

양방향 리니어 레귤레이터를 사용하는 폐배터리 병렬 분산형 충방전기 시스템

김경탁, 박중후
 숭실대학교

Distributed Parallel-cell Charging-discharging System for Retired Battery Using Bi-directional Linear Regulator.

Kyoung-tak Kim, Joung-hu Park
 Soongsil University

ABSTRACT

지난 수년 간 다량으로 배출되고 있는 폐 배터리를 에너지 저장장치(ESS)로서 재활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 ESS 시스템에는 사용하는 배터리마다의 규격이나 이전 사용 시 수명, 배출 시 상태의 차이가 존재하기 때문에 각 배터리 간 셀밸런싱 시스템이 필수로 요구된다. 현재까지 직렬형, 병렬형 등이 연구되고 있지만 모듈화나 신뢰성 등을 만족 시키기 위해서는 병렬형이 유리하다. 본 논문에서는 양방향 리니어 레귤레이터를 사용하며 셀 밸런싱 회로가 없는 병렬형 충방전 시스템을 제안하고자 한다.

1. 서론

자율주행 자동차 및 전기 자동차의 활발한 연구와 양산에 따른 결과로, 매 해 전기자동차에서 사용하고 수명을 다하여 폐기되는 폐 배터리가 다량 배출 될 것으로 예상하고 있다. 이렇게 배출되는 폐 배터리를 ESS로 재활용하려는 연구가 학계에서 진행되고 있고 현재는 그림 1과 같은 직렬형 방식이나 그림 2와 같이 병렬 분산형으로 연구가 진행되고 있다.^{[1][2]}

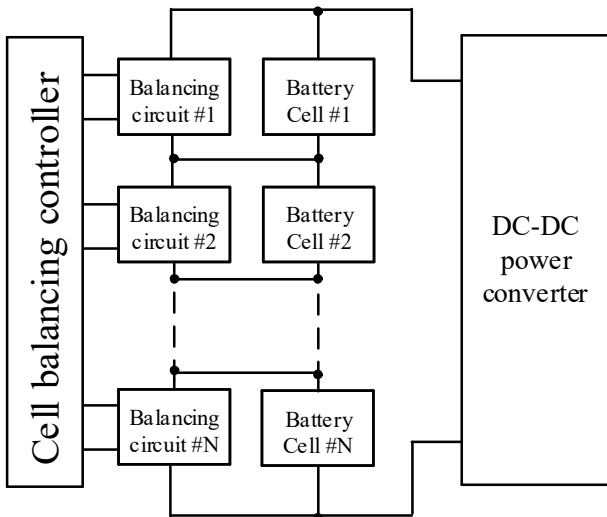


그림 1 기존의 배터리 에너지 저장 시스템 전력계 구조 개요

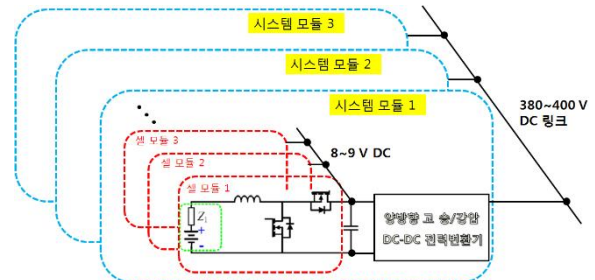


그림 2 제안하는 분산형 병렬모듈 충방전기 아키텍처

직렬형 방식은 배터리 간의 편차를 대비하여 셀밸런싱 회로가 필수 요소로 포함되어야 하고 단일 셀이나 단일 모듈에 이상이 발생하면 시스템 전체의 정상 동작을 보장할 수 없는 신뢰성의 문제, 그리고 시설 증설이나 규모의 변경 등에 따른 확장성이 용이하지 않은 문제가 단점으로 꼽힌다. 반면 그림 2^[3]와 같은 병렬형은 직렬형과 비교할 때 셀 밸런싱 회로가 필요 없고 신뢰성과 확장성을 모두 확보할 수 있는 장점이 있지만 각 셀 모듈마다 DC-DC 컨버터가 연결되어야 하기 때문에 경제성 측면이 약점으로 꼽힌다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위하여 그림 2와 같은 병렬-분산형 충방전기 시스템에서 DC-DC 컨버터를 대체하여 사용할 수 있는 양방향 리니어 레귤레이터를 제안하고 그를 이용한 충방전기 시스템에 대해 소개한다.

2. 본론

2.1 리니어 레귤레이터

리니어 레귤레이터의 기본 원리는 그림 3과 같다.

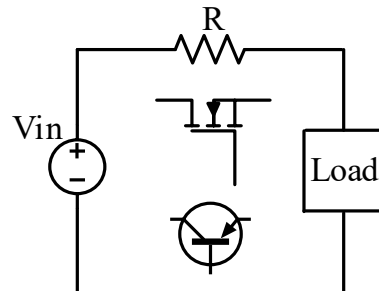


그림 3 기존의 리니어 레귤레이터의 간략한 구조

입력 DC 전압보다 낮은 DC 전압을 얻고자 한다. 즉 전압강하가 발생하는 부분이 필수요소 인데 이를 저항으로

사용하면 간단하다. 출력 DC 전압을 일정하게 유지하는 것이 목적이므로 전압강하가 발생할 저항을 가변저항으로 바꿔 이를 해결하게 되는데 보통 트랜지스터나 MOSFET을 이용하여 내부 ON 저항이나 전류를 컨트롤 함으로서 출력 전압을 일정하게 유지하게 만들 수 있다. 현재 상업적으로 널리 사용되고 있는 리니어 레귤레이터의 기본 원리 및 구성 요소라고 할 수 있다. 하지만 전압강하로 인하여 저항에서 발생하는 손실은 그대로 열로 변환되어 재활용할 수 없고 그 열을 감당하기 위해 히트싱크를 사용하거나 팬을 사용해야 한다. 따라서 최대 5W의 전력 내에서 사용하거나 대부분 1W 내의 전력에서 히트싱크 없이 사용하게 되고 그 이상의 전력에서는 DC-DC 컨버터를 사용하게 되는 것이 일반적인 흐름이다. 또 현재 산업계에서 주로 사용 되고 있는 리니어 레귤레이터는 단방향으로서, 양방향 레귤레이터가 필요한 그림 2의 DC-DC 컨버터를 대체할 수 있는 어플리케이션에서는 사용할 수 없는 등 한계 점이 명확하다.

2.2 제안하는 양방향 리니어 레귤레이터

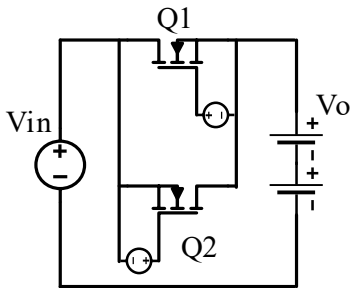


그림 4 제안하는 양방향 리니어 레귤레이터

그림 4는 제안하는 리니어 레귤레이터의 간략한 구조를 나타낸다. 입력 전압이 출력전압보다 큰 상태에서는 병렬로 연결된 MOSFET 중 위쪽 Q1이 Active 영역에서 동작하고 아래쪽 Q2는 Cut-off 영역에서 동작한다. 반대로 출력전압이 입력전압보다 큰 상태에서는 Q1은 Cut-off 영역에서 동작하고 Q2는 Active 영역에서 동작한다. 전반적인 구조는 기존의 리니어 레귤레이터와 크게 다른 점이 없다.

$$V_{in} - V_o \leq V_{fQ_2} \quad (1)$$

중요한 점은 Cut-off 영역에서 동작하는 MOSFET의 바디 다이오드의 턴온 조건을 만족시키지 않는 조건 하에서 식 (1) 같이 입력전압과 출력전압이 결정되어야 한다. 서로 반대 방향으로 연결되어 있는 구조기 때문에 Active 영역에서 Q1이 동작할 때 Cut-off 영역에 있는 Q2의 바디 다이오드가 턴온 된다면 다이오드의 포워드 전압과 전류가 손실을 발생 시킨다. 이는 리니어 레귤레이터의 입력전압과 출력 전압 사이의 전압강하가 크면 클수록 손실이 커진다는 단점보다 더 엄격한 조건이다.

2.2 제안하는 양방향 병렬형 충전전기

그림 5는 제안하는 리니어 레귤레이터를 사용한 양방향 분산형 병렬모듈 충전전기를 나타낸다. 양방향 고 승/강압 DC-DC 전력 변환기로서 양방향 LLC 공진형 컨버터를 사용하였다. LLC 공진형 컨버터의 출력에 따라 리니어 레귤레이터와 배터리 모듈들이 병렬로 연결되는 구조를 가지고 있다. 궁극적인 병렬형 충전전기로 가려면 400V DC 링크에서 배터리 셀의 기본 단위인 4V까지 강압이 가능한 형태로 가야 한다. 하지만 극단적인 승/강압에 따른 전력변환기의 효율을 고려해야

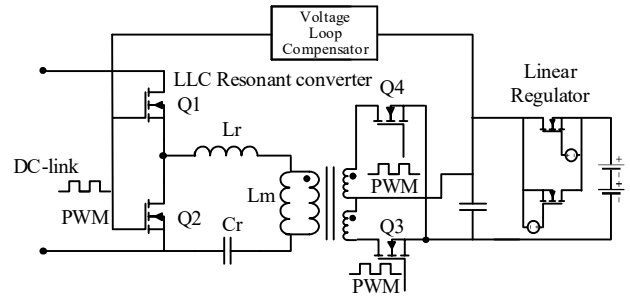


그림 5 제안하는 양방향 병렬형 충전전기

하고 셀 하나당 리니어 레귤레이터가 연결되어야 한다는 점을 고려 한다면 설계자가 하나의 리니어 레귤레이터가 감당할 배터리 셀의 개수에 대해 트레이드 오프를 생각해 볼 수 있다. 본 논문에서는 배터리 셀 2개가 직렬 연결된 8V의 전압을 리니어 레귤레이터의 출력전압(충전 시)으로 설정하였다. 제안하는 구조에서 리니어 충전 시 리니어 레귤레이터의 출력은 배터리가 되고 충전전에 따라 전압이 변동되므로 리니어 레귤레이터의 입력은 양방향 LLC 공진형 컨버터의 출력의 전압 루프를 통해 고정되어야 한다. 배터리 만충 시 전압이 8V라고 할 때, 리니어 레귤레이터의 입력전압과 출력전압의 차이는 최대한 적은 것이 좋은 효율을 가지기 때문에 LLC 공진형 컨버터의 출력전압은 리플을 가능하는 한 최소화 하여야 유리할 것이다. 따라서 LLC 컨버터의 출력 전압의 리플을 최소화 하기 위하여 출력 필터단을 최적으로 디자인 하고 높은 성능의 제어를 요구할 것으로 기대한다.

2.3 제안하는 양방향 리니어 레귤레이터를 사용하는 폐배터리 병렬 분산형 충전전기 시스템의 시뮬레이션

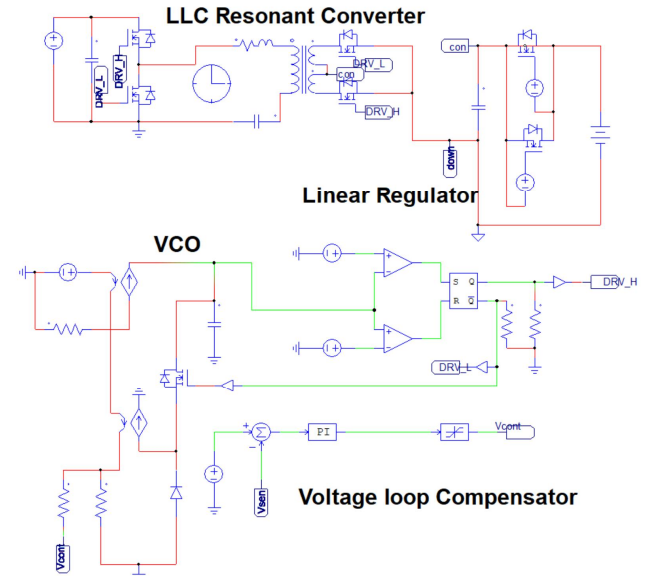


그림 6 제안하는 충전전기 시스템의 시뮬레이션 개요도

표 1 시뮬레이션 제원

| 입력 전압 | 400V | 배터리 충전 전류 | 6A |
|----------|-------|-----------|------|
| 출력 전압(충) | 8.25V | 배터리 충전 전압 | 8V |
| 출력 전압(방) | 7.75V | 출력 전력 | 400W |

표 2 리니어 레귤레이터에 사용한 MOSFET 제원

| | | | |
|------------------|---------------|----------|------|
| On 저항 | 4.7m Ω | Vgs(th) | 1.7V |
| Transconductance | 8.25V | Diode Vf | 0.8V |

표 1은 제안하는 시스템에서 사용한 양방향 LLC 공진형 컨버터의 제원을 나타낸다. 표 2는 제안하는 시스템에서 사용한 리니어 레귤레이터의 MOSFET 제원을 나타낸다. 그림 6는 제안하는 충방전기 시스템의 시뮬레이션 개요도를 나타낸다.

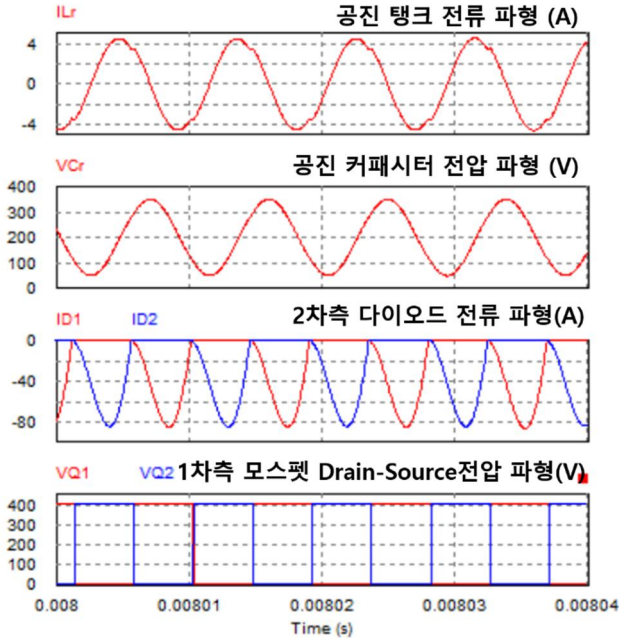


그림 7 제안하는 충방전기 시스템의 LLC 공진형 컨버터 부분 주요 파형

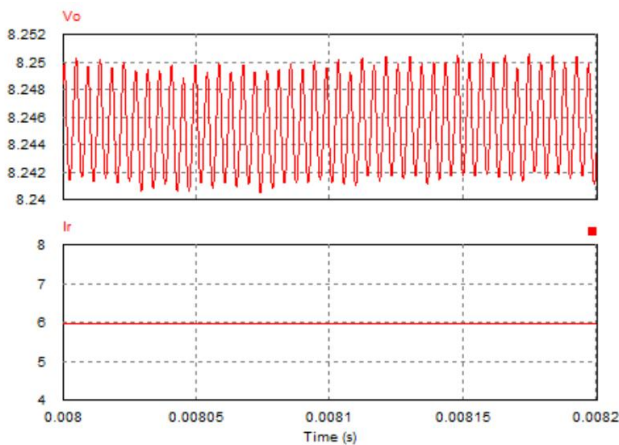


그림 8 제안하는 시스템의 충전 시 리니어 레귤레이터 주요 파형; 위 : 리니어 레귤레이터 입력 전압 파형, 아래 : 리니어 레귤레이터 전류 파형

그림 7은 제안하는 충방전기 시스템의 LLC 공진형 컨버터의 주요 파형이다. 입력 400V/출력 8.2V 이며 배터리 셀이 두개 직렬로 연결되어 있다고 가정하여 8V의 배터리를 가정하였으며 원통형 셀을 기준으로 하여 6A가 충 방전 시 흐른다고 가정하였다. 이에 따라 48W의 리니어 레귤레이터 모듈 8개가

LLC 공진형 컨버터의 부하로서 작동하도록 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 8은 리니어 레귤레이터의 입력 전압의 파형과 충전 전류의 파형을 보여 준다. 리플이 0.01V 로 시뮬레이션 되었고 8.246V의 평균값을 보여주고 있어 리니어 레귤레이터에 사용되는 MOSFET의 Vds의 값이 0.246V 이고 6A의 전류가 충전되고 있기 때문에 손실은 시뮬레이션 상으로 97% 이상의 효율을 보여주고 있다. DC-DC 컨버터를 사용하는 것과 대비해서 큰 효율 차이를 보이지 않으면서 저 비용으로 시스템을 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결론

기존의 직렬형의 폐배터리를 충방전 시스템은 셀밸런싱 회로가 필요한 단점이 있고 병렬형 시스템은 각 배터리 셀 간 DC-DC 컨버터가 필요하여 경제적으로 고비용을 필요로 하는 단점이 있다. 제안하는 양방향 리니어 레귤레이터를 사용하는 병렬형 충방전 시스템은 셀밸런싱 회로가 필요없는 병렬형의 장점을 가짐과 동시에 저 비용으로 시스템을 구성할 수 있어서 시스템을 구성하는데 도움을 줄 수 있다. 이 시스템에서 제안하는 양방향 리니어 레귤레이터와 LLC 공진형 컨버터를 이용한 회로를 시뮬레이션 하여 그 동작을 테스트 하였다.

참고 문헌

- [1] 이현준, 박중후, 김종훈 “리튬이온 폐배터리의 효율적인 재활용을 위한 발전된 SOC 추정방법의 필요성 연구”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, 2014. 11, 56-5
- [2] Wen-Chen Lih, Jieh-Hwang Yen, Fa-Hwa Shieh, Yu-Min Liao, “Second Use of Retired Lithium-ion Battery Packs from Electric Vehicles: Technological Challenges, Cost Analysis and Optimal Business Model”, 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, 2012. 06, 381-384.
- [3] 김경탁, 박중후, “폐배터리를 위한 병렬형 분산형 충방전기의 LLC 공진형 컨버터”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집, 2017. 07, 108-9