

아날로그 - 디지털 스위칭 혼합형
저 리플 - 고효율 Li-Ion 배터리 충전기

정상화, 우영진, 김남인, 조규형
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Analog-Digital Switching Mixed Mode
Low Ripple - High Efficiency Li-Ion Battery Charger

Sang-Hwa Jung, Young-Jin Woo, Nam-In Kim and Gyu-Hyeong Cho
Department of Electrical Engineering KAIST

Abstract - This paper describes a low noise and high efficiency analog-digital switching mixed mode battery charger for production facilities of Li-Ion batteries. The requirements for battery chargers for production facilities are very strict. The accuracy of output voltage and output current should be below 0.1% with very low ripple current. Therefore analog type linear regulators are widely used for battery charger in spite of their inefficiency and bulkiness. We combined linear regulator as a voltage source with digital switching converter as a dependent current source. Low current ripple and high accuracy are obtained by linear regulator while high efficiency is achieved by digital switching converter. Experimental results show that proposed method has 0.1% ripple and 90% efficiency at an output current of 1A for a battery voltage of 4V.

결되어 있다. 그리고 리플전류를 잘 흡수할 수 있도록 Class AB 형태의 출력단으로 구성하였다.

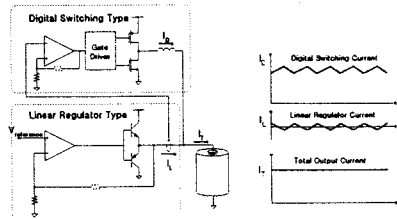


그림 1. 기본 구조와 각 블록의 전류파형

1. 서 론

Li-Ion 배터리 생산공정에서 배터리 충전, 방전과정을 통하여 배터리의 등급을 결정하므로 배터리 충전시 전류, 전압의 정확도가 아주 높아야 한다. 아날로그 방식의 충전기는 정확도는 높으나 효율이 낮아 부피가 큰 단점이 있다. 스위칭 방식[2]을 이용하여 낮은 효율을 증가시킬 수 있으나 리플 전류가 크고 정확도가 떨어져 사용하기에는 부적합하다. 정확도를 높이기 위해서는 리플 전류를 줄여야 하고, 또한 배터리의 수명을 늘리기 위해서도 리플전류를 줄여야 한다. 본 논문에서는 아날로그 디지털 스위칭 혼합형 구조[1]를 이용하여 저 리플, 고효율 배터리 충-방전기를 구현 하였다. 저 리플, 높은 정확도는 선형 레귤레이터에 의해서 구현되었고 고효율은 디지털 스위칭 방식에 의해서 구현되었다.

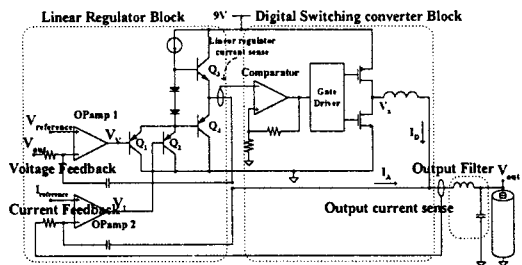


그림 2. 제안된 전류, 전압 피드백 회로

2. 기본구조

아날로그 디지털 스위칭 혼합형 배터리 충전기가 그림 1과 같다. 그림 1의 오른쪽 부분에서 디지털 스위칭 전류와 선형 레귤레이터 전류가 합쳐진 최종 전류를 보여 주고 있다. 선형 레귤레이터의 전류가 어느 정도 이상 증가하면 이를 감지하여 디지털 스위칭 블록에서 대부분의 전류를 공급한다. 대부분의 전류는 효율이 좋은 디지털 스위칭 컨버터에 의해서 공급되고 선형 레귤레이터에서는 디지털 스위칭 컨버터에서 공급되는 전류 리플의 반대 위상전류가 공급되어 최종적으로 리플이 없는 깨끗한 전류가 출력 단으로 공급된다.

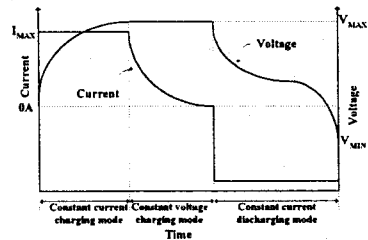


그림 3 Li-Ion 배터리 충-방전 그래프

그림 2에서 제안된 전류, 전압 피드백 회로를 보이고 있다. 그림 2의 왼쪽 부분이 선형 레귤레이터 부분이고 오른쪽 부분이 디지털 스위칭 블록이다. 선형 레귤레이터는 중전의 구조와 달리 리플전류를 공급, 흡수하여야 하므로 출력단에 NPN Tr 뿐만 아니라 PNP Tr 이 연

혼합형 배터리 충전기는 선형 레귤레이터 블록이 독립 전압원 역할을 하고 디지털 스위칭 컨버터는 중속 전류원 역할을 하게 되어 전체적인 출력 전류-전압 특성은 독립 전압원 역할을 하는 선형 레귤레이터에 의해서 결정된다.

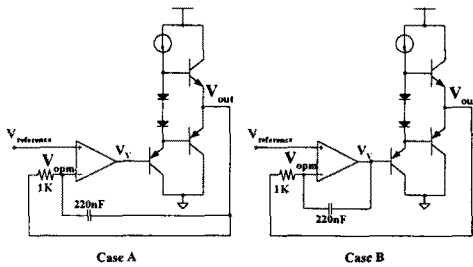
초기상태에서 배터리 전압이 낮을 때 정전류 충전을 한다. 정전류 모드에서는 출력 전압(V_{out})이 $V_{reference}$ 보다 낮으므로 V_v 전압이 high가 되어 Q_1 을 끄게 되고 Op-amp2와 Q_2 를 통하여 전류 피드백이 형성된다. 정전류 모드에서는 출력단에 정전류 형태로 공급하게 되고 배터리 전압은 계속 증가하게 된다. 배터리 전압이 증가하여 $V_{reference}$ 까지 도달하면 전류 피드백은 꺼지고 Op-amp1과 Q_1 에 의해서 전압 피드백이 형성되어 정전압 모드로 들어간다. 정전압 모드에서는 그림 3과 같이 전류가 서서히 감소하여 배터리가 최종 전압

($V_{reference}$)에 도달하게 된다. 배터리가 충분히 충전된 후 배터리 테스트를 위하여 정전류 방전 모드로 들어가게 된다. 정전압 충전 모드에서 정전류 방전모드로 바꾸기 위해서는 단순히 그림 2의 $I_{reference}$ 전압만 음으로 전환하면 된다. 선형 레귤레이터만 있으면 Q4에서 모든 에너지가 소모되었지만 디지털 스위칭 컨버터에 의해서 에너지가 전원으로 회생된다.

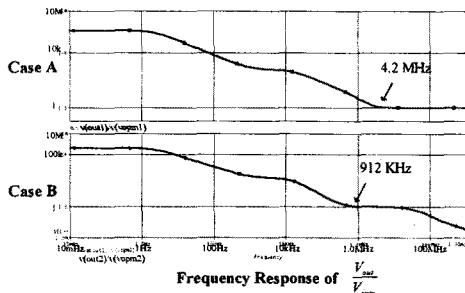
3. 선형 레귤레이터

3.1 적분기

선형 레귤레이터 블록에서 그림 4와 같이 두 가지 형태의 적분기를 생각할 수 있다. 출력전압을 조정하기 위한 적분기 기능만을 생각할 때는 그림 4(a)의 두 가지 경우에 차이가 없다. 그러나 혼합형 구조에서는 두 가지 경우가 큰 차이점이 있다. V_{opm} 에서 V_E 까지의 주파수 특성이 디지털 스위칭 블록에 의해 만들어진 리플 전류에 반응할 수 있을 정도로 빨라야 한다. 그렇지 않으면 출력 리플을 모두 흡수할 수 없으므로 최종 출력 전류에 리플이 상당량 존재하게 된다. 그림 4(b)는 Case A의 주파수 특성이 Case B보다 좋음을 보여준다. Case A가 빠른 이유는 V_{opm} 에서부터 V_{out} 까지의 경로에서 220nF의 캐패시터가 아무런 영향을 미치지 않기 때문이다.



(a)



(b)

그림 4. 적분기 캐패시터 위치에 따른 주파수 응답

3.2 루프 안정도

정전압 모드에서는 출력단에 큰 캐패시터 성분을 가지고 있는 배터리가 연결되어 있으므로 루프 안정도를 중요하게 고려해야 한다. 배터리 등가회로를 그림 5와 같이 RLC 적류 회로로 생각할 수 있다. 배터리 등가회로는 Impedance Analyzer를 통하여 얻어졌다. 배터리 임피던스 특성이 그림 6(b)의 세 번째 그래프와 같다. 주파수에 따른 배터리의 임피던스 특성이 그림 5의 오른쪽 그래프와 같다. ω_{z1} 까지 캐패시터 특성을 보이고 그 이후부터는 ESR에 의한 저항 특성을 보인다. ω_{z2} 부

터는 다시 ESL에 의해서 인덕터 특성을 보이게 된다. 따라서 ESR, ESL에 의해서 두 개의 zero가 존재하므로 전체 전압 루프에서 좋은 영향을 미치게 된다. 그리고 그림 6(a)의 output filter는 혼합형 구조에서 상쇄시키지 못한 노이즈 성분을 제거하기 위해서 연결되었다.

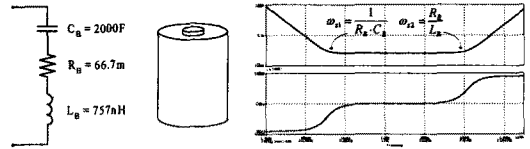
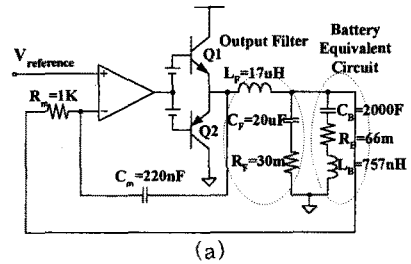
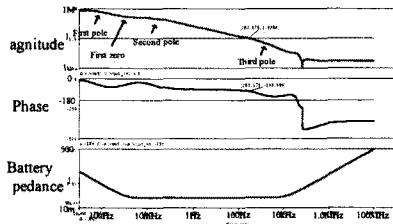


그림 5. 배터리 등가회로 및 임피던스 특성



(a)



(b)

그림 6. 정전압 모드 주파수 응답

시스템의 pole과 zero가 아래 표와 같다.

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_E \cdot C_B} \quad (1)$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_B \cdot C_B} \quad (2)$$

$$\omega_{p2} = \frac{1}{R_m \cdot A_{OL} \cdot C_m} \quad (3)$$

$$\omega_{p3} = \frac{R_B}{L_F} \quad (4)$$

$$\omega_{z2} = \frac{R_B}{L_B} \quad (5)$$

여기에서 R_E 는 Class AB 출력 버퍼의 출력 임피던스이고 A_{OL} 이 op-amp의 개루프 이득이다.

첫 번째 pole은 배터리 캐패시턴스(C_B)와 Class AB 버퍼의 출력 임피던스에 의해서 아주 낮은 주파수 대역에 형성된다. 이렇게 형성된 첫 번째 pole은 C_B 와 배터리 ESR(R_B)에 의해서 생성된 zero에 의해서 상쇄된다. 따라서 배터리는 전체 시스템에 영향을 미치지 못하게 된다. 그리고 C_M 에 의해 형성된 miller 캐패시턴스가 전체 회로에서 dominant pole을 형성하게 된다. 그리고 세 번째 pole은 L_F 와 R_B 에 의해서 형성되고 이것은 크로스 오버 주파수보다 훨씬 멀리 떨어져 있어야 한다. 이 시스템에서는 C_M 에 의한 dominant pole compensation을 통해서 전체 루프를 안정화 시켰다.

4. 디지털 스위칭 블록

디지털 스위칭 블록은 그림 7과 같다. 하드스위칭을 할 경우에 기생성분에 의한 공진과 M1, M2의 shoot through에 의해서 컨버터 출력에 노이즈가 발생할 수 있다. 위와 같은 문제점을 막기 위해서 M1과 M2의 gate 신호에 dead time을 두어 두 스위치가 동시에 켜지는 것을 방지한다. Dead time이 존재하더라도 그림 8(b)와 같이 기생공진 현상이 발생한다. 그림 7과 같이 bead core를 각 스위치의 드레인에 삽입하게 되면 그림 8(a)와 같이 아주 큰 인덕턴스로 공진 현상을 없애주는 역할을 하게된다. 그리고 bead core에 의해서 shoot-through도 방지된다.

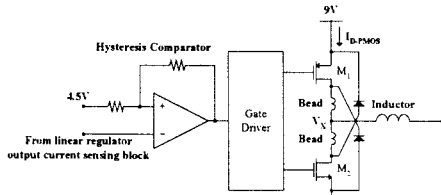
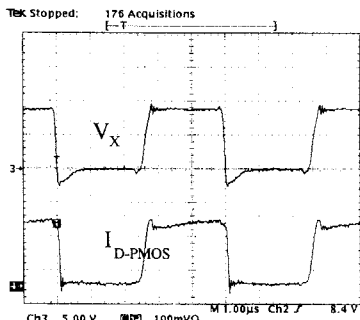
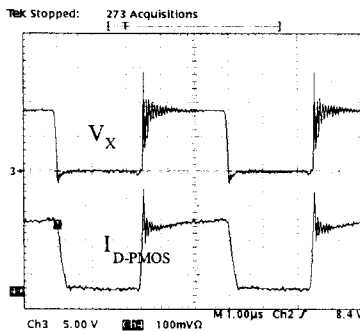


그림 7. 디지털 스위칭 블록



(a)



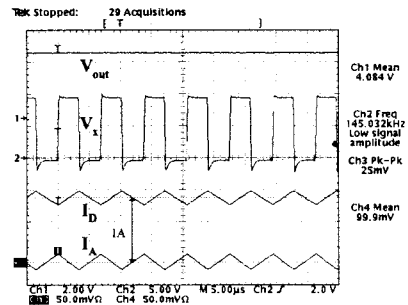
(b)

그림 8. V_x , I_{D-PMOS} 파형 (a) bead가 있는 경우 (b) bead가 없는 경우

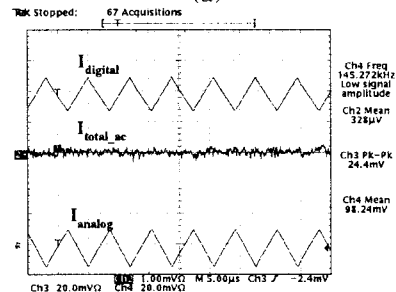
5. 실험 결과

그림 9에 혼합형 Li-Ion 배터리 충전기의 실험 파형을 보였다. 테스트 조건은 1A 정전류 모드로 하였다. 파형에서 보듯이 대부분의 전류는 디지털 전류(I_D)의해서 공급되고 선형 레귤레이터에서는 반대 위상의 리플전류만 공급하게 된다. 선형 레귤레이터에 의해서 출력전압과 전류가 아주 깨끗해진다. 그림 9(b)에 디지털 전류 파형과 선형 레귤레이터 전류 파형을 나타내었고 중

간에 최종 출력전류를 확대해서 나타내었다. 측정기의 한계로 인하여 출력 전류의 리플을 측정하기가 불가능할 정도로 리플전류가 작게 나타난다. 그림 10에서는 출력 파워에 따른 효율을 나타내고 있다. 디지털 스위칭 컨버터에 의해 전체적인 효율이 높게 나타나고 있고 출력 전력이 4W 일 경우 92%의 효율이 나왔다.



(a)



(b)

그림 9. 실험 파형

