

사용 후 배터리 자동검사 장비용 릴레이 스위칭 보드의 설계 및 구현에 관한 연구

이예빈*, 박찬욱*, 신 건*, 최익준*
*(유)레드

e-mail : yebin.lee@redsolution.co

Design and Implementation of Relay Switching Board for Automatic Re-used Battery Test System

Ye-Bin Lee*, Chan-Wook Park*, Jian Shen*, Ik-Joon Choi*
*RED CO., Ltd

요 약

최근, 전기차 보급 확대에 따라 사용 후 배터리 검사 수요가 증가하고 있지만, 기존 수동 측정 방식은 장시간 소요와 휴먼 에러, 안전사고 위험 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 KC 10031 표준에 따른 자동 검사를 위하여 배터리 ± 단자를 공유하고, 안전성과 정밀도를 동시에 확보하는 릴레이 스위칭 보드를 제안한다. 여기서, 제안한 보드는 AC-IR과 절연 저항 측정 경로를 독립 절체하고, Break-Before-Make 동작을 적용하며, ± 단자에 50[kΩ] 보호저항을 삽입하여 사고시 단락 전류를 mA 수준으로 제한할 수 있다. 한편, AC-IR 측정에서는 점접·배선·기생 성분이 오차를 유발하므로 Open/Short/Load 보정을 적용하고, 절연저항 측정에서는 보호저항 삽입으로 생기는 직렬 성분을 전용 보정식으로 보정하는 방안을 제안하고자 한다. 이를 바탕으로 사용 후 배터리 자동검사 장비용 시험장치를 구현하여, 동작 특성 시험을 수행한 결과, 표준저항의 기준 최대 오차는 AC-IR에서 약 3[%], 절연저항에서 약 0.2[%]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 기존 방식과 비교 시 최대 AC-IR과 절연저항의 오차는 각각 2.2[%], 1.9[%]로 나타남을 알 수 있다. 또한, 단락 시험에서 전류가 약 2.0 - 2.3[mA] 수준으로 제한되어, 단락 사고가 억제됨을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 릴레이 스위칭 보드는 측정 정밀도와 안전성을 동시에 확보할 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 전기차 시장의 급속한 성장에 따라 사용 후 배터리의 배출량이 급격하게 증가하고 있다. 일반적으로 전기차용 배터리는 SOH(State of Health)가 80[%] 이하로 감소하더라도 ESS(Energy Storage System), Power-bank, E-Mobility 등의 분야에서 재사용을 할 수 있어, 높은 경제적 및 환경적 가치를 가지고 있다. 이에 따라 정부는 KC 10031 표준에 의거한 사용 후 배터리 검사 체계를 구축하고 있으며, 절연저항, 개방회로전압(OCV), 용량, AC-IR, DC-IR, 자가방전 등 6가지 핵심 시험항목의 전수 검사를 요구하고 있다. 하지만 기존 방식은 수동으로 측정하여 각 시험 단계별로 작업자가 배터리를 분리 및 재연결해야 하는 번거로움이 발생하고, 불필요한 시간 소요 및 휴먼에러로 인한 사고와 오류 위험성이 높다. 따라서, 자동검사 시스템의 도입이 필수적이지만, 자동화 과정에서 새로운 문제가 발생한다. 특히, 릴레이 절체가 부적절하게 이루어지는 경우 단락을 일으킬 수 있으며, 점접저항과 배선저항은 AC-IR 측정값의 정밀도를 저

하시킬 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 사용 후 배터리 자동검사용 릴레이 스위칭 보드의 구조를 제시하고, Break -Before-Make 동작과 50[kΩ] 보호저항을 적용하여 단락 방지 및 사고전류 제한 방안을 제시한다. 또한, AC-IR 및 절연저항 측정 오차는 4단자 방식과 Open/Short/ Load 보정을 적용하여 최소화하고자 한다. 이를 바탕으로 사용 후 배터리 자동검사용 시험장치를 구현하고, KC 10031 및 공인 교정기관에서 제시하는 기준을 바탕으로 제안한 장치의 동작 특성을 분석하고자 한다.

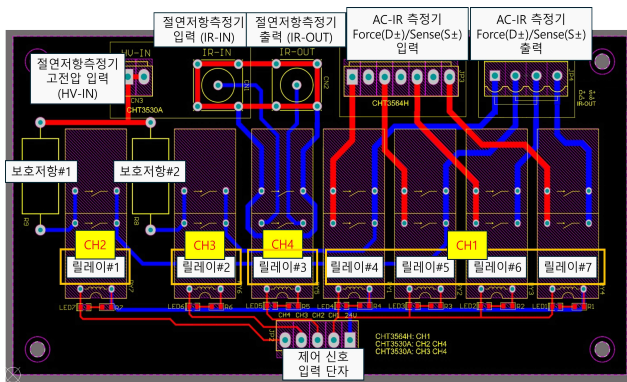
2. 사용 후 배터리 자동검사 장비용 릴레이 스위칭 보드의 설계

2.1 사용 후 배터리 자동검사 시스템용 릴레이 보드

본 연구에서 제안하는 릴레이 스위칭 보드는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, AC-IR 측정기와 절연저항 측정기는 배터리 ± 단자를 공유하지만, 안전성과 정밀도를 동시에 확보할 수 있도록 설계한다. 또한, AC-IR 측정 시험 시, CH1 릴레이 그룹

의 동작은 Force 단자(전류 인가 경로)와 Sense 단자(전압 검출 경로)를 입력 포트(D±/S±)에서 출력 포트(측정대상 측 D±/S±)로 연결한다. 이때 전류 인가 경로와 전압 검출 경로를 별도의 접점으로 분리함으로써, 접점저항이 측정값에 미치는 영향을 최소화한다. 한편, 절연저항 측정 시험 시, HV-IN 포트가 CH2 및 CH3 릴레이를 통해 측정대상(DUT : Device Under Test)의 ± 단자에 접속하여, 동시에 CH4 릴레이는 IR-IN/OUT 포트를 연결하여 검출 루프를 형성한다. 따라서, ± 단자는 두 측정기를 공유하지만, 고전압 인가 경로와 검출 루프는 독립적으로 절체함을 알 수 있다.

또한, 모든 절체 과정은 Break-Before-Make 원칙을 따른다. 즉, 기존 연결을 완전히 차단한 후 새로운 경로를 형성하여, 두 장비가 동시에 접속되는 상황을 원천적으로 차단한다. 그리고 보조접점을 통해 릴레이의 실제 동작 상태를 외부 제어기로 피드백함으로써, 제어 신호와 접점 상태의 불일치는 즉시 감지할 수 있도록 한다. 따라서, 이와 같은 구조는 시험 모드 간 간섭을 방지하고, 고전압 환경에서의 안전성을 보장한다.



[그림 1] 릴레이 스위칭 보드의 구조

2.2 단락 방지 회로

사용 후 배터리 시험장치용 릴레이 스위칭 보드는 단락 사고를 방지하기 위하여, ± 단자 경로에 각각 50[kΩ], 5[W] 보호저항을 직렬로 삽입한다. 이 회로는 릴레이 오동작이나 접점 용착이 발생하더라도 전류를 수 mA 이하로 제한하고, 이를 통해 시험기의 손상과 작업자 감전 위험을 근본적으로 차단할 수 있다. 또한, 절연저항 측정 과정에서 고전압 인가 시, 보호저항은 완충 역할을 수행하므로, 돌발 단락 시 발생할 수 있는 과도 전류를 효과적으로 억제할 수 있다.

하지만 보호저항 삽입은 측정값에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, DUT가 1[MΩ]일 경우 측정값은 약 1.05[MΩ]으로 나타나며, 이는 5[%] 수준의 오차에 해당한다. 따라서, 보호저항은 단락 방지라는 안전상의 이점을 제공하는 동시에, 낮은 절연저항 측정에서는 정밀도 저하를 초래한다. 이에 따라 본 연구에서는 이러한 오차를 보정하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2.3 오차 보정 방안

사용 후 배터리 시험을 위한 AC-IR 측정 시, 릴레이 접점저항, 기생 커패시턴스, 누설저항 등의 성분이 측정 오차를 발생시킨다. 상기에서 제시한 시스템의 경우, 모든 경로를 동일한 전력 릴레이로 구성하여 접점저항의 일관성을 확보할 수 있지만, 정밀 측정을 위한 보정 절차가 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 상기의 문제를 해결할 수 있는 측정 오차 보정 방안을 제시하고자 한다. 먼저, AC-IR 보정 절차는 식 (1)과 같이 Open/Short/Load의 3가지 성분으로 구성된다. 또한, Open 보정에서는 측정 단자를 개방하여 기생 커패시턴스와 누설 성분을 측정한다. 그리고, Short 보정에서는 측정 단자를 단락하여 접점저항과 배선저항을 측정한다. 마지막으로 Load 보정에서는 표준저항을 연결하여 전체 시스템의 선형성을 확인한다. 이를 바탕으로, 자동 측정 환경은 수동 측정과 동등한 정확도를 확보할 수 있다.

$$Z_{cor} = (Z_{mea} - Z_{open}) \times (Z_{stan} - Z_{short}) / (Z_{load} - Z_{short}) \quad (1)$$

여기서, Z_{cor} : 보정된 임피던스, Z_{stan} : 표준 DUT 임피던스 값, Z_{mea} : 실제 DUT 측정값, Z_{open} : 개방 보정값, Z_{load} : 부하 보정값, Z_{short} : 단락 보정값

한편, 절연저항 측정의 경우, 보호저항 삽입으로 인한 고정 오프셋을 제거하는 보정이 필요하다. 특히, 고저항 영역 측정 시, 보호저항과 측정 대상이 직렬로 연결되므로, 식 (2)와 같이 측정값에서 보호저항값을 차감하는 단순 보정이 가능하다. 또한, 누설저항은 식 (3)과 같이 병렬저항 성분을 고려한 확장 보정식 적용을 통하여 오차를 보정 할 수 있다.

$$R_{dut} = R_{mea} - R_{prot} \quad (2)$$

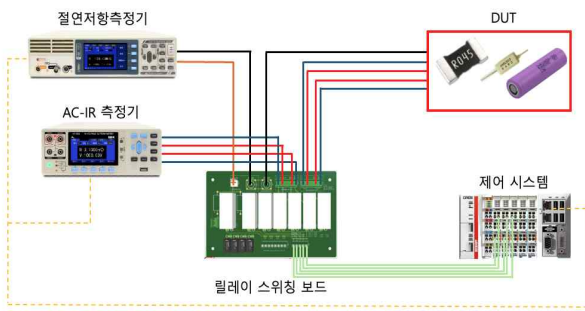
$$1/R_{dut} = 1/R_{mea} - 1/R_{prot} - 1/R_{leak} \quad (3)$$

여기서, R_{dut} : DUT 저항, R_{mea} : 측정저항, R_{prot} : 보호저항, R_{leak} : 누설저항

3. 사용 후 배터리 자동검사 장비용 시험장치 구현

상기에서 제시한 사용 후 배터리 자동검사 장비용 릴레이 스위칭 보드의 설계를 바탕으로 시험장치를 구현하면 그림 2와 같다. 여기서, 전체 시험장치는 AC-IR 측정기, 절연저항 측정기, 릴레이 스위칭 보드, DUT, 제어 시스템으로 구성한다. 먼저, AC-IR

측정기는 1 kHz 교류 전류를 인가하여 DUT의 교류 내부저항을 산출한다. 또한, 절연저항 측정기는 최대 500[Vdc] 시험전압을 인가하여 누설 전류를 검출하고, 이를 바탕으로 절연 상태를 평가한다. 한편, 릴레이 스위칭 보드는 CH1~CH4 릴레이와 보호저항 삽입 구조를 통해 두 시험 경로를 선택적으로 절제한다. 그리고 제어 시스템은 +24[V] 구동 신호로 시험 절차에 따라 릴레이를 자동 제어하는 기능을 가진다. 마지막으로 DUT는 표준저항(0.01[Ω], 0.1[Ω])과 절연저항 시험용 표준저항(100[kΩ], 1000[kΩ])과 공통 측정용 18650 리튬이온 원통형 셀을 적용한다.



[그림 2] 시험장치 전체 시스템 구성도

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

본 논문에서 제시한 사용 후 배터리 자동검사 장비의 동작 특성을 분석하기 위한 시험 조건과 시나리오는 표 1과 표 2와 같다. 먼저, 시험 환경은 KC 10031을 바탕으로 온도 25 ± 5 [°C], 습도 45 - 75[%]로 상정한다. 또한, AC-IR 시험의 주파수는 1[kHz], 전류는 100[mA]로 설정하고, 절연저항 시험은 최대 500[Vdc]를 인가하며, 전류 제한은 2[mA], 보호저항은 50[kΩ]으로 상정한다. 한편, 사용 후 배터리 자동검사 장비의 시험 시나리오는 표 2와 같이, 공인 교정기관에서 제시하는 저항 범위를 바탕으로 AC-IR 시험에서는 10[mΩ], 100[mΩ] 표준저항을 DUT로 적용하고, 절연저항 시험에서는 100[kΩ], 1000[kΩ] 표준저항을 적용한다. 또한, 18650 원통형 셀은 동일 조건에서 측정을 수행하여 실제 배터리 셀의 AC-IR 및 절연저항 특성을 확인한다.

이를 바탕으로 수행한 시험 결과는 두 가지 기준으로 분석한다. 먼저, 절대 오차는 표준저항의 공칭값을 기준으로 산출한다. 또한, 상대 오차는 수동 측정값을 참조값(reference)으로 가정하여 자동 측정값과 비교한다. 이러한 절차를 통하여, 제안한 방식이 표준저항에 대한 절대 정확도와 기존 수동 방식과의 정합성의 동시 확보 여부를 확인한다. 한편, 단락 방지 기능을 확인하기 위한 시나리오는 500[V] 조건에서 단락 전류를 측정하는 것으로

상정한다.

[표 1] 사용 후 배터리 자동검사 장비 시험 조건

구분	항목	사양
환경	온도 [°C]	25 ± 5
	습도 [%]	45 - 75
AC-IR	주파수 [kHz]	1
	전류 [mA]	100
절연저항	전압 [V]	500
	제한전류 [mA]	2
	보호저항[kΩ]	50

[표 2] 시험 시나리오

시험 항목	DUT/조건	세부 사항	반복 횟수
AC-IR 측정	표준저항 10[mΩ]	1[kHz], 100[mA]	3회 평균
	표준저항 100[mΩ]	1[kHz], 100[mA]	3회 평균
	원통형 셀(3.6[V], 2.5[Ah])	1[kHz], 100[mA]	3회 평균
절연저항 측정	표준저항 100[kΩ]	500[V], 2[mA] 제한	3회 평균
	표준저항 1000[kΩ]	500[V], 2[mA] 제한	3회 평균
	원통형 셀(3.6[V], 2.5[Ah])	500[V], 2[mA] 제한	3회 평균
단락 방지 시험	보호저항 포함 경로	500[V], 전류 측정	3회 반복

4.2 시험 결과 및 분석

4.2.1 AC-IR 측정

상기에서 제시한 시험 조건 및 시나리오를 바탕으로 사용 후 배터리 자동검사 장비의 AC-IR 측정 결과를 나타내면 표 3과 같다. 먼저, 표준저항 10[mΩ]의 경우, 기존 방식과 제안한 방식은 각각 10.3[mΩ]과 10.2[mΩ]으로 측정되어, 제안한 방식의 오차가 약 1.0[%] 정도 감소함을 알 수 있다. 또한, 표준저항 100[mΩ]의 경우, 기존 방식과 제안한 방식은 각각 100.3[mΩ]과 99.8[mΩ]으로 측정되어, 제안한 방식의 오차가 약 ± 0.5 [%] 정도 감소함을 알 수 있다. 한편, 18650 원통형 셀의 경우 기존 방식과 제안한 방식은 18.4[mΩ]과 18.8[mΩ]으로 측정되어, 약 2.2[%] 정도 오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 일반적인 18650 셀의 AC-IR 특성 범위(10 - 30 [mΩ])와 비교하는 경우 허용 가능한 수준이며, 제안 방식이 실제 배터리 셀의 특성 평가에서도 수동 측정과 정합성을 확보함을 알 수 있다.

[표 3] AC-IR 측정 결과

DUT	기준값	기존 방식	기존 방식 오차	제안한 방식	제안한 방식 오차	두 방식 상대차
표준저항 10[mΩ]	10[mΩ]	10.3[mΩ]	+0.3[mΩ] (+3.0[%])	10.2[mΩ]	+0.2[mΩ] (+2.0[%])	0.1[mΩ] (1.00[%])
표준저항 100[mΩ]	100[mΩ]	100.3[mΩ]	+0.3[mΩ] (+0.3[%])	99.8[mΩ]	-0.2[mΩ] (-0.2[%])	0.5[mΩ] (0.50[%])
원통형 셀 (18650)	-	18.4[mΩ]	-	18.8[mΩ]	-	0.4[mΩ] (2.20[%])

4.2.2 절연저항 측정

상기에서 제시한 시험 조건 및 시나리오를 바탕으로 절연저항 측정 결과를 나타내면 표 4와 같다. 먼저, 표준저항 100[kΩ]의 경우, 기존 방식과 제안한 방식은 각각 100.1[kΩ]과 100.2[kΩ]으로 측정되고, 제안한 방식의 오차가 약 0.1[%]정도 감소함을 알 수 있다. 또한, 표준저항 1000[kΩ]의 경우, 기존 방식과 제안한 방식은 각각 998[kΩ] 1000[kΩ]으로 측정되어, 제안한 방식의 오차가 약 0.2[%]정도 감소함을 알 수 있다. 한편, 18650 원통형 셀의 경우, 기존 방식과 제안한 방식은 각각 260[MΩ]과 255[MΩ]으로 측정된다. 이에 따라, 두 값의 차이는 5[MΩ]으로 약 1.9[%] 정도 오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 KC 10031에서 제시하는 절연저항 요구 조건을 충족하는 수준이며, 제안 보정 절차에 따라 보호저항 삽입으로 발생하는 고정 오프셋이 제거됨을 알 수 있다.

[표 4] 절연저항 측정 결과

DUT	기준값	기존 방식	기존 방식 오차	제안한 방식	제안한 방식 오차	두 방식 상대차
표준저항 100[kΩ]	100[kΩ]	100.1[kΩ]	0.1[kΩ] (0.1[%])	100.2[kΩ]	0.12[kΩ] (-0.2[%])	0.1[kΩ] (0.1[%])
표준저항 1000[kΩ]	1000[kΩ]	998[kΩ]	2[kΩ] (-0.2[%])	1000[kΩ]	0[Ω] (0[%])	2[kΩ] (0.2[%])
원통형 셀 (18650)	-	260[MΩ]	-	255[MΩ]	-	5[MΩ] (1.9[%])

4.2.3 단락 방지 기능

본 논문에서 제시한 사용 후 배터리 자동검사 장비의 단락 방지 기능은 500[V]를 인가한 조건에서 평가된다. 이때, 보호저항에 걸리는 전압을 측정하고, 이를 통해 역산된 전류는 약 2.0 - 2.3[mA] 수준으로 제한되어, 단락 사고의 억제력을 알 수 있다. 또한, 측정 완료 이후 자동 방전 절차의 수행을 통하여, 잔류 전하가 제거되므로 다음 측정 시퀀스의 안정성을 확보할 수 있다. 한편, 릴레이 보드의 보조접점 신호는 제어시스템에서 실시간으로 감시되며, 의도하지 않은 동시 접촉이 발생할 경우 즉시 차단 동

작을 통하여 단락 방지 기능이 정상적으로 수행함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 사용 후 배터리 자동검사 장비용 릴레이 스위칭 보드를 제안한다. 여기서, 제안한 보드는 AC-IR 측정기와 절연저항 측정기의 공용 단자를 통하여, 안전하게 사용할 수 있도록 Break-Before-Make 절체 구조와 보호저항을 포함한다. 또한, AC-IR 측정 시 발생하는 접점저항 및 기생 성분의 영향을 보정하기 위하여 Open/Short/Load 보정을 적용하고, 절연저항 측정 시 보호저항 삽입으로 인한 고정 오프셋을 제거하는 보정 방안을 제시한다. 이를 바탕으로 사용 후 배터리 자동검사 장비용 시험장치를 구현하여 AC-IR 및 절연저항 측정을 수행한 결과, 표준저항 기준 최대 오차는 AC-IR에서 약 3[%], 절연저항에서 약 0.2[%]로 산정된다. 기존 방식과 비교하는 경우, 최대 차이는 AC-IR 2.2[%], 절연저항 1.9[%]로 산정됨을 알 수 있다. 또한, 단락 시험에서 전류가 약 2.0 - 2.3[mA] 수준으로 제한되어 단락 사고가 억제됨을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 릴레이 스위칭 보드는 KC 10031에 근거한 사용 후 배터리 자동검사 장비의 핵심 구성으로 적용 가능함을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] Korean Agency for Technology and Standards, KC 10031: Safety requirements for electrical equipment, 2015.
- [2] 정재범, 임민규, 김남현, 김현재, 노대석, “중대형 배터리의 재상요율 위한 내부저항 평가에 관한 연구”, 대한전기학회논문지(SCOPUS), vol. 72, no. 6, pp. 717-723, 2023.06.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구(No.20032279)로서, 관계부처에 감사드립니다.