

# 3상 계통연계형 배터리 충전기의 전류리플 분석 및 보상

이우종, 김영록, 차한주  
충남대학교

## Analysis and Compensation of Battery Ripple Current in Three-phase Grid Connected Battery Charger

Wujong Lee, Youngrok Kim, Hanju Cha  
Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 3상 계통연계형 배터리 충전기의 전류리플 발생 원인을 분석하고 보상을 위한 기법을 제안한다. 배터리 전류리플의 요소로는 전류 측정 시 발생하는 오차와 테드타입에 의해 각각 기본파, 2고조파, 6고조파 성분이 발생한다. 배터리 전류의 리플 성분은 배터리 수명을 저하시키는 요소 중 하나로 리플 성분을 보상하여 그 크기를 줄이는 알고리즘이 필요하다. 배터리 전류 리플 성분의 발생은 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였고, 공진형 전류제어기를 사용하여 특정 고조파에 해당하는 리플 성분을 보상하여 배터리 전류의 리플을 보상하는 알고리즘을 적용하여 배터리의 리플 성분이 감소함을 확인하였다.

### 1. 서론

현재 환경과 에너지 공급에 대한 우려에 의해 그린 에너지를 기반으로 전기를 공급하는 연구가 진행되고 있다. 풍력과 태양광 발전은 신재생에너지로 급격하게 성장하고 있지만, 불규칙한 출력이 발생하기에 이러한 불규칙한 출력을 무시할 수 없는 이상 전력 시스템 안정화를 목표로 배터리 에너지 저장장치를 사용한다. 배터리를 사용함에 따라 배터리의 수명을 고려하는데, 배터리 수명은 온도, 전류리플, 과충전에 영향을 받는다.

배터리 전류는 AC 측의 동기좌표변환 결과에서 q축 전류의 영향을 받으며, q축 전류에서 AC 성분은 시스템 구동 시 계통 전류의 윗셋 에러, 스케일 에러, 테드타입 효과에 의해 발생한다[1][2].

본 논문에서는 각각의 고조파 성분이 배터리 전류에 미치는 영향을 분석하고, 이에 발생하는 리플성분을 보상하여 배터리 전류 리플이 감소함을 실험을 통해 증명하였다.

### 2. 배터리 전류

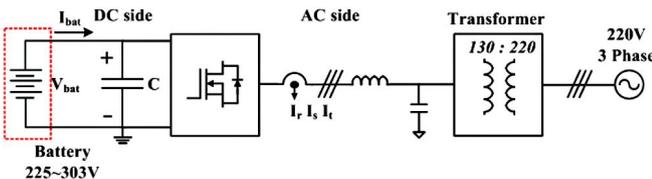


그림 1 계통연계형 배터리 에너지 저장장치  
Fig 1 Grid connected battery energy storage system

그림 1은 계통연계형 배터리 에너지 저장장치의 구성도이다.

배터리 에너지 저장장치는 Li ion 배터리, 계통연계형 인버터로 구성되어 있고, 효율 상상을 위해 dc dc 컨버터는 적용하지 않았다. 식 (1)은 DC측과 AC측의 정격전력을 구하는 공식을 나타낸다.

$$P_{dc} = V_{bat} \cdot I_{bat} \quad (1)$$

$$P_{ac} = \frac{3}{2} (V_{dc} \cdot I_{dc} + V_{qe} \cdot I_{qe}) \quad (2)$$

배터리의 전력은 식 (1)과 같이 표현한다. DC측과 AC측의 전력이 같다면, 식 (1)과 (2)는 식 (3)과 같이 표현된다. 동기좌표변환하면  $V_{dc}$ 는 0이 되고,  $V_{qe}$ 가 dc값이라면 배터리 전류의 리플성분은  $I_{qe}$ 의 리플성분에 의해 결정된다.

$$I_{bat} = \frac{1.5 \times V_{qe}}{V_{bat}} \cdot I_{qe} = K_{bat} \cdot I_{qe} \quad (3)$$

### 3. 배터리 전류의 리플 성분 분석

배터리 전류의 리플은 3상 AC 전류에 의해 기본파 성분, 2고조파 성분이 발생하고, 테드타입에 의해 6고조파 성분이 발생한다.

#### 3.1 기본파와 2고조파 리플성분

계통전류는 전류센서를 통해 측정되고, 아날로그 값이 디지털로 변환되어 DSP로 입력된다. 이때 전류센서의 불균형과 전류계산과정에서의 오차가 발생한다.

$I_r, I_s, I_t$ 는 실제 계통전류,  $I_{r\_AD}, I_{s\_AD}, I_{t\_AD}$ 는 측정된 계통전류,  $\Delta I_r, \Delta I_s, \Delta I_t$ 는 윗셋에러,  $K_r, K_s$ 는 실제 스케일값이다.

각 상 전류의 오차에 의해 배터리 전류에 미치는 영향은 식 (4), (5)와 같다.

$$\Delta I_{bat} = \frac{2 \cdot K_{bat}}{\sqrt{3}} \sqrt{\Delta I_r^2 + \Delta I_r \Delta I_s + \Delta I_s^2} \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

$$\therefore \alpha = \tan^{-1} \left( -\frac{\sqrt{3} \Delta I_r}{\Delta I_r + 2 \Delta I_s} \right)$$

$$I_{bat} = K_{bat} \cdot \left( \frac{K_s - K_r}{\sqrt{3}} I \sin \left( 2\omega t + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{K_r + K_s}{2} I \right) \quad (5)$$

계통전류 측정 과정에서 식 (4),(5)와 같이 계통의 기본파주수와 2고조파 성분으로 진동하며 전류리플을 발생시킨다.

#### 3.2 테드타입에 의한 6고조파 리플성분

계통연계형 인버터를 구동할 때 상하 두 스위치의 동시 턴온을 피하기 위해 테드타입을 적용하며, 이 테드타입에 의해 제어 성능 저하 및 출력 전압 왜곡이 발생한다. 테드타입에 의

해 발생하는 배터리 전류리플 성분은 식 (6)과 같다.

$$\Delta I_{bat} = K_{bat} \frac{4\Delta V}{\pi Z} \left( \frac{2}{35} \cos(6\omega t) - 1 \right) \quad (6)$$

$$\therefore \Delta V = \frac{T_d + t_{on} - T_{off}}{T_s} Z, Z: \text{filter impedance}$$

데드타임에 의해 배터리 전류에서는 식 (6)에서와 같이 6고조파 성분으로 진동한다.

#### 4. 배터리 전류리플 성분 보상

##### 4.1 기본과 리플 성분 보상

웁셋 에러는 하드웨어에서 필수적으로 발생하기에 DSP 제어 루틴 내부적으로 오차를 계산하여 보상하도록 한다. 그림 2는 웁셋 에러를 보상하는 루틴이다. 초기 시스템 구동 시 웁셋 에러를 연산하여 그 오차를 A/D 변환 부분에 대입하여 오차를 없애는 방법이다.

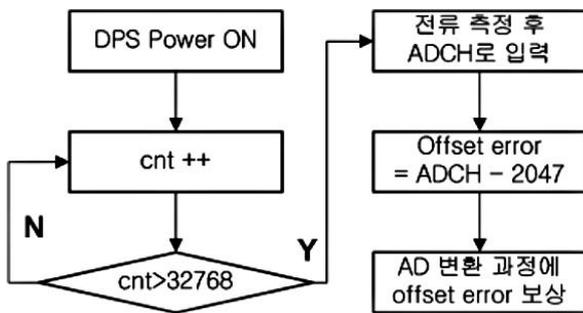


그림 2 웁셋 에러 보상 순서도  
Fig 2 Flowchart of offset error compensation

##### 4.2 2고조파, 6고조파 리플 성분 보상

배터리 전류에 생기는 리플은 120Hz, 360Hz 성분으로 특정 주파수에서 진동한다. 특정 주파수 성분을 보상하는 방법으로 공진형 제어기를 적용하여 리플 성분을 보상한다. 공진형 제어기는 식 (7)과 같은 전달함수를 갖는다.

$$G_r(s) = \frac{K_r s}{s^2 + (n\omega_o)^2} \quad (7)$$

( $K_r$ :제어기게인,  $\omega_o$ :계통주파수,  $n$ :고조파 차수)

그림 3은 전류 제어를 수행하는 PI 제어기에 2고조파와 6고조파 성분을 보상하는 공진형 제어기를 추가하여 PWM 명령치를 만들어주는 과정을 보여준다.

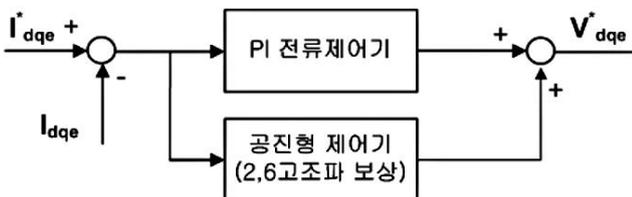


그림 3 공진형 제어기 보상 알고리즘  
Fig 3 Compensation algorithm of resonant controller

#### 5. 실험 결과

3상 전류 측정에서 발생하는 오차와 데드타임 기법으로 인해 배터리 전류 리플에 미치는 영향을 확인하고, 보상 방법을 적용하여 리플 성분이 감소하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 실험조건은 3kW 방전으로 LCL 필터를 사용하였다. 그림 4는 고조파 성분을 보상하지 않은 상태의 파형이고, 그림 5는 고조

파 성분을 보상하는 기법을 적용한 파형이다. 그림 4 (a)와 5 (a)는 실험파형이고, 그림 4 (b)와 5 (b)는 배터리 전류의 각 고조파 성분을 보여준다.

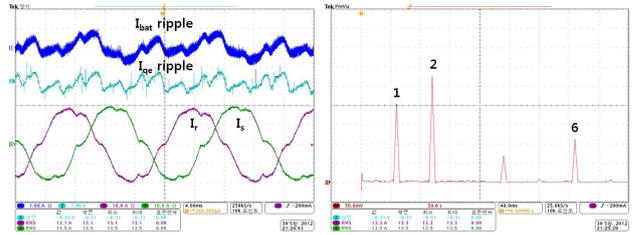


그림 4 보상기법 적용 전 3kW 방전 파형  
Fig 4 3kW discharge before compensation

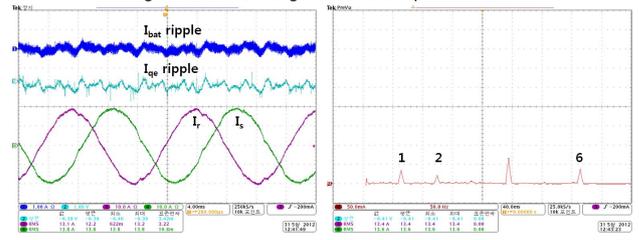


그림 5 보상기법 적용 후 3kW 방전 파형  
Fig 4 3kW discharge after compensation

보상기법 적용전과 후의 결과를 표 1에 나타내었다. 배터리 전류리플은 1.8A에서 0.8A로 감소하였다. 이는 배터리 전류의 FFT를 확인하였을 때 확연히 감소함을 보여주며, 데드타임 보상을 통해 영전류에서의 왜곡된 부분을 보상함에 따라 전류 THD도 감소함을 확인하였다.

표1. 보상기법 적용 전과 후 실험 결과

		보상 전	보상 후
$I_{bat}$ ripple (p p)		1.8A	0.8A
$I_{bat}$ FFT	기본과	200mA	35mA
	2고조파	270mA	22mA
	6고조파	110mA	38mA
전류 THD		8.4%	3.2%

#### 6. 결 론

본 논문에서는 배터리 전류에 리플 성분이 생기는 원인에 대하여 분석하고 보상하였다. A/D 변환으로 전류를 측정하는 과정에서 오차에 의해 기본과, 2고조파 성분이 배터리 전류로 유입되어 리플 성분이 발생하고, 데드타임 기법이 적용됨에 따라 6고조파 성분이 발생함을 확인하였다. 웁셋 에러를 보상하여 기본과 성분을 감소시키고, 공진형 제어기를 적용하여 2고조파, 6고조파 성분을 보상하여 그 크기를 감소시켰다. 또한 AC 전류 THD의 경우 3kW 방전일 때 8.4%에서 3.2%로 크게 감소하였다. 따라서 제안한 배터리 전류 리플성분 보상기법의 타당함을 증명하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Seung Ho Song, Jong Woo Choi, Seung Ki Sul, "Current measurements in digitally controlled ac drives" IAM, IEEE, pp 51 62, Aug. 2000.
- [2] Sang Hyup Han, Jong Hyoung Park, Heung Geun Kim, Honnyong Cha, Tea Won Chun, Eui Cheol Nho, "Dead time compensation of grid connected inverter using resonant controller" KIPE, pp 569 576, Dec. 2011.