

능동 클램프를 이용한 포워드 컨버터 기반 능동형 셀 밸런싱 회로

부이특민, 전선우, 배성우[†]
영남대학교

Active Cell Equalizer by a Forward Converter with Active Clamp

Thuc minh Bui, Seonwoo Jeon, Sungwoo Bae[†]

Dept. of Electrical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Gyeongbuk, Korea

ABSTRACT

본 논문은 FAC (Forward converter Active Clamp) 회로를 통해 변압기 자화인덕턴스에 저장된 에너지를 셀 밸런싱에 재사용하는 Active Clamp Forward converter 기반 셀 밸런싱 회로를 제안한다. 제안 회로는 클램프 커패시터의 충전 균형으로 스위치를 전압 스파이크로부터 보호하고 전력손실을 초래할 수 있는 변압기의 자기포화를 방지할 수 있다. 제안한 셀 밸런싱 회로는 RCD 포워드 셀 밸런싱 컨버터 보다 더 높은 전력 전달 효율과 낮은 전압 스트레스를 갖는다. 제안한 액티브 셀 밸런싱 회로는 동시에 모든 셀이 균등화 되도록 작동하므로, 셀 밸런싱 시간이 짧다. 본 논문에서는 제안 회로의 배터리 상태에 따른 제어모드를 설명하고 회로의 타당성 검증에 위해 Powersim 社의 Psim 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

1. 서론

다중 배터리 팩을 이용한 고전압 배터리 시스템은 에너지 저장장치, 전기자동차와 같은 산업분야에서 2차 전지 시스템으로 사용되고 있다. FAC (Forward converter Active Clamp) 회로는 중-저 전력 애플리케이션에서 높은 효율을 달성할 수 있다.^[1] FAC 회로는 변압기 자화인덕턴스의 자기포화 방지와 스위치의 전압스트레스 억제를 위한 보조스위치와 클램프 커패시터로 구성된다.^[2] 다중권선 변압기를 이용한 n개의 셀이 직렬 연결된 셀 밸런싱 회로는 다양하다.^[3] 그러나 변압기 리셋회로를 내장하고 있지 않기 때문에 기존의 셀 밸런싱 회로는 변압기가 포화되는 현상을 방지하지 못했다. 스너버 커패시터는 공진 포워드 컨버터의 코어를 리셋 시키는 데 사용된다. 이에 RCD 클램프 방식이 제안되었고 스위치 소자의 전압 스트레스를 감소시킬 수 있다. 그러나 자화인덕턴스에 저장된 에너지가 저항에 의해 소모되므로 RCD 클램프 방식 회로의 셀 밸런싱 에너지 전달효율은 제한적이다.^[4]

본 논문은 다중 권선 변압기를 이용한 액티브 셀 밸런싱 회로를 제안한다. 제안 회로에서 보조 스위치는 액티브 클램프를 구동하는 데 사용된다. 제안 회로의 장점은 다중 권선 변압기가 포화상태에 이르는 것을 방지할 수 있고 스위치의 전압 스트레스를 저감시킬 수 있다. 제안 셀 밸런싱 회로의 타당성을 검증하기 위해 본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. 본론

2.1 제안하는 셀 밸런싱 회로

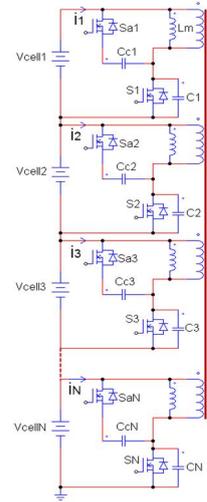


그림 1 제안하는 셀 밸런싱 회로

Fig. 1 Proposed cell balancing circuit

그림 1은 제안한 셀 밸런싱 회로를 보여준다. 제안하는 셀 밸런싱 회로는 각 셀에 연결된 전원스위치(S_k), FAC 리셋회로, 다중 권선 변압기(T_m)와 직렬 연결된 N 개 셀로 구성된다. 본 논문에서는 제안 회로 동작 분석의 용이성을 위해 배터리 팩이 4개의 직렬 연결된 배터리 셀로 구성되었음을 가정한다. FAC를 포함한 제안된 셀 밸런싱 회로에서 전류는 선택적으로 전원스위치(S_k)와 보조스위치(S_{ak})를 동작하므로 전압이 가장 높은 셀에서 전압이 가장 낮은 셀로 흐른다. 이 회로는 그림 2에 도시한 바와 같이 한 스위칭 주기(T_s) 동안 6가지 동작모드를 가진다.

2.2 제안하는 회로의 동작원리와 모드분석

제안하는 셀 밸런싱 회로의 동작원리는 그림 2에 도시된 바와 같이 한 스위칭 주기(T_s) 동안 다음과 같은 6가지 동작모드로 구성된다.

모드 1 [t_0, t_1]: t_0 에서, 4개의 보조스위치($S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}$)가 동시에 OFF되어있는 동안에 4개의 주 전원스위치(S_1, S_2, S_3, S_4)는 ON된다. 그러므로 4개의 주 전원스위치(S_k)의 전압은

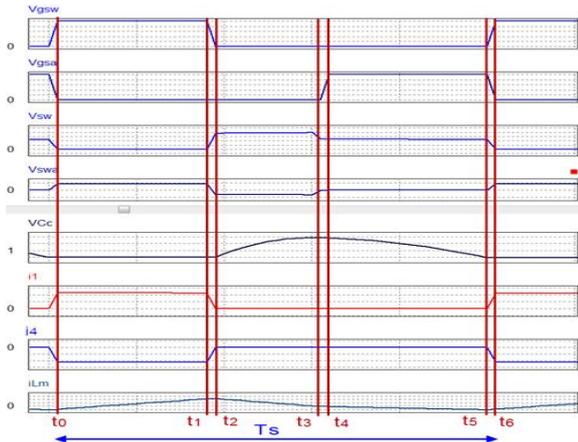


그림 2 제안하는 셀 밸런싱 회로의 동작 파형
Fig. 2 Operating waveforms of the proposed cell equalizer

0이 된다. 자화인덕턴스(L_m)의 전류는 V_{cellk}/L_m 의 기울기를 가지면서 선형적으로 증가한다. V_{cellk} 는 k 번째 셀의 전압이다

이 모드에서 가장 전압이 높은 셀(V_{cell4})에서 가장 전압이 낮은 셀(V_{cell1})로 에너지가 다중 권선변압기(T_m)를 통하여 전송된다. t_1 에서 전원스위치(S_k)는 OFF되기 시작한다. 따라서 전원스위치의 전압은 증가한다.

모드 2 [t_1, t_2]: 그림 2와 같이 t_1 에서 모든 전원스위치(S_k)는 OFF되기 시작하고, 모든 보조스위치(S_{ak})도 OFF되면서 전원스위치의 전압이 증가한다. 이 모드에서 자화인덕턴스(L_m)에 저장된 에너지는 다이오드를 통해 방출된다.

모드 3 [t_2, t_3]: 그림 2와 같이 t_2 에서 모든 전원스위치(S_k)는 OFF되고 자화인덕턴스(L_m)는 다이오드를 통해 리셋되면서 자화인덕턴스전류(I_{Lm})는 감소한다.

모드 4 [t_3, t_4]: t_3 에서 모든 보조스위치(S_{ak})는 ON되기 시작한다.

모드 5 [t_4, t_5]: t_4 에서 모든 보조스위치(S_{ak})는 ON되어 있다. 자화인덕턴스(L_m)는 보조스위치(S_{ak})를 통해 리셋을 유지한다. 자화인덕턴스의 에너지를 방출하는 과정은 FAC회로에 의해 이 모드에서 종료된다.

모드 6 [t_5, t_6]: t_5 에서 모든 전원스위치(S_k)는 ON되기 시작하고, 모든 보조스위치(S_{ak})는 OFF 된다. 그리고 자화인덕턴스전류(I_{Lm})는 감소한다. t_6 에서 모든 전원스위치(S_k)는 ON되고, 모든 보조스위치(S_{ak})는 OFF된다. 이 모드에서 6모드의 사이클이 종료된다.

2.3 시뮬레이션 결과

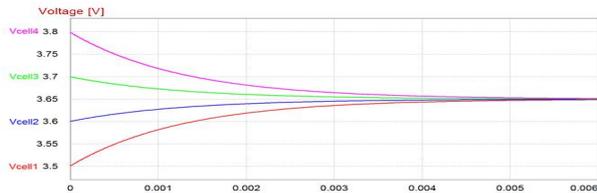


그림 3 제안하는 셀 밸런싱 회로의 셀 전압 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation voltage waveforms of the proposed cell balancer

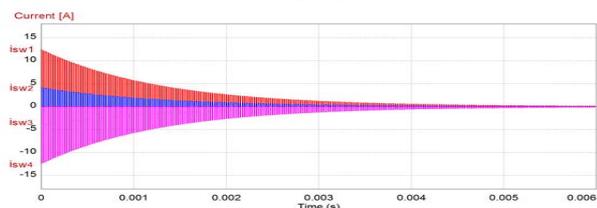


그림 4 제안하는 셀 밸런싱 회로의 셀 전류 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation current waveforms of the proposed cell balancer

표 1 시뮬레이션에 사용된 제안된 셀 밸런싱회로의 파라미터
Table 1 parameters of proposed cell balancer for simulation

C_c	22[nF]
V_{cell1}	3.6[V]
V_{cell2}	3.7[V]
V_{cell3}	3.5[V]
V_{cell4}	3.8[V]
전원스위치 D	0.375
보조스위치 D'	0.625
L_m	2.5[mH]
스위칭 주파수	40kHz

본 논문에서 제안한 배터리 셀 밸런싱의 타당성을 검증하기 위해 Powersim 社의 Psim을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 4개의 서로 다른 직렬 연결된 배터리 셀이 각각 3.5[V], 3.6[V], 3.7[V], 3.8[V]으로 충전의 상태로 4개의 직렬 연결된 커패시터로 대체하였다. 그림 1의 FAC회로의 설명을 위해 그림 3과 그림 4의 셀 전압, 전류 파형 시뮬레이션 결과로 보여준다. 제안한 셀 밸런싱 회로의 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

3. 결론

본 논문에서는 FAC(Forward converter Active Clamp)회로를 기반으로 한 액티브 셀 밸런싱 회로를 제안하였다. 제안한 회로는 FAC회로를 사용하여 셀 밸런싱 회로의 변압기가 포화 상태에 이르는 상태를 방지하였다. 모든 전원스위치는 일정한 듀티비(D)를, 모든 보조스위치는 일정한 듀티비($1-D$)의 PWM신호를 가진다. 제안한 셀 밸런싱 회로에서는 가장 높은 전압의 셀이 가장 낮은 전압의 셀로 에너지가 전송하며 직렬로 연결된 모든 셀의 평균 전압의 값으로 균등화된다. 본 논문에서 제안한 회로의 유효성은 Powersim 社의 Psim을 통한 시뮬레이션 결과로 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No NRF 2014R1A1A1036384)

참고 문헌

- [1] Q. Li, F. C. Lee, and M. M. Jovanovic, "Large signal transient analysis of forward converter with active clamp reset," in IEEE PESC Rec., 1998, pp. 633-639.
- [2] B. Carsten, "Design techniques for transformer active reset circuit at high frequencies and power levels," in Proc. HFPC, 1990, pp. 235-246.
- [3] M. Einhorn, W. Roessler, and J. Fleig, "Improved performance of serially connected Li ion batteries with active cell balancing in electric vehicles," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 6, pp. 2448-2457, Jul. 2011.
- [4] C. D. Bridge, "Clamp Voltage Analysis for RCD Forward Converters," in Proc. of IEEE APEC, pp. 959-965, Mar. 2000.