

# 선형 배터리 모델을 이용한 에너지 저장장치의 제어기 설계기법에 관한 연구

김일송<sup>†</sup>

## Study on the Controller Design Method for Battery Energy Storage System using Linearized Battery Model

Il-Song Kim<sup>†</sup>

### Abstract

A controller design method for a battery-energy storage system using a linearized battery model is presented in this paper. The suggested linear battery model is expressed with open-circuit voltage having three relaxation filters and a linear output equation. A method to obtain on-line resistance and maximum available power is also presented. The battery state of charge information is obtained by Kalman filter, and its performance is verified by FTP75 driving cycles. The controller for power converter is designed and experimented with a 250 V battery pack. The proposed control method is simple and easy to apply to a real system.

**Key words:** BESS, Battery, Controller, Linearized battery model, Kalman filter, EV

### 1. 서 론

대용량, 고출력 리튬전지는 가볍고 높은 에너지 밀도를 가지고 있어서 HEV, EV와 같은 전기수송 시스템과 상업용 제품에 많이 사용되고 있다. 또한 태양광 발전이나 풍력발전과 같은 신재생에너지 시스템의 전력품질 향상목적으로도 사용되고 있고 현재는 스마트 그리드의 계통주파수 제어(frequency regulation)로 응용분야가 확대되고 있다.

HEV/EV와 같은 수송분야 및 전력저장과 같은 응용에서 가장 중요한 배터리 관리 요소는 일정한 시간동안 충전되거나 방전가능한 최대 유효출력을 알아내는 것이다. 또한 배터리 충전량(SOC: State of Charge)을 알아내는 것도 주행가능한 거리와 충방전제어를 위해서 필요하다. 유효출력이나 충전량은 배터리 내부 상태이므로 직접 측정이 불가능하여 수학적인 방법이나 다른 수단에 의해서 추정되어야만 한다. 일반적으로 배터리 유효출력은 충전량 정보에서 얻어질 수 있기 때문에 정확한

충전량을 얻어내는 것은 배터리 관리에서 핵심적인 기술이 된다.

수학적 방법에 의해서 충전량을 알아내기 위해서는 배터리 모델링이 필요하며, 그동안 많은 연구가 이루어져 왔다<sup>[1-5]</sup>. 대부분은 정확도를 증가시키기 위해 복잡한 실험적인 비선형 모델을 사용하였다. 이 방식의 단점은 충전량을 알아내기 위한 충분한 수학적 표현이 부족하거나 너무 복잡한 표현 방식에 있다.

본 연구에서는 간단한 계산을 위해서 선형 배터리 모델이 제시되었다. 제안된 모델은 단순하지만 복잡한 비선형 모델과 견줄만한 높은 정확도를 가지고 있다. 선형 배터리 모델의 장점은 SOC 알고리즘을 적용할 때에 얻어진다. 일반적으로 사용되는 확장 칼만필터는 역행렬을 계산하기 위해 너무 많은 시간과 리소스를 요구한다. 제안된 선형모델을 사용하면 계산시간을 크게 단축시키고 제한된 리소스로 구현 가능한 장점이 얻어진다.

계통연계형 배터리 전력저장장치(BESS : Battery Energy Storage System)는 양방향 컨버터와 계통연계형 인버터를 사용하여 단위역률로 계통으로 전력을 전송하거나 배터리로 충전할 수 있는 시스템이다. 배터리, 양방향컨버터와 모터, 인버터로 구성된 HEV/EV와 동일한 구성이다. 차이점은 인버터가 모터 대신 계통에 연결되어 있다는 점이다. 만약 BLDC 모터가 사용된다면 수학적 표현식은 두 시스템이 동일하다.

Paper number: TKPE-2014-19-6-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: iskim@ut.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Korea Nat'l Univ of Transportation

Tel: +82-43-841-5142 Fax: +82-43-841-5140

Manuscript received Jun. 25, 2014; accepted Sep. 30, 2014

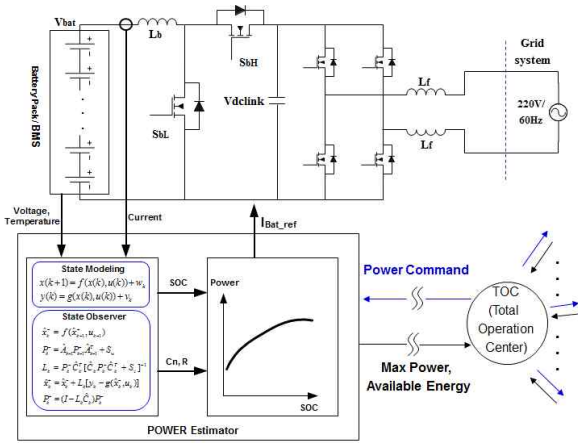


Fig. 1. Configuration of BESS.

일반적인 단상 BESS 구성은 그림 1에 표시되어 있다. BMS(Battery management System)를 가지는 배터리팩과 양방향 컨버터 그리고 계통형 인버터로 구성되어 있다. BMS는 매초마다 셀 전압, 전류, 온도를 측정하여 셀의 충전량(SOC)을 계산하고 내부 파라미터에 대한 정보를 관측기 이론을 이용하여 얻어낸다. 관측기는 선형 배터리모델에 기반하여 구성되며 공칭용량( $C_n$ ), 내부저항( $R$ )과 같은 내부 파라미터와 SOC 정보에 의해서 사용가능한 최대출력을 얻어낸다. 최대출력과 사용가능한 에너지, SOC 등의 정보는 TOC(Total Operation Center)에 보내진 후 기준출력 명령을 받는다. 충전, 방전은 기준출력 명령의 부호에 의해 결정된다. 출력을 배터리 전압으로 나누어 기준 전류명령( $I_{bat\ ref}$ )를 생성되며 기준전류명령은 양방향 컨버터의 기준전류가 된다. 인버터 제어는 DC link 전압에 바탕을 두고 있다. 220V 계통에 연계하기 위하여 DC link 전압은 320V 보다 커야 하므로 기준전압은 350V로 유지되고 충/방전시에 계통전류가 단위역률로 제어된다.

## 2. 제어시스템 설계

### 2.1 선형배터리 모델링

잘 알려진 전류적산(Coulomb counting) 기법을 사용하여 SOC를 다음과 같이 정의하였다.

$$z_{k+1} = z_k + \frac{\Delta t}{C_n} i_k \quad (1)$$

$z_k$ 는 SOC이고  $i_k$ 는 충/방전전류이고(충전일때는 +, 방전일때는 -로 정의),  $C_n$ 은 공칭용량,  $\Delta t$ 는 샘플링시간이다.

제안된 모델의 출력방정식은 다음으로 정의된다.

$$V_t(k) = V_{oc}(soc(k)) + Ri_k + V(k)_{relaxation} \quad (2)$$

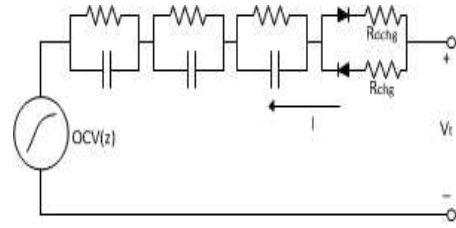


Fig. 2. Equivalent circuit having 3 RC relaxation.

OCV는 SOC의 함수로 주어지고 short-term과 long-term에 해당되는 relaxation 전압을 나타내기 위해 직렬 연결된 RC병렬회로가 사용되었다. 모델링 오차를 줄이기 위해서 추가로 RC회로를 직렬 연결하여 구성할 수 있다. 3단 RC 회로는 HEV/EV와 같이 모터부하로 구동되는 매우 높은 펄스형태의 충/방전 전류를 가지는 응용분야에서 높은 정밀도를 유지할 수 있다.

배터리의 입력은 충방전 전류  $i_k$  이고 출력은 단자전압  $v_t$  이다. 직렬 연결된 RC 회로는 동작환경에서 요구되는 정밀도에 의해 결정된다. 1% SOC 오차에 해당하는 10mV의 정밀도를 요구하며 3단의 RC 회로를 연결해서 이 요구조건을 만족시킬 수 있다. 등가회로는 그림 2에 나타나 있다. 이 회로를 이산 상태방정식으로 나타내면 다음으로 주어진다.

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= AX_k + Bu_k \\ y_k &= CX_k + Du_k \end{aligned} \quad (3)$$

상태변수는  $X_k = [f_{1,k} \ f_{2,k} \ f_{3,k} \ z_k]^T$

입력변수는  $u_k = i_k$

출력변수는  $y_k = v_{t,k}$  로 정의된다.

A, B, C, D 행렬은 시스템의 동적행렬이며, 시스템 행렬 A는 RC회로의 시상수(time constant)에 의해 결정되며  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  로 주어진다. A 행렬은 대각행렬(diagonal matrix)이며 nonsingular 행렬이 존재한다.

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \frac{\Delta t}{C_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

수식 (2)의 출력방정식은 다음과 같은 형태로 다시 정리된다.

$$y_k = G_f f_k + OCV(z_k) + Ri_k \quad (5)$$

$OCV(z_k)$ 는 SOC 상태변수  $z_k$ 에 해당하는 개방전압이고, 내부저항  $R$ 은 서로 다른 충전( $R_{chg}$ )와 방전( $R_{dchg}$ ) 값을 갖는다. Relaxation 전압은 다음의 형태로 주어진다.

$$y_f = G_f f_k = [g_1 \quad g_2 \quad g_3][f_{1,k} \quad f_{2,k} \quad f_{3,k}]^T \quad (6)$$

SOC는 observer 이론을 이용하여 얻을 수 있다. 선형 모델에는 Luenberger 관측기와 칼만필터(Kalman filter)를 적용할 수 있다. Luenberger 관측기는 feedback 이득을 설정하면 되는데, 4차 시스템인 경우 4개의 최적 feedback 이득선정이 쉽지 않다는 단점이 있다. 칼만필터는 계산량이 많은 단점이 있지만, 행렬 연산에 의해 최적이득을 선정할 수 있다는 장점이 있다<sup>[6-8]</sup>. 제안된 모델은 4차 시스템이지만 대각행렬(diagonal matrix)로 구성이 되어 있어서 역행렬 계산이나 곱셈행렬 계산을 간단하게 할 수 있는 장점이 있어 칼만필터를 사용하였다. 다음에 칼만필터 수식을 표시하였다.

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1}^- &= A\hat{X}_k + Bu_k \\ P_{k+1}^- &= AP_k A^T + Q_k \\ L_k &= P_{k+1}^- C^T (C^T P_{k+1}^- C^T + R)^{-1} \\ \hat{X}_k^+ &= \hat{X}_k^- + L_k (y_k - C\hat{X}_k^-) \\ P_k &= (I - L_k C) P_k^- \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.2 저항측정

배터리의 내부 저항(충전 저항, 방전저항)을 실 운전 조건에서 DC-IR 측정기법으로 알아내는 방법에 대해서 알아본다. DC-IR 기법이란 Ohm의 법칙에서 유래된 것으로 저항의 정의가  $R = V/I$  임을 이용하여 동적(Dynamic) 저항을 구하는 방법을 말한다. 동적 저항이란 특정 시간 구간에서 전압의 변화량과 전류의 변화량의 비로서 정의된다. 즉

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (8)$$

충방전기를 사용하여 동적저항을 측정하는 것은 간단하다. 예를 들어 10초 동안 일정한 전류를 충전하거나 방전하면서 이 시간 동안 전압의 변화를 측정하면 동적 저항을 쉽게 측정할 수 있다. 만약 10 초 동안 방전 전류의 변화가 100A 이고 전압의 변화가 0.3V 이면 방전 저항은 3 mΩ이 된다.

하지만 실제 운영 상황에서 동적저항을 측정하는 것은 충방전기와는 상황이 다르다. 충방전 전류의 크기가 일정하지 않고 시간도 역시 조건에 따라서 달라지기 때문

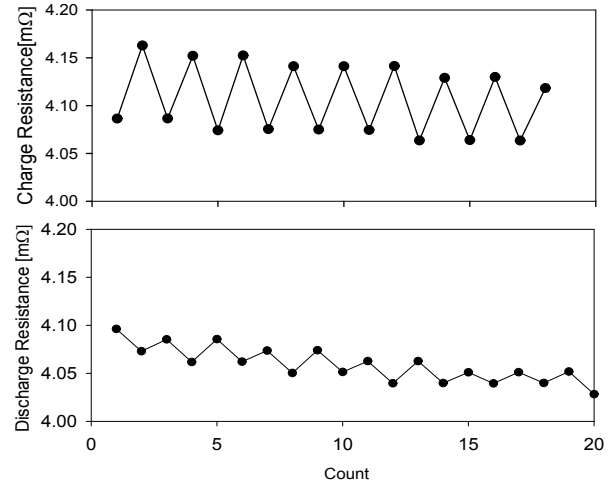


Fig. 3. On-line resistance measurement.

이다. 본 연구에서는 동적 저항 측정기법에 대해 서술한다. 매 1초마다 BMS에서 배터리 전류와 전압을 측정한다. 전류의 기울기가 + (혹은 -) 인 시간이 10 초 이상인 상태에서 전류의 변화량과 전압의 변화량을 측정하여 동적 저항을 구한다. 이 때 전류의 변화량이 일정량(일반적으로 100A)이상 되는 구간만을 측정에 사용한다. 이것은 미소전류가 일정시간 흐르는 경우를 방지하기 위한 것이다. 기울기를 사용하는 이유는 전류가 충전만을 계속하는 경우에 충전구간에서 기울기가 달라지게 되면, 전압의 크기가 증가하다가 감소하게 된다. 이것은 배터리 시험에 사용된 전압-전류 프로파일을 보면 쉽게 알 수 있다. 이 경우에는 동적저항을 정확히 측정하기 어렵게 된다. 따라서 전류의 부호 대신에 기울기를 사용하는 것이 보다 정밀한 동적 저항을 측정하는데 유리하다. 그림 3에 실제 운영중의 동적 저항을 표시하였다.

## 2.3 Power Estimation

배터리는 제한된 전력을 공급할 수 있는 에너지원이기 때문에 일정한 시간동안 충/방전이 가능한 최대전력을 알아내는 것이 중요하다. 특히 HEV나 풍력발전용 전력저장장치와 같이 단기간에 높은 펄스로 충방전이 되는 시스템에서는 최대출력을 알아내는 것이 가장 중요한 배터리관리의 하나가 된다. 최대출력은 적용가능한 배터리의 최대, 최소 전압 혹은 충전량(SOC)의 최대, 최소가 기준이 된다<sup>[9]</sup>. 즉 최대충전전력은 현재 전압에서부터 최대 허용전압까지 충전가능한 전류와 전압의 곱이 된다. 반대로 최대 방전전력은 현재 전압에서 최소 허용전압까지 방전가능한 전류와 전압의 곱이 된다. N-개의 셀이 직렬로 연결된 배터리 팩에서 BMS는 일정시간 간격으로 N-개 전압과 팩전류를 측정한다. 최대, 최소, 평균 셀 전압을 구하여 충전전력 계산에는 최대 전압, 방전전력 계산에는 최소 전압, SOC 계산에는 평균 전압을 사용한다. 유효전력을 알아내는 과정은 다음과

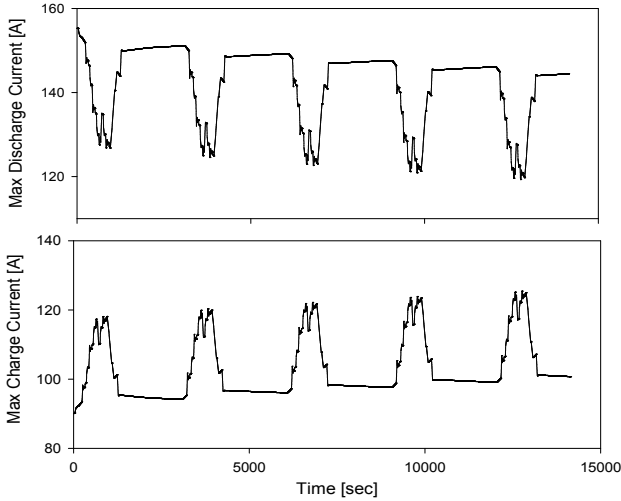


Fig. 4. Maximum available power(current).

같다. 식 (2)를 정리하면

$$Ri_k = V_i(k) - V(k)_{relaxation} - V_{oc}(soc(k)) \quad (9)$$

충전가능한 최대 배터리 전압이  $V_{Full}$  이면 최대 충전 전류는 다음과 같이 계산된다.

$$i_{chg,max} = \frac{V_{Full} - V_{oc}(soc(k))}{R_{chg}} \quad (10)$$

방전가능한 최소 배터리 전압이  $V_{Cut}$  이면 최대 방전 전류는

$$i_{dis,max} = \frac{V_{Cut} - V_{oc}(soc(k))}{R_{dchg}} \quad (11)$$

되고 최대 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_{dis,max} &= V_{Cut} \times i_{dis,max} \\ P_{chg,max} &= V_{Full} \times i_{chg,max} \end{aligned} \quad (12)$$

그림 4에 실제 동작상황에서 얻어진 최대 충/방전 출력 전류를 나타내었다.

#### 2.4 전력변환기 제어기 설계

BMS는  $I_{bat\_ref}$ 를 양방향 컨버터의 제어명령으로 발생시킨다. +는 충전을 -는 방전을 의미한다. 충전시 컨버터는 Buck 컨버터로 동작하고 스위치  $S_{bH}$ 가 동작하고  $S_{bL}$ 은 disable된다. 방전시는 Boost 컨버터로 동작하며 스위치 동작은 반대가 된다. 인덕터  $L_b$ 에 샘플링 시간  $T_s$  동안 volt-sec balance를 적용하면<sup>[10]</sup>

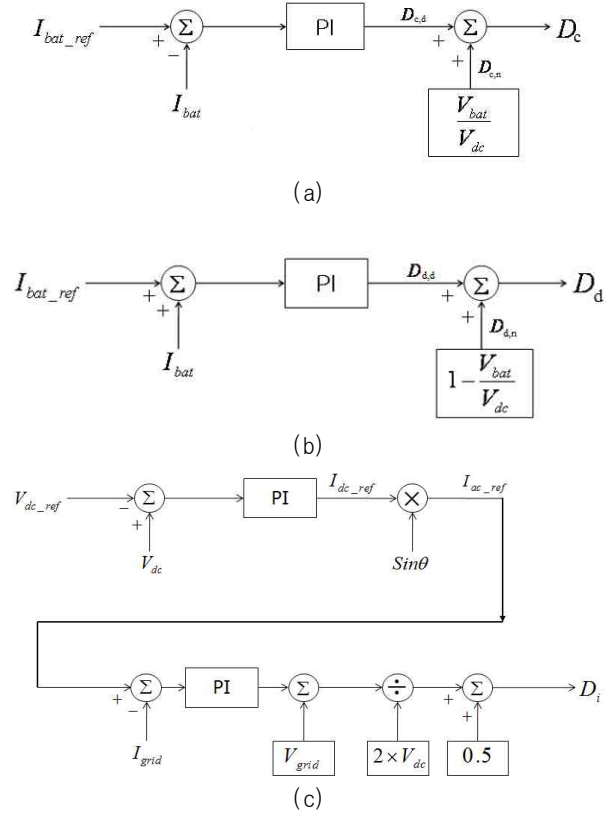


Fig. 5. Power controller configuration.

(a) charge, (b) discharge, (c) grid inverter

$$V_{bat}(1 - D_c) - (V_{dclink} - V_{bat})D_c = L_b \frac{\Delta I_b}{T_s} \quad (13)$$

충전기간동안 Duty는 다음과 같이 표현된다.

$$D_c = D_{c,n} + D_{c,d} = \frac{V_{bat}}{V_{dclink}} - \frac{L_b \Delta I_b}{V_{dclink} T_s} \quad (14)$$

방전기간에는 컨버터는 Boost로 동작하며 인덕터 전류 변화율은 다음으로 주어지며

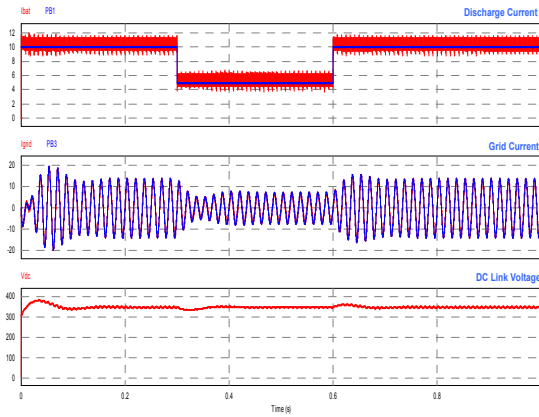
$$V_{bat}D_d - (V_{dclink} - V_{bat})(1 - D_d) = L_b \frac{\Delta I_b}{T_s} \quad (15)$$

방전기간 동안의 Duty는 다음과 같이 표현된다.

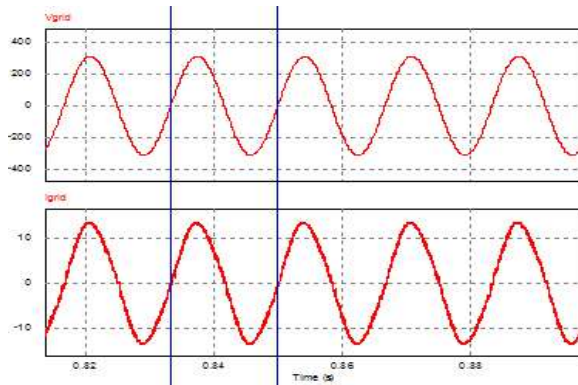
$$D_d = D_{d,n} + D_{d,d} = 1 - \frac{V_{bat}}{V_{dclink}} + \frac{L_b \Delta I_b}{V_{dclink} T_s} \quad (16)$$

인버터의 출력방정식은 다음으로 주어진다.

$$V_f = L \frac{di_L}{dt} + V_{grid} \quad (17)$$



(a)



(b)

Fig. 5. Discharge waveform.

(a) current and dc link voltage (b) grid voltage and current

이산 방정식으로 표현하면

$$V_f(k+1) = L \frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T_s} + V_{grid}(k) \quad (18)$$

인덕터 전류가 1 샘플링 시간 내에 기준명령을 따라간다면, 기준 전류는 다음과 같이 표현된다.

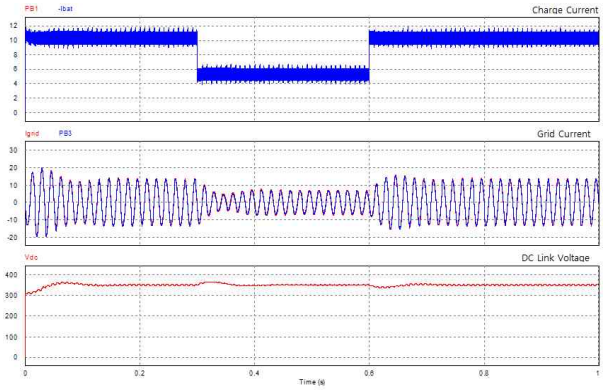
$$i_{ref}(k) = i_L(k+1) \quad (19)$$

따라서 인버터 제어기 명령은 다음과 같이 표현된다.

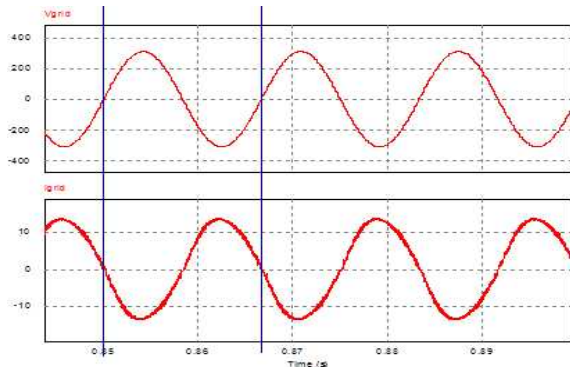
$$V_f(k+1) = \frac{L}{T_s} [i_{ref}(k) - i_L(k)] + V_{grid}(k) \quad (20)$$

### 3. 시뮬레이션

PSIM 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 방전의 경우 배터리 방전 기준 전류를 10A → 5A 로



(a)



(b)

Fig. 6. Charge waveform.

(a) current and dc link voltage (b) grid voltage and current

변경하였을 때 전류가 기준전류에 제어되고 계통기준전류와 전류가 그리고 DC link 전압이 350V로 제어됨을 알 수 있다(그림 a). 계통 전압과 전류는 단위역률로 제어되며, 위상은 동상(배터리 → 계통)이다. (그림 b).

충전의 경우 배터리 전류와 계통 전류도 역시 기준 전류값에 제어되며, 계통전압과 전류도 단위역률로 제어되면 전류의 흐름이 반대이기 때문에 계통 전류의 위상은 전압과 역상(180도 위상차)이다. (그림 b)

### 4. 실험 결과

선형 배터리모델을 이용한 SOC 알고리즘이 250V 배터리팩을 이용하여 테스트 되었다. 10Ah의 용량을 갖는 직렬 연결된 80개의 리튬 폴리머셀이 고전압 배터리 팩을 구성하였다. 배터리 팩과 전력변환기 사진이 그림 7와 8에 표시되었다.

다음 단계는 제안된 선형모델의 파라미터를 구하는 것이다. 100% 정확한 모델 파라미터를 구하는 것은 불가능하다. 최선의 방법은 주어진 입력에 대해서 오차를 최소화시킬 수 있는 최적의 파라미터를 구하는 것이다. 입력은 상수나 혹은 임의로 주어질 수 있지만, 실제 운영 조건에서 얻어내는 것이 적당할 것이다. 현재 실증사업



Fig. 7. Lithium polymer battery pack (250V/10Ah).

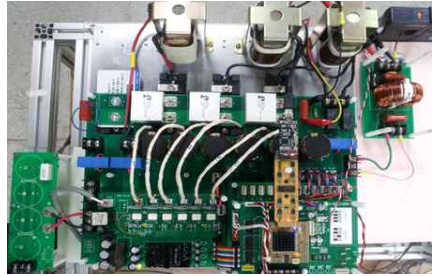


Fig. 8. Power converter configuration.

이나 보급사업을 통해 BESS가 설치된 분야는 부가서비스 분야(ancillary service)로 계통 주파수 제어 (frequency regulation)에 초점이 맞추어져 있고, 빠른 응답특성이 필요하기 때문에 고출력의 리튬 배터리를 사용하고 있다. 또한 BESS가 풍력발전기의 전력품질 보상용으로 많이 사용되는데, 이 경우도 역시 빠른 응답특성(고출력 펄스 충방전)을 요구한다. 현재까지 BESS의 배터리 규격이나 시험에 관한 명문화된 사양 (specification)이나 성능평가 지표가 없는 관계로 고출력 리튬전지를 사용하는 전기자동차용 사이클을 채용하여 실험하였다. UDDS(urban dynamometer driving schedule) 사이클은 전기자동차용 배터리를 시험하기 위한 전형적인 사이클이다. 먼저 배터리를 만충전시킨 다음에 일련의 충방전 전류를 배터리 전압이 cut-off까지 감소될 때까지 인가하는 것이다. 이 경우 전체 동작범위는 SOC 0~100%에 해당한다. 셀전압과 전류가 매초마다 기록되며, 이 데이터들은 셀 모델 파라미터를 얻어내는데 사용된다. 선정된 파라미터들은 충방전 전류가 인가된 상태에서 셀 전압과 모델전압과의 오차를 최소화시키는 값들이다. 이것은 전체동작범위에 대해서 전압오차의 제곱이 최소화되는 LMS(Least mean square) 방법에 의해서 구해진다. 오차를 최소화시키는 파라미터들은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.9206 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9950 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.99999 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0001 \\ 0.0001 \\ 0.000043 \end{bmatrix},$$

$$G_f = [0.9773, 0.0885, -0.000302]$$

$$R_{chg} = 4.12 \text{ m}\Omega, R_{dchg} = 4.05 \text{ m}\Omega, C_n = 9.46 \text{ Ah}$$

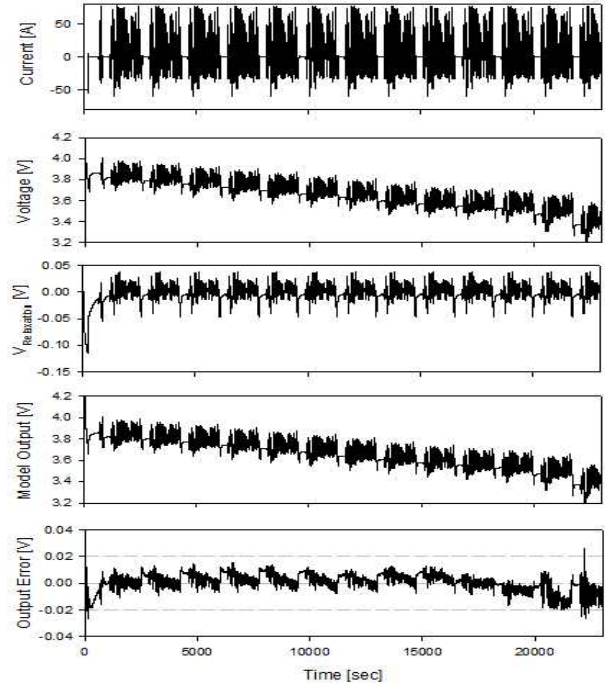


Fig. 9. Experimental result for linearized battery model.

선정된 파라미터를 이용한 배터리 모델의 25도에서의 시험결과가 그림 9에 나타나 있다. 테스트 결과를 보면 5~95% SOC 범위 내에서 모델오차가 10mV 이내로 유지되는 것을 알 수 있다. FTP(Federal Test Procedure) 75 프로파일을 이용하여 SOC 알고리즘을 검증하였다. 이 프로파일은 30분의 전류펄스로 이루어져 있고, 1사이클의 총 Ampere-hour는 -8Ah로 용량의 80%에 해당한다. 다음 사이클에서 전류의 극성이 반전되어 매 two 사이클 마다 총 Ah는 0으로 reset된다. SOC 알고리즘의 drift 여부를 알아보기 위해 총 4 사이클을 수행하였고 결과가 그림 10에 나타나 있다. 두 번째 그림에서 볼 수 있듯이 배터리 전압은 매 두 사이클마다 동일한 레벨로 유지된다. CC (Coulomb Counting)을 이용한 SOC 결과가 세 번째 그래프에 나타나 있고, 칼만필터를 이용한 결과가 네 번째 그래프에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 CC와 칼만필터 결과가 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 매 두 사이클 마다 칼만 필터에 의해서 추정된 SOC는 초기 상태로 reset 되고 drift가 없음을 알 수 있다. 제안된 배터리 모델로 이루어진 SOC알고리즘은 SOC drift에 대해서 강인성을 가지고 있음을 알 수 있다.

전력변환기는 양방향 컨버터와 계통연계형인버터로 구성되어 있다. 전력변환기는 32-bit floating point DSP인 TMS320F28335와 고정밀도의 bipolar input (+/-10V) simultaneous 6-channel ADC 보드가 정확한 신호변환을 위해 사용되었다. 내부 변수들은 고속 직렬통신을 통해 컴퓨터로 전송되어 저장된다.

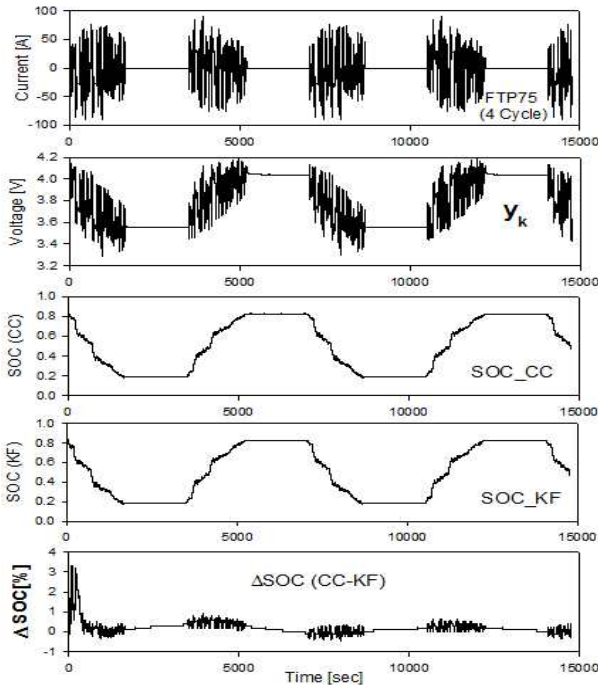


Fig. 10. Result for SOC estimation using FTP75 Profile.

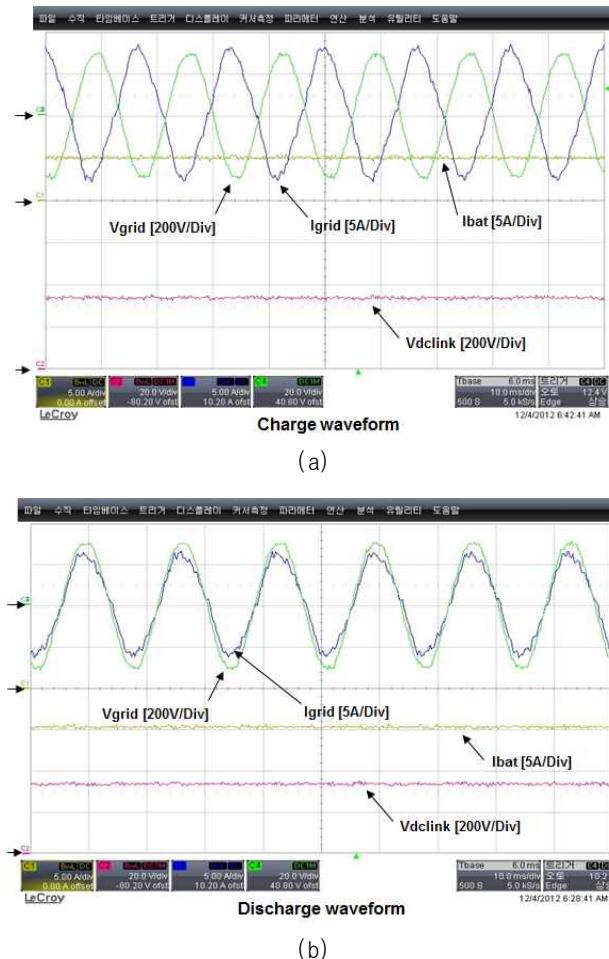


Fig. 11. Power converter operation result.  
(a) Charging, (b) Discharging

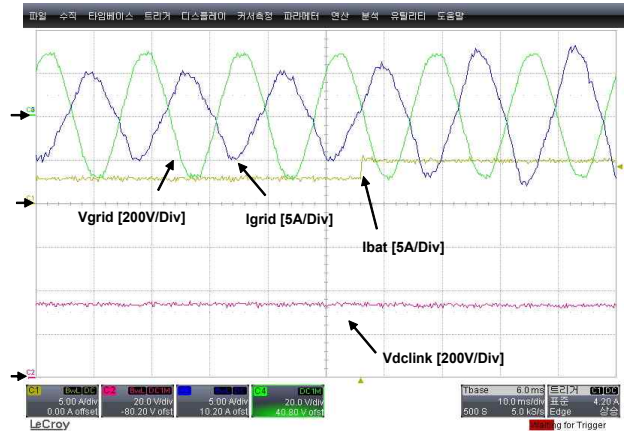


Fig. 12. Reference current command step change.

충전시의 동작파형이 그림 11 (a)에 나타나 있다. 배터리 충전 기준 전류는 5A 이고 DC link 기준전압은 350V이다. 계통전압과 전류의 위상차가 180도는 것은 전력이 계통에서 배터리로 전달되고 있다는 의미이다. 파형에서 알 수 있듯이 충전 전류는 5A, DC link 전압은 350V로 제어되고 있다.

방전시의 파형이 그림 11 (b)에 나타나있다. 배터리 방전 기준 전류는 -5A이고 DC link 기준전압은 350V이다. 계통 전압과 전류의 위상차는 0이고 전력이 배터리에서 계통으로 전달되고 있다는 의미이다. 그림에서 방전 전류는 -5A, DC link 전압은 350V로 제어되고 있음을 알 수 있다.

기준 전류값을 변화( $I_{ref} : 3A \rightarrow 5A$ ) 시켰을때의 파형을 그림 12에 나타내었다. 제안된 제어기가 기준전류 변화에 대해서도 잘 제어되고 있는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

펄스부하조건에서 동작되는 배터리 응용분야에서 높은 정밀도를 유지하기 위해서 기존에 사용되었던 복잡한 비선형 모델의 단점을 극복하기 위한 선형 배터리 모델이 제안되었다. 제안된 모델은 단순하지만 복잡한 비선형 모델과 견줄만한 높은 정확도를 가지고 있다. 선형 정규화 매트릭스(Canonical form)로 구성되어 있어서 역행렬이나 곱셈행렬 계산시간을 크게 단축시키고 제안된 리소스로 구현가능한 장점도 가지고 있다.

칼만필터를 이용한 SOC 추정 알고리즘이 제시되고, 검증에 위해서 실제 주행 사이클을 이용하여 정밀도를 검증하였다. 상온에서 제안된 모델과 알고리즘은 1[%]의 SOC오차를 가지고 있는 것을 확인하였다. 배터리 에너지저장장치를 계통에 연계시키기 위한 제어기 설계방식이 제시되었다. 충전방전을 위한 단일제어기가 제시되고 실험에 의해서 성능을 입증하였다. 제안된 연구 방식은 기존의 비선형 배터리 모델에 비해 선형으로 이루어져

있기 때문에 계산시간을 단축시킬 수 있고 모든 동작범위 내에서 높은 정밀도를 유지할 수 있다. 제안된 방식은 배터리 저장 장치, 풍력/태양광 발전을 위한 전력품질 향상 시스템, HEV/EV와 같은 분야에 적용이 가능하다.

이 논문은 2012년도 한국교통대학교의 해외파견 연구교수 지원금을 받아 수행한 연구임”

“The research was supported by a grant from the 2012 program for visiting professors overseas in Korea National University of Transportation

- [10] J. M. Kim, “Three-phase power equalizing system with UPS function based on battery storage,” *Trans. KIPE*, Vol. 17, No. 4, pp.353-358, Aug. 2012.



#### 김일송(金一松)

1968년생. 1991년 연세대 공대 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 졸업(공학박). 2007년 3월~현재 한국교통대 전기공학과 부교수. 2013년 North Carolina State University, FREEDM Center 방문교수.

## References

- [1] S. Buller, M. Thele, E. Karden, and R. W. D. Doncker, “Impedance-based non-linear dynamic battery modeling for automotive applications,” *Journal of Power Sources*, Vol. 113, pp. 422-430, Jan. 2003.
- [2] Min Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance,” *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 2, pp. 504-511, Jun. 2006.
- [3] I. Snihir, W. Rey, and E. Verbitsky, A. B. Ayeb, P. H. L. Notten, “Battery open-circuit voltage estimation by a method of statistical analysis,” *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1484-1487, Sep. 2005
- [4] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 21, No. 2, pp. 504-511, Jun. 2006.
- [5] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral, and J. Fleig, “Comparison, selection, and parameterization of electrical battery models for automotive applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 3, pp. 1429-1437, Mar. 2013.
- [6] R. Xiong, H. He, F. Sun, and K. Zhao, “Evaluation on state of charge estimation of batteries with adaptive extended Kalman filter by experiment approach,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 62, No. 1, pp. 108-117, Jan. 2013.
- [7] I. S. Kim, “Nonlinear state of charge estimator for hybrid electric vehicle battery,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, No. 4, pp. 2027-2034, Jul. 2008.
- [8] G. Plett, “Extended kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification,” *Journal of Power Sources*, 134 (2004), pp. 262-276.
- [9] G. Plett, “High-performance battery-pack power estimation using a dynamic cell model,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 53, No. 5, pp. 1586-1593, Sep. 2004