

Battery Cell Balancing with Hybrid Architecture of Serial and Parallel Charging

직·병렬 하이브리드 충전 구조를 사용한 배터리 균형 충전

Euihan Jeong*, Changju Yang*, Seungho Han**, Hyongsuk Kim*†
정의한*, 양창주*, 한승호**, 김형석*†

* Division of Electronics Engineering, Intelligent Robot Research Center, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Korea

** KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea
† hskim@jbnu.ac.kr

Abstract

A hybrid charging method with serial and parallel architecture has been developed to resolve the unbalanced charge problem among battery cells for Electric Vehicles. In this method, the major charging is performed with serial part and the balancing is carried out with the parallel part, where the serial part is big and heavy but the parallel part is smaller and lighter than serial part. A sensor array to detect the individual battery cell voltage, duty rate control incorporated IGBTs, and battery management system are employed as the core parts of the proposed system.

전기자동차 배터리 셀들 간의 불균형 충전 문제를 해결하기 위해, 직병렬 하이브리드 충전 구조를 개발하였다. 이 방법은 직렬 부분에 의해 주 충전이 수행되며 병렬 부분에 의해 밸런싱이 수행되는데, 이 때, 직렬 부분은 부피가 크고 무겁지만 병렬 부분은 직렬 부분보다 작고 가볍다. 개별 배터리 셀 전압을 측정하기 위한 센서 어레이, 듀티비 제어를 포함한 IGBT, 그리고 배터리 관리 시스템은 제안된 시스템의 핵심 요소이다.

Keywords: Hybrid Charging Architecture, Serial Charging, Parallel Individual Charging, Sensor Technique, Control Technique

I. 서론

리튬이온 이차전지는 1994년 등장한 이래 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며, 단위 전지전압이 3.0~3.7 V로 현존하는 이차전지 중에서 가장 높은 단위 전지전압을 갖는다. 특히, 에너지 밀도가 높고 사용하지 않더라도 자연방전 현상이 적기 때문에 휴대형 제품에 적합하다 [1].

그러나 과충방전과 과전류 등에 약하고, 그로 인한 폭발이나 발화의 위험성이 크기 때문에 이를 막기 위한 보호회로가 필요하다는 단점이 있다. 충전기의 전압과 배터리 셀의 전압 간의 차이가 클수록 배터리 셀의 충전전류가 더 커지게 되는데, 이 충전전류가 과도하게 큰 경우, 열이 발생하여 배터리의 안전과 수명을 위협할 수 있다. 따라서 배터리 충전을 수행할 때, Constant Current 구간과 Constant Voltage 구간으로 나누어 리튬이온 이차전지의 안전과 수명을 보장해야 한다.

Fig. 1은 위에서 언급한 충전 과정을 보여주는 충전 곡선으로 충전기와 배터리 셀들을 병렬로 연결하고 충전전압 V_{chg} 를 배터리 셀의 전압 V_{cell} 보다 일정하게 높은 전압을 유지하여 충전전류 I_{chg} 가 일정한 값을 유지하도록 하는데, 이 구간을 정전류 기간 t_1 이라고 한다.

셀에 충분한 충전전류가 공급되어 일정한 전압에 이르면, 충전전압을 더 이상 올리지 않고 고정시켜야 한다. 이 때, 충전전류는 점차 줄어들게 되는데, 충전전류가 초기 충전전류의 20%이하로 떨어지면 충전을 종료하며, 이 구간을 정전압 구간 t_2 라고 한다.

기존의 직렬 충전 방식은 직렬로 연결된 전체 배터리 셀들에 충전장치를 연결하여 직렬 일괄 충전하는 방식이다 [1]-[4]. 이 때, 충방전 사이클이 계속 반복되면서 각 배터리 셀이 가지는 특성 인자들이 서로 동일하지 못하게 되면 각 배터리 셀의 전압들이 불균형 한 상태가 된다 [5][6]. 이러한 배터리 셀들 간의 충전 불균형 현상은 방전 심도(Depth Of Discharge, DOD)가 높을 경우 더욱 심화되어 결국 과충전을 야기시키고 배터리의 안전에 악영향을 끼치게 되며 리튬이온 이차전지의 경우 폭발이나 발화와 같은 위험한 상황의 요인이 된다.

상기 배터리 셀들 간의 충전 불균형 현상을 해결하기 위해 개별 배터리 셀을 담당하며 배터리 셀들과 같은 개수의 충전장치를 사용하여 병행 충전을 수행하게 하였다. 이를 병렬 충전 방식이라고 한다. 이 충전 방식은 배터리 셀들 간의 충전 불균형 현상을 완전히 해소하며 배터리 셀들의 과충전을 막으므로, 기존의 직렬 충전 방식보다 배터리의 수명을 연장시키는 장점은 있지

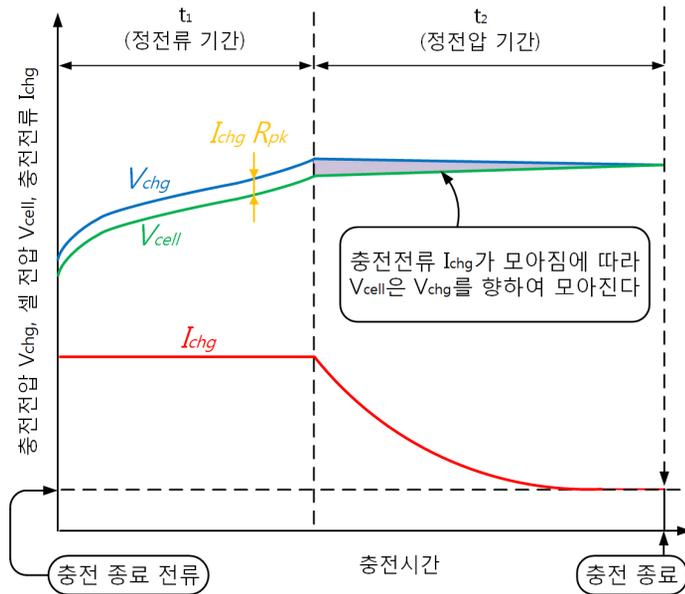


Fig. 1. 리튬이온 이차전지의 충전 곡선.

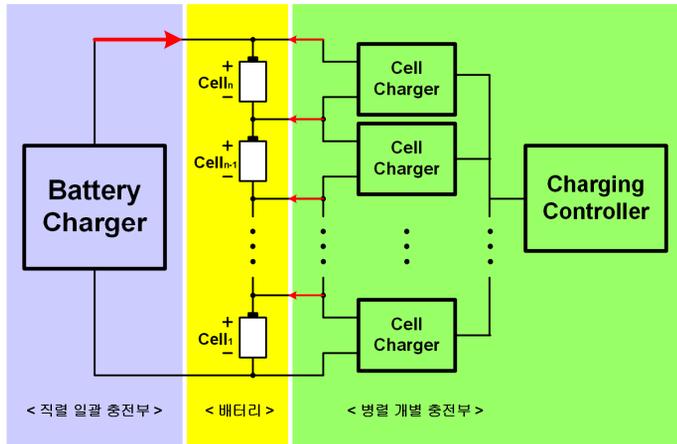


Fig. 2. 제안한 직병렬 하이브리드 충전시스템.

만, 충전장치가 배터리 셀들의 개수만큼 필요하게 된다. 즉, 병렬 충전 방식에서의 충전장치마다 필요로 하는 충전전류량은 직렬 충전 방식에서 필요로 하는 충전전류량과 동일하므로, 필요한 하드웨어 측면에서는 효율이 낮다.

하지만 제안한 직병렬 하이브리드 충전 방식은 1개의 크기가 큰 직렬 충전장치를 이용하여 일괄 충전을 수행하면서, 여러 개의 크기가 작은 병렬 충전장치를 개별 연결하여 보충 충전하는 구조이다. 이 때, 필요한 병렬 충전장치는 개수는 단순 병렬 충전 방식과 같지만, 보충 충전용으로 크기가 작기 때문에 필요한 하드웨어 측면에서 더 효율적이다.

II. 본론

A. 제안한 직병렬 하이브리드 충전장치

제안한 직병렬 하이브리드 충전 방식은 1개의 큰 충전장치를 사용하여 전체 배터리 셀들에 직렬 일괄 충전을 수행하고, 그와 동시에 여러 개의 작은 개별 충전

장치들을 병렬 설치하여 보완 충전하는 구조이다.

기존의 직렬 충전 방식을 사용하여 전기자동차용 배터리를 충전 할 경우, 배터리 셀들 간의 불균형 충전 문제가 발생하여 배터리 수명을 단축시킬 뿐 아니라, 폭발 및 발화의 위험도 존재한다. 각 배터리 셀에 병렬 개별 충전하는 방법은 다른 요소들에 비해 상대적으로 부피가 크고 무거운 변압기 등을 포함한 개별 충전장치들을 배터리 셀들의 개수만큼 사용해야 하므로, 시스템 크기와 설치비용이 과도하게 증가하는 문제가 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해, 제안한 직병렬 하이브리드 충전시스템에서는 1개의 크기가 큰 직렬 일괄 충전시스템을 사용하여 전체 배터리 셀들을 고 전류로 충전하고, 1개의 병렬 충전시스템에서는 크기가 작은 저 전류 충전시스템을 사용하여 보충 충전만 담당하면서 여러 개의 충전시스템을 사용하더라도 결과적으로 전체 충전기 크기의 큰 증가 없이 고속 충전과 균형 충전을 모두 가능하게 한다.

제안한 직병렬 하이브리드 충전시스템은 Fig. 2의 좌측과 같이 직렬 일괄 충전 방식을 주축으로 하여 충전하고, 우측의 병렬 개별 충전기들은 배터리 셀들 간의 전압 균형을 맞추는 용도로만 사용한다. 따라서 대부분의 전류는 직렬 충전기를 통해서 공급되므로, 직렬 충전기는 고 전류용의 매우 큰 시스템을 사용한다. 한편, 배터리 셀들 간의 전압 균형을 맞추기 위해 사용되는 병렬 충전기들은 큰 전류가 필요하지 않으므로, 작은 크기의 충전기를 사용할 수 있다. 따라서 이 충전시스템은 크기가 큰 직렬 충전시스템에 의해 고속충전을 할 수 있을 뿐 아니라, 크기가 작은 병렬시스템에 의해 배터리 셀들 간 전압 균형을 유지할 수 있는 효과적인 방법이다.

B. 충전 회로

1) 직렬 충전 회로

아래의 Fig. 3은 직렬 일괄 충전장치의 상세 회로도를 보여준다. 직렬 일괄 충전장치에서의 정류회로는 변압기와 브리지 다이오드 및 전압을 평활화 하는 콘덴서로 구성되어, 교류전압을 직류전압으로 변환하는 역할을 수행한다.

저항 R1과 R2의 직렬연결은 정류전압 측정용 분압 회로로, Processor의 Analog-Digital 변환기로 측정하는 것이 가능하도록 정류전압을 분압하여 축소하는 역할을 수행한다.

DC-DC 변환회로는 IGBT1, Gate Driver U1, 인덕터 L1, 콘덴서 C2로 구성되어, 정류회로로부터 입력된 직류전압을 배터리를 충전하기 위한 충전전압으로 변환하는 역할을 수행한다. 이를 위해서, Gate Driver U1에는 직렬 충전장치 제어기의 제어신호가 인가되고, Gate Driver U1의 출력신호는 IGBT1의 Gate 단자에 인가되어 IGBT1를 ON-OFF 시킨다. 이 때, 직렬 충전장치 제어기의 제어신호는 듀티비 제어되며, 충전전압의 크기를 조절 가능하다. 인덕터 L1은 IGBT1의 ON-OFF에 따른 전압의 급격한 변화를 완충시키기 위한 소자이고, 콘덴서 C2는 인가된 평균 충전전압을 저장하여 이에 연결된 배터리에 안정화된 전원을 공급하기 위한 것이다.

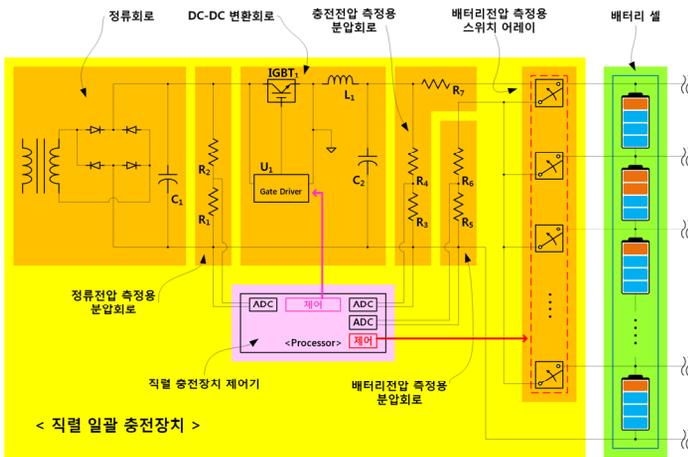


Fig. 3. 직렬 일괄 충전장치의 상세 회로도.

이와 같은 구조를 갖는 DC-DC 변환회로의 충전전압은 IGBT의 Gate에 인가되는 신호의 듀티비에 의해 제어되게 되며, 최대 충전전압은 직렬로 연결된 전체 배터리 셀들의 목표 전압과 동일한 전압으로 한다. 상기 DC-DC 변환회로에서 얻어진 충전전압은 직렬로 연결된 배터리 셀 어레이 양 끝단에 인가하여 배터리 셀들이 일괄 충전되도록 한다.

저항 R3와 R4의 직렬연결은 충전전압 측정용 분압 회로로, 직렬 일괄 충전장치에서의 충전전압을 측정하기 위한 회로이다.

한편, 직렬로 연결된 배터리 셀들의 개별 전압은 배터리 팩의 전압을 직렬로 연결된 배터리 셀들의 개수로 나눈 값이 되어야 이상적이다. 그러나 각 배터리 셀의 파라미터와 충전 특성이 다르기 때문에 어떤 배터리 셀들의 전압이 다른 배터리 셀들에 비해 높거나 낮게 충전되는 배터리 셀들 간의 전압 불균형 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제로 인하여 일부 배터리 셀들의 전압이 감내할 수 있는 범위를 벗어나 과충방전 상태가 되면 배터리 셀의 수명에 악영향을 줄 수 있으며, 심할 경우 폭발의 위험도 있다.

이러한 위험을 막기 위해서는 각 배터리 셀의 전압을 측정할 필요가 있는데, 이를 위해 각 배터리 셀의 출력을 배터리전압 측정용 스위치 어레이를 이용해서 배터리 셀들을 순차적으로 선택하여 전압을 측정하며, 이 값들은 저항 R5 및 R6를 통하여 분압해서 읽어낸다. 또, 1옴 이하의 작은 저항 R7을 연결해서 직렬로 연결된 배터리에 흐르는 전류를 측정한다. 정류전압 측정, DC-DC 변환회로 듀티비 제어, 배터리 셀들의 전압 측정용 스위치 제어 및 전류 측정 등은 직렬 충전장치 제어기에서 담당한다.

2) 병렬 충전 회로

상기의 배터리 셀들 간 전압 불균형 문제를 해결하기 위해 개별 배터리 셀을 담당하며 배터리 셀들과 같은 개수의 개별 충전장치들을 사용하여 병렬 개별 충전을 수행하였다. 이를 병렬 개별 충전장치라고 하며, 상세 회로도도 Fig. 4와 같다.

개별 충전장치는 직렬 일괄 충전장치와 동일한 구조를 가지나, 직렬 일괄 충전장치의 최대 충전전압이 직

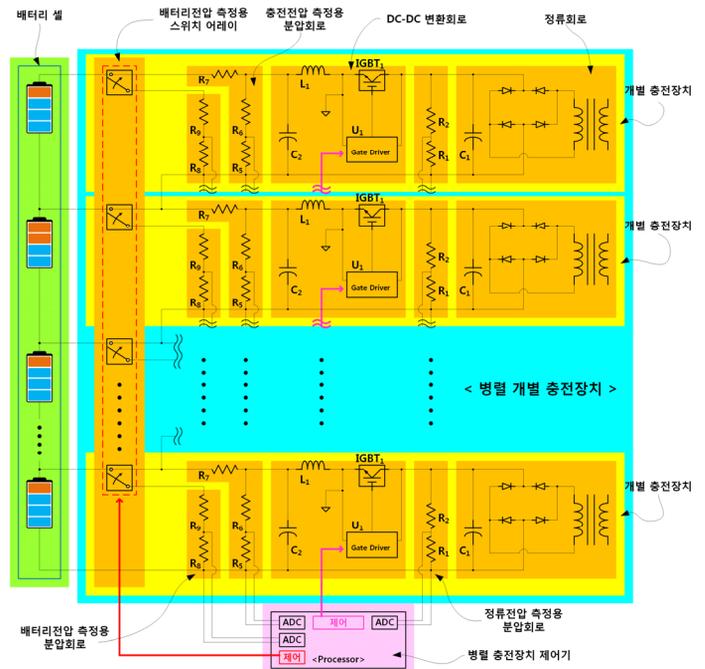


Fig. 4. 병렬 개별 충전장치의 상세 회로도.

렬로 연결된 전체 배터리 셀들의 목표 전압으로 높은 전압이어야 하는데 비해, 각 개별 충전장치의 최대 충전전압은 각 배터리 셀의 목표 전압으로 낮은 전압인 점이 다르다. 이와 같은 이유로 직렬 일괄 충전장치와 병렬 개별 충전장치의 변압기 출력전압 크기가 다르다.

병렬 충전장치 제어기는 병렬 개별 충전장치의 정류전압 측정, DC-DC 변환회로 듀티비 제어신호 생성, 충전전압 측정, 배터리전압 측정, 배터리전압 측정용 스위치 제어 등을 담당한다.

III. 충전 실험 결과

개발한 직병렬 하이브리드 충전시스템의 prototype은 리튬이온 배터리 팩 1개를 충전할 수 있는 시스템으로 4.2V×6=25.2V까지 충전할 수 있는 시스템이다. 전기자동차의 충전시스템은 이와 같은 배터리 팩들을 직렬로 연결하여 370V 정도의 매우 큰 전압을 얻어 사용하므로, 전기자동차 배터리 시스템의 핵심기술은 단위 팩 개발에 있다.

충전시스템은 IGBT에 의한 정전류 충전 제어가 필수적이다. 아래의 Fig. 5는 본 충전장치가 정전류 충전을 가능하게 함을 보이는 그래프이다. 파란색 그래프는 정전류 제어를 하지 않고 정전압으로 충전한 경우의 그래프로, 초기에 빠른 속도로 충전되다가 점차 충전 속도가 느려짐을 알 수 있다. 빨간색 그래프는 개발한 충전시스템에 의한 정전류 충전 곡선으로, IGBT에 인가되는 펄스의 듀티비를 조절하여 일정한 충전전류량으로 충전을 수행하였다. 정전류 충전 구간에서의 전압 증가 속도는 일정하다는 특징이 있고, 이 충전 곡선은 Fig. 1의 정전류 충전 구간의 직선적인 부분과 일치하므로, 개발한 충전장치가 정전류 충전이 가능함을 알 수 있다.

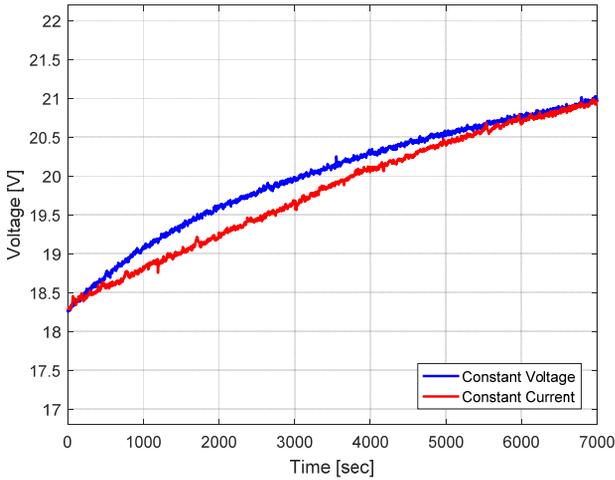


Fig. 5. 개발한 충전장치의 정전압 충전(파란색 그래프)과 정전류 충전(빨간색 그래프)의 전압 상태 변화 비교.

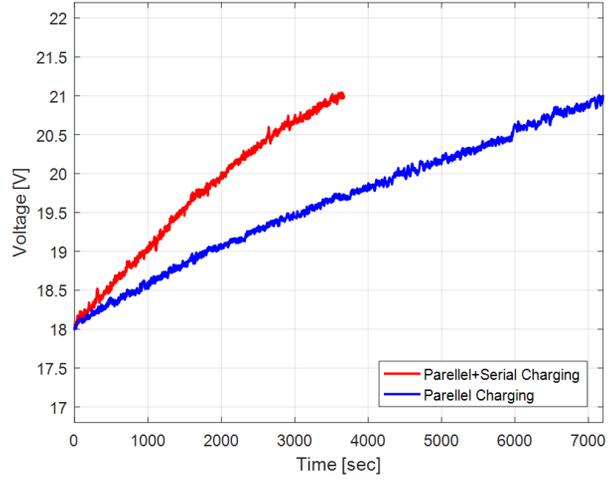


Fig. 7. 직렬 충전과 병렬 충전을 동시에 수행한 경우(빨간색 그래프)와 병렬 개별 충전만 수행한 경우(파란색 그래프)의 전압 증가 속도 비교.

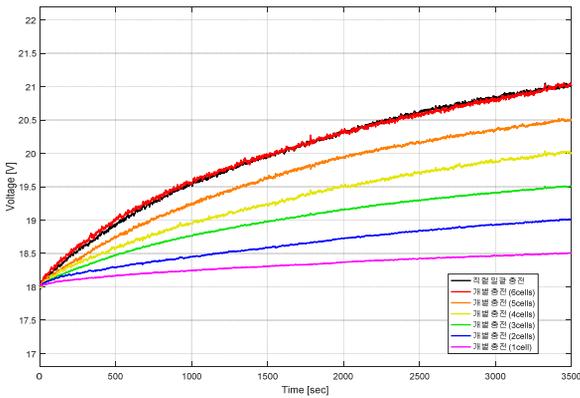


Fig. 6. 직렬 충전장치를 6개의 배터리 셀에 연결한 경우(검정색 그래프)와 직렬 충전장치와 동일한 충전전류를 갖는 충전장치를 여러 배터리 셀들에 연결한 경우(빨간색, 주황색, 노랑색, 초록색, 파랑색, 보라색 그래프)의 전압 증가 속도 비교.

만약, 직렬 충전장치와 동일한 충전전류를 갖는 충전장치를 배터리 셀마다 병렬로 연결하여 충전하는 경우, 한 개의 직렬 충전장치로 충전하는 것보다 빠른 충전이 가능한가 하는 의문이 있다.

아래의 Fig. 6은 직렬로 연결된 6개의 배터리 셀들에 직렬 충전장치를 연결하여 일괄 충전하는 경우 전압 상태 변화(검정색)와 직렬 충전장치와 동일한 충전전류를 갖는 충전장치를 배터리 셀마다 연결하여 충전하는 경우 전압 상태 변화들(빨간색, 주황색, 노랑색, 초록색, 파랑색, 보라색)을 보여준다. 보라색 그래프는 1개, 파랑색 그래프는 2개, 초록색 그래프는 3개, 노랑색 그래프는 4개, 주황색 그래프는 5개, 빨간색 그래프는 6개의 배터리 셀들에 개별 충전장치를 연결하여 충전하는 경우를 나타낸다.

직렬로 연결된 6개의 배터리 셀들에 직렬 충전장치를 연결하여 일괄 충전하는 경우의 전압 증가 속도는 직렬 충전장치와 동일한 충전전류를 갖는 충전장치를 6개의 배터리 셀들에 연결하여 개별 충전하는 경우와 거의 비슷한 전압 증가 속도를 보여주고 있고, 6개의 배터리 셀들에 개별 충전장치를 연결하여 충전하는 경우의 전압 증가 속도는 1개의 배터리 셀에 개별 충전장치를

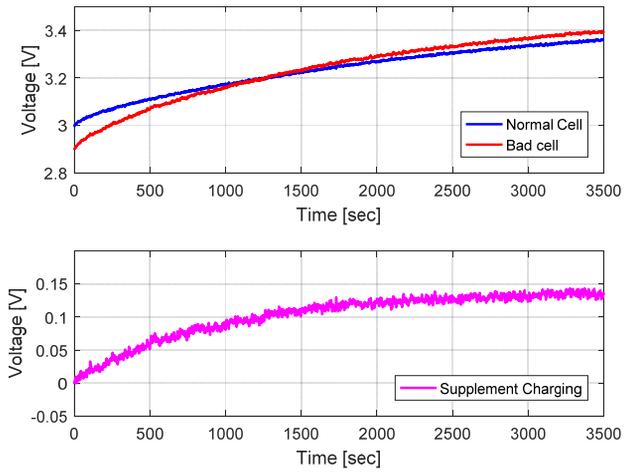


Fig. 8. 고 전류용 직렬 일괄 충전장치로 충전하는 동안 저 전류용 병렬 개별 충전장치로 보충 충전하는 부진한 셀(빨간색 그래프)과 정상 셀(파랑색 그래프)의 전압 상태 변화 비교 및 병렬 개별 충전장치에 의해 보충 충전되는 전압 상태 변화(보라색 그래프).

연결하여 충전하는 경우의 전압 증가 속도의 6배인 것을 확인할 수 있다. 이 때, 1개의 충전장치를 사용하는 직렬 충전 방식이 6개의 충전장치를 사용하는 병렬 충전 방식에 비해 필요한 하드웨어 측면에서 더 효율적임을 알 수 있다.

배터리의 직렬 충전과 병렬 충전의 특성을 파악하기 위해 직병렬 하이브리드 충전을 수행하고, 그 실험 결과를 직렬 충전 또는 병렬 충전만 수행했을 때와 비교하였다. 아래의 Fig. 7에서 파란색 그래프는 직렬 충전장치와 동일한 충전전류를 갖는 충전장치 6개를 사용하여 각 배터리 셀에 병렬 개별 충전했을 때 직렬로 연결된 배터리 양단에서의 전압 상태 변화이고, 빨간색 그래프는 제안한 직병렬 하이브리드 충전을 수행한 경우의 전압 상태 변화이다. 아래의 결과로부터 직병렬 하이브리드 충전에서 배터리전압이 목표 전압까지 도달하는 시간은 병렬 충전만 하는 경우 배터리전압이 목표 전압까지 도달하는 시간의 거의 반임을 확인할 수 있고, 이를 통해서 직병렬 하이브리드 충전의 전압 증가 속도가 병



Fig. 9. 제작된 직병렬 하이브리드 충전장치 prototype. 최상층은 직렬 충전장치, 중간층은 병렬 충전장치, 최하층은 변압기 등이 장치되어 있다.

렬 충전만 하는 경우의 전압 증가 속도의 거의 2배인 것을 알 수 있다. 하지만 병렬 충전장치로 직렬 충전장치와 동일한 충전전류를 갖는 충전장치를 사용할 경우, 시스템 크기와 설치비용이 과도하게 증가하는 문제가 있다.

병렬 개별 충전 방식의 경우 직렬 일괄 충전 방식보다 필요한 하드웨어 측면에서 효율이 떨어지는 위의 문제점을 해결하기 위해 직렬 일괄 충전장치에는 큰 전류와 큰 전압의 충전장치를 사용하여 주 충전을 하고, 병렬 개별 충전장치에는 작은 전류와 작은 전압을 사용하는 방식을 제안하였다. 이 때 사용하는 개별 충전장치는 기존의 병렬 개별 충전 방식에 사용했던 개별 충전장치에 비해 작으므로 하드웨어 크기가 크게 증가하지 않으면서도 균형 충전이 가능하게 될 것이다. 아래의 Fig. 8은 개발된 직병렬 하이브리드 충전시스템이 배터리를 균형적으로 충전하는 모습을 보여주고 있다. 파란색 그래프는 정상 배터리 셀이 직렬 일괄 충전장치에 의해 충전되는 모습을 나타내고 있고, 빨간색 그래프는 충전 성능이 부진하여 낮게 충전되어 있는 배터리 셀에 직렬 일괄 충전장치와 동시에 병렬 개별 충전장치를 통한 보충 충전을 진행하는 모습이다. 아래의 결과로부터, 부진한 셀의 충전 속도가 빨라지는 것을 확인 할 수 있으며, 고 전류용 직렬 일괄 충전장치가 전체 배터리 셀들을 충전하는 동안에 저 전류용 병렬 개별 충전장치를 함께 사용하면 초기에 충전상태가 부진했던 셀의 경우에도 얼마동안의 충전이 지속된 후에는 정상적인 셀의 충전량을 추월하여 충분히 충전 될 수 있음을 보여준다.

III. 결론

전기자동차용 리튬이온 배터리 셀들 간의 균형 충

전 기술 개발을 위해서 고 전류 직렬 일괄 충전시스템과 저 전류 병렬 개별 충전시스템이 결합된 직병렬 하이브리드 충전시스템을 개발하였다.

개발한 직병렬 하이브리드 충전시스템은 고 전류 직렬 일괄 충전시스템과 저 전류 병렬 개별 충전시스템으로 구성되며, 구체적인 사양은 다음과 같다.

고 전류 직렬 일괄 충전시스템 :

- 입력전압 - 상용전원 AC 220V
- 정류기 입력 전압 - AC 28V
- 충전장치의 허용 출력전류 - DC 10A

저 전류 병렬 개별 충전시스템 :

- 충전 성능 - 4.2V 3A의 정전압, 정전류
- 총 개별 충전장치 수 - 6개 (배터리 팩 1개 충전용)

개발한 직병렬 하이브리드 충전시스템은 배터리 셀들 간의 충전 불균형 현상을 완전히 해소하며 배터리 셀들의 과충전을 막으므로, 기존의 직렬 일괄 충전 방식보다 배터리의 수명을 연장시킬 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. (Grant Number : R15XA03-53)

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R15XA03-53)

REFERENCES

- [1] 나경민, 여인준, 변영재, “전기 자동차 고효율 BMS 구현을 위한 하이브리드 타입 Charge Equalizer,” 한국자동차공학회 지회 학술대회 논문집, MAY 2012, pp83-86.
- [2] Ho-Seok Hwang, Jong-Ha Nam, Jin-Hong Choi, Dae-Gyeong Jang, and Min-Kee Park, “리튬-이온 배터리의 전압안정회로 설계,” THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, VOL. 9, NO. 2. APRIL 2004, pp.187-193.
- [3] Jong-ha Nam, Jin-hong Choi, Jong-yeop Baek, and Ho-seok Hwang, “이차전지의 셀밸런싱 기법에 관한 연구,” Power Electronics Annual Conference, November 2006, pp143-145.
- [4] Nasser H. Kutkut, Deepakraj M. Divan, and, Donald W. Novotny, “Charge Equalization for Series Connected Battery Strings,” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. VOL. 31, NO. 3. MAY-JUNE 1995, pp.562-568.
- [5] Nasser H. Kutkut, Herman L. N. Wiegman, Deepak M. Divan, and Donald W. Novotny, “Design Considerations for Charge Equalization of an Electric Vehicle Battery System,” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 35, NO. 1, JANUARY-FEBRUARY 1999, pp.28-35.
- [6] Yuang-Shung Lee, and Ming-Wang Cheng, “Intelligent Control Battery Equalization for Series Connected Lithium-Ion Battery Strings,” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 52, NO. 5, OCTOBER 2005, pp.1297-1307.