

배터리 교환형 전기자동차의 배터리 접속기 내구성 평가에 관한 연구

(A Study of Durability Evaluation for Couplers in Battery Changeable Electric Vehicle)

김광민* · 윤준보 · 강병국 · 이 주**

(Kwang-Min Kim · Jun-Bo Yun · Byung-Guk Kang · Ju Lee)

Abstract

Recently, many countries are researching and developing the various Electric Vehicle(EV) for reserving their natural environments and so on. But the charging time that is longer than the time of filling up the traditional engine vehicle will be the obstacles of spreading them. So, the other type EV is developed. It is the Battery Changeable EV. But there is not testing method for it. Especially, the defining of the durability evaluation for the couplers between battery and charger is very important because the couplers are changed very frequently. So, they may cause many faults and problems. Therefore, this study shows the definition of the durability procedure and the test is conducted with the equipment.

Key Words : Battery Changeable, Electric Vehicle, Connector, Durability, Evaluation, Test Method

1. 서 론

세계 각국은 화석연료 고갈에 대한 대체수단 개발 및 환경규제에 따른 이산화탄소 저감을 목적으로 다양한 신기술 연구와 신제품 개발에 아낌없는 지원을 하고 있다. 그 중에서 전기 자동차는 교통부분 탄소배출량을 획기적으로 저감시킬 수 있고 지구온난화 문

제를 해결할 수 있는 핵심 운송수단으로 인식되어 전 세계에서 지속적으로 연구개발이 진행 되고 있다. 그러나 그린카라 불리며 많은 장점을 갖고 있는 전기 자동차는 방전된 배터리를 충전하는 시간이 길다는 단점으로 인하여 관련 인프라 보급확산에 큰 어려움을 겪고 있다. 따라서 전기 자동차 개발업체에서는 이를 극복하기 위하여 배터리 교환형 전기자동차를 개발하고 있다. 배터리 교환형 전기자동차는 배터리의 장착 위치에 따라 상부취부형과 하부취부형으로 나눌 수 있으며, 그림 1은 상부취부형 배터리 교환형 전기자동차를 나타내고 있다.

배터리 교환형 전기 자동차는 배터리 교환소 내에 설치된 교환로봇 또는 직접 사람이 방전된 배터리와 충전이 완료된 배터리를 자동 또는 수동으로 교환함으로써, 전기 자동차의 배터리 충전으로 인한 운행불

* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 대학원
** 교신저자 : 한양대학교 전기생체공학부 교수
* 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
접수일자 : 2014년 4월 23일
1차심사 : 2014년 4월 30일, 2차심사 : 2014년 6월 8일
심사완료 : 2014년 6월 12일

가시간을 획기적으로 저감시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 이와 같은 빈번한 배터리 교환은 필수불가결하게 배터리 접속기에 내구성의 문제를 발생시키게 된다. 따라서 개발업체는 설계 시부터 이를 고려하여 접속기를 개발해야만 한다. 그러나 현재 배터리 교환형 전기 자동차의 배터리 접속기 내구성 시험에 대한 국제적 기준이 마련되어 있지 않아서, 접속기 개발업체 및 시험인증기관에서 많은 시행착오를 겪고 있는 것이 현실이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 배터리 교환형 전기 자동차의 배터리 접속기 내구시험 판단기준을 정의하고, 시험장치를 제작하여 내구시험을 진행하였다.

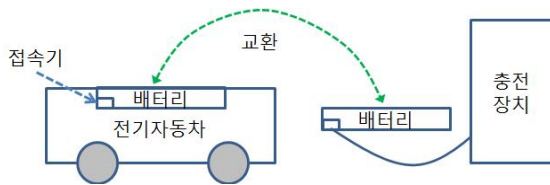


그림 1. 배터리 교환형 전기자동차 충전 시스템
Fig. 1. Battery Changeable EV Charging System

2. 본 론

2.1 내구시험 항목 고찰

앞서 기술한 바와 같이 배터리 교환형 충전시스템은 구조적으로 문제점을 가질 수 밖에 없으며, 이러한 문제점이 발생하는 매커니즘은 그림 2와 같다. 배터리 교환소에서 배터리 교환이 빈번하게 발생하면 배터리 접속기에 마모가 발생하여, 삽발력이 작아지고, 접촉 저항이 커지게 된다. 이로 인하여 접속기 체결부 간에 전압강하가 증가하게 되며 불필요한 열손실이 발생하게 되고 접속기의 열적인 내구력을 감소시켜 시스템 안정성을 저하시키며 시스템의 효율도 떨어뜨리게 된다. 따라서 개발된 배터리 교환형 전기 자동차의 배터리 접속기가 사용기간동안 일정수준이하의 접촉저항으로 관리할 수 있도록 시험표준을 정립할 필요가 있다. 본 연구에서는 배터리 접속기 내구시험의 주요한 평가지표항목인 수명시험 기준횟수와 접촉저항시험

기준값을 정의하였다.

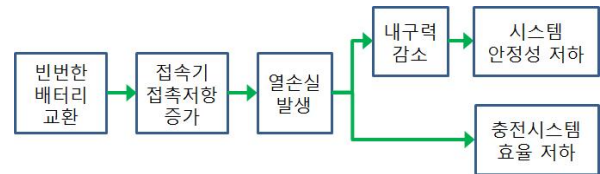


그림 2. 배터리 교환형 충전시스템의 문제점
Fig. 2. Problems of Battery Changeable EV Charging System

2.1.1 수명시험 기준 정의

접속기의 수명시험 기준횟수를 정의하기 위하여 평균고장시간의 개념을 도입하였다. 평균고장시간(MTTF : Mean Time To Failure)은 시스템이나 제품이 출하된 후 고장이 발생할 때까지의 평균수명의 정도를 나타내는 지표이다[1]. 즉 평균고장시간은 통상적인 사용환경에서 정기적인 기기점검기간보다는 길어야 하며, 관련 시스템에 장애가 발생하지 않을 것을 보증하는 최소한의 기간이다. 이를 계산하기 위하여 먼저 전기자동차의 일일 배터리 교환횟수와 사용기간을 정의하여야만 한다. 배터리 교환횟수는 차량의 운행 거리에 따라 달라지며, 일반적으로 통근용으로 사용되는 승용 전기자동차의 경우에는 일일 평균 2회 정도의 배터리 교환이 필요하며, 운행거리와 운행시간이 상대적으로 긴 전기버스의 경우에는 그보다 많은 교환이 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 그 중에서 배터리 교환형 전기버스 운행 시범사업이 진행되면서 실제 전기버스에 대한 운행환경조건을 확인할 수 있었으며, 배터리 교환횟수가 많은 전기버스의 다양한 변수들을 고려한 수명기준 횟수와 접촉저항을 정의할 수 있었다.

차량당 배터리 일일교체횟수를 계산하기 위하여 배터리 교환소 설치수는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$N_{EX} = k_{EX} \times D_T \quad (1)$$

(N_{EX} : 배터리 교환소 설치수, k_{EX} : 배터리 교환 여유계수, D_T : 1회 충전으로 운행가능한 거리)

이때 배터리 교환소 설치수는 배터리용량과 전기 자

동차의 운행가능거리를 고려하여 결정하게 되며, 배터리 교환계수가 클수록 교환소를 많이 건설하게 되어 부득이하게 발생하는 배터리 방전으로 인한 버스의 운행중단 위험을 예방할 수 있게 되지만, 그로 인하여 배터리 교환소 건설비용이 증가하게 된다[2]. 따라서 이를 적절하게 고려하여 기존에 진행 중인 전기버스 시범운행사업에서는 배터리 교환 여유계수를 0.5로 하여 1회 충전으로 가능한 전기버스 운행거리의 절반인 10km마다 1기의 배터리 교환소를 설치하였다.

식 (1)을 이용하여 차량당 배터리 일일교체횟수를 정의하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$N_{BD} = 2 \times N_{ED} \times N_{EX} \quad (2)$$

(N_{BD} : 배터리 일일교체횟수, N_{ED} : 전기 자동차 일일운행횟수)

식 (2)에서 우변에 있는 상수 2는 배터리 교환소에서 버스에 있는 배터리를 착탈 후 충전을 위하여 다시 충전기에 결합시켜야 하기 때문에 고려해야하는 상수이며, 안전계수와 점검주기를 고려한 최소의 수명시험 기준횟수는 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$N_C = S \times N_{BD} \times P_D \quad (3)$$

(N_C : 수명시험기준횟수, S : 기계적 안전계수, P_D : 시스템점검주기)

전기버스의 배터리 교환횟수는 앞서 기술한 것과 같이 배터리 용량과 운행노선 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 운행조건에 매우 종속적이기 때문에 실제로 사용되는 운행조건을 그대로 사용하여 내구시험을 진행하였다. 현재 포항에서 시범운행중인 배터리 교환형 전기버스를 기준으로 교환횟수를 산정하였으며 배터리사양 및 운행거리 등의 운행조건은 표 1과 같다.

배터리 교환형 전기 자동차의 접속기는 기계적 마찰이 빈번하게 발생하고, 교환소에 충전되어 있는 교환용 배터리수보다 전기자동차의 대수가 많은 경우를 고려하여 충분히 큰 안전계수인 6을 사용하였다.

표 1. 배터리 교환형 전기버스 운행조건
Table 1. Operating Condition of Battery Changeable EV Bus

분류	항목	조건
배터리	용량	약 41kWh
	공칭전류(I_B)	70A
배터리 교환소 설치수(N_{EX})		2개소
전기버스 노선 운행거리(D_T)		약 20km
배터리 교환 여유계수(k_{EX})		0.5
전기버스 일일운행횟수(N_{ED})		약 10회
기계적 안전계수(S)		6
시스템점검주기(P_D)		90일

2.1.2 접촉저항시험 기준 정의

앞서 정의한 것과 같이 잦은 배터리 교환으로 인한 접속기 접촉저항의 증가로 발생한 열손실은 접속기의 내구성과 전체 시스템의 효율을 떨어뜨리는 문제를 야기시킨다. 따라서 배터리와 충전기사이의 접속기 접촉저항을 일정이하로 관리하는 것은 배터리 교환형 충전시스템의 기계적 안정성을 유지하고 시스템의 효율을 저하시키지 않는 방법이다.

접속기의 접촉저항 기준을 정의하기 위하여 국제전기기술위원회(IEC)의 퓨즈 및 퓨즈홀더에 대한 표준을 참조하였다. 표준번호는 IEC 60127-1이며 접촉저항은 표 2와 같이 평균 0.005Ω(=5mΩ) 이하를 유지하도록 규정되어 있다[3]. 이를 참고하여 배터리 접속기의 접촉저항의 기준을 선정하였으며, 접촉저항 측정을 위하여 JIS K 7194의 4단자법을 사용하였다[4].

표 2. IEC 60127-1의 접촉저항 규정
Table 2. Standard of Contact Resistance in IEC 60127-1

항목	사양
정격전류	16A 이하
정격전압	1500V 이하
평균 접촉저항	0.005Ω(=5mΩ) 이하

배터리 접속기 역시 퓨즈와 퓨즈홀더와 같이 전원을 인가하는 접속부분이므로 IEC 60127-1의 규격을 이

용하여 접촉저항에 의하여 발생하는 열손실이 규격과 동일하다고 가정하면 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{V_{fuse}^2}{R_{f,fuse}} = \frac{V_{rated,B}^2}{R_{f,B} \times k_{ratio}} \quad (4)$$

(V_{fuse} : IEC 60127-1 규격상의 정격전압, $R_{f,fuse}$: IEC 60127-1 규격상의 평균접촉저항, $V_{rated,B}$: 배터리 정격전압, $R_{f,B}$: 접속기 접촉저항, k_{ratio} : 최대전류 대비 정격전류비)

접촉저항에 대한 식으로 정리하면 식 (5)와 같다.

$$R_{f,B} = \left(\frac{V_{rated,B}^2 \times R_{f,fuse}}{V_{fuse}^2 \times k_{ratio}} \right) \quad (5)$$

우변 분모에 있는 k_{ratio} 는 최대전류와 실제 사용하는 정격전류의 비가 클수록 정격전류 대비 전류도통 단면적이 넓다는 것을 의미하고, 이는 접촉저항이 같을 경우 전류도통단면적이 넓어서 열에 대한 영향을 적게 받음을 의미하는 여유계수이다.

2.2 시험 및 결과

배터리와 충전기 사이에 사용되는 접속기는 충전기에 연결된 커넥터와 배터리에 연결된 인렛의 2개의 부분으로 구분할 수 있으며, 표 3은 접속기의 사양을 나타내며, 그림 3은 실제 내구시험에 사용된 커넥터 사진이다.

표 3. 접속기의 전기적 사양
Table 3. Electrical Specification of Coupler

항목	전원용	신호용
단자 구성	DC(+), DC(-), 접지	통신 및 각종 고장 검출용 13개
정격전압	600Vdc	24Vdc or 5Vdc
연속도통 최대전류	200A	3A 이하
정격전류	150A	-



그림 3. 내구시험 수행 전 커넥터
Fig. 3. Connector before conducting Durability Test

배터리 교환형 전기 자동차에 사용되는 충전기는 일반적으로 충전시간이 짧은 직류 충전장치가 사용되기 때문에, 사용되는 접속기는 기본적으로 관련 국제표준인 IEC 61851-1, 23 및 IEC 62196-1에 맞도록 설계되어야 하며, 내구시험에 사용하는 접속기 샘플을 선정하기 위하여 IEC 62196-1을 참조하였다[5-7].

60Vdc 이상의 전원단자에는 인체감전의 위험이 존재하기 때문에 전기 자동차 충전 설비를 설치함에 있어서 더욱 주의해야 하며 접속기 단자의 마모로 인한 열손실 문제는 사용전압과 전류가 높은 경우에 더욱 문제가 되기 때문에 24Vdc 및 5Vdc이하의 통신 및 고장검출용 단자 이외의 600Vdc 전원용 단자의 접촉저항을 정의하고 시험을 진행하였다[8].

앞서 정의한 수명시험 기준횟수 산정수식인 식 (3)과 전원용 단자의 접촉저항 기준값 산정수식인 식 (5)를 이용하여 다음과 같이 각각의 기준값을 계산하였다.

$$N_C = 21600 \text{회}$$

$$R_{f,B} \leq 0.001\Omega (=1m\Omega)$$

이를 정리하면 배터리 교환횟수가 21600회인 경우 접속기의 접촉저항은 0.001Ω (=1mΩ)이하여야 함을 나타낸다.

내구시험에 영향을 줄 수 있는 접속기의 삽발시간은 표 4와 같이 실제 배터리 교환형 전기버스의 배터리 교환시간과 비슷하게 각각 5초로 설정하였으며, 1회 삽발 후 약 10초간의 휴지기간을 두어 내구시험에 미치는 마찰열의 영향을 최소화 하였다.

표 4. 접속기 내구시험 동작 시간 조건
Table 4. Condition of Operating Time for Durability Test of Coupler

항목	시간
삽발시간	각 5초
휴지시간	10초

또한 표 4의 조건에 근거하여 접속기 내구시험을 진행하기 위하여 전기 자동차 충전기 접속기 시험장비를 사용하였으며, 기존 장비와의 호환성을 위하여 그림 4와 같이 시험용 배터리 인렛과 충전기 커넥터를 장착할 수 있도록 시험지그를 제작하여 자동으로 시험을 진행하였다.

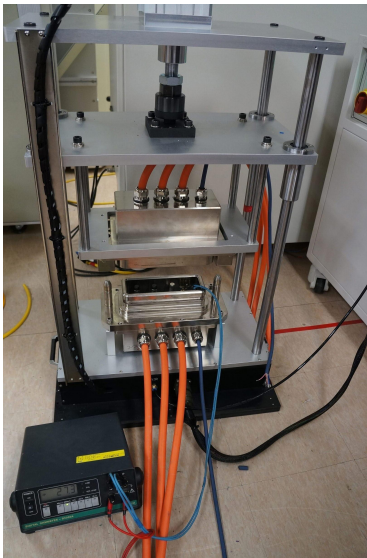


그림 4. 접속기 내구시험 장치
Fig. 4. Equipment of Durability Test for Coupler

시험 초기에는 1000회 간격으로 접촉저항을 측정하였으며, 중간결과에 문제가 없음을 확인한 후 측정간격을 넓혀서 시험을 진행하였다. 21600회의 내구시험 완료 후 그림 5와 같이 인렛에 많은 마모가 발생했음을 확인할 수 있었으나, 앞서 기준으로 정의한 배터리 인렛과 충전기 커넥터 사이의 접촉저항이 0.001Ω (=1mΩ)을 넘지 않는 것을 확인하였다.

시험품에 대한 내구시험 결과를 정리하면 다음의 그림 6과 같다.

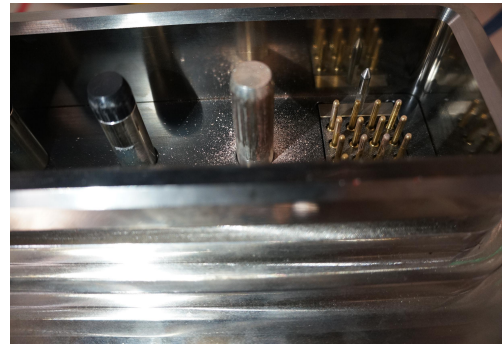


그림 5. 내구시험 수행 후 인렛
Fig. 5. Inlet after conducting Durability Test

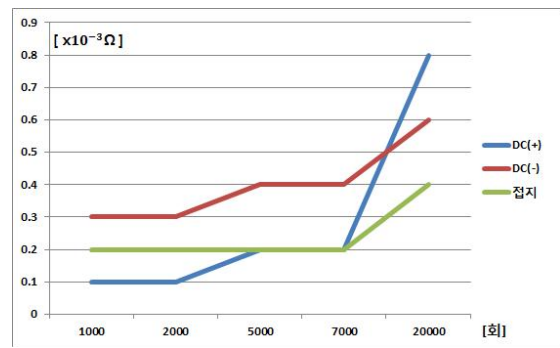


그림 6. 접속기 내구시험 결과
Fig. 6. Result of Durability Test for Coupler

초기에는 접촉저항이 증가하지 않다가 교환시험횟수가 일정 이상이 되면 급격하게 접촉저항이 증가함을 알 수 있었으며, DC(+) 단자의 경우에는 교환시험횟수가 20000회를 넘었을 경우, 0.0008Ω(=0.8mΩ)까지 접촉저항이 증가함을 알 수 있었다. 다만 접촉저항 기준값인 0.001Ω(=1mΩ) 이내이므로 평균고장시간(MTTF)이 시스템점검주기보다 길다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 표 1에서 정의한 사용조건으로 시스템점검주기동안 사용해도 접속기의 내구력 저하에 의한 문제가 발생하지 않을 것이라는 것을 예측할 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 배터리 교환형 전기자동차의 배터리와 외부 충전기 또는 전기 버스 내부의 접속기 사이의 내구 시험 항목 중 수명시험 기준횟수와 접촉저항의 기준을 정의하고, 실제 사용되는 제품에 적용하여 내구시

험 적합성 평가를 수행하였다. 이를 위하여 시험품의 사양을 확인하여 정리하였으며, 자동 내구시험 지그를 제작하였다.

본 연구의 결과는 배터리 교환형 전기 자동차 특히 전기버스의 접속기 설계에 관한 기초적 자료로 활용될 수 있으며, 향후 연구에서는 전기 자동차 충전기까지 포함하는 내구시험 적합성 시험방법과 기준값을 정의한다면 배터리 교환형 전기 자동차의 충전시스템에 대한 종합적인 내구시험 평가기술을 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No.2013R1A2A1A01015171)

References

- [1] IEC 61124 Reliability testing - Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity (2012).
- [2] The Effect of Mileage on Recharging Infrastructure - Hwan Park, Sin-Hwan Kang, Myung-chul Shin, KIEE, 2010 KIEE Power Engineering Society Conference, 2010.11, page(s): 308-309.
- [3] IEC 60127-1 Miniature fuses - Part 1: Definitions for miniature fuses and general requirements for miniature fuse-links ed2.0 (2006).
- [4] JIS K 7194 Testing method for resistivity of conductive plastic with a four-point probe array (1994).
- [5] IEC 61851-1 Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements (2010).
- [6] IEC 61851-23 Electric vehicle conductive charging system - Part 23: DC Electric vehicle charging station (2014).
- [7] IEC 62196-1 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements (2011).
- [8] Study on Standard for Ensured Safety of Electric Vehicle Charger - Ki-Yeon, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Hyoung-Jun Gil, KIEE, 2011 KIEE Conference, 2011.7, page(s): 2148-2149.

◇ 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.



윤준보(尹浚輔)

1976년 2월 2일생. 2002년 국립인천대학교 전기공학과 졸업. 2004년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004~2007년 삼성전기 전동모터개발팀 선임연구원. 2007년~현재 LG전자 전력전자팀 책임연구원 근무. 2011년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



강병국(姜秉國)

1978년 10월 20일생. 2005년 동국대학교 전기공학과 졸업. 2012년 한양대학교 공학대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005~2006년 대한전선 초고압케이블기술팀 근무. 2007년~현재 한국산업기술시험원 신재생사업센터 선임연구원 근무. 2012년~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.