

불연속모드 부스트-포워드 컨버터를 이용한 셀 밸런싱

김경탁, 박중후
 숭실대학교

Cell Balancing using Discontinuous Conduction Mode Boost-Forward Converter

Kyoung-Tak Kim, Joung-Hu Park
 Soongsil University

ABSTRACT

본 논문에서는 새로이 제안되는 불연속모드 양방향 부스트-포워드 컨버터를 사용하는 셀 밸런싱 방법을 제안한다. 이 컨버터는 다중입력과 다중출력의 양방향 배터리 충방전을 다루고, 다중직렬 배터리의 전압 셀 밸런싱에 초점을 두었다. 여러 입력 배터리의 전압 차가 나지 않을 때는 부스트 컨버터가 작동하고, 레퍼런스가 되는 입력 배터리와 다른 입력 배터리의 전압이 불균형이 생길 때 포워드 컨버터가 작동하여 밸런싱을 맞추는 새로운 불연속모드 부스트-포워드 컨버터 토폴로지를 제안한다. 전압 불균형에 따른 밸런싱 조건에 대한 식을 증명하였고, 실제로 80W급 하드웨어를 제작하여 제안된 회로를 검증하였다.

1. 서론

최근의 EV와 같은 입출력으로 배터리를 사용하는 시스템은 배터리간 직/병렬로 연결된 경우를 볼 수 있다. 이런 상황에서 배터리의 노화에 따른 커패시턴스의 편차나 초기전압의 불균형과 같은 배터리간 밸런싱이 깨진 후의 작동을 예상할 수 있다. 이러한 배터리간 불균형을 제어하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있는데, 본 논문에서는 추가적인 제어회로가 필요 없는 불연속모드 부스트-포워드 컨버터를 이용한 배터리간 셀 밸런싱 토폴로지를 제안한다.

2. 본론

2.1 DCM 모드 부스트-포워드의 동작특성

제안된 회로는 그림 2와 같은 회로로서 변압기를 기준으로 자화 인덕턴스를 공유하는 부스트 컨버터와 두 개의 포워드 컨버터로 구성되어 있다. 회로의 동작 모드는 L_{x1} 의 전류를 기준으로 하여 세가지로 구분될 수 있다.

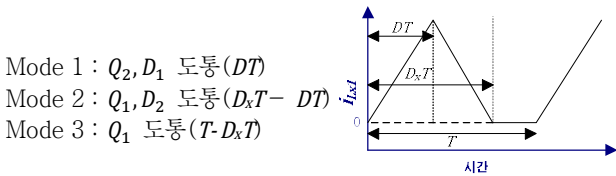


그림 1. i_{Lx1} 의 DCM 모드 주기

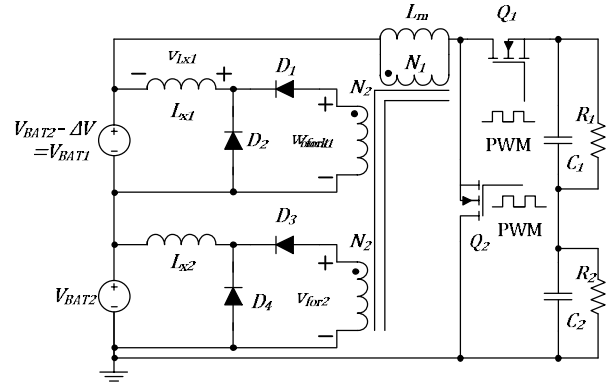


그림 2. 제안된 DCM 모드 부스트 포워드 컨버터 구조

2.2 DCM 모드 부스트-포워드 컨버터의 회로해석

포워드 컨버터의 2차측 전압을 v_{for1} , 권수비를 N 이라 한다. L_{x1} 에 걸리는 전압을 이용해 Mode 1에서의 인덕터 최대 전류 Δi_{Lx1} 를 구하면

$$v_{for1} = \frac{2V_{BAT2} - \Delta V}{N} \quad (1)$$

$$\frac{V_{BAT2} - \Delta V + V_{BAT2}}{v_{for1}} = \frac{N_1}{N_2} = N \quad (2)$$

$$v_{Lx1} = \left(\frac{2-N}{N}\right)V_{BAT2} + \left(\frac{N-1}{N}\right)\Delta V \quad (3)$$

$$\Delta i_{Lx1} = \frac{DT}{L_{x1}} \left\{ \left(\frac{2-N}{N}\right)V_{BAT2} + \left(\frac{N-1}{N}\right)\Delta V \right\} \quad (4)$$

와 같다. 같은 방법으로 Mode 2에서의 전류를 구하면

$$v_{Lx1} = -(V_{BAT2} - \Delta V) \quad (5)$$

$$\Delta i_{Lx1} = \frac{(DT - D_x T)(V_{BAT2} - \Delta V)}{L_{x1}} \quad (6)$$

와 같다. L_{x1} 의 최대 전류를 이용하여 i_{Lx1} 의 평균을 구하면

$$I_{Lx1} = \frac{DD_x}{2L_{x1}f} \left\{ \left(\frac{2-N}{N}\right)V_{BAT2} + \left(\frac{N-1}{N}\right)\Delta V \right\} \quad (7)$$

와 같다. 한 주기 동안 인덕터 전류의 변화량이 0임을 이용하면

$$\frac{DT}{L_{x1}} \left\{ \left(\frac{2-N}{N}\right)V_{BAT2} + \left(\frac{N-1}{N}\right)\Delta V \right\} + \frac{(DT - D_x T)(V_{BAT2} - \Delta V)}{L_{x1}} = 0 \quad (8)$$

와 같다. 식 (8)을 이용하여 D_x 에 대해 나타내면

$$D_x = \frac{D(2V_{BAT2} - \Delta V)}{N(V_{BAT2} - \Delta V)} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 시비율 D 는 부스트 포워드 컨버터의 입출력 관계식과 같으므로, 식 (9)를 입출력에 대한 식으로 바꾸면

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_s \quad (10)$$

$$D_x = \frac{(V_o + \Delta V - 2V_{BAT2})(2V_{BAT2} - \Delta V)}{NV_o(V_{BAT2} - \Delta V)} \quad (11)$$

와 같다.

2.3 DCM 모드 부스트-포워드 컨버터의 셀 밸런싱 원리와 밸런싱 가능 조건

본 논문의 회로는 밸런싱 상황에서는 부스트 컨버터로만 작동하고, 입력 배터리 간의 전압 밸런싱이 깨진 후 (배터리의 노화에 따른 커패시턴스의 불균형 혹은 초기 전압의 불균형 등)에는 포워드 컨버터가 작동하여 밸런싱을 회복하는 구조를 가지고 있다. V_{BAT2} 를 기준이 되는 배터리라 하고 $V_{BAT2} - \Delta V$ 를 기준보다 ΔV 만큼 편차가 생긴 상태의 배터리라고 하자. 식(1)을 살펴보면 v_{for1} 에 걸리는 전압을 정의할 때 N 으로 나눠 주는 것을 알 수 있다. 권수비 N 을 포워드 2차측의 개수와 동일하게 맞추어 준다면 v_{for1} 과 v_{for2} 는 두 입력전압의 평균과 같음을 알 수 있다. 두 입력 전압과 v_{for1} , v_{for2} 를 비교해 보면 평균보다 낮은 부분인 v_{for1} 쪽의 포워드만 작동함을 알 수 있다.

포워드 컨버터의 2차측 인덕터 L_{x1} 의 밸런싱 동작 DCM 모드의 경계조건을 이용하여, 제안된 회로의 불균형 정도인 ΔV 의 최대값을 구할 수 있다. 그림 1에 의하면 DCM 조건은

$$D_x - D \leq 1 - D \quad (12)$$

이므로 식(9)를 이용하여 정리하면

$$\frac{(2D-N)V_{BAT2}}{D-N} \leq \Delta V \quad (13)$$

과 같다. 이를 식(10)을 이용하여 입출력에 대한 식으로 바꾸면

$$\Delta V \leq -\frac{4V_{BAT2} + (N-1)V_o - \sqrt{\{V_o(1-N) - 4V_{BAT2}\}^2 - 4V_{BAT2}\{(N-2)V_o + 4V_{BAT2}\}}}{2} \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다.

2.4 DCM 모드 부스트-포워드 컨버터의 효율

η_1 을 포워드 컨버터의 효율, η_2 를 부스트 컨버터의 효율, η 를 전체 회로의 효율이라고 하면,

$$\eta = \frac{\eta_2(P_{BAT1} + P_{BAT2} + P_{for1} \frac{P_{for1}}{\eta_1})}{P_{BAT1} + P_{BAT2}} \quad (15)$$

로서 전체 회로의 효율을 예상해 볼 수 있다. 식 (15)에서 포워드 손실은 다음과 같다.

$$P_{for1} - \frac{P_{for1}}{\eta_1} = v_F I_{Lx1} + R_{Lx1} I_{Lx1}^2 \quad (16)$$

v_F 를 다이오드의 포워드 전압, I_{Lx1} 을 인덕터의 평균전류라고 한다면 포워드 컨버터의 손실은 다이오드의 포워드 전압에 의한 손실과 인덕터의 저항에 의한 손실로 나타낼 수 있다.

2.5 DCM 모드 부스트-포워드 컨버터의 실험결과

변압기 권선은 동축권선 케이블^[1]을 이용하여 제작하였고 효율측정은 2802 TWO CHANNEL POWER ANALYZER (Xitron Technologies)를 사용하여 측정 하였다. 다음의 그림 3은 실제 DCM 모드 부스트-포워드의 동작 파형과 효율 추이이다.

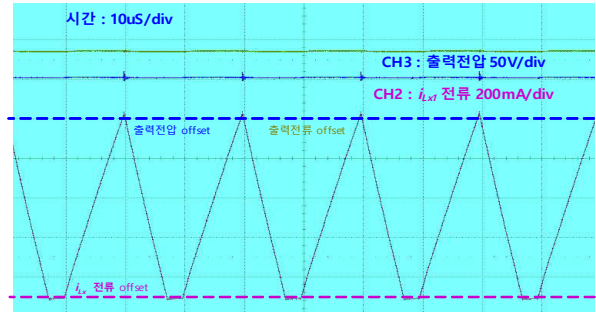


그림 3 하드웨어의 출력과 i_{Lx1} 파형

DCM 주기 동안 포워드의 i_{Lx1} 이 편차를 보이고 있는 입력 배터리 쪽으로 흐르고 있는 것을 볼 수 있다.

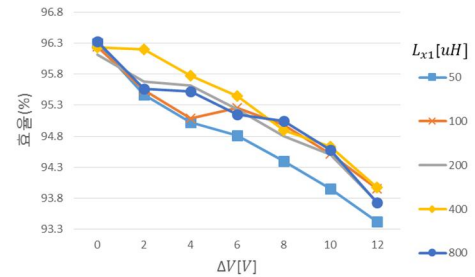


그림 4 L_{x1} 의 크기와 언밸런싱 정도에 따른 효율 추이

그림 4는 식 (15)로부터 예상해 볼 수 있는 효율을 실험을 통해 검증하였다. 편차가 커져 포워드 컨버터의 전류가 커짐에 따라 손실이 늘어나서 효율이 감소함을 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 추가적인 제어회로 없이 부스트 포워드 컨버터의 파워스테이지만으로 편차가 있는 배터리 간의 밸런싱을 유도하는 컨버터를 제안하고 편차 별 효율을 예상하였다. 또한 80W 급 실제 하드웨어를 제작하여 실제 컨버터 성능을 검증하였다.

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A1003964)

참고 문헌

- [1] 김석희, 김도현, 박종후, "동축권선을 적용한 다출력 플라임백의 출력전압 변동특성 연구", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, 458-459, 2012.7
- [2] 김현우, 전영태, 박종후, "결합 인덕터를 이용한 부스트포워드 차동전력조절기 설계", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, 192-194, 2015.4