

엑티브 셀 밸런싱을 위한 새로운 전력 피드백 방식의 플라이백 토폴로지에 관한 연구

Study on the Fly-back Topology of New Power Feed-back Method for Active Cell Balancing

강성용¹, 송명진², 박성미³, 박성준⁴, 고재하^{5*}

Seong-Yong Kang¹, Myeong-Jin Song², Seong-Mi Park³,
Sung-Jun Park⁴, Jae-Ha Ko^{5*}

〈Abstract〉

Recently, the demand for low-voltage, high-capacity ESS is rapidly increasing due to the revitalization of the e-mobility industry, which is mainly powered by electricity. In addition, the demand for portable power banks is rapidly increasing due to the revitalization of leisure industries such as camping and fishing. The ESS with this structure consists of a small number of series cells and many parallel cells, resulting in a system with a large rated current. Therefore, the number of power devices for cell balancing configured in series is small, but a balancing device with a large current capacity is required. Construction of a constant temperature device in such a low-voltage, high-current ESS is difficult due to economic issues. The demand for an active balancing system that can solve the passive balancing heating problem is rapidly increasing. In this paper, propose a power feedback fly-back topology that can solve the balancing heating problem. The characteristic of the proposed topology is that a series-connected voltage sharing voltage is used as the input of the flyback converter,

1 주저자, (주)매그나텍, 책임연구원
E-mail: sykang0414@naver.com

2 참여저자, 전남대학교 전기공학과, 석사과정
E-mail: mm3082@naver.com

3 참여저자, 한국승강기대학교 승강기공학부, 부교수
E-mail: seongmi@klc.ac.kr

4 참여저자, 전남대학교 전기공학과, 부교수
E-mail: sjpark1@jnu.ac.kr

5* 교신저자, 호남대학교 전기공학과, 조교수
E-mail: jhko@honam.ac.kr

1 Main Author, Magnatech Senior Researcher

2 Co-author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Master Course

3 Co-author, Dept. of Lift Engineering, Korea Lift College, Associate Professor

4 Co-author, Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Professor

5* Corresponding Author, Dept. of Electrical Engineering, Honam University, Assistant Professor.

and the converter output is connected to one transformer. In this structure, the converter output for cell voltage balancing shares magnetic flux through one high-frequency transformer, so the cell voltage connected to the converter automatically converges to the same voltage.

Keywords : E-mobility, Cell balancing, Feedback Fly-back topology, Magnetic flux

1. 서론

ESS의 운용 시간이 증가함에 따라 배터리 셀 전압은 불평형이 발생하여 배터리의 이용률 및 수명을 현격히 저하시키게 된다. BMS의 가장 중요한 목적은 배터리 수명을 최대한 연장하기 위함이며, 배터리 셀간 불평형은 수명 감소를 유발하는 가장 위협적인 원인이고, 이를 방지하는 기술이 배터리 밸런싱이다.

직렬로 구성된 배터리 셀의 불평형 전압을 해소하기 위하여 수동(Passive) 또는 능동(Active) 방식의 다양한 배터리 밸런싱 방법 등이 연구되고 있다[1][2]. ESS 역할의 핵심은 배터리가 담당하고 있으며, 각 분야별 높은 가용시간, 높은 부하 출력 등에 따라 배터리의 용량이 점차 대형화되고 있는 추세이다[3]. 이렇게 2차 전지는 점차 다양한 분야에 활용되고 대용량화 되어 가고 있다. 이와 같이 배터리가 차지하는 역할 증가 및 배터리의 높은 가격으로 각 분야에서 배터리가 차지하는 비용도 점점 증가하고 있다. 그러므로 배터리가 예상 수명을 유지하지 못하면 많은 비용 상승을 유발하고, 시스템 설비 등의 가동이 정지되는 문제점이 발생하므로 배터리 수명을 유지하고 최상의 성능이 발휘될 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 이처럼 대용량 배터리는 고가이며 중요한 역할을 수행하므로 배터리의 충전, 방전, 온도, SoC(State of Charge), SoH(State of Health), SoL(State of Life), 충방전 횟수, 배터리 밸런싱

(Battery balancing) 등을 포괄적으로 관리하는 지능적인 배터리 관리 시스템(BMS)이 요구되어진다 [4][5].

본 연구에서는 수동방식에서 배터리 밸런싱을 행할 경우 발생하는 발열 문제를 해결할 수 있는 저가형 능동방식인 전력 피드백 방식의 플라이백 토폴로지를 제안한다. 제안된 토폴로지의 특징은 컨버터 입력은 직렬로 연결된 셀 전압을 플라이백 컨버터의 입력으로 사용하고, 컨버터 출력은 하나의 변압기에 연결되는 구조를 취하고 있다. 이러한 구조는 셀 전압 밸런싱용 컨버터 출력이 하나의 고주파 변압기를 통하여 자속을 공유하는 형태를 취함으로써 컨버터에 연결된 셀 전압이 자동으로 동일한 전압으로 수렴하게 된다. 제안된 방식의 타당성은 5[V] 파워뱅크 시스템을 대상으로 하여 시뮬레이션 및 실험 결과를 통하여 타당성을 검증하였다.

2. ESS의 셀 밸런싱 분석

2.1 셀 밸런싱 기술동향

초기 배터리 모듈은 셀들의 용량이 동일하여 충방전 용량 특성이 우수하지만, 시간이 지나며 따라 개별적인 셀의 화학물 변동, 초기 충전량의 차, 배터리 셀의 위치에 따른 온도의 영향 등에

따라 각기 다른 성능으로 변화한다. Fig. 1과 같이 ESS의 용량은 용량이 줄어든 배터리 셀에 의해 충방전 시 동작 시간이 제한되고, 수명에 영향을 끼치게 된다.

즉 ESS를 충전할 때 직렬로 연결된 약한 셀이 강한 셀보다 먼저 완전충전 전압에 도달하므로, 강한 셀의 용량을 다 충전하지 못하게 된다. 강한 셀의 완전충전을 위해 충전을 지속하는 경우, 약한 셀은 과충전에 따른 폭발의 위험이 생길 수 있다. 이러한 부분은 BMS 구성 시 과충전 보호 기능에 의해 강한 셀이 아직 충전되지 못한 상태에서 약한 셀이 먼저 완전충전 전압에 도달하여 충전을 종료하므로 강한 셀은 완전충전을 완료하지 못하게 된다. 마찬가지로 방전할 경우 약한 셀이 강한 셀보다 충전 용량이 적으므로 먼저 종지(Cut-off) 전압에 도달하여 약한 셀에 의해 동작 시간이 제한된다. 강한 셀을 종지 전압 도달까지 방전하게 되면, 약한 셀은 종지 전압을 넘어 완전방전에 이르게 되어 약한 셀을 더 이상 사용할 수 없다. 따라서 전체적인 시스템에 적정 전압을 공급하는 것이 불가능하여 배터리의 고장 및 교체를 야기하게 된다. BMS 구성 시 셀의 과방전 보호 기능으로 약한 셀이 종지 전압에 도달하면 전체적으로 가용 용량이 남아있지만 셀의 안전성을 위하여 방전 동작을 중지하게 된다. 배터리 셀 간의

불균형은 ESS 측면에서 보면 배터리의 용량을 충분히 활용하지 못하여 동작시간 감소를 야기하고, 동작시간 감소에 따라 충방전 횟수가 증가하게 되어 전체적으로 배터리의 수명을 저하시키게 된다. 그러므로 셀 간의 불균형을 균일하게 만드는 셀 밸런싱이 필요하다.

배터리 셀 밸런싱의 분류는 크게 2가지 방법으로 구분된다. 하나는 수동 방식이며 다른 하나는 능동방식으로 나눌 수 있으며, 이는 곧 에너지를 소비 유무에 따라 분류하는 것이다. 즉 수동 방식은 과충전된 셀의 에너지를 소비하는 것으로 Dissipative이라는 용어로도 사용되며, 능동 방식은 에너지를 소비하지 않는 것으로 Non-dissipative라는 용어로도 사용된다.

Fig. 2는 배터리 밸런싱에 대한 분류를 나타낸 것이다. 소비방식은 크게 고정된 병렬 저항 방식과 스위칭 소자에 제어되는 병렬 저항 방식 그리고 체너다이오드로 구분된다. 주요 동작 원리는 과충전된 배터리의 높은 전압을 저항과 같은 수동 부품을 사용하여 소비하는 것이다. 즉 셀 간의 전압이 서로 다른 경우 낮은 셀의 전압을 기준으로 높은 셀의 전압을 소비하여 전압 평형을 이루는 것이다[6][7]. 에너지 비소비 방식은 커패시터를 사용하는 방법과 인덕터 및 변압기를 사용하는 방법 그리고 마지막으로 전력변환 장치를 사용하는

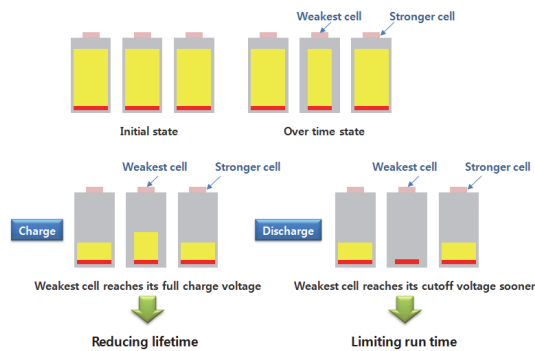


Fig. 1 Decrease in battery lifetime

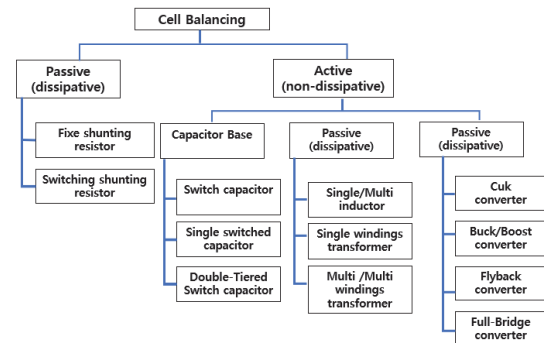


Fig. 2 Classification of battery balancing topologies

방법으로 나뉜다. 비소비 방식은 소비방식과 다르게 과충전된 에너지를 소비하지 않고 부족한 배터리 셀 쪽으로 에너지를 이동하는 개념으로 높은 전압의 배터리 에너지가 낮은 전압의 배터리로 이동하여 전체적인 전압을 동일하게 평형을 이루는 것이다.

2.2 수동방식 배터리 밸런싱

수동 배터리 셀 밸런싱은 높은 전압의 배터리 셀에 병렬로 연결된 저항을 통하여 에너지를 소비하여 나머지 셀들과 전압을 맞추는 원리이다. 이 방법은 시스템 구성에 있어 비용이 저렴하고 구현하기가 쉬우며 배터리 밸런싱 회로가 차지하는 부피가 작은 장점이 있다. 하지만 에너지를 소비하여 배터리 밸런싱을 구현하는 방식으로 에너지 사용적인 면에서는 효율적이지 못한 단점을 가지고 있다. 위 방식은 BMS에서는 높은 전압을 가지고 있는 배터리 셀을 선택적으로 제어하는 간단한 제어만으로 배터리 밸런싱을 수행할 수 있다. 따라서 현재 배터리 밸런싱을 수행하는 방법에서는 수동 방식을 많이 사용되고 있다[8]-[10]. 그 이유는 에너지 소비 대비 적은 구축비용과 제어가 용이한 장점으로 인하여 저용량 배터리에서 많이 사용된다.

Fig. 3(a)는 배터리 셀 별 방전용 션트 저항과 On/Off 스위치가 한 그룹으로 구성되어있다. 현재 다수의 배터리를 충전하는 시스템에서 가장 많이 사용되는 방법으로, 스위치로 제어되는 션트 저항(R_N)은 배터리 충전 시 먼저 완전 충전된 셀의 과충전을 보호하기 위하여 인가되는 전류를 션트 저항으로 감지하여 완전 충전된 셀의 스위치를 On시켜, 나머지 셀들이 완전충전이 될 때 까지 저항을 통해 열로 소모하는 방식으로 주변 셀과의 전압 평형을 이룬다. 또한 이 방식은 제어의 용이성을 위하여 스위치를 동일하게 On/Off 제어하여

배터리 셀간의 전압 편차를 줄이는 목적으로 사용할 수도 있다. 위 방식은 노트북과 같은 적은 용량의 배터리는 충분히 고려할 수 있지만, 전기차 및 BESS의 경우에는 낭비되는 에너지의 양이 많기 때문에 부적합하다. 즉 많은 양의 에너지를 소비하기 때문에 시스템 설계 시 고전류용 스위치와 고출력 션트 저항을 사용해야 한다. 또한 부가적으로 발열에 대한 문제 해결을 위하여 별도 방열판 또는 팬 구조 등이 수반된다. 그러므로 이 시스템은 저전류용 충전 시스템에 적합한 방법이라 할 수 있다.

Fig. 3(b)는 제너다이오드를 사용한 전압 밸런싱 회로를 보여주고 있다. 과충전된 배터리를 제너다이오드에 의해 제한하는 방식으로 구조가 간단하나, 셀이 과충전되어 제너다이오드가 도통하게 되면 충전전류 전부가 제너다이오드로 흐르기 때문에 제너다이오드에서 발생하는 전력손실이 크게 되므로 주로 저용량의 전압 밸런싱 회로에 적용되고 있다. TLP431과 같은 범용 기준 전압 IC 등을 사용하여 배터리 완전충전 전압을 설정하여 개별적인 셀들 중 먼저 완전충전이 된 배터리는

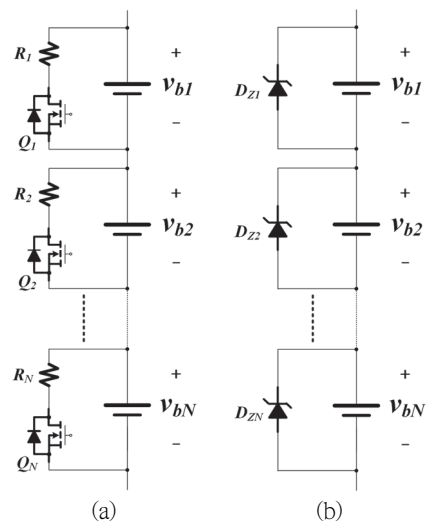


Fig. 3 Manual cell balancing

제너다이오드가 도통하여 충전전류를 제너다이오드에서 소모하는 형태이다. 이러한 방식은 위의 저항 방식과 유사하게 전력손실이 이루어지는 구조이다. 제너다이오드 방식에서 제너다이오드 부품 손실을 저감하기 위하여 별도의 전류 소모용 저항을 함께 구성하여 사용하기도 한다.

2.3 커패시터를 이용한 능동 배터리 밸런싱

수동방식의 배터리 밸런싱은 열 방출에 의한 밸런싱을 수행하는 방법으로 소모한 에너지만큼 배터리 셀의 동작 시간을 감소시키는 단점이 있다. 하지만, 능동 방식은 낮은 전압 배터리를 기준으로 높은 전압의 배터리를 커패시터 등과 같은 소자를 사용하여 에너지를 저장 또는 이동시켜 전체적인 배터리 밸런싱을 수행하는 형태로서, 동작 시간 및 본연의 수명을 기대할 수 있다. 수동 방식이 충전 할 때 수행하는 배터리 밸런싱이라면, 능동 방식은 충전, 방전 또는 독립적으로 배터리 밸런싱만을 선택적으로 수행할 수 있는 장점을 가진다. 또한 에너지 관점에서 볼 때 에너지를 낭비하지 않고 적절하게 분배하므로 에너지 효율이 우수하지만, 제어가 수동방식에 비하여 많이 복잡한 형태이다. 배터리 밸런싱을 수행하는 부품 요소들이 기존 수동방식에 비하여 많이 사용되고 비용도 증가하여 저용량 배터리에는 적합하지 않고 주로 대용량 방식에 적합한 방법이다[9][10].

Fig. 4(a)와 같은 스위치 커패시터 토폴로지는 직렬로 연결된 배터리 셀에서 배터리 셀의 개수를 N 이라 했을 때 N 개의 3가지 상태 스위치와 $N-1$ 개의 커패시터로 구성된다. 이때의 스위치는 서로 동기화 되어 하나의 제어신호에 의하여 제어된다. 스위치 커패시터 토폴로지 구조는 2개의 배터리에 하나의 커패시터가 연속적으로 결합된 구조로서, 배터리 간 에너지 전달을 커패시터가 담당하는 구

조이며, 스위치는 Open, Input, Out 제어신호로 각각의 배터리 간의 밸런싱을 수행한다. 충전, 방전, 평상시에도 배터리 밸런싱을 수행할 수 있으며, 제어가 비교적 단순하게 Open, Input, Out으로 일련의 스위치 과정을 반복적으로 수행하면 전체적인 배터리 밸런싱이 이루어지는 구조이다. 즉 하나의 배터리 전압이 과충전 방지를 위하여 설정된 값보다 크면, 배터리 밸런싱 기능을 시작하여 스위치가 Open 상태에서 Input 상태로 절체되어, 과충전된 셀의 에너지를 커패시터에서 받고, 다시 스위치가 Out 상태로 절체되어 커패시터에 저장된 에너지를 부족한 셀로 보내는 방법이다. 다만 구조상 과충전 셀에서 부족한 셀로 바로 가는 것이 아닌 위아래 구성된 배터리 간의 에너지는 커패시터를 통해 이동하고, 또한 커패시터 간의 에너지 역시 배터리를 통해서 이동되는 구조이다. 이러한 방법은 높은 전압의 셀 에너지가 저항과 같은 열로 소비되는 낭비 없이 부족한 배터리 셀로 넘어가므로 에너지 사용 측면에서 좋은 방법이다.

Fig. 4(b)와 같은 스위치 커패시터 토폴로지는 스위치가 하나로만 되어있지만, MOSFET이 상보

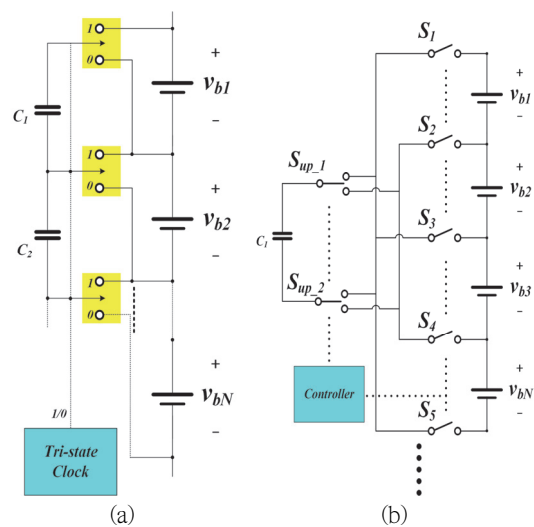


Fig. 4 Active cell balancing

적으로 구성 되어있는 2개의 스위치로 되어있는 형태이며 MOSFET의 정격은 배터리의 전압에 맞게 구성해야 한다. 이러한 방식의 가장 큰 단점은 가장 위에 위치하는 배터리 셀과 가장 아래쪽에 위치하는 배터리 셀간의 밸런싱이 필요한 경우, 이 배터리들 사이에 있는 배터리와 커패시터 전부를 이용하여 배터리 밸런싱을 수행하므로 전체적인 전압 평형을 이루는 시간이 길어지는 단점과 효율이 저하되는 단점이 있다.

2.4 자기회로를 이용한 능동 배터리 밸런싱

Fig. 5는 자기회로를 이용한 배터리 전압 밸런싱 구성을 나타내고 있다. 이러한 토폴로지는 N개의 권선을 가진 하나의 고주파 변압기에 N개의 직렬로 연결된 배터리 셀을 소스로 하여 N개의 DC/DC 컨버터가 연결된 구조이다. 여기서 표현된 DC/DC 컨버터는 하프 브리지 컨버터, 풀 브리지 컨버터, 플라이백 컨버터, 포워드 컨버터 등 다양한 컨버터로 구성할 수 있다. 이러한 하나의 고주파 변압기를 이용한 N개의 DC/DC 컨버터 구조는 밸런싱을 위한 모든 컨버터가 하나의 고주파 변압기에 의해 자속을 공유하여 동기된 신호에 의해 변압기 단자전압에 다수의 여자전압을 인가하는 형태를 취하므로 모든 컨버터의 전압이 자동으로 동일한 전압으로 수렴하게 된다. 그러므로

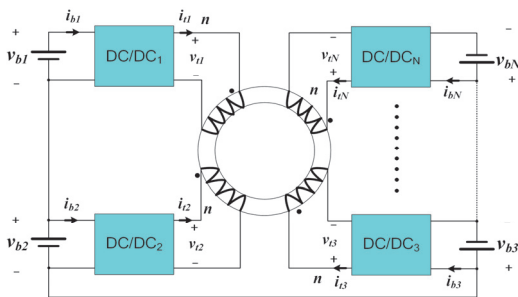


Fig. 5 Battery balancing using magnetic circuit

하나의 배터리의 전압만을 계측하면 배터리 밸런싱 후 모든 배터리의 전압이 동일하므로 배터리 모듈 수의 곱셈만으로 배터리 모듈의 전압을 추정할 수 있다. 이는 배터리 모듈내의 모든 배터리 셀의 전압을 계측하기 위해 다수의 전압 센서가 사용되는 이전의 배터리 밸런싱 방식보다 하나의 전압 센서만을 사용하므로 회로 구성 및 단가에 대한 이점을 가질 수 있다.

이렇게 자속을 공유하는 방식에서는 권선비가 1:1인 다권선을 가지는 변압기 하나만으로 배터리 밸런싱을 수행하므로 기존 수동 방식에 비하여 에너지 소비가 없으며, 능동 방식에서 나타나는 다수의 배터리 셀 간 에너지 이동에 따른 시간 소요 및 전달 손실이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 위의 방식에는 배터리 셀 밸런싱을 위해서는 셀 수와 동일한 DC/DC 컨버터 수로 인하여 저가화에는 한계가 있다.

3. 제안된 ESS의 셀 밸런싱 기법

3.1 저가형 셀 밸런싱 토폴로지

Fig. 6은 경제적 측면을 고려한 소용량 SMPS로 일반적으로 사용되는 플라이백 컨버터 배터리 충전기 구조를 나타내고 있다. 플라이백 컨버터는 스위치 Q가 On 하는 경우 변압기 여자 인덕터에

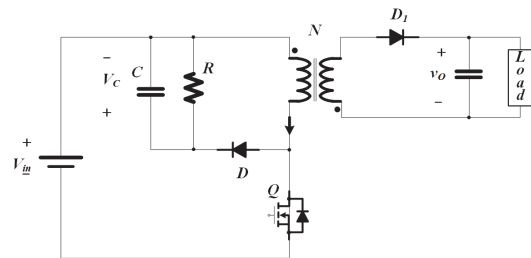


Fig. 6 Topology of flyback converter

저장된 에너지를 스위치 Off 시 변압기 2차 측으로 전달하는 전류원으로 동작하며, 스위치 오프 시 변압기 1차 측 누설인덕터에 저장된 에너지는 RDC 스너버에서 소비하게 된다. 이때 전류원으로 동작하는 플라이백 컨버터의 RDC 스너버 전압(Vc)은 출력전압에 의해 결정됨으로 승감압 컨버터 특징을 가지게 된다.

Fig. 7은 본 논문에서 제안된 저가형 5[V] 모듈에 적용된 셀 밸런싱 토폴로지를 나타내고 있다. 제안된 플라이백 방식의 모듈 셀 밸런싱 시스템은 스위치 소자 1개 만으로 구성이 가능하여 경제적인 측면에서 큰 장점을 갖고 있다.

본 토폴로지의 특징은 각 셀에 연결된 입력 및 출력은 하나의 변압기에 연결되는 구조를 취함으로써 모든 전압 밸런싱 용 스위치가 하나의 고주파 변압기를 통하여 자속을 공유하는 형태를 취하는 구조이다. 플라이백 스위치가 온하면 직렬로 연결된 셀에서 전력을 공급 받고, 스위치가 오프하면 각 배터리 셀에 연결된 2차측 다이오드 의해서 직렬로 연결된 셀 중에서 전압이 최소인 배터리 셀에 전력

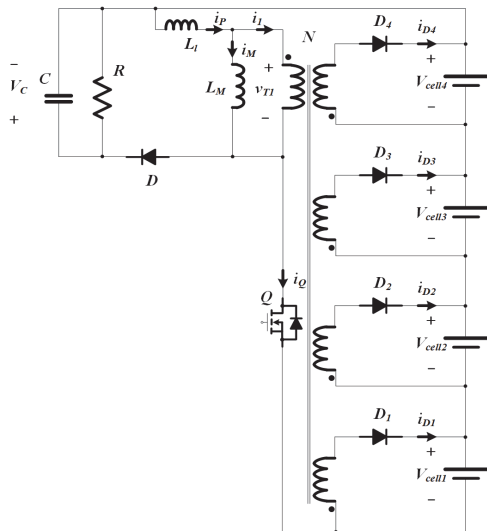
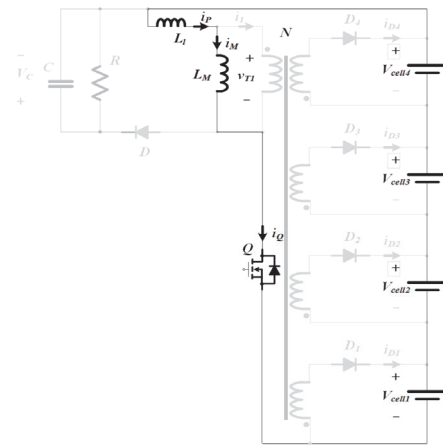
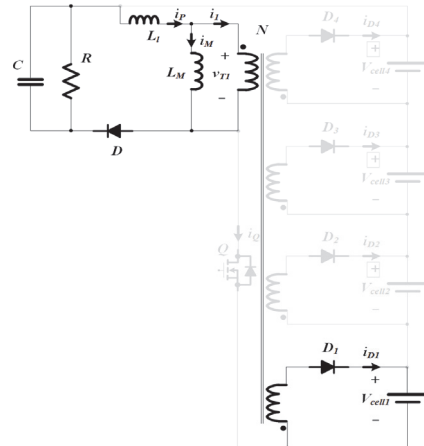


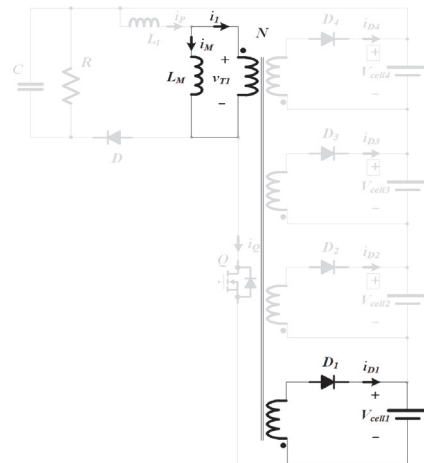
Fig. 7 Cell subtraction topology of the proposed 12[V] module



(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3

Fig. 8 Modes of two-switch flyback converter

을 전달할 수 있는 구조를 취함으로 배터리 밸런싱 이루어진다. 밸런싱 전류의 크기는 플라이백 스위치의 시비율(d)에 의해 결정된다. 따라서 밸런싱을 위한 하드웨어 제어요소는 시비율이 된다.

플라이백 컨버터는 스위치 온, 오프 및 전류 불연속 모드에서 Fig. 8과 같이 크게 4개의 모드로 분류할 수 있으며, 각 모드에 따른 등가회로는 Fig. 9과 같다.

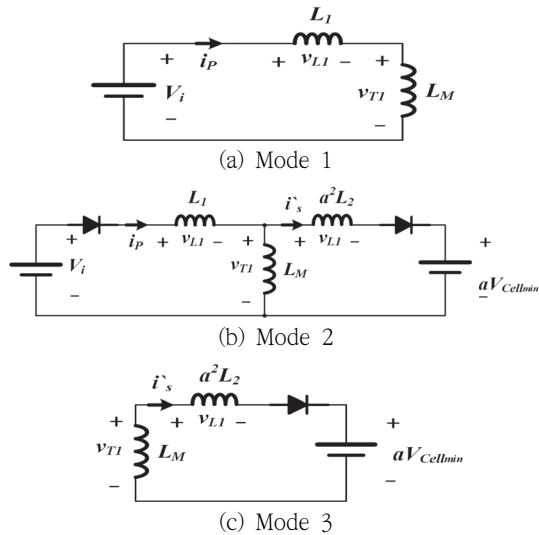


Fig. 9 Equivalent circuit for each mode

Mode 1 : 본 모드는 Q 스위치가 온되는 순간에서 시작하며, 이 모드에서는 입력 전원으로 부터 변압기의 여자 인덕터에 에너지를 저장하는 영역이다. 이때 변압기 1차 측에는 입력전압이 인가되나, 2차 측으로 전력 전달이 없이 1차측 누설 인덕터와 여자 인덕터를 통하여 전류가 형성되어 Fig. 8(a)의 등가회로가 되고 변압기 1차측 전류 값은 식 (1)과 같다.

$$i_p = \frac{V_i}{L_1 + L_M} t \quad (1)$$

Mode 2 : 본 모드는 모드 1에서 축적된 1차측 누설 인덕터의 에너지를 전원 측으로 회수함과 동시에 변압기 여자 인덕터에 저장된 에너지를 2차 측으로 전달하는 영역이다. 이 영역은 Q 스위치가 오프되는 순간에서 시작하며, 이때 등가회로는 Fig. 8(b)에 나타나 있다. Fig. 8(b)로부터 입출력 전압과 변압기 1차측 및 2차측 전류에 대한 전압 방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_i \\ aV_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(L_1 + L_M) & -L_M \\ -L_M & -(a^2L_2 + L_M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

본 토폴로지는 순환전류에 의해 출력전압 제어가 되는 전류형 컨버터로 회로해석을 위해서는 전류해에 대한 정보가 매우 중요하다. 본 컨버터에서 변압기 1차 및 2차측 전류 해는 식 (2)를 이용하여 역행렬을 취한 식 (3)와 같다.

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -(a^2L_2 + L_M) & L_M \\ L_M & -(L_1 + L_M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ aV_{Cellmin} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{단, } A = a^2L_2(L_1 + L_M) + L_1L_M$$

식 (3)의 상태방정식에서 전류 해를 구하면 아래 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$i_p = \frac{aL_M V_{Cellmin}}{A} (t - t_1) - \frac{(a^2L_2 + L_M)V_i}{A} (t - t_1) + i_p(t_1) \quad (4)$$

$$i_2 = \frac{aL_M V_i}{A} (t - t_1) - \frac{(a^2L_2 + L_M)V_{Cellmin}}{A} (t - t_1) \quad (5)$$

이 모드 2는 변압기 1차측 전류가 영이되는 시점에서 종료된다.

Mode 3 : 본 모드는 변압기 1차측 입력 전류는 영이되고, 여자인덕터에 저장된 에너지를 2차

측으로 전달되는 영역이며 이 때 등가회로는 Fig. 8(c)와 같고 전류해는 식 (6)과 같다.

$$i_2 = i_2(t_2) - \frac{a V_{Cell_{min}}}{a^2 L_2 + L_M} (t - t_2) \quad (6)$$

이 모드는 변압기 여자인덕터의 전류가 영이 되는 시점에서 종료된다.

Mode 4 : 본 모드는 플라이백 컨버터의 모든 전류가 영이 되는 영역이다.

Fig. 10은 위에서 설명한 각 모드에 따른 동작 파형을 나타내고 있다.

본 토폴로지의 구조는 단일 입력 선택적 출력 (SISO: Single Input Selected Output) 형태의 플라이백 컨버터 타입이다. 본 토폴로지의 특징은 각 셀에 연결된 입력 및 모든 출력 다이오드는 하나의 변압기에 연결되는 구조를 취함으로 모든 전압 밸런싱 용 스위치가 하나의 고주파 변압기를 통하여 자속을 공유하는 형태를 취하는 구조이다. 제안

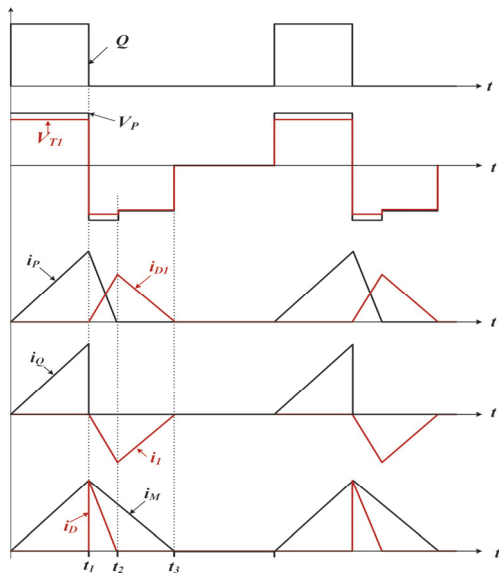


Fig. 10 Operation waveform when balancing is in progress

된 토폴로지에서 전압 밸런싱을 위한 충전전류의 크기는 Q 스위치의 시비율(d)에 의해 결정된다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 자속 공유형 플라이백 컨버터 배터리 밸런싱 토폴로지의 타당성을 검증하기 위한 시뮬레이션 회로는 Fig. 11과 같다.

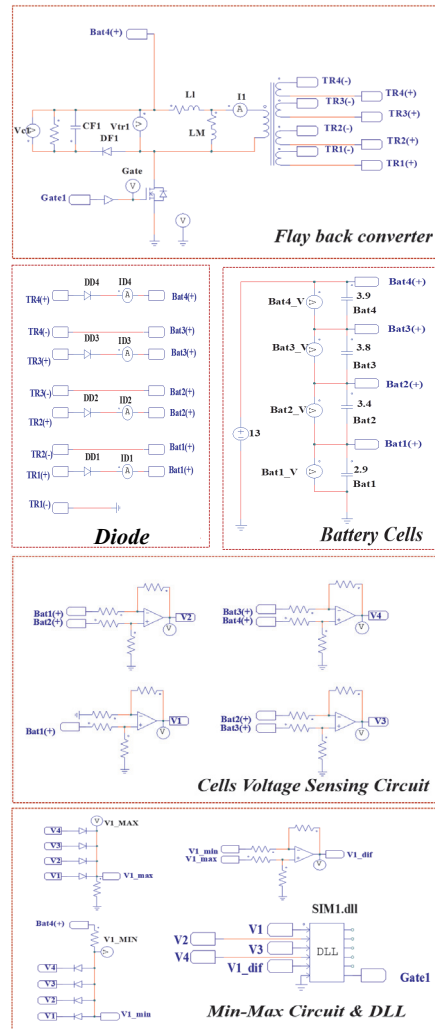


Fig. 11 Simulation schematic

시뮬레이션 회로는 Fig. 11과 같이 4개의 배터리를 대상으로 하여 1 개의 스위치를 이용한 플라이백 컨버터 회로를 구성하였다. 시뮬레이션에서는 실제 배터리 모델을 사용 할 경우 전압 밸런싱 회로의 시정수가 너무 길어지는 어려움이 있어, 배터리를 20000 [uF] 용량을 가지는 커패시터로 대체하여 시뮬레이션을 수행하였다. 1개의 플

라이백 컨버터는 한 개의 변압기를 사용하여 구성하였으며, 스위칭 주파수는 시비율 0.35, 20 [kHz]로 정의하였다.

Fig. 12는 초기 전압 상태에서의 전압 밸런싱 특성을 관찰하기 위한 시뮬레이션 결과이다. 배터리 등가 커패시터 C_1, C_2, C_3, C_4 의 초기 전압은 4.8 [V], 3.2 [V], 1.6 [V], 1.0 [V]로 설정하였다. 초기에는 커패시터의 전압 중 전압이 가장 낮은 C_4 를 충전하는 컨버터를 동작함으로 C_4 측으로 충전전류가 형성되어 C_1, C_2, C_3 전압은 감소하고 C_4 전압은 증가하게 된다. C_4 전압이 증가하여 C_3 전압과 동일한 순간 C_4, C_3 측으로 충전전류가 형성되어 C_1, C_2 전압은 감소하고 C_4, C_3 전압은 증가하게 된다, 또한 C_4, C_3 전압이 C_2 전압과 동일한 순간 C_4, C_3, C_2 측으로 충전전류가 형성되어 C_1 전압은 감소하고 C_4, C_3, C_2 전압은 증가하게 된다.

시뮬레이션 결과 최종적으로는 4개의 커패시터 전압이 동일한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 플라이백 컨버터의 입력전류는 밸런싱 여부에 관계없이 시비율에 의해 결정됨으로 밸런싱이 완료된 상태에서는 순환전류로 동작함으로 컨버터의 손실 저감을 위해서는 밸런싱 완료를 판단하여 동작을 중지하는 동작이 필요하다. 저가형 마이크로프로세서를 사용하여 배터리 전압을 검출하고 각 전압의 차를 검출하여 밸런싱 완료 시점을 구현하는 경우 그 정밀도가 부정확하는 경우가 종종 발생한다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 11과 같이 최대치 및 최소치 전압 회로를 이용하고 그 값을 차동 OP-Amp.를 사용하여 정확한 동작을 구현하였다. 본 시뮬레이션 조건에서 밸런싱 동작 개시부터 100 [ms] 후에 4개의 커패시터 전압은 동일한 값을 가지며, 매우 빠른 속도로 밸런싱이 종료되는데, 이는 시뮬레이션 편의상 시정수가 큰 배터리 대신 시정수가 작은 커패시터를 사용하였기 때문이다.

제안된 플라이백 컨버터 배터리 셀 전압 밸런

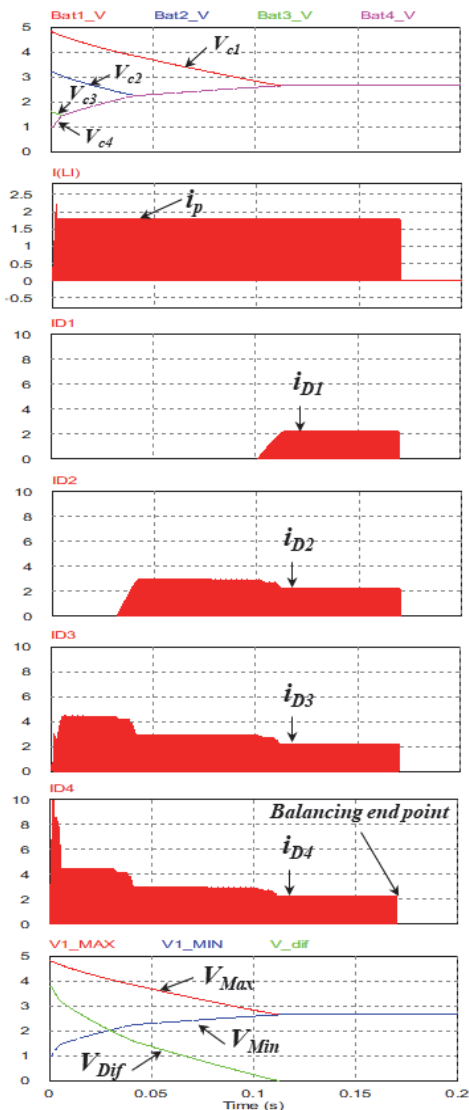


Fig. 12 Simulated results of voltage balancing

싱 시스템이 성공적으로 동작하고, 그 성능이 우수함을 시뮬레이션으로 검증하였다. 하드웨어 환경 하에서도 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위해 Fig. 13과 같은 실험용 시스템을 구축하였다. Table 1은 실험용 시스템의 전기적 사양이다. 이 시스템은 배터리를 대체한 4개의 커패시터로 구성하였으며, 저가형 AVR48을 통해 배터리 셀 전압을 계측하여 각 셀의 충전 여부를 선택스위치에 의해 결정하고, 설정된 시비율에 의해 PWM 신호를 생성하여 밸런싱을 수행하는 구조이다. 제작된 보드는 크게 밸런싱용 Flyback 컨버터, 전압 센싱 회로, 통신회로, ATmega48 마이크프로세서 회로, 제어 전압용 SMPS, 배터리 대응 대용량 콘덴서, 밸런싱 시작 스타트신호 및 자기유지회로로 구성된다. 우선

Start 신호 단자에 100 [ms] 이상의 펄스 신호에 의해 LM2576 소자가 장착된 SMPS가 동작하며 마이크프로세서는 디지털 출력을 LM2576의 인에이블 핀에 Low 신호를 출력하여 SMPS의 동작을 자기유지하며, 밸런싱이 완료되면 인에이블 핀에 High 신호를 출력하여 Shot-down 하게 된다.

Fig. 14는 플라이백 컨버터의 동작을 확인하기 위해 시비율이 0.35인 경우의 게이트 신호, 플라이백 컨버터용 변압기의 입력 전류와 출력전류를 나타내고 있다. 2차 전류의 평균값은 약 1 [A]가 됨을 알 수 있으며, 기존의 대부분 밸런싱용 전류가 수백[mA]에 비하여 큰 전류가 됨을 알 수 있다. 이는 밸런싱 시간 감소와 직결되어 빠른 밸런싱이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 15는 동일 모듈 시 전압 밸런싱 특성을

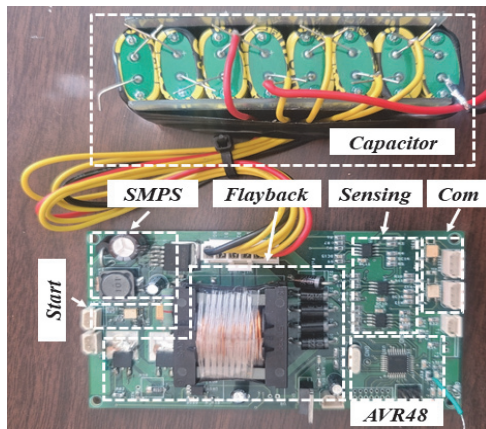


Fig. 13 Installation system

Table 1. Active balancing system design specifications

Parameters	Value
C1	4.8V / 20000uF
C2	3.2V / 20000uF
C3	1.6V / 20000uF
C4	1.0V / 20000uF
MCU	ATMega48
SMPS	LM2576 / 5V
Switching Frequency	20kHz

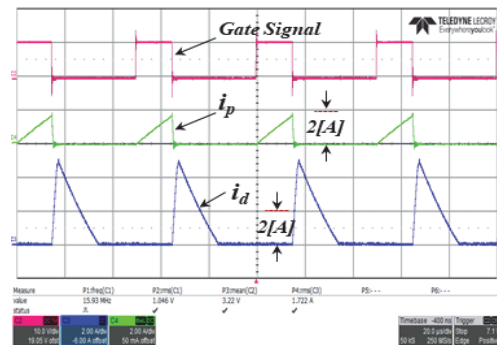


Fig. 14 Measured results of flyback converter

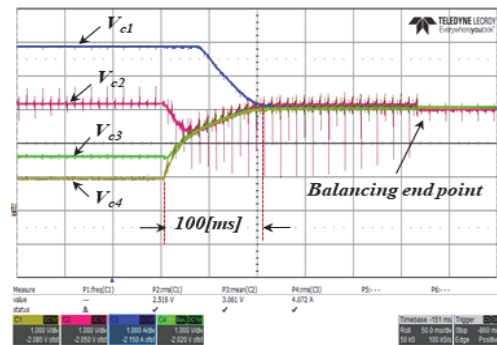


Fig. 15 Waveforms of voltage balancing

관찰하기 위한 실험 결과이며 4개의 커패시터 전압을 나타내고 있다. 커패시터 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 의 초기 전압은 시뮬레이션 조건과 같이 4.8 [V], 3.2 [V], 1.6 [V], 1.0 [V]로 설정하였다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 실험 결과 시뮬레이션과 유사한 특성 파형으로 100 [ms] 이후에 배터리 밸런싱이 만족스럽게 이루어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 배터리 밸런싱의 특성을 분석하기 위해 1개의 콘덴서 전압을 영으로 둔 상태에 동작 파형을 나타내고 있다. Fig. 16(a)에서 보는바와 같이 밸런싱용 플라이백 컨버터는 시비율 0.35로 동작하며 플라이백 컨버터의 전류는 콘덴서 전압의 증가와 독립적으로 일정한 전류값을 형성하고 있다. 콘덴서에 연결된 충전용 다이오드 전류

는 초기에는 피크치 약 5 [A]로 충전하여 콘덴서 전압을 증가시키고, 다른 콘덴서 전압과 유사한 전압이 되면 플라이백 컨버터는 다수의 콘덴서 전압을 충전시킴으로 전압 증가 기울기는 감소하게 된다. 이러한 과정을 통하여 밸런싱이 이루어지면 콘덴서 전압의 증가 기울기는 영이 되어 일정한 값을 갖게 됨을 알 수 있다. Fig. 16(b)는 초기 기동상태를 관찰하기 위해 Fig. 16(a)를 확대한 파형으로 초기기동에서도 안정적인 동작을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 직렬로 연결된 배터리 셀 전압 불평형을 제거하기 위해 새로운 직렬로 연결된 셀 전압을 입력으로 하여 최소전압 선택형 다중 출력 형태의 플라이백 컨버터를 이용한 밸런싱 토폴로지를 제안하였다. 제안된 방식의 타당성은 5 [V] 파워뱅크 시스템을 대상으로 하여 시뮬레이션 및 실험 결과를 통하여 타당성을 검증하였다. 제안된 토폴로지를 실험한 결과 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

배터리 모듈을 구성하는 직렬의 배터리 셀은 각 셀에 장착된 스텝 스위치 검 정류부를 통하여 1개의 변압기의 코일에 연결되고, 모든 코일이 자속을 공유하는 배터리 밸런싱 시스템을 구성하여 각 셀의 개별 전압검출 없이 능동적으로 모듈 내 각 셀 간의 전압 밸런싱을 수행할 수 있었다.

여러 개의 모듈이 직렬로 연결된 배터리 팩의 경우에도 배터리 모듈의 전압 밸런싱과 동일한 방법으로, 각 모듈에 장착된 DC/DC 컨버터를 통하여 배터리 팩 전압 밸런싱용 변압기에 연결하여 모듈 간 전압 밸런싱을 수행할 수 있다.

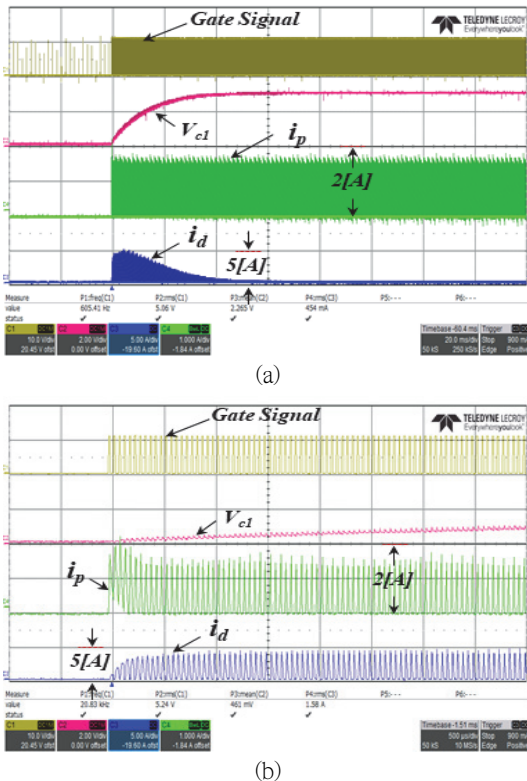


Fig. 16 Measured results of the converter after voltage balancing

·제한된 구조는 계층(hierarchical) 구조로 배터리 밸런싱을 수행하므로, 계층 구조의 층수를 필요에 따라 높은 전압/전류 용량을 가진 배터리 팩을 모듈식으로 설계할 수 있다. 이 장점은 전력시스템용 BESS처럼 대용량을 필요로 하는 시스템에서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-002).

참고문헌

- [1] Y. S. Lee and G. T. Cheng, "Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1213–1224, (2006).
- [2] J.W. Kimball, B. T. Kuhn, and P. T. Krein, "Increased performance of battery packs by active equalization," in *Proc. IEEE Veh. Power Propulsion Conf.*, pp. 323–327, (2007).
- [3] M. Daowd, N. Omar, P. V. D. Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on matlab simulation," in *Proc. IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–7 (2011).
- [4] D. Bjork, "Maintenance of batteries - new trends in batteries and automatic battery charging," in *Proc. INTELEC Conf.*, pp. 355-360 (1986).
- [5] Linear technology, "Active cell balancer extends run time and lifetime of large series-connected battery stacks," *LT J. Analog Inno.*, vol. 23, no. 1, (2013).
- [6] J.W. Kimball, B. T. Kuhn, and P. T. Krein, "Increased performance of battery packs by active equalization," in *Proc. IEEE Veh. Power Propulsion Conf.*, pp. 323–327, (2007).
- [7] C. S. Moo, Y. C. Hsieh, I. S. Tsai, and J. C. Cheng, "Dynamic charge equalization for series-connected batteries," *IEEE Proc. Electric Power App.*, vol. 150, no. 5, pp. 501-505 (2003).
- [8] A. Thomas. Stuart, and Wei Zhu, "Fast equalization for large lithium ion batteries," *IEEE Aerospace and Electron. Syst. Magazine*, vol. 24, pp. 27-31 (2009).
- [9] C. Pascual and P. T. Krein, "Switched capacitor system for automatic series battery equalization," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 848–854, (1997).
- [10] S. West, and P.T. Krein, "Switched-capacitor systems for battery equalization," *IEEE Modern Techniq. and Tech.(MIT 2000)*, pp. 57–59, (2000).
- [11] J. H. Lee, C. H. Park, G. E. Yang, G. K. Shin, C. M. Bae, "Development and performance of BMS Modules for Urban Electric Car using life prediction method", *KSAE*, vol. 21, no. 6, pp. 147-154 (2013).
- [12] Sun-soon Park, Jea-seung Koo, Kil-young Youn, Chul-soo Kim, "Development of battery management system(BMS) for hybrid electric vehicle(HEV)", *KSAE, Spring conference proceeding*, pp. 1249~1254 (2002).