5kW급 계통연계형 단상 배터리 충전기의 구현 및 실험

안현성¹, 이우종¹, 문병호¹, 박일규¹, 정선용¹, 김영록[†], 차한주¹

Experiment of Single-phase Grid Connected Battery Charger

Hyun-Sung An¹, Wujong Lee¹, Byung-Ho Mun¹, Il-Kyu Park¹, Seon-Yong Jung¹,
Youngroc Kim[†], and Hanju Cha¹

Abstract – This paper explains control methods of single-phase grid connected battery charger. Charging mode is control by Constant Current - Constant Voltage method and discharging mode is controlled by active-reactive power control method. Current control method is based on the synchronous reference frame(SRF) PI controller, and the second harmonic of battery current is compensated by an added L-C resonant circuit. Feasibility of the proposed control methods is verified through experiment with a prototype of 5kW single-phase grid connected battery charger.

Keywords: grid connected battery charger, second harmonic ripple current, L-C resonant

1. 서 론

화석에너지에만 의존하였던 과거와 달리 신재생에너지에 대한 관심이 높아지며 풍력, 태양광 발전 등의 시스템에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 이에 따라 산업분야를 비롯하여 가정에서도 에너지에 대한 인식이 변화하고 있다. 수요자와 소비자 모두 에너지의 효율적인 이용과 고품질의 에너지를 공급 받기를 원하며, 이에 계통으로의 고품질의 에너지를 공급하기 위해 불규칙한 출력을 보상하는 3상과 단상의 배터리 에너지 저장장치(BESS)에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 3상 배터리 저장장치는 주로 대용량의 산업용으로 많이 사용되고 있으며 대규모의 풍력발전 또는 태양광 발전과 접목되어 사용되고 있으며, 반면에 단상 배터리 저장장치는 소용량의 가정용으로 주로 사용되고 있다. 배터리 저장장치는 산업용뿐만 아니라 가정용까지 다양하게 사용되고 있어 효율적인 에너지 사용을 위한 배터리 충전기의 성능을 비롯하여 에너지 저장장치인 대용량의 배터리 뱅크와 소용량의 배터리에 대한 연구도 활발히 진행되어진다. 세부적으로 시스템의 효율, 계통전류의 왜곡보

상, 배터리의 충전-방전 시 발생하는 리플전류 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 이 중에 저장장치로 사용되는 배터리의 특성을 고려하여^[1] 배터리 충전-방전 전류의 리플 성분에 대한 보상이 적절하게 이루어져야 한다. 3상 시스템은 오프셋 에러와 데드타임에 의해 배터리 충전-방전 전류에 리플 성분이 발생하며, 단상 시스템에서는 계통 측의 전압과 전류에 의해 배터리의 120Hz의 리플전류가 필연적으로 발생한다^{[2]-[3]}. 기존의 배터리 저장장치 시스템은 3상과 단상 모두 인버터와 DC-DC 컨버터의 연계를 통한 시스템 구현을 통해 에너지의 높은 효율과 배터리 리플전류 감소를 위해 연구되어져 왔다^[4]. 하지만 DC-DC 컨버터 시스템의 추가에 따라서 배터리 저장장치의 시스템이 커지는 문제점과 DC-DC 컨버터에서 발생하는 손실에 의해 효율이 저하되는 이유로 다른 방법이 제안되어졌다^{[5]-[6]}. 그 중 제안된 방법으로 배터리 뱅크와 계통연계형 인버터만으로 이루어진 구조로 연구되고 있다. 본 논문에서는 배터리와 계통연계형 단상 인버터만의 구조로 단상 배터리 충전기를 구현하고 실험을 통해 충전-방전 성능을 확인하며, 단상 충전기 시스템에 적용한 제어기법들과 앞서 설명한 단상 배터리 충전기에서 필연적으로 발생하는 120Hz성분에 대해 설명한다.

2. 계통연계형 단상 배터리 충전기

그림 1은 본 논문에서 구현한 계통연계형 단상 충전

Paper number: TKPE-2013-18-1-10 ISSN: 1229-2214
† Corresponding author: youngroc.kim@gmail.com, Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7006

¹ Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University
Manuscript received Oct. 15, 2012; accepted Dec. 7, 2012

— 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 우수추진논문임

기의 블록도이며, 구성은 크게 배터리, 단상 인버터, L-C필터, 변압기 부분으로 나누어진다. 배터리를 에너지 저장장치로 사용하였으며, 단상인버터는 제어기와 게이트 드라이버, IGBT로 구성되어 배터리 충전기의 충전-방전에 필요한 제어를 하게 되고 L-C필터를 사용하여 계통에 공급되는 전류의 리플성분을 제거한다.

본 논문에서 사용된 에너지 저장장치인 배터리의 방전특성곡선을 그림 2에서 볼 수 있다. 배터리에 부하를 연결하여 일정한 전류로 방전을 하게 되면 초기에는 급격히 배터리 단자 전압이 떨어진다. 이 영역을 exponential 영역이라 하며, 그 이후에는 배터리 단자전압은 천천히 떨어지는데 이 영역을 nominal 영역이라 한다. 이 영역이 실제로 배터리의 동작영역이고, 이 동작영역 이하로 방전을 하면 배터리의 특성이 나빠져 수명이 줄어들게 된다. 본 연구에서 사용된 배터리 모델은 내부저항, 분극저항, 분극전압으로 SOC(State of Charge)의 함수로 표현된다. 그림 3의 배터리 모델은 전기회로 모델로 간단하며 널리 사용하고 있으며, 전극과 용액계면에 일어나는 현상을 R , C 로 표현한다. 모델의 파라미터는 실험을 통해 구할 수 있으며, 스텝 함수의 전류를 방전시켜서 전압의 변화를 통해 각 파라미터를 구한다. 개로전압(OCV)과 SOC는 서로 선형관계이며, 방전 초기에는 커패시턴스 성분에 의해 단락되어 저항 R_i 만 보이게 된다. 정상상태에서 커패시턴스는 개방된 것으로 볼 수 있으므로 R_p 성분을 알 수 있게 되며, 식 (1)에서 시정수(τ)와 R_p 의 관계를 통해 C_p 계산할 수 있다.

$$V_t = V_{OC} - i \times (R_i + R_p \times (1 - e^{-\frac{-t}{\tau}})), \quad \tau = R_p C_p \quad (1)$$

Fig. 1 Structure of single-phase grid connected battery charger

Fig. 2 Characteristic of battery discharging curve

Table 1 Battery experiment parameter

Battery model	ES24-12	
Number of battery	22EA(seies)	
Battery Paameter	R_i	0.948Ω
	R_p	0.00368Ω
	C_p	$15.957F$

3. 계통연계형 단상 인버터 제어기법

본 절에서는 단상 인버터의 충전-방전의 수행을 위해 d-q동기 좌표 변환을 비롯하여 기본적으로 단상충전기의 기본제어 기법과 충전모드와 방전모드를 수행하기 위한 정전압-정전류 제어와 유효-무효 전력 제어에 대해 서술한다.

3.1 가상 d-q 동기좌표변환

단상, 3상 시스템 모두 실제 계통에서의 전류 및 전압의 값이 교류적으로 변하기에 제어함에 있어서 어려움이 있다. 따라서 계통 측에서의 값을 직류의 형태로 변환시켜 제어 과정에 있어서 빠르고 정확하게 제어하는 방법이 요구된다. 본 논문에서의 단상 충전기 구현에서는 계통전압에서 읽은 값을 정지좌표계로 설정하고 이를 회전좌표계로 변환하였으며, 전 대역필터(APF)를 통해 d-q축에 대한 위상차를 만들어 좌표변환을 하였다. 그림 4에서 그 과정을 보여주며, 좌표변환에 대한 결과는 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta} \\ -\sin\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ -V_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

Fig. 3 Battery modeling

Fig. 4 Structure of synchronous reference frame

4. 배터리 전류의 리플 성분

본 논문의 단상 충전기에서는 계통과 연계 되어 있어 배터리 측에서 2고조파 성분이 나타나게 된다. 이러한 배터리 측에서 발생하는 고조파 성분은 배터리를 충전-방전에 있어 배터리의 수명이 짧아지는 원인을 제공하게 된다. 수식적으로나 시뮬레이션 및 실험을 통해서도 배터리 측의 2고조파 성분을 확인 할 수 있다.

4.1 배터리 전류의 2고조파

계통연계형 단상충전기는 수식을 통해서도 배터리 측의 2고조파 성분을 확인 할 수 있다. 식(12)부터 식(15)를 통해 배터리 측의 전류에서 2고조파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 식(16)의 I_{DC} 는 배터리 입력전류의 직류 성분을 나타내며, 식(17)의 i_{ac} 는 교류 성분 즉, 2고조파의 성분을 보여준다. Φ 는 계통 측의 전압과 전류의 위상차를 나타낸다.

$$v_o = \sqrt{2} V_o \sin \omega t \quad (12)$$

$$i_o = \sqrt{2} I_o \sin(\omega t - \Phi) \quad (13)$$

$$p_o = v_o i_o = P_o + p_{ac} \quad (14)$$

$$i_{DC} = \frac{p_o}{V_{DC}} = I_{DC} + i_{ac} \quad (15)$$

$$I_{DC} = \frac{V_o I_o}{V_{DC}} \cos \Phi \quad (16)$$

$$i_{ac} = -\frac{V_o I_o}{V_{DC}} \cos(2\omega t - \Phi) \quad (17)$$

4.2 L-C 공진회로 구성

2고조파를 감소시키기 위해 L-C 공진주파수를 120Hz에 맞춰 배터리와 DC Link사이에 L-C 병렬 회로를 직렬로 연결하여 2고조파 감소가 얼마나 되는지 확인을 하였다. 그림 9는 L-C 공진회로를 추가한 단상 충전기의 블록도를 보여주며, 식(18)을 통해 공진주파수를 구할 수 있다.

$$f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_R C_R}} \quad (18)$$

Fig. 9 structure of L-C resonant circuit in sing-phase battery charger

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

3장에서 설명한 제어기법들을 토대로 시뮬레이션을 구현하여 단상 충전기에 대한 성능을 확인하였으며, 시뮬레이션을 토대로 실제 5kW급 계통연계형 단상 충전기를 구현하여 충전-방전의 성능을 확인하였으며, L-C 공진회로 추가에 따른 배터리 측의 2고조파 성분 감소에 대해서도 확인하였다.

5.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 Psim을 통해 구현하였으며, 실제 프로토타입으로 실험을 하기 위해 모든 조건을 동일하게 하여 충전-방전을 비롯하여 기본적인 제어기법들을 1차적으로 확인하였다. 그림 10과 그림 11은 3kW 방전과 충전의 수행을 보여준다. 방전에서는 계통 측의 전압과 전류가 동상이며, 충전에서는 전압과 전류가 역상임을 통해 역율 1인 것을 생각 할 수 있다. 그림 12는 유효-무효전력제어를 확인 할 수 있다. 역율 1은 그림 10를 통해 확인 할 수 있으며, 그림 12는 역율이 0.4일 때를 보여준다. 두 위상차를 볼 때 계통전압이 전류에 비해 위상이 약 66°도 진상인 것을 볼 수 있으며, 이와 더불어 d-q축의 전류 값도 서로 반대로 작용하여 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 단상 충전기의 실험에 앞서 안정성과 충전-방전 성능을 확인하였다. 배터리 충전기의 충전과 방전 수행 중에 발생하는 배터리 리플전류를 줄이기 위해 L-C 공진회로를 그림 9와 같이 구성하여 프로토타입에 적용하기 전에 그 성능을 확인하였다.

Fig. 10 3kW Discharge simulation (a) grid voltage (b) grid current (c) d-axis current (d) q-axis current

Fig. 11 3kW Charge simulation (a) grid voltage (b) grid current (c) q-axis current (d) d-axis current

그림 13은 L-C 공진회로를 적용하기 전의 시뮬레이션 파형으로 배터리의 전류(a)에서 약 3.8A 크기를 가지는 2고조파 성분이 발생하는 것을 볼 수 있으며, DC Link의 전압에서도 약 3.5V의 2고조파가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 14는 L-C 공진회로를 적용한 후의 시뮬레이션 파형으로 배터리의 전류(a)에서 약 0.4A의 2고조파를 확인할 수 있으며, 두 비교를 통해 L-C 공진회로의 유무에 따른 배터리 리플전류의 감소 효과를 확인할 수 있다.

5.2 실험 결과

그림 15는 5kW급 계통연계형 단상 충전기의 프로토타입으로 인버터를 비롯하여 필터 그리고 변압기를 통해 단상 220V의 계통에 연계되었다. 마지막으로 배터리를 DC Link와 병렬로 연결함으로써 충전기에 대한 구현을 마쳤다. 필터는 L-C필터를 사용하였으며, L은 450 μ H, C는 50 μ F를 선정하여 사용하였다. 그리고 배터리 전류에서 발생하는 2고조파 전류를 감소시키기 위해

Fig. 12 Active-reactive power control simulation(PF=0.4)
(a) grid voltage (b) grid current (c) q-axis current (d) d-axis current

Fig. 13 Simulation without L-C resonant circuit (a) battery current (b) DC Link voltage

Fig. 14 Simulation with L-C resonant circuit (a) battery current (b) DC Link voltage

L-C 공진회로를 배터리와 DC Link 사이에 연결하였으며, L은 6mH로 C는 300 μ F로 선정하여 사용하였다.

3장에서 설명 내용을 토대로 시뮬레이션을 통해 충전기의 충전-방전을 확인하고 단상 충전기를 구현하여 충전-방전의 성능을 확인하였다. 그림 16는 3kW 충전수행을 보여주고 있으며, 그림 17는 3kW 방전수행을 보여준다. 파형을 통해 방전 시에는 계통의 전류와 전압이 동상을 이루는 것을 볼 수 있으며, 충전 시에는 계통의 전류와 전압이 역상을 이루는 것을 볼 수 있다. 실험 결과를 통해 시스템이 안정적으로 충전-방전을 수행하는 것을 확인하였으며, 각 파형을 통해 충전-방전의 성능을 확인할 수 있으며, 방전 시 계통 전류의 THD는 4.7%이며 충전 시에는 4.5%이다. 그림 18은 유효-무효전력 제어(역률 0.4)를 보여주며 시뮬레이션과 동일하게 계통 전압이 계통전류보다 약 66°도 진상인 것을 확인할 수 있다. 그림 19은 3kW방전 시 전류제어에 대한 파형으로 배터리 측의 전류와 전압을 보여주고 있으며, 배터리 전류에서 2고조파가 확연하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 20은 L-C 공진회로를 배터리와 DC Link 사이에 연결하고 실험한 파형이다. 2고조파의 감소 전과 후의 리플 크기를 비교해보면, 감소 전에는 3.96A로 큰 2고조파 성분을 확인하였으며, L-C 공진 회로 추가에 따른 감소 후를 보면 0.38A로 상당히 리플의 크기가 감소한 것을 볼 수 있다. 리플의 크기는 peak to peak로 나타내었다.

Fig. 15 Prototype of single-phase battery charger (a) battery charger (b) battery bank

Fig. 16 3kW charge current control (a) q-axis current (b) d-axis current (c) grid current (d) grid voltage

6. 결 론

본 논문에서는 5kW급 계통연계형 단상 충전기를 구현하기 위해 배터리에 대한 모델링을 진행하였으며, 시스

Fig. 17 3kW discharge current control (a) d-axis current (b) q-axis current (c) grid current (d) grid voltage

Fig. 18 Active-reactive power control(PF=0.4) (a) q-axis current (b) d-axis current (c) grid current (d) grid voltage

Fig. 19 3kW discharge battery current and DC Link voltage (a) battery current (b) DC Link voltage (c) grid current (d) grid voltage

Fig. 20 Battery current and DC Link voltage by L-C resonant circuit (a) battery current (b) DC Link voltage (c) grid current (d) grid voltage

템 제어에 사용된 제어기법을 서술하였다. 이를 토대로 시뮬레이션을 구현하여 충전-방전의 성능을 1차적으로 확인하였으며, 시뮬레이션에서의 안정성과 성능을 토대로 5kW급 단상충전기를 구현하고 실험하여 단상 충전기의 성능을 확인하였다. 더불어 L-C 공진회로를 추가로 구현하고 실험하여 배터리 전류의 2고조파 성분의 크기가 감소한 것을 확인하였다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 2012T100201669)

참 고 문 헌

- [1] O. Tremblay, L. A. Dessaint, and A. I. Dekkiche, "A generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," *VPPC 2007*, pp. 284-289, 9-12 Sept. 2007.
- [2] H. Li, k. Zhang, and H. Zhao, "Active DC-Link power filter for single phase PWM rectifiers," *International Conference Power Electronics and ECCE Asia(ICPE & ECCE)*, pp. 2920-2926, 2011.
- [3] B. P. McGrath and D. G. Holmes, "A Geneal Analytical Method for Calculating Inverte DC-Link Current Harmonics," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1851-1859, 2009.
- [4] W. Lee, B. Han, and H. Cha, "Battery ripple current reduction in a three-phase interleaved dc-dc converter for 5kW battery charger," *IEEE ECCE*, pp. 3535-3540, 2011.
- [5] X. Guo. Q. Zhao, and W. Wu, "A Single-Phase Grid-Connected Inverter System With Zero Steady-State Error," *IPEMC*, pp. 1-5, 2006.
- [6] J. Selvaraj, N. A. Rahim, and C. Krismadinata, "Digital PI current control for grid connected PV inverter," *ICIEA*, pp. 742-746, 2008.

안현성(安賢聖)

1985년 1월 25일생. 2010년 충북대 물리학과 졸업. 2011년 9월~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.

이우종(李雨鐘)

1983년 10월 27일생. 2009년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

문병호(文炳鎬)

1987년 3월 31일생. 2012년 건양대 전자정보공학과 졸업. 2012년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.

박일규(朴日圭)

1987년 2월 25일생. 2012년 충북대 물리학과 졸업. 2012년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.

정선웅(鄭善龍)

1980년 7월 23일생. 2006년 한밭대 전자공학과 졸업. 2012년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정.

김영록(金榮綠)

1991년 충남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1993년~1998년 LG산전 연구소, 2001년~현재 헥스파워시스템(주) 연구소장.

차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2005년~현재 충남대 전기공학과 부교수. 당 학회 총무이사.