Data를 분석하여 수명을 평가하는 방법으로써 다음과 같은 수식을 사용한다.

$$MTBF = \left[\sum_{i=1}^n t_i + (n-r)T \right] / r \text{ 또는 } MTBF = \left(\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{i=r+1}^n T \right) / r$$

t_i : I번째 전력량계의 고장이 발생하기까지 사용시간
 T : 무고장 교체 사용기간
 r : 고장건수
 n : 전력량계 수

2.2.2 가속열화시험

가속열화시험 방법은 부품단위와 제품단위로 구분하여 시험하는 방법이 있다. 제품가속시험은 제품의 열화특성을 갖는 요인 즉, 가속스트레스를 인가하여 마모고장을 일으키고 그 결과를 정상조건으로 환산하여 수명을 예측하는 방법으로 구성하고 있는 각 부품들의 가속스트레스가 다르므로 마모에 의한 고장이 아닌 비정상적인 고장을 일으킬 수 있는 단점이 있다. 부품가속시험은 제품의 열화특성을 갖는 주요부품을 선별하고 그 부품들의 가속스트레스를 인가하여 정상조건으로 환산한 다음 각각의 결과치 중에서 최저치를 수명으로 산정하는 방법을 말한다.

위의 두 방법에 대하여 심층적으로 논의한 결과 수명예측을 위하여 부품가속시험을 하되, 제품가속시험도 병행하여 결과치에 대한 신뢰성을 검증하는 방안으로 선정하였다.

2.3 수명예측 결과

2.3.1 고장이력Data에 의한 수명평가 결과

한전에서 사용중인 전자식전력량계는 13종의 287千대가 부설되어 있으며 용도별로 구분하면 고압 기록형이 131千대(45.54%), 역률관리용 110千대(38.28%), 심야복합용 42千대(14.78%) 및 심야전력용 4千대(1.40%)로 나타나 특고압 수전고객의 원격검침용을 시작으로 저압용 전자식전력량계가 54.46%로 많이 보급되었음을 알 수 있다.

'04이후의 전자식전력량계 교환실적은 모두 17千여 건이었고, 이중 '04이후에 제작된 계기의 교환실적을 조회해 본 결과 5千여 건이었다. 특히, 규격별로는 역률관리용 3P4W 380V 120/30A의 교환실적이 2千여 건이고, 교환사유로는 계약해지 실적이 1千여 건으로 가장 많았다.

운영현황에서 철거 또는 교환 사유에서 마모에 의한 고장에 해당되는 항목은 '고장'의 전체와 '기타변경' 및 '소손(미변상)'의 일부가 이에 해당되므로 마모고장 유형으로 구분하였으며, 가장 많은 비중을 차지하고 있는 고장의 형태는 LCD고장으로써 19.6%를 점유하고 있어 전자식전력량계의 품질을 개선하기 위해서는 LCD부분의 기술개발 및 온도·습도에 대한 대책을 수립해야 함을 알 수 있다.

또한, 기계식전력량계와 달리 전자식전력량계는 유도원판이 회전하는 기계부가 없으므로 LCD에서 수치를 읽지 못한 경우에도 '부동'으로 입력하는 경우가 있어 이를 감안한다면 LCD의 중요성은 더욱 크게 된다.

마모고장으로 인해 교환된 전력량계는 1,270건으로써 누계 실사용일수는 104千여일로 추정하였다. '04이후에 한전에 납품된 시점부터 현장에 설치되기까지의 소요일수는 대략 55일로 파악되었다.

〈표 2〉 수명예측을 위한 Data

구분	적용수치	
	수량	누적 사용일수
정상사용중인 계기	수량	135,295
	누적 사용일수	15,752,103
정상교환 계기	수량	5,669
	누적 사용일수	403,426
마모고장교환 계기	수량	1,270
	누적 사용일수	104,747

위의 <표 2>의 Data를 근거로 평균수명(MTBF)은 35.1년으로 추정하였다.

2.3.2 가속열화시험에 의한 수명예측 결과

본 시험은 제품 고장형태 조사→고장메카니즘 조사→유효 가속스트레스 선정→측정항목 선정→측정방법 결정→시험시간 결정→시료수 결정→시험 실시→고장분석→통계적 Data 분석 등으로 진행하였다.

고장부위 조사는 가속시험을 실시하고자 하는 대상 제품이 커패시터나 저항과 같은 부품이 아니고 여러 가지 부품이 결합된 제품인 경우 필드에서 일어나는 고장형태와 함께 고장이 발생하는 주요 부위를 파악하여야 한다. 어느 부위에서 고장이 발생하는지를 알아야 그 부위에 초점을 맞추어 가속을 어떻게 할 것인지 설계를 할 수 있다. 고장 부위를 정확히 알지 못하고 시험을 하는 경우 필드에서 주로 고장이 발생하는 부위 이외의 장소에서 고장이 가속되어 필드 고장을 재현하지 못하는 경우가 발생할 수 있게 된다.

부품단위 가속열화시험을 수행하려면 마모고장의 형태를 파악하고 그 제품의 주요부품을 선별하여야 한다. 전자식전력량계의 경우 다음과 같이 마모고장의 형태와 마모고장을 발생시키는 부품을 다음과 같이 파악되었다.

<표 3> 주요고장형태 및 해당 부품명

고장형태	고장 부위(부품)	고장메카니즘
디스플레이 안됨	LCD Display	백화현상
전원부 고장	AI전해커패시터	전해액의 Dry out
오차 변동	저항	저항값 변화

위와 같이 LCD, AI전해커패시터 및 저항으로 선정하였으며, 각 부품별 열화요인을 온도, 습도 및 전압이 마모고장에 영향을 주는 요인이었다.

<표 3>과 같이 부품별로 가속스트레스가 결정된 후에는 시험을 어떤 수준에서 실시할 것인지 결정하게 된다. 일반적으로 한 종류의 스트레스를 사용하여 가속하는 경우 3수준에서 시험을 실시하고, 시험을 여러 수준에서 실시할 수 없는 경우 적어도 2수준에서는 시험을 하여야 가속모형을 추정할 수 있다. 시험할 스트레스 수준을 결정하는 부분에 있어서는 무엇보다도 가장 높은 스트레스 수준을 어떻게 결정하는가가 가장 어렵고 중요하다. 스트레스 수준을 높게 결정할수록 가속효과는 더 커지겠지만 정상 사용조건과 고장메카니즘이 달라질 가능성도 또한 커지게 된다. 가장 높은 스트레스 수준은 일반적으로 구성 재료의 특성에 좌우되는데 구성 재료의 특성에 대한 정보가 없는 경우에는 예비시험을 통하여 높일 수 있는 한계 스트레스 수준을 결정한다. 한계 스트레스 수준이 결정되면 한계 스트레스 수준을 포함한 한계 스트레스 수준과 정상 사용조건 사이의 적절한 스트레스 수준들을 선택하여 시험을 실시한다. 이 때 스트레스 수준들 사이에는 충분한 차이를 주어 스트레스 수준들 사이에 가속효과가 다르게 나타날 수 있도록 한다.

각 부품별 시험조건 및 시험방법은 다음과 같이 수행하였다.

LCD의 경우 시험조건을 40°C/93% RH, 60°C/95% RH, 70°C/85% RH, 85°C/85% RH의 4개 조건에서 각 업체별로 5개씩의 부품시료를 모두 고장날 때까지 시험하였다.

AI전해커패시터는 제품에 사용하는 종류가 많아 정격전압 및 용량 Map을 작성하여 최대/최소치를 선택하여 최종적으로 10V/2200µF, 16V/10µF, 63V/470µF의 3종으로 결정하고 시험온도를 85°C, 105°C, 125°C에서 각각 1000h를 시험하였다. 이때 3개 업체서 사용한 부품은 모두 동일한 제작사이기에 전력량계 제조사별로 구분하지 않았다.

저항의 경우 필드 고장형태 중 전력량계의 오차변동 원인으로서 제조업체에서 저항 값의 변화를 들고 있기 때문에 IEEE 650에서는 마모고장메카니즘을 갖지 않는 것으로 분류되었는데도 불구하고 시험을 실시하였다. 저항의 가속스트레스로는 전력과 온도를 선택하였다. 시험 조건은 경감곡선(de-rating curve)으로부터, 4가지 조건(온도조건 : 2, 부하조건 : 2)을 선택하여 각 조건에서 10개씩 1500h동안 시험하였다.

위의 각각의 시험결과를 토대로 가속모형을 구하고 실 사용환경에서의 수명을 추정하는 방법으로써 각 제품별로 수명을 예측한 결과는 다음과 같다.

<표 4> LCD의 수명예측 결과

온습도 조건	B ₂₀ 수명		
	A 업체	B 업체	C 업체
25°C, 50 %RH (1.58 kPa)	28,040h 3.2년	141,831h 16.1년	217,045h 24.7년

<표 5> AI전해커패시터의 수명예측 결과

온도 조건	예측 고장시간		
	10V, 2200µF	16V 10µF	63V 470µF
25°C	324,693,487h 37,065년	315,126h 36년	161,855h 18년

저항은 고장이나 열화가 발생하지 않아 수명에 직접적인 영향이 없는 것

으로 파악되었다.

또한 전자식전력량계 자체를 가속조건에서 시험하는 경우 어떤 현상이 발생하는지 확인해 보기 위하여 110/190V, 5(2.5)A 2대를 1000h동안 85°C 조건에서 동작시키며 시험하였으나 특이한 사항은 발견하지 못해 제품단위 가속열화시험은 별로 의미가 없음을 알게 되었다.

LCD의 경우 제조업체마다 수명은 차이가 있었으나 시험조건에 따른 가속정도는 일관성이 있었다. LCD의 경우 열화 특성을 갖기 때문에 수명이 유한한 부품이고 업체마다 수명이 차이를 보이므로 LCD에 대해서는 수명에 대한 요구사항을 제시할 필요가 있을 것으로 보였다. LCD의 기준 사용조건을 25°C, 50 %RH(1.58 kPa)로 정하고, 기준 수명을 B₂₀수명(20%가 고장나는 시점)으로 정할 때 B₂₀수명이 10년 이상되어야 합을 요구사항으로 정하고 신뢰수준 90%로 보증하기 위한 평가기준을 설계한 결과 다음과 같았다. 11개의 시험품을 다음과 같은 조건에서 해당 시간동안 시험하여 고장이 발생하지 않아야 한다.

<표 6> LCD 시험조건과 시험시간

시험조건	시험시간
60°C, 95 %RH	26일
75°C, 95 %RH	13일
85°C, 85 %RH	4일

AI전해커패시터의 경우 모든 모델에 있어서 30°C 조건까지 계산해 본 예측 고장시간이 모두 10년 이상되었다. 역으로 AI 전해커패시터의 기준 사용조건을 25°C로 정하고, 기준 수명을 B₂₀수명으로 정할 때 B₂₀수명이 10년 이상됨을 신뢰수준 90%로 보증하기 위한 평가기준을 구하면 다음과 같다. 즉, 11개의 시험품을 105°C 조건에서 23일 동안 시험하여 고장이 발생하지 않으면 10년 이상됨을 보증할 수 있다. 따라서 한전의 전자식전력량계 구매규격에서 전자부품의 수명을 10년 이상으로 규정하였으므로 LCD와 AI커패시터는 상기 조건을 만족해야 함을 알 수 있다.

3. 결 론

전자식전력량계의 수명예측에 관한 연구는 이번이 2번째로써 부품단위 가속열화시험 방법을 채택하여 수명을 예측했다는 것에 의의를 찾을 수 있다. 연구를 수행하면서 아쉬웠던 점은 아직은 우리나라의 전자식전력량계의 도입역사 및 운영경험이 짧고 수명예측을 전제로 한 고장통계 등의 체계적 분석 및 사후관리가 미흡한 것으로 사료되므로 이번 연구결과를 바탕으로 전력량계 부설현장의 고장데이터를 근거로 한 이론적 수명산출의 정확도 향상을 위하여 통계관리 개선방안 등을 강구해나가야 할 것으로 사료된다.

최근 전력량계는 IT기술의 눈부신 발달, 요금제도 다양화 및 분산전원의 도입에 따른 전원구성의 변화 등 시장구조의 변화에 따라 전력계량의 역할뿐만 아니라 시간대별 요금제 지원, 수요관리 및 각종 부가기능 활용을 통한 고객서비스 제공 등 다기능 역할을 요구하고 있어 고정밀급, 고신뢰도 및 시스템화 되어야 한다. 본 연구결과와 시험방법이 전자식전력량계 기술 개발에 많은 도움이 되었으면 하는 바램을 갖는다.

[참 고 문 헌]

- [1] 설일호 외, "전자식전력량계 경년특성 및 수명예측 연구", 전력연구원, 2006
- [2] 김준오 외, "전자식 및 IV형 전력량계의 경년특성 및 수명예측에 관한 연구", 전력연구원, 2002
- [3] 김준오 외, "전자식전력량계의 특성과 구조", 전력연구원, 2001
- [4] 박정원 외, "국산 고체 알루미늄 전해커패시터의 가속수명시험 개발 및 국의 선진업체 제품과의 특성 비교", 신뢰성응용연구, 제2권, 제1호, 1-14, 2002