

3상 AC-DC 승압형 컨버터를 이용한 SOC 추정 기반의 효율적 배터리 충전 알고리즘

(An Efficient Battery Charging Algorithm based on State-of-Charge Estimation using 3-Phase AC-DC Boost Converter)

이정호* · 원충연**

(Jung-Hyo Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract

This paper presents battery charging method using 3-phase AC-DC boost converter. General battery charging method is that charging the battery voltage to the reference voltage according to the constant current(CC) control, when it reaches the reference voltage, charging the battery fully according to the constant voltage(CV) control. However, battery charging time is increased because of the battery impedance, constant current charging section which should take the large amount of charge is narrow, and constant voltage charging section which can generate insufficient charge is widen. To improve this problem, we propose the method to reduce the charging time according to the SOC(State of Charge) estimation using battery impedance.

Key Words : Battery Charging Method, 3 Phase AC-DC Boost Converter, Constant Current, Constant Voltage, SOC Estimation

1. 서 론

최근 배터리는 신재생 에너지, 무정전전원장치를 비롯한 전기자동차의 발달로 인하여 그 사용분야가 점점 넓어지고 있다. 특히 대용량 배터리를 사용하는 응용분야가 늘어나면서 3상 계통을 입력으로 하여

배터리를 충전하는 방식이 늘고 있다. 본 논문은 그림 1과 같이 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 토폴로지를 이용한 배터리 충전 방법을 제안한다. 3상 AC-DC 승압형 컨버터는 계통입력인 AC를 별도의 정류회로 없이 6개의 스위치를 이용하여 승압된 DC전압을 출력할 수 있다. 또한 양방향 스위치를 사용하므로 계통전류의 위상을 제어할 수 있어 PFC(Power Factor Correction) 제어가 가능하다.

한편, 배터리의 안정적이고 효율적인 이용을 위해 배터리의 충전 방식 또한 여러 가지 방법으로 연구되어 왔다. 이러한 방법 중, 가장 일반적으로 사용되고 있는 배터리 충전 방법은 정전류-정전압(Constant

* Main author : Senior Engineer at LG Innotek
** Corresponding author : Professor course of Electrical and Engineering at Sungkyunkwan Univ.
Tel : 031-290-7169, Fax : 031-290-4963
E-mail : daumin@naver.com
Received : 2015. 8. 12
Accepted : 2015. 9. 14

Current- Constant Voltage : CC-CV) 제어 방법이다. 일반적인 CC-CV충전방식은 CC충전에서 CV충전으로의 전환 시 배터리의 단자전압을 센싱하여 충전모드를 전환하게 된다. 그러나 이러한 단자전압을 이용하여 충전을 하게 되면 CV충전시간이 길어지게 되므로 전체적인 충전시간이 증가하는 단점이 있다. 또한 기존의 CC-CV를 이용하여 빠른 충전을 하게 될 경우, 큰 전류로 CC 충전을 해야 한다. 그러나 큰 CC 전류는 배터리의 내부 임피던스 특성에 의해 SOC에 비해 단자전압을 크게 만들고 결국 CC 제어구간은 짧아지고 CV 제어구간이 길어지게 되므로 충전시간 단축이 사실상 어렵다.

이러한 충전 방법의 단점을 보완하기 위해 본 논문은 배터리의 SOC(State of Charge)를 이용한 충전 방법을 제안하였다. SOC를 이용한 개선된 CC-CV제어는 SOC를 계산하여 CC 제어 방식에서 CV 제어 방식으로 전환되는 시간을 결정하기 때문에 CC 제어에 의한 충전시간은 길게 유지할 수 있고 CV 제어에 의한 충전 구간은 상대적으로 줄어들어 전체 충전시간을 감소시킨다.

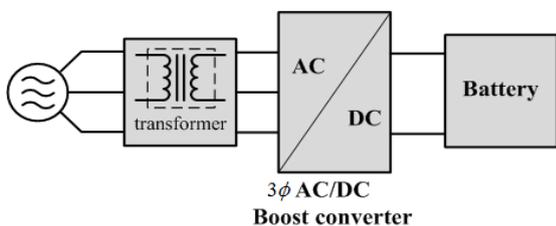


Fig. 1. Battery charger using 3-phase AC-DC Boost converter

개선된 CC-CV 충전방법을 적용하기 위해서는 실시간으로 SOC가 추정가능 해야 하며 정확성도 고려되어야 한다. 이러한 SOC 추정을 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 가장 일반적으로 사용되는 방법은 전류적산 방식을 이용한 SOC 추정방식이 있다. 그러나 이 방법은 측정 잡음에 민감하고 초기값을 결정하기 어려운 단점이 있으며, 무엇보다 배터리의 변동되는 파라미터를 적용할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 OCV(Open Circuit Voltage)를 이용한 방식[1-2], 배터리 모델을 이용하여 칼만필

터를 사용하는 방식[3], 고주파를 입력하여 스펙트럼을 분석하는 방식[4-6] 등이 연구되었다.

본 논문에서는 실시간 SOC 추정에 적합한 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 기존의 복잡한 연산을 단순화 하였으며 또한 정확성도 고려하였다. 제안된 방법은 실험을 통해 기존의 전류적산법과 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. SOC 추정방법

SOC 추정 방법의 경우 여러 가지 방법이 연구되었는데 본 논문은 이 중 배터리 모델을 이용한 SOC 추정방법을 이용한다[3-6]. 배터리 모델을 표현하는 방식 또한 여러 가지 방법이 있으나 분극현상과 직렬 임피던스 성분을 등가적으로 표현한 테브넨 등가 모델을 사용하였다. 그림 2는 이러한 테브넨 등가 배터리 모델을 나타내었다. 이러한 배터리 모델을 이용한 SOC 추정 방법은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 충전전류에 교류 전류를 인가하여 그에 대한 전압변동을 보는 방법[4-6]과 칼만 필터를 이용하여 비선형적인 SOC를 추정하는 방법[3]이다. 이 중 교류 전류의 주파수를 인가하여 추정하는 방식의 경우 인가되는 교류 전류의 응답이 매우 작다는데 그 문제가 있다. 기본적으로 배터리의 캐패시턴스는 매우 크며 이러한 전류에 대한 전압 응답은 작을 수밖에 없다. 따라서 이러한 작은 전압 응답을 검출할 수 있는 기기가 필요하며 이러한 정밀도가 높으면 높을수록 가격은 상승한다. 반면 칼만 필터를 사용하는 경우 공분산을 구하기 위한 연산량이 매우 많으며 초기치와 게인값의 영향에 민감하다는 단점이 있다.

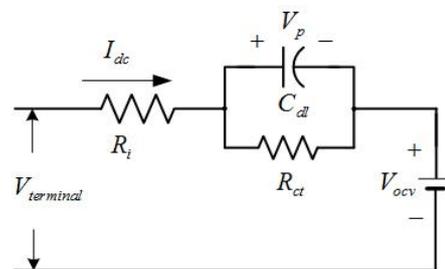


Fig. 2. Battery Thevenin equivalent model

2.1 제안된 SOC추정 방법

제안된 SOC 추정 방법을 설명하기 위해 먼저 그림 2의 테브넨 배터리 등가모델에 대해 분석한다. 테브넨 모델에 대한 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{dc} = [R_i + R_{ct}(1 - e^{-\omega_p t})] \cdot I_{dc} + V_{ocv} \quad (1)$$

여기서 $\omega_p = \frac{t}{R_{ct}C_{dl}}$ 이다.

3상 AC-DC 승압형 컨버터가 단일 역률로 제어되고 입력과 출력에 어떠한 손실도 없다고 가정할 경우, 입력전력과 출력전력은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\frac{3}{2} E i_q^e = V_{dc} I_{dc} \quad (2)$$

여기서 E 는 입력 전압의 크기, i_q^e 는 입력 전류의 크기이다. 식 (1)과 (2)로부터 배터리 단자전압은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{3}{2} E i_q^e = I_{dc} \left((R_i + R_{ct}(1 - e^{-\omega_p t})) I_{dc} + V_{ocv} \right) \quad (3)$$

$$V_{ocv} = \frac{3Ei_q^e - 2ZI_{dc}^2}{2I_{dc}} \quad (4)$$

여기서 $Z = (R_i + R_{ct}(1 - e^{-\omega_p t}))$

배터리의 SOC와 OCV는 그 크기가 매우 유사하다. 따라서 본 논문은 OCV와 SOC가 같다고 가정한다[2]. 이러한 가정을 기반으로 배터리의 SOC를 측정하기 위해서는 배터리 내부 직렬저항과 $R_{ct}C_{dl}$ 를 측정하여야 함을 알 수 있다. 먼저 내부 직렬저항은 입력전류에 대한 초기 전압강하로써 측정할 수 있다.

$$R_i = \frac{V_{dc} - V_{dc}(0)}{I_{dc}} \quad (5)$$

여기서 $V_{dc}(0)$ 는 전류를 인가하지 않은 상태에서의 배터리 전압값이다.

한편 병렬 연결된 $R_{ct}C_{dl}$ 는 직류전류로 반응하지 않기 때문에 정현파 교류 전류를 충전 직류전류에 인가하여 이에 대한 파라미터를 추출한다. 이러한 교류전류에 대한 배터리 임피던스 스펙트럼 출력은 그림 3과 같으며, 이에 대한 주파수 도메인의 배터리 임피던스 크기는 그림 4와 같다.

그림 3에서 실수축의 배터리 임피던스 스펙트럼은 배터리 임피던스의 내부 저항값을 의미하며, 이 중, 반원의 성분은 배터리의 분극 저항과 분극 캐패시터 성분으로 인해 나타나는 성분이다. 기존의 연구에서 주파수가 높을 경우 나타나는 실수축 성분은 배터리 직렬 저항 R_i 값이며, 주파수가 낮아질수록 분극 캐패시터와 저항에 의해 반원의 임피던스 스펙트럼 현상이 나타난다. 이 때, 반원의 실수축의 임피던스 값은 분극 저항 R_{ct} 값이다.

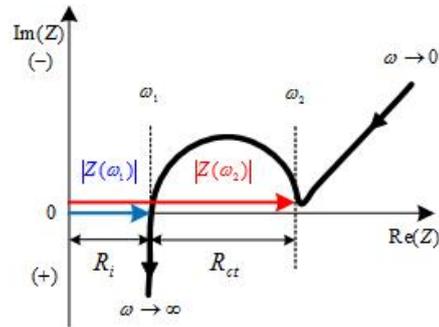


Fig. 3. Battery impedance spectrum

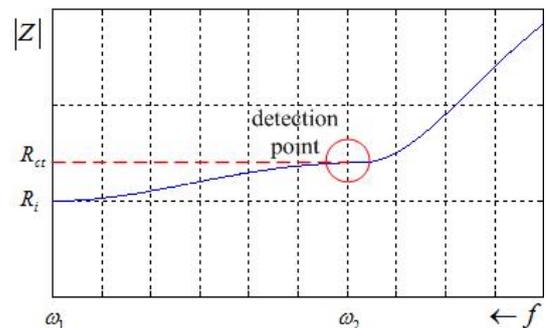


Fig. 4. Battery impedance amplitude by input frequency

본 논문에서 제안하는 SOC 추정방법은 복잡하고 가격이 비싼 기존의 스펙트럼 분석을 사용하지 않고,

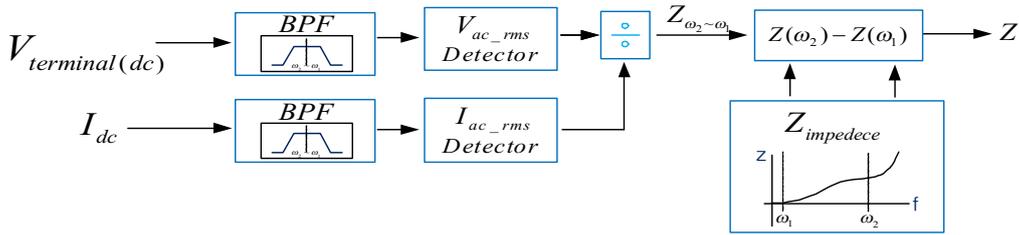


Fig. 5. Block diagram of online calculating impedance

그 크기만을 이용하여 SOC를 추정한다. 그림 4는 이러한 그림 3의 스펙트럼을 입력주파수에 따른 배터리 임피던스 크기로 표현한 그림이다. 그림을 살펴보면 반원에 의해 입력 임피던스의 크기가 주파수가 낮아 질수록 급격히 변하는 변곡점이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 변곡점까지 발생하는 주파수에 대한 임피던스와 초기 고주파를 넣었을 때의 임피던스 차이를 빼서 배터리 내부 저항 성분을 추출한다. 이를 위한 추출식은 다음과 같다.

$$R_{ct} = \frac{V_{dc(rms)}(\omega_2) - V_{dc(rms)}(\omega_1)}{I_{dc(rms)}(\omega_2) - I_{dc(rms)}(\omega_1)} \quad (6)$$

여기서 $I_{dc(rms)}$ 와 $V_{dc(rms)}$ 는 각각 전류, 전압 실효치를 의미한다.

이러한 내용을 바탕으로 제안된 SOC 추정 블록도는 그림 5와 같다. 그림 5를 살펴보면, 인가된 교류 전류에 대한 전압의 교류 성분을 추출하기 위해 BPF(Band Pass Filter)를 사용하여 각 전류와 전압의 교류 성분을 추출한 후에, 이를 다시 실효치로 나타낸 후 배터리 전체 임피던스를 측정한다. 측정된 임피던스가 변곡점을 나타낼 때까지 주파수를 감소시키고 식 (6)과 같은 수식을 이용하여 전체 임피던스 성분을 구한다.

실시간으로 추출된 임피던스를 통해 다음과 같은 간략한 수식으로 배터리의 SOC를 추정할 수 있다.

$$V_{ocv} = V_{dc_LPF} - ZI_{dc_LPF} \quad (7)$$

여기서, $I_{dc(rms)}$ 와 $V_{dc(rms)}$ 는 각각 전류, 전압 실효치를 의미한다.

3. 3상 AC-DC 승압형 컨버터를 이용한 배터리 충전방법

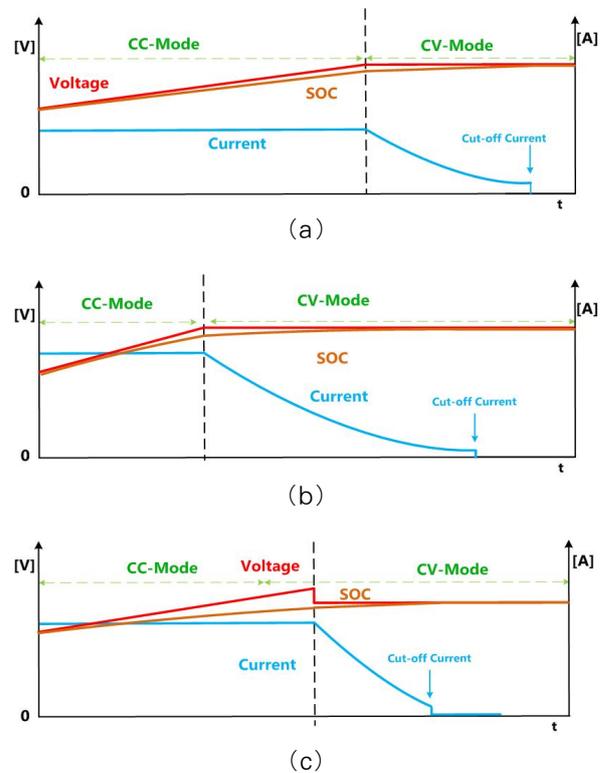


Fig. 6. Battery charging method (a) slow charging (b) fast charging and (c) proposed method

그림 6은 기존의 정전류-정전압 제어 방식과 제안된 정전류 정전압 제어 방식을 비교한 파형이다. 실제 완속 충전과 고속 충전시에 배터리의 전하를 빠르게 충전하는 정전류 제어 구간은 완속충전이 길다. 따라서 고속 충전의 경우에 완속충전보다 입력되는 전류 크기에 비해 충전시간이 특수하게 빠르지 않다. 또한,

정전류-정전압 제어에 일반적으로 사용되는 PI제어기의 경우 배터리 파라미터에 따라 실제 SOC와 단자전압은 차이가 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 방법은 SOC를 기반으로 정전류-정전압 제어 구간을 구별하도록 하였다. 주의해야 할 것은 충전 중의 SOC 전압이 100%에 도달할 경우 배터리 과과의 위험이 있으므로 정전류 제어는 정전압 제어를 통해 배터리의 전압이 공칭값을 넘지 않도록 해야한다. 일반적으로 산업용 급속충전기는 배터리 SOC의 80%까지 충전하기 때문에 오버전압에 대한 마진이 존재한다.

그림 7은 제안된 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 충전 제어 방법이다. 기존 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 제어 방식의 경우 상전류의 크기를 제어하는 벡터 제어 방식이 일반적으로 사용된다[8]. 그러나 이러한 경우 배터리 전압의 증가분을 반영하지 못하기 때문에 실제 배터리에 흐르는 전류는 점점 감소하게 된다.

$$\frac{3}{2} E \cdot i_q = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (8)$$

여기서, E 는 계통전압의 크기

식 (8)은 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 입출력을 나타낸 식이다. 이를 살펴보면 우편의 단자전압이 상승

할 경우 계통전압의 크기는 고정되므로 q 축 전류가 일정하게 제어될 경우 배터리 전류는 감소하게 되는 것을 알 수 있다.

4. 실험

그림 8은 본 논문에서 사용된 10kW급 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 실험 세트 사진이다. 제안된 알고리즘의 검증에 위해 28개의 공칭전압 12V의 배터리를 직렬연결하여 364V의 배터리를 충전하였다. 표 1은 실험에 사용된 배터리 사양이며, 표 2는 제어에 사용된 컨버터 사양을 나타내었다.

Table 1. Battery parameters

Battery Model	DELKOR Hi-Ca 80(lead-acid battery)	
Nominal Capacitance	80Ah	
Charging Condition	Max. current	20A(0.25C)
	Max. voltage	14.3~14.5V
	State of Charge @ 100%	13V
	State of Charge @ 0%	11.8V
Life Cycle Characteristic	2500 Cycle @ 80% DoD	
Injected Current Frequency	10mHz~100mHz	
Battery Bank (28-Series Connected)	Charging voltage	364V
	Charging current	8A
	Cut-Off current	0.5A

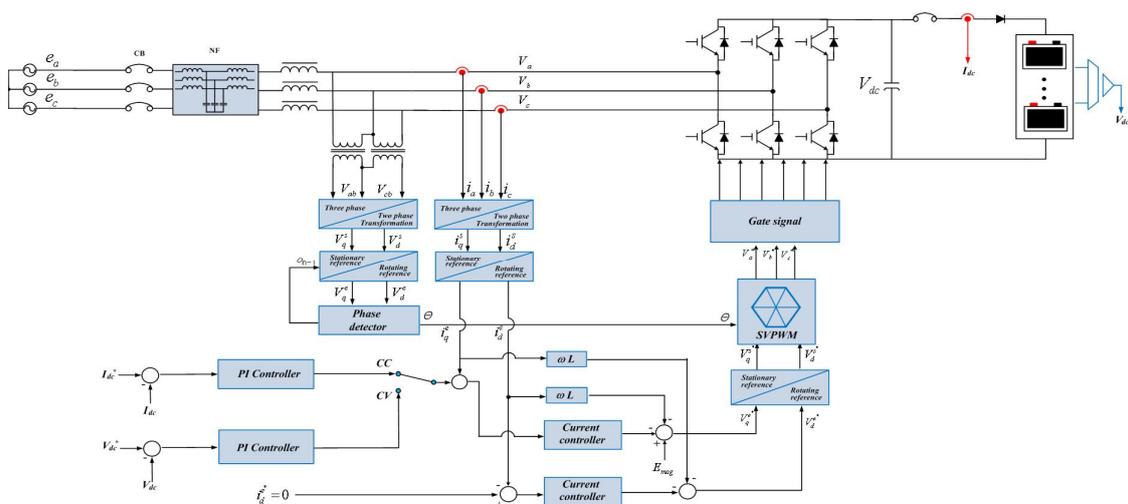


Fig. 7. Charging method of 3-phase AC-DC Boost converter

Table 2. Parameters of 3-phase AC-DC Boost converter

Input Voltage	3ph. 220Vrms
Output Voltage	364V
Max. Output Current	27.5A

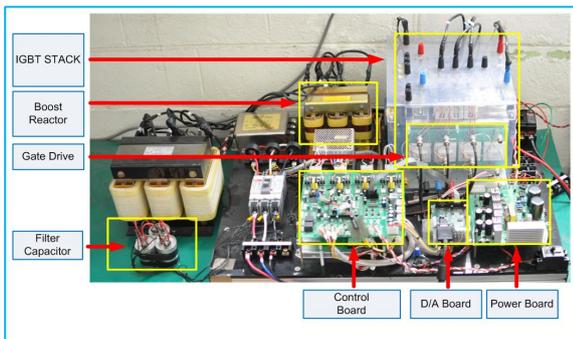


Fig. 8. 10kW power rate 3-phase AC-DC Boost converter

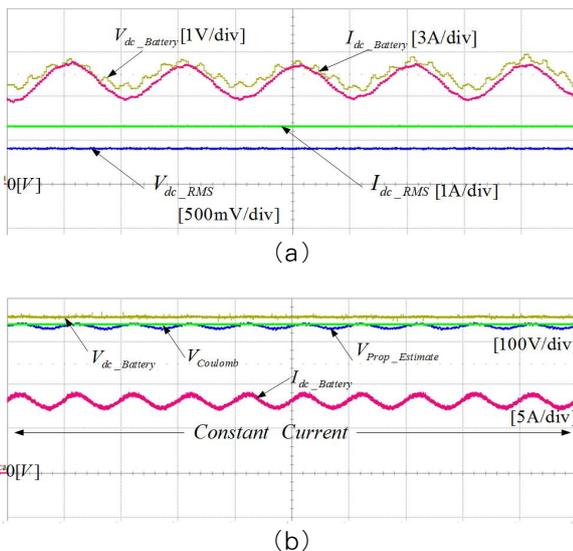


Fig. 9. Current and voltage waveforms by high frequency injection method of battery
 (a) Injected high frequency current and voltage
 (b) Output voltage and SOC estimation by current of battery

그림 9는 배터리 SOC를 추정한 실험 파형이다. 배터리 SOC의 실시간 추정을 위해, 컨버터 출력 전류에 고주파를 주입하여 이에 대한 배터리 전압응답을 측

정하였다. 배터리의 분극 저항을 측정하기 위해 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 출력 전류 주파수는 10mHz에서 100mHz로 가변하였고 크기는 3Apk이다. 그림 9의 (a)를 살펴보면 배터리의 고주파 전류에 따른 전압 변동을 알 수 있다. 또한 고주파 응답에 대한 전압, 전류 실효치가 잘 추출되는 것을 알 수 있다. 한편 그림 9의 (b)를 살펴보면 고주파 전류 주입에 따른 추정 SOC($V_{Prop_Estimate}$)를 도시하였다. 제안된 추정 방법을 검증하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 SOC 추정 방법인 전류적산법으로 추정된 SOC($V_{Coulomb}$)와 비교하였다.

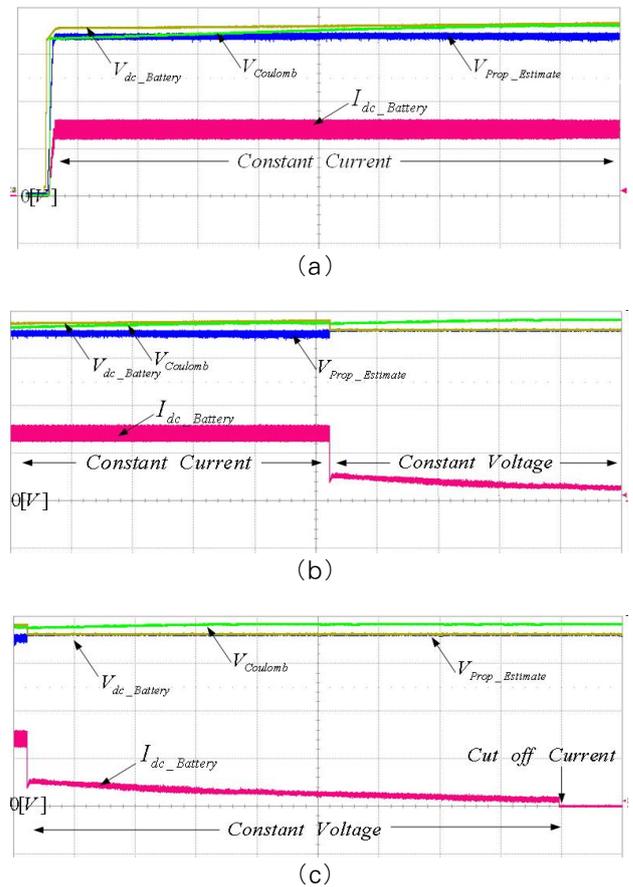


Fig. 10. Constant voltage and current control using proposed method
 (a) Section of constant current control
 (b) Transition section of CC-CV control
 (c) Cut-off region

그림 10은 제안된 방법에 따른 정전류-정전압 제어 실험 결과이다. 전류적산법에 의해 추정된 SOC의 경우 인가된 전류에 따른 전하량에 따라 전압이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 경우 온도나 기타 여러 가지 파라미터 변동 성분에 대한 오차를 반영하지 못해 누적오차가 발생됨을 알 수 있다. 또한, 전류적산법에 의해 추정된 SOC의 경우 단자전압과 비슷하여 정전류 제어 구간을 크게 늘리지 못하는 것을 알 수 있다. 하지만 제안된 방법으로 SOC를 추정하는 경우 기존 전류적산법보다 보다 더 정확한 SOC가 추정되는 것을 알 수 있으며 이로써 기존의 방법보다 빠른 배터리 충전이 가능함을 알 수 있다. 표 3은 충전완료 후 OCV에 대한 추정전압 오차를 나타내었다. 제안된 방법을 적용하였을 때, 단자전압 오차가 기존 전류적산법을 사용하였을 때보다 작음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 3상 AC-DC 승압형 컨버터를 사용하여 빠른 배터리 충전을 위해 새로운 SOC 추정방법을 이용한정전류-정전압제어방법에대해제안하였다. 기존의 복잡한 고주파 주입 기반의 SOC 추정 방법, 응답 전압의 크기에 대한 임피던스 차이를 추출하여 배터리 내부 저항을 추출하였으며, 일반적인 3상 AC-DC 승압형 컨버터의 백터제어 방법을 배터리 충전 방식에 맞게 변형하여 배터리를 충전하였다. 제안된 방법은 기존의 전류적산법과 실험을 통해 비교하였으며, 기존의 방법에 비해 배터리 충전시간을 단축시킬 수 있음을 증명하였다.

References

[1] Tetsuro Okoshi, Keizo Yamada, Tokiyoshi Hirasawa and Akihiko Emori, "Battery condition monitoring (BCM) technologies about lead-acid batteries," J. Power of Source, Vol. 158, No. 2, pp. 874-878, Aug. 2006.
 [2] Novie Ayub Windarko and Jaeho Choi, "SOC Estimation Based on OCV for NiMH Batteries Using an Improved Takacs Model," Journal of Power Electronics, Vol. 10, No. 2, pp. 181-186, Mar. 2010.

[3] Lalit P. Mandal and Robert W. Cox, "A Transient-Based Approach to Estimation of the Electrical Parameters of a Lead-Acid Battery Model," Energy Conversion and Exposition (ECCE), pp. 181-186, Mar. 2010.
 [4] Stephan Buller, Marc Thele and Rik W. A. De Doncker, "Impedance-Based Simulation Models of Supercapacitors and Li-Ion Batteries for Power Electronic Applications," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 3, pp. 742-747, May/June. 2005.
 [5] Dinh Vinh Do, Christophe Forgez, Khadija El Kadri Benkara and Guy Friedrich, "Impedance Observer for a Li-ion Battery Using Kalman Filter," IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 8, pp. 3930-3937, Sep. 2009.
 [6] Stephan Buller, Marc Thele, Eckhard Karden and Rik W. De Doncker, "Impedance-based non-linear dynamic battery modeling for automotive application," J. Power Source, Vol. 113, No. 2, pp. 422-430, Jan. 2003.
 [7] Martin Coleman, William Gerard Hurley and Chin Kwan Lee, "An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 23, No. 2, pp. 708-713, Apr. 2008.
 [8] Jin-Ho Park, Kyung-Min Kim, Jung-Hyo Lee and Chung-Yuen Won, "Reduction of DC-Link Voltage Ripple of Three-phase AC/DC Converter for Uninterruptible Power Supply by Applying Fuel Cell", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 24, No. 6, pp. 43-51, June 2010.

◆ 저자소개 ◆



이정효 (李禎孝)

1982년 9월 20일생. 2006년 건국대 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008~2013년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(박사). 2013년~현재 LG 이노텍 선임연구원.



원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년~현재 삼성전기 에너지과 연구 센터장. 현재 성균관대정보통신공학부 교수.