

측정불확도를 고려한 배터리 교환형 전기버스용 접속기 접촉저항 평가에 관한 연구

(A Study of Contact Resistance Test Considered with Measurement Uncertainty for Electric Bus Couplers with Battery-Swapping System)

김광민* · 이 주**

(Kwang-Min Kim · Ju Lee)

Abstract

Many people think that Electric Vehicles(EVs) is the best method to resolve the problems of running out of fossil fuels. But EVs take long time for charging. So, EVs with battery swapping systems(EVBS) are developed to resolve this problem. Nonetheless, EVBS is not spreaded widely because the method of durability test in couplers is not defined.

In this study, the evaluation method of durability test in couplers is defined by some standards and the measurement uncertainty is used to increase the reliability of EV couplers.

Key Words : Electric Bus, Coupler, Durability, Contact Resistance, Measurement Uncertainty

1. 서 론

근래에 많은 국가에서 자국의 환경을 보호하고 화석 연료에 대한 대기오염을 줄이기 위하여 청정교통시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 전기자동차는 차량의 이산화탄소 등의 오염물질을 대폭 저감시킬 수 있다는 장점으로 인하여 많은 국가에서 지속적으로 연구개발이 진행 중이다. 그러나 전기자동차

는 1회 배터리 충전으로 주행 가능한 거리가 가솔린 차량보다 매우 짧다는 단점을 갖고 있다. 이를 극복하기 위하여 많은 수의 전기자동차 배터리 충전소의 건립이 필요하다. 아울러 짧은 주행거리를 극복하기 위하여 수행되는 빈번한 배터리 충전은 전기자동차 충전용 접속기의 내구력 저하 문제를 발생시킬 수 있다.

본 논문에서는 전기자동차 충전용 접속기의 내구시험을 위하여 타분야의 표준을 이용하여 내구시험용 특정 수식을 지정하였으며, 이와 같은 수식을 바탕으로 실제 개발된 전기자동차 충전용 접속기 시험에 적용하여 이를 확인하였다. 특히 내구시험 평가의 최종 결과인 접촉저항의 값에 측정불확도 이론을 도입하여 내구성시험에 신뢰수준을 접목시켜서 평가할 수 있도록 하였다.

* Main author : Doctor Course, Electrical Engineering of Hanyang University
** Corresponding author : Professor, Electrical Bio-Engineering of Hanyang University
Tel : 02-860-1411, Fax : 02-860-1419
E-mail : k41027@hanmail.net
Received : 2015. 7. 24
Accepted : 2015. 8. 25

2. 본 론

2.1 전기자동차 충전기 접속기 선택

전기자동차는 사용되는 배터리의 착탈가능여부에 따라 크게 배터리 고정형 전기자동차와 배터리 교환형 전기자동차로 구분할 수 있다. 그 중 배터리 교환형 전기자동차는 방전된 배터리와 기존에 미리 준비한 충전된 배터리를 1:1로 교환함으로써 충전시간을 대폭으로 줄일 수 있는 장점이 있다[1]. 아울러 배터리를 직접 교체하는 방식이기 때문에 배터리의 하중 등으로 인하여 배터리 고정형 전기자동차에 비하여 접속기에 더욱 큰 마모가 발생할 수 있다. 이는 배터리 고정형 전기자동차의 접속기는 사람이 손으로 들고 사용을 하기 때문에 전기자동차와 접속기가 수평으로 접속을 하며 접속기의 무게가 가벼운 반면, 배터리 교환형 전기자동차의 접속기는 기계를 이용한 배터리 교환을 위하여 접속기가 수직방향으로 접속을 하며 배터리의 하중을 접속기가 모두 감당하는 구조이기 때문이다. 즉 더 큰 힘으로 접속기가 결합을 하기 때문에 더 많은 기계적 마모가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 배터리 고정형 전기자동차의 접속기 내구시험보다 배터리 교환형 전기자동차의 접속기 내구평가가연구가 시급하다고 판단하였으며, 본 논문에서 내구시험을 위한 접속기로 선택되었다.

2.2.1 내구시험횟수 정의

내구시험을 정의하기 위해서는 사용되는 환경을 특정하여야만 한다. 본 연구에서는 배터리 교환형 전기자동차 중에서도 특히 배터리교환이 빈번하게 발생하는 전기버스의 접속기를 실제 운행되는 환경에서 사용되는 것으로 가정하였으며, 표 1과 같이 전기버스의 운행조건을 정의할 수 있다.

내구시험의 기준을 정의하기 위하여, 특정 내구시험횟수를 수행했을 경우의 접촉저항을 측정하는 방법을 선택하였다. 이는 객관적인 데이터를 이용하여 내구성 평가의 적합성 성능을 용이하게 평가할 수 있기 때문이다. 아울러 빈번한 배터리의 교체로 인한 접속기

의 접촉저항이 증가하게 되고, 이는 열에 의한 전력손실을 발생할 수 있는 배터리 교환형 전기버스의 특성을 고려한 적합한 시험방법이기 때문이다.

Table 1. Operating Condition of EV Bus Battery swapping system

분류	항목	사양
배터리	용량	약 41kWh
	정격전류(I_{rated})	70A
전기버스 일일운행횟수(N_{ED})		10회
배터리 교환소 설치수(N_{EX})		2개소
기계적 안전계수(S)		6
시스템점검주기(P_D)		90일

내구시험횟수는 전기버스의 일일운행횟수가 많고, 배터리 용량이 작고, 배터리교환소가 작을수록 교체횟수가 많게 된다[2-3]. 아울러 시스템점검주기가 길수록 안전을 위하여 더욱 큰 내구시험횟수(N_T)를 필요로 하게 되며, 이는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이는 시스템점검주기 동안에 접속기는 내구로 인한 문제가 없어야 함을 의미한다.

$$N_T = 2 \times S \times (N_{ED} \times N_{EX}) \times P_D \quad (1)$$

식 (1)에 있는 상수 2는 배터리 교환형 전기자동차의 개념에 따라 방전된 배터리를 탈거 후, 충전된 배터리를 접속하기 때문에 1회의 배터리 교환 시, 버스 내부에 장착된 접속기에는 2회의 탈착이 발생함을 의미한다.

식 (1)에 표 1의 제원표를 대입하면, 21,600회 내구시험횟수를 계산할 수 있다.

2.2.2 접촉저항 정의

전기장치의 기계적 내구성 평가의 적합성을 판정하기 위하여 내구시험 후 유지해야 하는 접촉저항을 정의하여야만 하며, 이를 위하여 이와 전기적 및 기계적 성질이 유사한 퓨즈홀더의 국제표준(IEC 60127-1)

을 참조하였다[5]. 접촉저항에 의한 전력손실은 사용되는 전기자동차 접속기의 최대전류 및 정격전류의 비(k_{ratio})와도 관계가 있다. 이는 기준전압(V_{fuse})과 기준접촉저항($R_{f,fuse}$)이 동일한 경우, 사용전압(V_{rated})이 작을수록 단위면적당 도통전류가 작게 되고, 단위면적당 열손실이 작다는 것을 의미하며, 이러한 열손실은 열에 의한 기계적 내구성에 많은 영향을 미치기 때문이다. 따라서 정격전압 조건에서 만족해야 하는 접촉저항($R_{T,rated}$)은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 이때 정격전압과 접촉저항의 기준은 IEC 60127-1의 표준값을 적용하였다[4].

$$R_{T,rated} = \left(\frac{V_{rated}^2 \times R_{f,fuse}}{V_{fuse}^2 \times k_{ratio}} \right) \quad (2)$$

식 (2)에 IEC 60127-1의 표준과 사용된 600V / 200A급 접속기의 사양을 대입하면, 필요한 접촉저항은 약 1mΩ 임을 계산할 수 있다.

2.2.3 측정불확도

어떤 값을 계측기로 측정을 하는 경우, 계측기의 오차와 측정자의 오차 등을 포함하게 되며 이는 측정의 품질을 악화시킬 수 있다. 따라서 그 오차범위가 얼마인지를 파악하고 이를 수치화할 필요가 있다. 측정불확도는 이를 정형화하여 수치화해주는 방법이다[5].

측정불확도는 측정치의 평균, 분산, 표준편차 등을 이용하여 신뢰구간을 갖는 특정한 값으로 변환시켜주는 역할을 한다. 따라서 본 논문에서는 접촉저항을 측정, 평가하는 과정에서 측정불확도의 개념을 도입하여서 신뢰성을 높일 수 있었다.

측정불확도 이론에 따라 측정된 접촉저항(R_{test})은 계측기 지시값 평균(R_m)과 보정값(R_{std}) 및 분해능에 의한 변화량(R_{res})의 합으로 정의될 수 있다.

$$R_{test} = R_m - R_{std} + R_{res} \quad (3)$$

2.3 시험 및 결과

실제 사용되는 배터리 교환형 전기버스용 접속기를

이용하여 내구시험을 진행하였다. 그림 1은 실제의 배터리 교환형 전기버스용 접속기이며, 제원은 표 2와 같다.



Fig. 1. Coupler for EV Bus with Battery Swapping-system

Table 2. Electrical Specification of Coupler

항목	전원단자	신호단자
정격전압	600Vdc	24Vdc or 5Vdc
최대전류	200A	3A
정격전류	150A	-

실제 사용되는 전기버스용 접속기가 앞서 계산된 접촉저항값을 만족하는지 확인하기 위하여 시험장치를 이용하여 접속기의 암수 단자에 21,600회 착탈을 반복하였을 경우, 접촉저항이 1mΩ 이하를 유지하는지 시험을 진행하여 확인하였다. 수만회의 시험을 수동으로 진행하기 힘들기 때문에 자동화된 내구시험기를 사용하였으며, 이에 적합한 시험용 어댑터도 제작하였다. 또한 시험을 계속해서 수행하게 되면 접속기 간에 마찰로 인하여 열이 발생하고, 이는 또 다른 내구문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 착탈시험 1회 후, 마찰열이 누적되지 않을 정도의 충분한 휴지기간 후 다시 착탈을 하는 방법을 사용하였다. 접촉저항을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 시험에서는 4단자망 접촉저항 측정법 표준(JIS K 7194)을 사용하였다[6].

측정불확도 이론을 사용하여 내구시험을 진행하면서 접촉저항이 가능 크게 측정된 전원(+)의 접촉저항값을 정리하였다. 측정불확도는 측정값을 기준으로 참값이 존재할 수 있는 범위를 확률을 포함한 값으로 표현한 개념이다. 이를 계산하기 위하여 각각의 불확도 요소를 표준불확도 형태로 계산한 후, 이를 합성하여 합성표준불확도를 산출하며 원하는 신뢰수준에 따라 포함인자를 계산하여 확장불확도를 얻게 된다. 이와 같은 측정불확도 이론을 이용함으로써, 시험결과의 신뢰수준을 알 수 있으며 이는 시험의 객관적인 신뢰도를 향상시키는 역할을 할 수 있다.

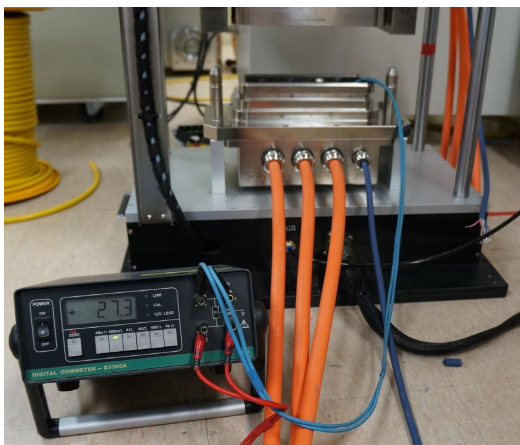


Fig. 2. Equipment for the durability test

시험의 결과치에 대한 계측에 대한 측정불확도표를 계산하기 위하여 총 10회 접촉저항값을 측정하였으며 그 값은 표 3과 같다.

Table 3. DC(+) Contact Resistance after durability test (21,600times)

측정 횟수	1	2	3	4	5
저항(mΩ)	0.810	0.792	0.794	0.804	0.805
측정 횟수	6	7	8	9	10
저항(mΩ)	0.800	0.789	0.799	0.810	0.805

이러한 값들을 신뢰수준 약 95%를 기준으로 접촉저항의 측정불확도표를 계산하면 표 4와 같고, 이때 추정오차를 계산하는 방법은 식 (4)와 같다.

Table 4. Measurement Uncertainty Table of Contact Resistance after durability test (21,600times)

	추정값	표준 불확도	확률 분포	감도 계수	기여도	자유도
R_m	0.815	0.00039	t	1	0.00039	9
R_{std}	-0.006	0.00350	N	-1	-0.00350	-
R_{res}	0.000	0.00029	4각형	1	0.00029	-
R_{test}	0.821	-	-	-	0.00353	61168

$$\text{추정오차} = R_{test} \text{의 기여도} \times K \quad (4)$$

t-분포표에서 자유도가 10보다 많이 큰 경우에는 K가 2임을 고려하여 추정오차를 계산하면 0.007mΩ임을 알 수 있다. 따라서, 전원(+)의 접촉저항은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{21600\text{회 시험 후 전원}(+)} = 0.815 \pm 0.007 \text{ (m}\Omega\text{)} \quad (5)$$

(신뢰수준 약 95%, K=2)

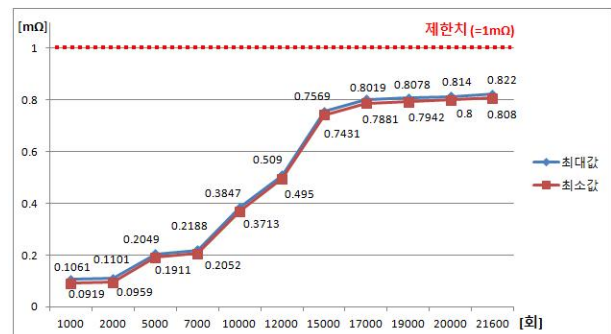


Fig. 3. DC(+) Contact Resistance of Couplers considered with Measurement Uncertainty

이러한 측정불확도 이론을 내구시험 중간에 적용하여 정리한 접촉저항값의 결과는 그림 3과 같다. 추정오차를 고려하여 최대값과 최소값을 표시하였다. 결과를 분석해보면, 시험 초기에는 접촉저항이 증가하지 않다가 일정 횟수 이상이 되면 급격하여 접촉저항이 증가함을 알 수 있으며, 이는 특정임계횟수를 넘게 되면 기계적인 마모가 급격하게 진행됨을 유추할 수 있었다. 아울러 특정 시험횟수가 넘게 되면 시험횟수에

따라 접촉저항값이 많이 커지지 않음을 알 수 있었다. 다만 앞서 정의한 내구시험횟수 21,600회를 진행하여도 신뢰수준 약 95%를 만족하는 범위 내에서 접촉저항이 1mΩ 이하를 유지하기 때문에 시스템점검주기동안 내구에 문제가 없음을 예상할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 배터리 교환형 전기버스용 접속기의 내구시험 수명시험 기준횟수와 접촉저항의 기준을 정의하고 평가를 실시하였으며 내구성시험횟수를 시행하여도 기능상문제가 없음을 확인하였다. 아울러 기존에 발표된 논문에서는 단지 1회의 측정만으로 접촉저항을 판단하였기 때문에 계측에 대한 신뢰도가 떨어지는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이를 보완하기 위하여 측정불확도 이론을 도입하여 측정에 대한 오차범위와 신뢰수준을 수치화할 수 있었으며, 이로 인하여 객관적인 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

본 연구의 결과는 전기자동차의 접속기 설계에 관한 기초적 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각되며, 향후 연구에서는 전기자동차 내부에 장착되어 있는 On-Board Charger(OBC) 및 외부 거치용 충전기를 포함하는 내구시험 적합성 시험방법과 기준값을 정의한다면 전기자동차의 충전시스템에 대한 종합적인 내구시험 평가기술을 향상시킬 수 있을 것이다.

References

- [1] Dan Zheng, Fushuan, Jiansheng Huang, Optimal Planning of Battery Swap Stations, International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN2012), 1-7, September, 2012.
- [2] IEC 61124 Reliability testing - Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity (2012).
- [3] Mushfiqur R. Sarker, Hrvoje Pandzic, Miguel A. Ortega-Vazquez, Electric Vehicle Battery Swapping Station: Business Case and Optimization Model, 2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCV), 289-294, December, 2013.
- [4] IEC 60127-1 Miniature fuses - Part 1: Definitions for miniature fuses and general requirements for miniature fuse-links ed2.0, 2006.
- [5] ISO/IEC Guide 98-2, Uncertainty of Measurement - Part 2: Concept and basic principles, 2008.

- [6] JIS K 7194 Testing method for resistivity of conductive plastic with a four-point probe array, 1994.

◇ 저자소개 ◇



김광민 (金光珉)

1976년 10월 27일생. 1999년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001~2009년 LG산전 시스템드라이브연구팀 선임연구원. 2009~2012년 현대자동차 전력변환설계팀 책임연구원. 2012년~현재 한국산업기술시험원 디지털융합기술센터 선임연구원 근무. 2011년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.