

상태공간평균화법에 의한 2차전지 충방전 시스템의 해석

원화영, 채수용, 이형주, 김희선, 홍순찬
 단국대학교 전자전기공학과

Analysis of the Secondary Battery Charge/Discharge System Using State Space Averaging Method

Hwa-Young Won, Soo-Yong Chae, Hyung-Ju Lee, Hee-Sun Kim, and Soon-Chan Hong
 Dept. of Electronics and Electrical Eng., Dankook University

ABSTRACT

Charging or discharging secondary batteries such as a lithium-ion battery is essential in the stage of production and takes long time over two hours. And the charge/discharge system is operated with high switching frequency over several tens kHz. Therefore, to simulate such a system in the conventional way takes very long time and huge files are produced. Finally, the simulation would be unable with general PC class. In this paper, the lithium-ion battery charge/discharge system is analyzed by using state space averaging method. As a result, the simulation time is reduced dramatically and the charge/discharge characteristics of the lithium-ion battery can be observed.

1. 서론

2차 전지는 생산 과정에서 충전과 방전을 여러 차례 반복하는 화성공정을 필요로 한다. 화성공정은 충전모드와 방전모드로 구분된다. 충전모드에서는 전지의 전압이 충전상한전압에 도달할 때까지 CC(Constant Current)모드로 충전하고 충전상한전압에 도달한 후에는 CV(Constant Voltage)모드로 충전한다. 그리고 방전모드에서는 CC모드로 방전하한전압까지 방전하게 된다.^[1]

리튬전지를 1회 충방전할 경우 소요되는 시간은 전류 지령 값에 의해 결정된다. 2,600[mAH]인 리튬전지를 0.5C로 충전할 경우, 충전에 2시간 이상이 소요되고 방전에 2시간 정도 소요된다. 충전에 2.5시간이 소요되고 충전기의 스위칭 주파수를 100[kHz]로 하며 시뮬레이션 주기를 스위칭 주기의 1/30로 하는 경우에는 2.7×10^{10} 번의 시뮬레이션이 필요하다. 따라서 일반적인 방법으로는 시뮬레이션을 수행하는데 어려움이 있다.^[2]

본 논문에서는 상태공간평균화법을 사용하여 리튬전지 충방전 시스템을 시뮬레이션하여 시뮬레이션 시간을 단축하고 리튬전지의 충방전 특성을 알아보려고 한다.

2. 상태공간평균화법에 의한 해석

그림 2.1은 하나의 장치로 충전동작과 방전동작을 수행할 수

있는 리튬전지 충방전기이다.^[2] 충전시에는 스위치 Q_1 을 구동시켜 파워드 변환기로 동작하고, 방전시에는 스위치 Q_2 를 구동시켜 절연된 부스트 변환기로 동작한다.

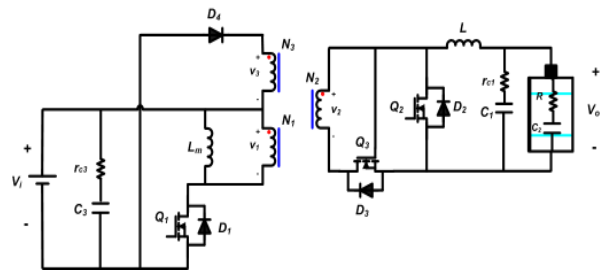


그림 2.1 리튬전지 충방전기
 Fig. 2.1 Charge/discharge system for lithium-ion battery

충방전기를 시뮬레이션 하기 위해서 리튬전지를 등가화할 필요가 있다. 본 논문에서는 복잡한 배터리 모델링 방법 대신 단순화된 저항-커패시터 모델링 방법을 적용하였다.^[3]

2.1 충전시 상태공간평균화법에 의한 해석

그림 2.2는 파워드 변환기의 회로도이다. 스위치 Q_1 이 켜지면 변압기를 통하여 부하단으로 에너지가 전달되고, Q_1 이 꺼지면 자화 인덕턴스에 저장된 에너지는 다이오드 D_4 를 통해 입력전원으로 회수된다. 이때 변압기 2차측은 출력인덕터 L 과 출력커패시터 C_1 에 저장되었던 에너지가 D_2 를 통해 부하로 전달된다. 충전시의 상태변수는 인덕터 전류 i_L 과 커패시터 전압 V_{C1} , 리튬전지를 등가화한 커패시터 V_{C2} 가 된다.

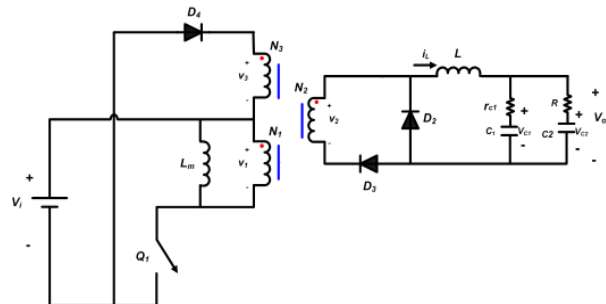


그림 2.2 파워드 변환기
 Fig. 2.2 Forward converter

식 (1)은 스위치가 닫혀있을 때의 상태방정식이다. 여기서 $N=(N_1/N_2)$ 이다.

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{Rr_{e1}}{L(R+r_{e1})}i_L - \frac{R}{L(R+r_{e1})}V_{e1} - \frac{r_{e1}}{L(R+r_{e1})}V_{e2} + \frac{1}{LN}V_i \\ \frac{dV_{e1}}{dt} &= \frac{R}{C_1(R+r_{e1})}i_L - \frac{1}{C_1(R+r_{e1})}V_{e1} + \frac{1}{C_1(R+r_{e1})}V_{e2} \\ \frac{dV_{e2}}{dt} &= \frac{r_{e1}}{C_2(R+r_{e1})}i_L + \frac{1}{C_2(R+r_{e1})}V_{e1} - \frac{1}{C_2(R+r_{e1})}V_{e2} \\ V_o &= \frac{Rr_{e1}}{(R+r_{e1})}i_L + \frac{R}{(R+r_{e1})}V_{e1} + \frac{r_{e1}}{(R+r_{e1})}V_{e2} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (2)는 스위치 열려있을 때의 상태방정식이다.

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{Rr_{e1}}{L(R+r_{e1})}i_L - \frac{R}{L(R+r_{e1})}V_{e1} - \frac{r_{e1}}{L(R+r_{e1})}V_{e2} \\ \frac{dV_{e1}}{dt} &= \frac{R}{C_1(R+r_{e1})}i_L - \frac{1}{C_1(R+r_{e1})}V_{e1} + \frac{1}{C_1(R+r_{e1})}V_{e2} \\ \frac{dV_{e2}}{dt} &= \frac{r_{e1}}{C_2(R+r_{e1})}i_L + \frac{1}{C_2(R+r_{e1})}V_{e1} - \frac{1}{C_2(R+r_{e1})}V_{e2} \\ V_o &= \frac{Rr_{e1}}{(R+r_{e1})}i_L + \frac{R}{(R+r_{e1})}V_{e1} + \frac{r_{e1}}{(R+r_{e1})}V_{e2} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 포워드 변환기의 상태방정식을 구하면 식 (3)과 같다. 여기서 D는 듀티비이다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{e1}}{dt} \\ \frac{dV_{e2}}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{Rr_{e1}}{L(R+r_{e1})} & -\frac{R}{L(R+r_{e1})} & -\frac{r_{e1}}{L(R+r_{e1})} \\ \frac{R}{C_1(R+r_{e1})} & -\frac{1}{C_1(R+r_{e1})} & \frac{1}{C_1(R+r_{e1})} \\ \frac{r_{e1}}{C_2(R+r_{e1})} & \frac{1}{C_2(R+r_{e1})} & -\frac{1}{C_2(R+r_{e1})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{e1} \\ V_{e2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{LN} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_i \\ V_o &= \begin{bmatrix} \frac{Rr_{e1}}{(R+r_{e1})} & \frac{R}{(R+r_{e1})} & \frac{r_{e1}}{(R+r_{e1})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{e1} \\ V_{e2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 방전시 상태공간평균화법에 의한 해석

그림 2.3은 절연된 부스트 변환기의 회로도이며, 리튬전지가 전원전압이 된다. 그림 2.1에서 Q_3 는 Q_2 가 온상태이면 오프상태가 되고 Q_2 가 오프상태이면 온상태가 되므로 방전시에는 다이오드처럼 동작한다. 방전시 리튬전지의 전압과 전류의 크기를 고려하여 직류링크단 인덕터 L에 에너지가 저장되며 출력 커패시터 C_3 는 부하로 방전한다. 그리고 Q_2 가 꺼지면 변압기 2차측 권선을 통하여 에너지를 부하로 전달한다. 여기서 상태변수는 인덕터 전류 i_L 과 커패시터 전압 V_{C2} 및 V_{C3} 이다.

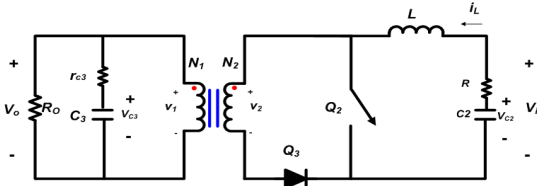


그림 2.3 절연된 부스트 변환기
Fig. 2.3 Isolated boost converter

식 (4)는 스위치가 닫혀있을 때의 상태방정식이다.

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{R}{L}i_L + \frac{1}{L}V_{e2} \\ \frac{dV_{e2}}{dt} &= -\frac{1}{C_2}i_L \\ \frac{dV_{e3}}{dt} &= -\frac{1}{C_3(R_o+r_{e3})}V_{e3} \\ V_o &= \frac{R_o}{(R_o+r_{e3})}V_{e3} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (5)는 스위치 열려있을 때의 상태방정식이다.

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{-R_o r_{e3} - N^2 R r_{e3} - N^2 R_o R}{LN^2(R_o+r_{e3})}i_L + \frac{1}{L}V_{e2} - \frac{R_o}{LN(R_o+r_{e3})}V_{e3} \\ \frac{dV_{e2}}{dt} &= -\frac{1}{C_2}i_L \\ \frac{dV_{e3}}{dt} &= \frac{R_o}{NC_3(R_o+r_{e3})}i_L - \frac{1}{C_3(R_o+r_{e3})}V_{e3} \\ V_o &= \frac{R_o r_{e3}}{N(R_o+r_{e3})}i_L + \frac{R_o}{(R_o+r_{e3})}V_{e3} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5), (6)으로부터 구한 부스트 변환기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_{e2}}{dt} \\ \frac{dV_{e3}}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{-R_o r_{e3} - N^2 R r_{e3} - N^2 R_o R + R_o r_{e3} D}{LN^2(R_o+r_{e3})} & \frac{1}{L} & -\frac{R_o(1-D)}{LN(R_o+r_{e3})} \\ -\frac{1}{C_2} & 0 & 0 \\ \frac{R_o(1-D)}{NC_3(R_o+r_{e3})} & 0 & -\frac{1}{C_3(R_o+r_{e3})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \\ V_o &= \begin{bmatrix} \frac{R_o r_{e3}(1-D)}{N(R_o+r_{e3})} & 0 & \frac{R_o}{(R_o+r_{e3})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

3. 시뮬레이션

그림 2.1의 충방전기를 상태공간평균화법을 사용하여 시뮬레이션하였다. 리튬전지를 RC로 등가화하였으며, 정전류모드일 때의 전류를 1,300[mA]로 하여 시뮬레이션하였다.

여기서 리튬전지를 등가화한 커패시터 C_2 는 리튬전지의 공칭용량을 이용하여 얻었으며, 리튬전지를 등가화한 저항 R은 그림 4.1(b)의 실험파형에서 $\tau=RC_2$ 를 적용하여 얻었다. 리튬전지를 RC로 등가화하였을 때 R은 84[mΩ], 리튬전지의 C_2 는 6,240[F]이다.

시뮬레이션에 사용한 파라미터는 $L=500[\mu\text{H}]$, $C_1=1,000[\mu\text{F}]$, $C_3=1,000[\mu\text{F}]$ 이며, 변압기의 권수비는 $N=(N_1/N_2)=17$ 이다.

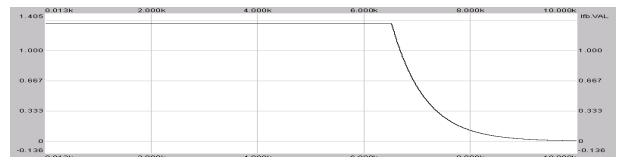
3.1 충전시의 시뮬레이션

입력 전원은 3상 220[V]를 정류한 311[V]이고 리튬전지의 커패시터 초기전압은 2.7[V]이며 충전상한전압은 4.2[V]이다.

그림 3.1은 충전시 시뮬레이션 결과로서 정전류 충전구간과 정전압 충전구간을 확인할 수 있다. 정전류 구간에서 전지의 양단전압이 2.7[V]에서 서서히 증가하다가 충전상한전압인 4.2[V]에 도달하면 정전압구간이 시작되며 전류는 거의 지수함수적으로 감소한다.



(a) 리튬전지 양단전압



(b) 리튬전지 전류

그림 3.1 충전시 시뮬레이션 결과
Fig. 3.1 Simulation results in charging process

3.2 방전시의 시뮬레이션

리튬전지의 초기 전압은 4.2[V]이며, 방전하한전압은 2.7[V]이다. 직류링크단은 저항부하로 대체하였으며, 저항부하 R_0 는 22.44[k Ω]이다.

그림 3.2는 방전시 시뮬레이션 결과로서 1.3[A]의 일정한 전류로 방전되는 것을 확인할 수 있다.

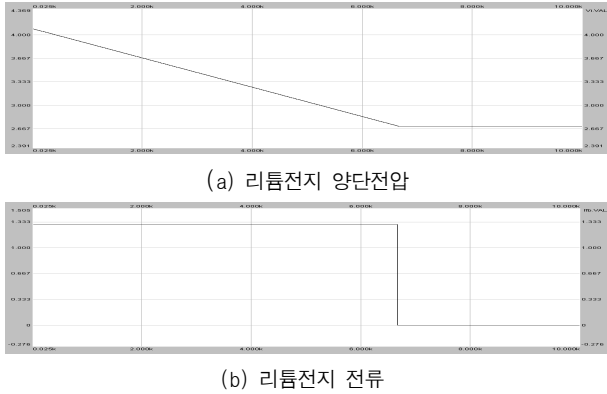


그림 3.2 방전시 시뮬레이션 결과
Fig. 3.2 Simulation results in discharging process

4. 실험 결과 및 검토

실험에 사용한 리튬전지는 Enerland사의 PF465690 모델로서 리튬폴리머전지이다. 이 전지의 공칭용량이 2,600[mAH]이며 정전류 제어에서 지령전류는 리튬전지를 0.5C로 충방전하기 위해 1.3[A]로 한다. 실험에 사용된 파라미터는 시뮬레이션에서 사용한 파라미터와 동일하다.

리튬전지의 충방전 특성을 확인하기 위해 오실로스코프로 10,000초 동안 실험하였다. 충전시험은 초기전압을 2.7[V], 충전상한전압을 4.2[V]로 설정하여 시행하였으며, 스위칭 주파수는 100[kHz]이다. 충전시 실험 결과는 그림 4.1과 같으며, 시뮬레이션 결과인 그림 3.1의 파형과 유사함을 알 수 있다.

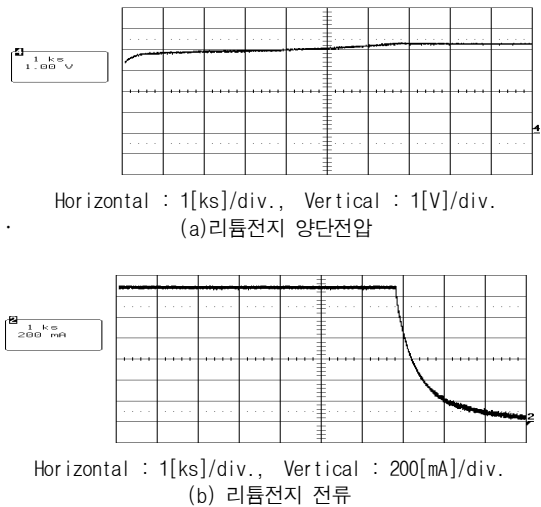


그림 4.1 충전시 실험 결과
Fig. 4.1 Experimental results in charging process

스위칭 주파수를 100[kHz]로 하고 1.3[A]의 일정한 전류로 방전시킨 경우의 실험 결과는 그림 4.2와 같다. 방전시의 실험 파형을 살펴보면 시뮬레이션 결과인 그림 3.2의 결과와 유사함을 알 수 있다. 그림 4.2(a)에서 리튬전지 양단전압이 4.2[V]에서 방전을 시작하여 서서히 감소함을 알 수 있다. 이 파형에서 방전동작 종료 후 리튬전지 양단전압이 약간 상승하는데 이는 전지의 화학적인 특성에 의한 것으로 보인다.

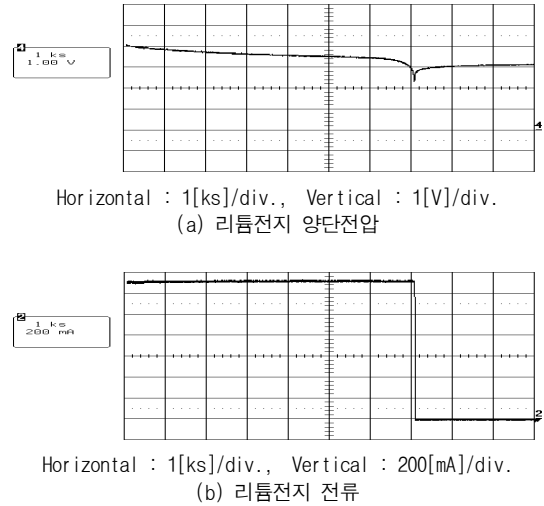


그림 4.2 방전시 실험 결과
Fig. 4.2 Experimental results in discharging process

5. 결론

본 논문에서는 상태공간평균화법을 사용하여 2차전지 충방전 시스템을 시뮬레이션하였다.

리튬전지를 1회 충방전하려면 충전동작과 방전동작에 각각 수 시간이 소요되며 스위칭 주파수가 높아 기존의 방법으로 시뮬레이션을 수행하는데 어려움이 있었다. 본 논문에서는 상태공간평균화법을 사용하여 시뮬레이션 시간을 대폭 단축하고 리튬전지의 충방전 특성을 알아볼 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 中道 龍二, “배터리 동작 회로의 모든 것”, 월간전자기술, 2002년 12월호.
- [2] 채수용, 서영민, 정대택, 윤덕용, 홍순찬, “이차전지 충방전용 직류-직류 변환기에 관한 연구”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.235-237, 2006.4
- [2] Hsueh-Chih Yang and Lan-Rong Dung, “An Accurate Lithium-Ion Battery Gas Gauge Using Two-Phase STC Modeling”, IEEE ISIE Proceedings, pp.866 ~ 871, 2007.