

# 단상 AC Line 호환형 대용량 전원 장치 구현 방안

김병석<sup>1</sup>, 강경수<sup>2</sup>, 노정욱<sup>†</sup>

## Universal Single-Phase Line Compatible High Power AC/DC Converter

Byeong-Seok Kim<sup>1</sup>, Kyung-Soo Kang<sup>2</sup>, and Chung-Wook Roh<sup>†</sup>

### Abstract

A conventional single-phase high-power system typically generates a large AC line input current at universal 90 VAC condition. Sometimes, this phenomenon can block the Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB), which causes problems. Replacing power facilities is essential to ensure smooth operations. Thus, this paper proposes a method that can drive higher power than the limit of conventional power facilities. The proposed method can reduce the large AC line input current by limiting the input power of Power Factor Correction (PFC). An additional battery circuit can supplement the power deficiency. Specifically, a bidirectional converter with charging and discharging functions was adopted for the battery circuit. Finally, the validity of the proposed system could be confirmed by modal analysis and simulation, and an experiment in 2 KW condition was implemented with a prototype sample as well.

**Key words:** PFC(Power Factor Correction), Power limit, Bi-directional converter, Power system

### 1. 서 론

최근 개별 장비의 집적화와 모듈화 그리고 급속 냉·난방 및 가열, 충전 기술들이 주목 받으면서 가전제품, 의료기기, 전기차 충전기와 같은 상용 전원을 입력으로 하는 장비들의 사용 전력이 높아지고 있다.

그림 1은 기존 전원 장치들의 일반적인 회로 구성을 나타낸 블록도이다. 상용 전원을 입력으로 하는 장비는 고조파 규제를 만족하기 위해 입력 단에 역률개선회로(Power Factor Correction : PFC)를 사용하고 있다.<sup>[1]-[3]</sup>

이 때, 대용량의 전력을 운용하는 만큼 역률개선회로(PFC)의 입력 전류가 커지면서, 기존 전력 설비 용량이 부족한 문제(가정용 전력 설비 용량 입력 전류 기준 16Arms)가 발생하고 있다. 특히, 상용 전원 호환형 제품의 경우 AC 입력 전압이 110V<sub>ac</sub> 인 지역의 입력 전류

가 220V<sub>ac</sub> 인 곳에 비해 2배 이상 크기 때문에 가정용 전기 설비로는 용량(16A<sub>rms</sub>)이 부족한 경우가 발생하여 전력 설비 교체가 불가피한 상황이다.

따라서 기존의 전력 설비를 그대로 이용하면서 상기 문제를 해결하기 위해서는, 대용량 전력 운용 시에도 낮은 입력 전류를 가지면서 최대 출력 전력을 공급해 줄 수 있는 방안이 필요하다.

상기 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 역률개선회로에 전력 제한 기능을 구현하여 AC Line 입력 전류를 일정 전류 이하로 제한하면서, 부족한 출력 전력을 배터리 보조회로로 보충하는 새로운 전원 시스템을 제안한다.

제안된 전원 시스템은 역률개선회로의 입력 전류는 낮추면서 최대 출력을 보장할 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 단상 AC 전원의 허용 전류 한계를 넘는 터보 출력 구동을 할 수 있는 방안이 된다.

역률개선회로의 전력 제한 기능 원리와 부족한 출력 전력을 보충해줄 수 있는 배터리 보조회로의 구성 및 동작 원리에 대해 설명한다. 제안된 시스템의 타당성 검증 위해 모의실험을 수행하였고, 2kW 급 시제품을 실제 제작하여 실험을 하였다.

### 2. 제안된 전력 제한 역률개선회로와 배터리 보조회로 연계 전원 시스템

Paper number: TKPE-2015-20-4-1

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

<sup>†</sup> Corresponding author: dmo@kookmin.ac.kr, PESL, School of Electrical Eng., Kookmin University

Tel: +82-2-910-4947 Fax: +82-2-910-4449

<sup>1</sup> Hyundai Wia Co.

<sup>2</sup> PESL, Dept. of Electrical Eng., Kookmin University

Manuscript received Nov. 19, 2014; revised Jan. 21, 2015; accepted May 6, 2015

— 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

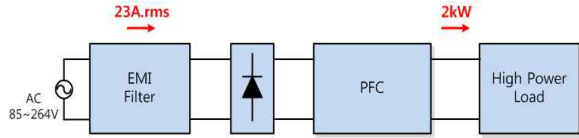


Fig. 1. Conventional high power system block.

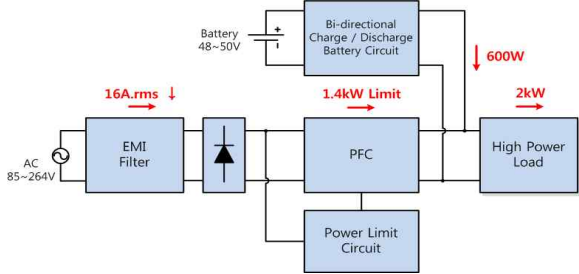


Fig. 2. Proposed high power system block.

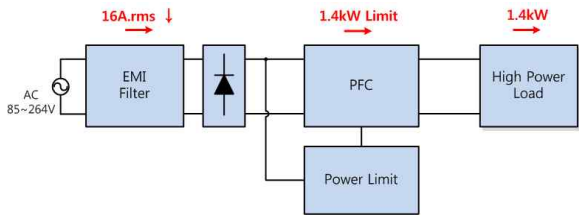


Fig. 3. The proposed power factor correction circuit block with power limit function.

그림 2는 제안된 전원 시스템의 블록도이다. 제안 회로는 전력 제한 기능을 갖는 역률개선회로와 배터리 보조 회로로 구성되어 있다.

제안된 전원 시스템은 역률개선회로의 전력 제한 기능을 통해 입력 전류를 일정 값 이하로 제한하며, 부족한 출력 전력은 배터리 보조회로를 통해 보충한다. 이를 통해, 역률개선회로의 입력 전류를 일정하게 유지한 상태로 최대 부하 출력을 가능하게 한다.

2.1 전력 제한 기능을 갖는 역률개선회로

그림 3은 제안된 전력 제한 역률개선회로의 구성 블록도이다. 기존 회로는 상용 전원 호환 형 제품으로서 단상 전원 전압이 90V<sub>ac</sub> 인 지역에서 최대 부하 동작 시, 220V<sub>ac</sub> 지역에서 보다 높은 입력 전류를 갖는 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해, 제안 회로에는 PFC의 입력 전류를 제한할 수 있는 전력 제한 기능을 추가하였다. 본 장에서 제안된 전력 제한 기능을 갖는 역률개선회로의 구성 및 동작 원리에 대해 설명한다.

2.1.1 전력 제한 역률개선회로의 구성

그림 4은 제안된 전력 제한 역률개선회로의 회로도이다. 제안 회로는 기존 회로와 동일하게 역률개선을 위한 회로로 부스트 컨버터와 상용 역률개선 제어 IC를 사용

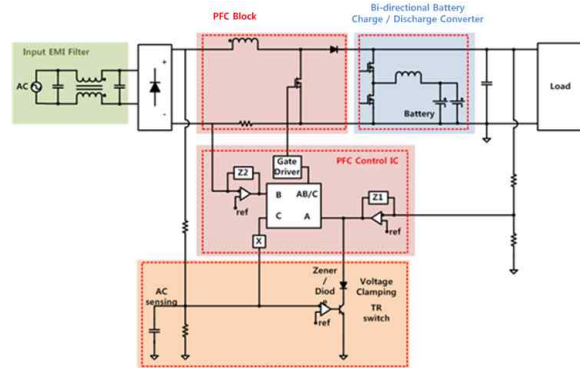


Fig. 4. Structure of the proposed power system with power limit function.

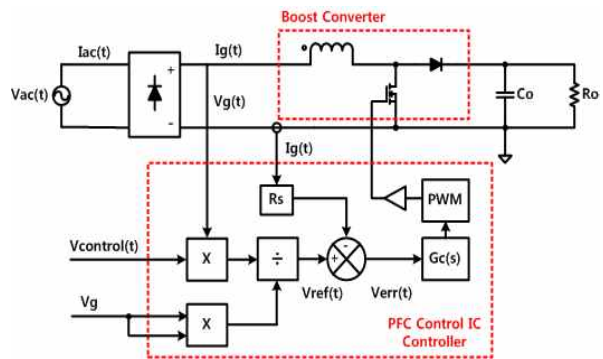


Fig. 5. The average current control block having an input voltage feed forward loop.

한다.<sup>[4]</sup> 전력 제한을 위해 TR 스위치와 제너 다이오드를 포함하는 Clamp 회로를 추가하였다.

AC 전압을 감지하여 전압이 낮을 경우 비교기를 통해 Clamp 회로의 TR이 도통되고, 상용 역률개선 제어 IC 내부의 전압 제어기 출력 V<sub>control</sub>이 제너 다이오드 전압 V<sub>z</sub>로 제한된다. V<sub>control</sub> 전압이 V<sub>z</sub>로 제한될 경우 전력 제한이 되는 원리를 다음 장에 설명한다.

2.1.2 역률개선회로의 전력 제한 기능 원리

그림 5는 역률개선회로의 입력 전압 Feed Forward 루프를 갖는 평균 전류 제어 블록도이다.<sup>[4],[6]</sup> 이를 통해, 출력 전압의 Feedback 전압인 V<sub>control</sub>과 입력 전압 V<sub>g</sub>(t)를 곱한 Feed Forward Gain에 입력 전압의 실효값을 연산한 V<sub>ref</sub>(t)에 대한 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$V_{ref}(t) = \frac{P_{av} V_g(t) R_s}{V_g^2} = \frac{k_v V_{control}(t) V_g(t)}{V_M^2} \quad (1)$$

위 식 (1)을 통해, Feedback 전압인 V<sub>control</sub> 전압과 PFC 입력 전력 P<sub>av</sub>에 관한 식 (2)를 유도할 수 있다.

$$P_{av} = \frac{k_v V_{control}(t)}{2R_s} \quad (2)$$

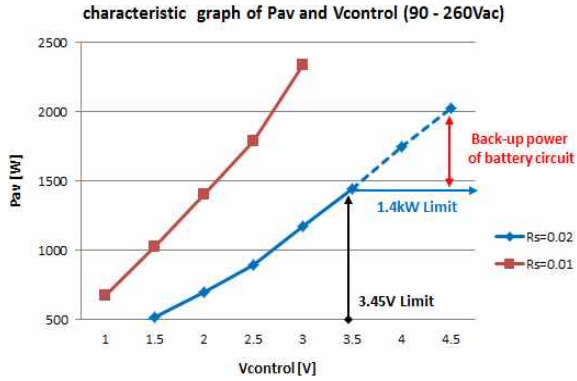


Fig. 6. Characteristic graph of  $P_{av}$  and  $V_{control}$ .

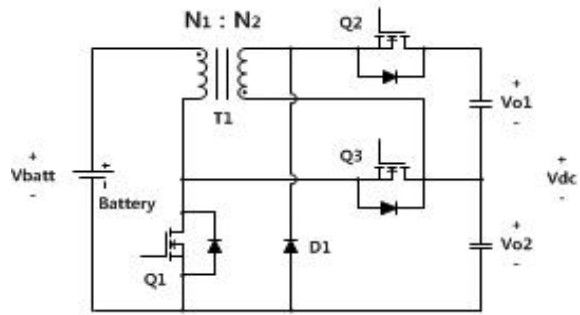
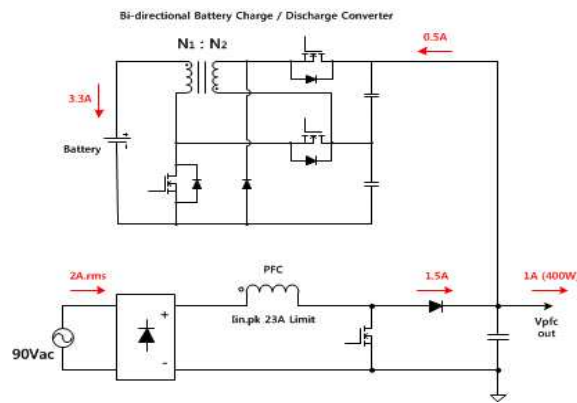
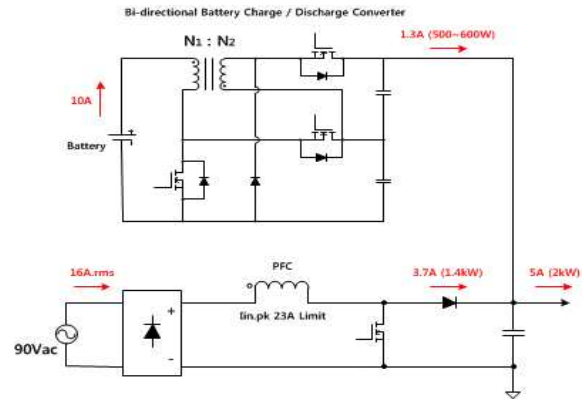


Fig. 7. Proposed bi-directional battery circuit.



(a) Charge mode of proposed battery circuit



(b) Discharge mode of proposed battery circuit

Fig. 8. Operation mode of proposed battery circuit.

최종 정리된 식 (2)를 통해 출력 전압의 Feedback 전압인  $V_{control}$  전압과 PFC 입력 전력  $P_{av}$ 가 비례 관계임을 알 수 있다. 또한, PFC 입력 전력  $P_{av}$ 는  $V_{control}$  전압에 의해 직접 제어되고 입력 전압  $V_g(t)$ 에 독립적인 것을 알 수 있다.

전류 검출 저항  $R_s$  값에 따른 PFC 입력 전력  $P_{av}$ 와 Feedback 출력  $V_{control}$  전압 사이의 관계를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯  $V_{control}$ 이 커질수록  $P_{av}$ 가 커지게 되며,  $V_{control}$ 을 3.45V로 제한한 경우 입력 전력은 1.4kW로 제한된다. 따라서  $V_{control}$ 을 일정 전압으로 제한하면 입력 전압  $V_g(t)$  값에 관계없이 PFC 입력 전력  $P_{av}$ 를 제한할 수 있다. 이 때, 제한된 전력 보다 큰 출력이 요구되면 부족한 전력을 배터리 보조회로를 통해 공급한다.

## 2.2 전력 백업을 위한 배터리 보조회로

본 배터리 보조회로는 PFC 회로의 전력 제한 동작으로 부족한 출력 전력을 보충해 주기 위해 사용한다.

### 2.2.1 전력 제한 역할개선회로의 구성

그림 7은 본 논문에서 사용한 배터리 보조회로의 전력 단 구성을 나타낸다. 제안된 회로는 배터리 충·방전을 위해 양방향 전력 변환이 가능하고, 부스트 컨버

터와 플라이백 컨버터가 결합된 형태로 기존 부스트 컨버터 방식 보다 높은 승압 변환이 가능하다.<sup>[7]-[9]</sup>

이에 따라 낮은 입력 전압으로 구동이 가능하여 입력으로 사용되는 배터리 사용 개수를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

### 2.2.2 배터리 보조회로 충·방전 시 동작 원리

배터리 보조회로는 전력 제한 PFC 회로와 연계 동작 시, 배터리 충전모드와 방전모드로 동작이 구분된다.

그림 8(a)는 대기모드 또는 PFC 회로의 입력 전력이 제한되지 않는 경우의 배터리 충전모드 동작을 나타낸 회로도이다. 이 때, 배터리 회로는 PFC 출력 전압을 입력으로 하는 벡 모드로 동작하여 배터리 전압을 충전한다. 배터리 충전 시 정 전류모드(Constant Current : CC)로 동작하여 충전 전류를 일정하게 제어하며, 배터리 완충 시에는 정 전압모드(Constant Voltage : CV)로 동작하여 배터리 전압을 일정하게 유지한다.<sup>[10]</sup>

그림 8(b)는 PFC 회로의 입력 전력이 제한된 경우에 부족한 출력 전력을 백업해주는 배터리 방전모드 동작을 나타낸 회로도이다. 이 때, 배터리 회로는 배터리 전압을 입력으로 하는 부스트 모드로 동작하여 부족한 출력 전력을 보충해 준다.

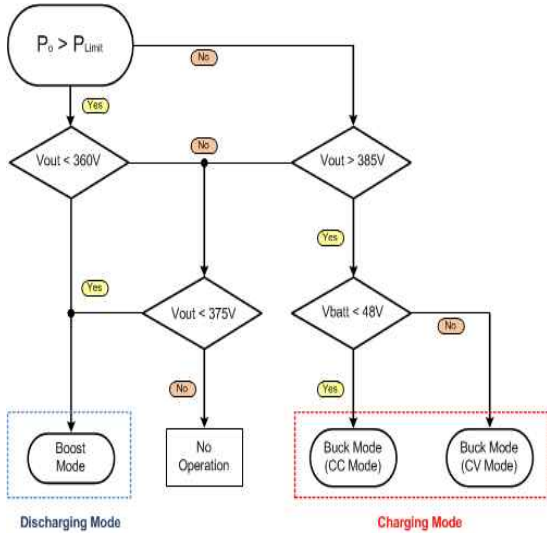


Fig. 9. Flow chart of proposed battery circuit for operation mode control.

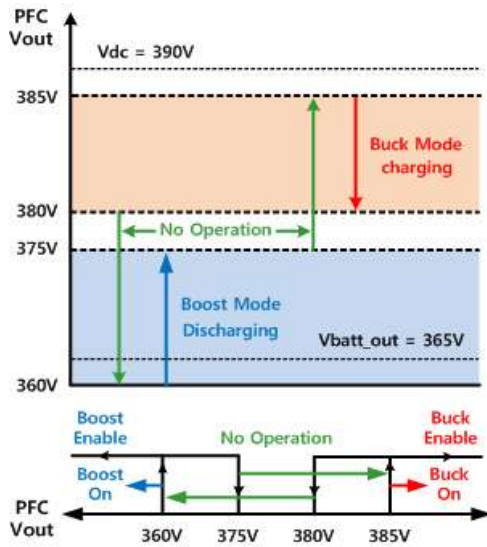


Fig. 10. Hysteresis control of proposed battery circuit by PFC output voltage.

제안된 전원 시스템에서 배터리 회로는 충전모드와 방전모드를 갖는다. 따라서 상황에 맞는 동작 모드 선택이 중요하다. 이를 위한 배터리 회로의 충·방전 모드 제어 방법을 그림 9과 그림 10을 통해 나타내었다.

배터리 회로의 충·방전모드 동작은 PFC 회로의 전력 제한 유·무 상태로 결정하며, 이는 PFC 출력 전압으로 판단할 수 있다.<sup>[11]</sup>

그림 10은 PFC 출력 전압에 따른 배터리 회로의 충·방전모드 제어방법을 나타내었다. 출력으로 요구되는 부하가 작은 경우, PFC 출력 전압을 390V로 제어한다. 이때 출력 전압이 385V 보다 큰 경우, 배터리 회로를 그림 8-a와 같은 벡 모드(충전모드)로 동작시킨다.  $V_{dc}$  전압이 380V 보다 낮아지면 벡 모드 동작을 중단한다.



Fig. 11. 2kW prototype of proposed power system.

TABLE I  
SIMULATION AND TEST CONDITION OF PROPOSED CIRCUIT UNDER THE 1.2kW RESISTIVE LOAD

Components	PFC Parameters	Battery Parameters
Input Voltage ( $V_{in}$ )	90V <sub>ac</sub>	48 - 50V <sub>dc</sub>
Output Voltage ( $V_o$ )	390V	365V
Maximum Output Power ( $P_{o,max}$ )	1.2kW	300W
Output Resistor ( $R_o$ )	130Ω	
Switching Frequency ( $f_s$ )	25kHz	
Feedback Clamping Voltage ( $V_{control}$ )	1.5V (800W)	-
Limited Output Power ( $P_{limit}$ )	800W	300W

출력으로 요구되는 부하가 큰 경우, PFC의 입력 전력 제한으로 인해 출력 전압은 줄어들게 된다. PFC 출력 전압이 360V 보다 낮아지면 배터리 회로를 그림 8-b와 같은 부스트 모드(방전모드)로 동작시키며, 배터리 회로의 출력 전압인 365V로 제어한다.  $V_{dc}$  전압이 375V 보다 큰 경우 부스트 모드 동작을 중단한다.

충·방전모드 전환 과정에서 배터리 회로 보호를 위해 동작을 하지 않는 모드 변환 구간(No Operation)을 설정하였다.

상기와 같은 충·방전모드 변경 방법을 통해 배터리 회로를 제어하였다.

### 3. 모의 해석 및 실험 결과

본 장에서는 제안한 전원 시스템의 동작을 확인하기 위해, 1.2kW 저항 부하 및 2kW X-ray 부하 조건하에서 PSIM 모의실험과 시작품 실험을 수행하였다. 그림 11에 2kW 급 전원 시작품 사진을 나타내었다. 이를 통해 제안한 전원 시스템의 우수성을 검증하였다.

#### 3.1 제안된 전원 시스템의 1.2kW 저항 부하 실험 결과

제안된 전원 시스템의 타당성을 검증하기 위해 표 1의 조건하에서 저항 부하 모의실험과 실험을 수행하였다. 제안 회로의 사양은 표 2와 같다.

TABLE II  
EXPERIMENTAL PARAMETERS OF PROPOSED CIRCUIT  
UNDER THE 1.2kW RESISTIVE LOAD CONDITION

Components	PFC Parameters	Battery Parameters
Magnetic Inductor ( $L_m, L_{boost}$ )	500uH	100uH
Core	MPP 2.5Φ Toroidal	EER 4042S
Number of Turn (N)	28T	35T
Turn Ratio n (1:n)	-	2.5
Input Capacitor ( $C_{in}$ )	-	5F / 50V
Output Capacitor ( $C_o$ )	1mF / 450V	
Current Sensing Resistor ( $R_s$ )	0.01 Ω	1 Ω (1A)
Control IC	UC3854	TL494
Battery Capacitor	-	5F (2.7V/100F*20ea)

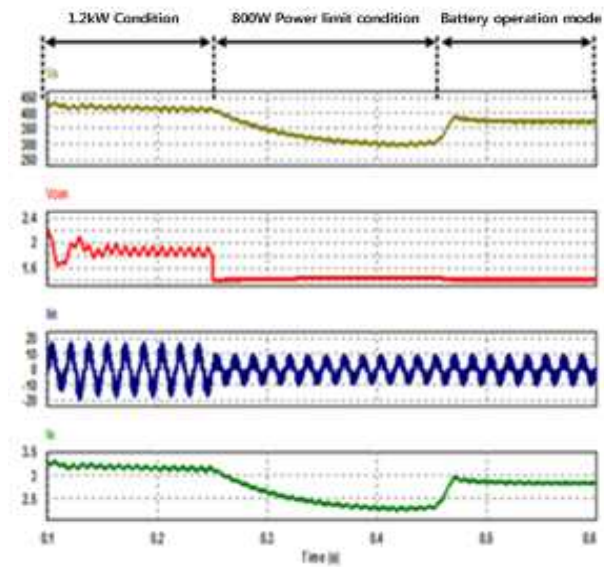
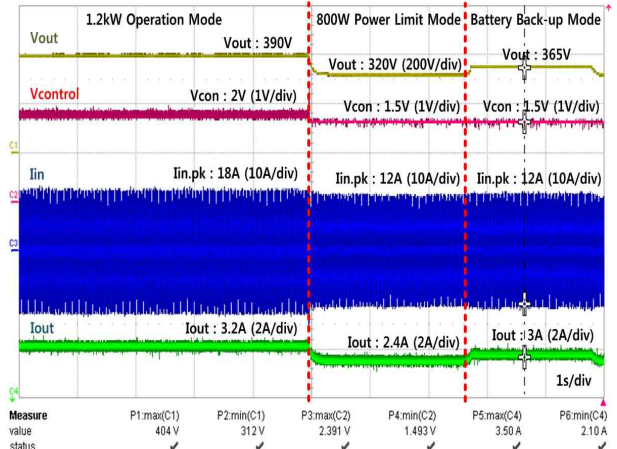


Fig. 12. Main waveform of simulation under the operation mode variation.

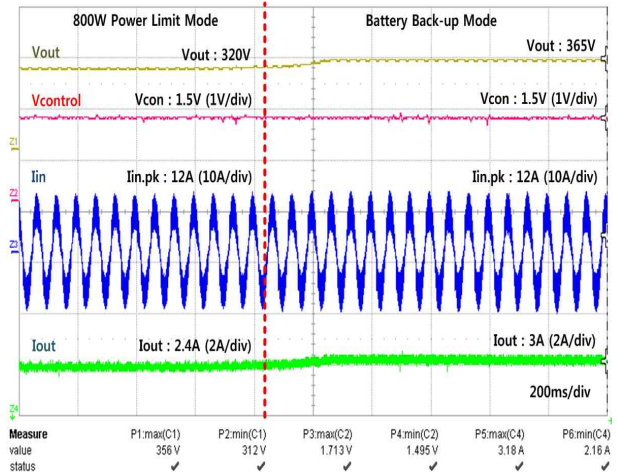
그림 12와 그림 13은 제안된 전원 시스템의 동작별 구간에 따른 모의실험과 실험 결과파형이다. 또한, 그림 13(a)는 제안 회로의 입력 전류( $I_{in}$ ), 출력 전압( $V_o$ ), 출력 전류( $I_o$ ) 및 Feedback 전압( $V_{control}$ )에 대한 전체 실험 파형이며, 그림 13(b)는 배터리 회로의 백업 시점의 확대 실험 파형이다.

모의실험과 실험 결과파형은 전력 제한 기능이 차단된 상태에서의 1.2kW 동작 구간과 800W로 전력이 제한된 구간, 그리고 배터리 보조회로의 전력 백업을 통해 300W 출력 전력이 보상된 구간으로 나뉜다.

두 파형 모두 1.2kW 동작 구간에서는  $V_{control}$  전압이 2V, 입력 전류 최대치( $I_{in,pk}$ )는 18A, 출력 전류( $I_o$ )는 3.2A 임을 알 수 있다.



(a) Experimental waveform under the operation mode variation



(b) Experimental waveform of power limit mode under the operation mode variation

Fig. 13. Key experimental waveform of 1.2kW resistive load condition under the operation mode variation.

이 후, 800W 전력 제한 구간에서는  $V_{control}$  전압이 2V(=1.2kW)에서 1.5V(=800W)로 제한되면서 출력 전압 ( $V_o$ )이 390V에서 320V로, 출력 전류 ( $I_o$ )는 3.2A에서 2.4A로 줄어들었다. 따라서 역률개선회로의 출력 전력 ( $P_o$ )이 1.2kW에서 800W로 제한되어 입력 전류 최대치 ( $I_{in,pk}$ ) 또한 12A로 낮아진 것을 볼 수 있다.

배터리 회로 백업 구간에서는 제한된 전력을 보상하기 위해 배터리 회로가 방전 동작하여 출력 전압 ( $V_o$ )이 320V에서 365V로, 출력 전류 ( $I_o$ )는 2.4A에서 3A로 올라 출력 전력 ( $P_o$ )이 약 300W 보상됨을 알 수 있다. 이 때, 역률개선회로의 입력 전류 최대치 ( $I_{in,pk}$ )는 12A로 계속 유지되는 것을 실험 파형을 통해 확인할 수 있다.

PFC 출력 전압 ( $V_o$ )이 320V에서 365V로, 출력 전류 ( $I_o$ )는 2.4A에서 3A로 올라 출력 전력 ( $P_o$ )이 약 300W

TABLE III  
TEST CONDITION OF PROPOSED CIRCUIT UNDER THE 2kW X-RAY LOAD

Components	PFC Parameters	Battery Parameters
Input Voltage ( $V_{in}$ )	90V <sub>ac</sub>	48 - 50V <sub>dc</sub>
Output Voltage ( $V_o$ )	390V	365V
Maximum Output Power ( $P_{o,max}$ )	2kW	400W
Output Resistor ( $R_o$ )	5A	
Switching Frequency ( $f_s$ )	25kHz	
Feedback Clamping Voltage ( $V_{control}$ )	3.45V (1.4kW)	-
Limited Output Power ( $P_{limit}$ )	1.4kW	400W

TABLE IV  
EXPERIMENTAL PARAMETERS OF PROPOSED CIRCUIT UNDER THE 2kW X-RAY LOAD CONDITION

Components	PFC Parameters	Battery Parameters
Magnetic Inductor ( $L_m, L_{boost}$ )	500uH	100uH
Core	MPP 2.5Φ Toroidal	EER 4042S
Number of Turn (N)	28T	35T
Turn Ratio n (1:n)	-	2.5
Input Capacitor ( $C_{in}$ )	-	5F / 50V
Output Capacitor ( $C_o$ )	1mF / 450V	
Current Sensing Resistor ( $R_s$ )	0.02Ω	0.3Ω (3.3A)
Control IC	UC3854	TL494
Battery Capacitor	-	5F (2.7V/100F*20ea)

보상됨을 알 수 있다. 이 때, 역률개선회로의 입력 전류 최대치 ( $I_{in,pk}$ )는 12A로 계속 유지되는 것을 실험 파형을 통해 확인할 수 있다.

모의실험과 실험 결과파형을 통해 제안된 전력 제한 역률개선회로와 배터리 보조회로의 연계 동작을 확인하였다. 또한, 출력 Feedback 전압 ( $V_{control}$ )을 조절하여 PFC 입력 전력 ( $P_{in}$ )을 제한할 수 있음을 확인하였고, 배터리 보조회로의 백업을 통해 입력 전류 ( $I_{in}$ )를 일정 이하로 유지하면서 출력 전력 ( $P_o$ )의 보상이 가능함을 증명하였다.

### 3.2 제안된 전원 시스템의 2kW X-ray 부하 연동 실험 결과

제안된 전원 시스템의 동작과 배터리 회로의 충·방전 동작이 실제 제품에 적용되는지를 검증하기 위해

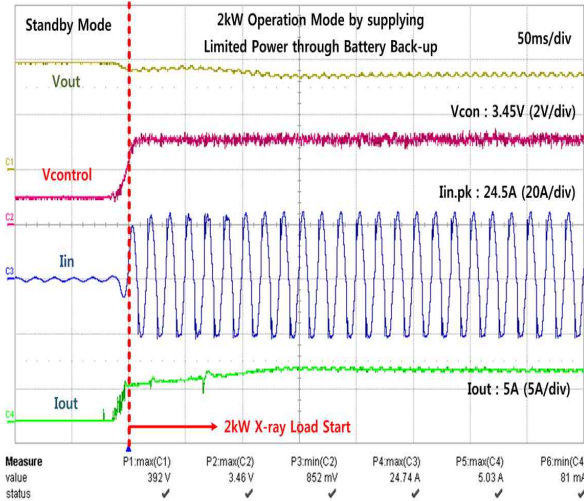


Fig. 14. Key experimental waveform of PFC circuit under the 2kW X-ray load condition.

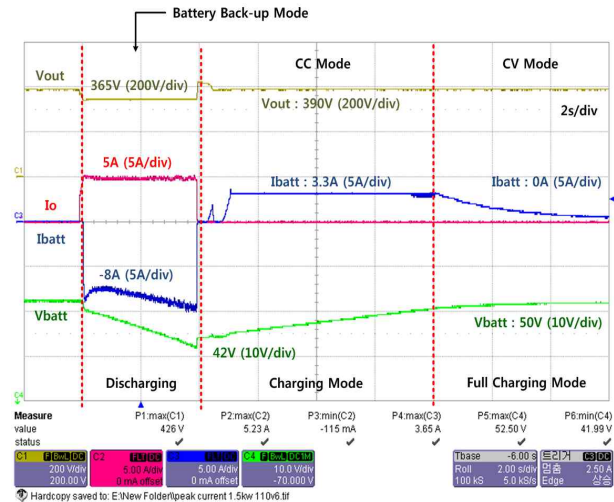


Fig. 15. Key experimental waveform of battery circuit under the 2kW X-ray load condition.

표 3의 조건하에서 X-ray 부하 실험을 수행하였다. 제안 회로의 사양은 표 4와 같다.

그림 14는 제안된 전원 시스템의 2kW X-ray 부하 구동 시, PFC 출력 전압, 전류, 입력 전류, 출력 Feedback 전압 실험 결과파형이다. 상기 실험은 PFC 회로의 입력 전류를 16A<sub>rms</sub> 이하로 유지하기 위해, 입력 전력을 1.4kW로 제한하여 수행하였다.

그림 14의 실험 결과파형을 보면,  $V_{control}$  전압은 3.45V, PFC 출력 전압은 365V, 입력 전류 최대치는 24.5A(=16A<sub>rms</sub>), 출력 전류는 5A 이다. PFC 입력 전력이 1.4kW로 제한된 상태에서 1.8kW의 전력이 출력되고 있음을 알 수 있다. 즉, 400W의 출력 전력이 배터리 회로에서 보충되고 있음을 예상할 수 있다.

그림 15는 배터리 회로의 X-ray 부하 출력 전력 백업 시, PFC 출력 전압, 전류 및 배터리 전압, 전류 실험 파형이다. 이 실험 파형을 통해 출력 전력 백업 구

간의 배터리 방전모드 동작과 대기모드 구간의 배터리 충전모드 동작을 확인할 수 있다.

우선, 대기 모드 구간에서 배터리 전압은 50V로 완충 되어 있어 전압을 일정하게 유지하는 CV 모드 동작을 하고 있다. 이 때, 배터리 전류는 0A 임을 알 수 있다.

2kW 급 X-ray 부하 출력 시, 배터리 회로 백업 구간에서는 역률개선회로의 입력 전력이 1.4kW로 제한되어 있기 때문에, 입력 전력과 출력 전력간의 불균형으로 PFC 출력 전압이 줄어들게 된다. 이 때, PFC 전압이 360V 보다 낮아지게 되면 배터리 회로는 방전모드로 동작하여 부족한 출력 전력을 보충해준다. 그림 16의 실험 파형을 보면, 배터리 전압이 50V에서 42V로 방전하며 방전 전류는 -8A 인 것을 확인하였다. 따라서 약 400W의 출력 전력을 보충해주고 있음을 알 수 있다.

배터리 전압 방전 후, 대기모드 구간에서는 충전모드로 동작한다. 이 구간에서는 방전된 배터리 전압의 충전을 위해 CC 모드로 제어하며, 충전 전류는 3.3A로 일정한 것을 알 수 있다.

이 후, 배터리 전압이 완충 된 CV 모드 구간에서는 50V로 전압을 일정하게 제어하며, 배터리 전류가 3.3A에서 0A로 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다.

상기 실험 결과를 통해 X-ray 부하를 연동한 경우에도 제안된 전원 시스템이 잘 동작되고 있음을 알 수 있다. 이를 바탕으로 제안 회로의 우수성을 검증하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 대용량 전원 회로에서 역률개선회로의 높은 입력 전류를 줄일 수 있는 전력 제한 기법을 제안한다. 또한 제한된 전력의 보상을 위해 배터리 충전 보조회로를 연계한 시스템을 제안한다.

제안된 전원 시스템은 동작 원리 분석과 PSIM 모의 실험을 통해 이론적 분석을 하였으며, 출력 용량 2kW의 시작품을 제작하여 1.2kW 저항 부하와 2kW X-ray 부하 실험을 하였다. 이를 통해,  $V_{control}$  전압을 이용한 역률개선회로의 입력 전력 제한 동작과 배터리 회로 연계 동작 성능을 확인하였다. 또한 출력 전력에 따른 전류 THD는 3.8%, 역률은 0.986로 확인하였다.

상기 결과를 바탕으로 대용량 전원 장치의 입력 전류를 낮추면서 최대 부하 출력을 보장할 수 있음을 검증하였다. 또한, 기존의 전원 장치의 허용 한계를 넘는 대용량 전력의 운용이 가능할 것으로 기대된다.

#### References

- [1] M. Madigan, R. Erickson, and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier-regulator," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, pp. 1043-1051, 1992.
- [2] R. Martinez and P. N. Enjeti, "A high-performance single-phase rectifier with input power factor correction," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 11, No. 2, pp. 311-317, Mar. 1996.
- [3] K. D. Gussemé, D. Van de Sype, A. Van den Bossche, and J. Melkebeek, "Input-current distortion of CCM boost PFC converters operated in DCM," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 54, No. 2, pp. 858-865, Apr. 2007.
- [4] C. Todd, "UC3854 Controlled power factor correction circuit design", *Application Note U-134*, Texas Instruments.
- [5] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, pp. 484-516, 2000.
- [6] L. Balogh, "UC3854A/B provide power limiting with sinusoidal input current for PFC front ends," *Unitrode Design Note DN-66*, Texas Instruments, Nov. 2001.
- [7] Y. M. Lee, B. S. Kim, and C. W. Roh, "Boosting two-way about battery charge and discharge circuit," *2014 KIFE Power Electronics Annual Conference*, pp. 423-424, July 2014.
- [8] T. J. Liang and K. C. Tseng, "Analysis of integrated boost-flyback step-up converter," *IEEE Proc. Electr. Power Applications*, Vol. 152, No. 2, pp. 217-225, Mar. 2005.
- [9] L. S. Yang and T. J. Liang, "Analysis and implementation of a novel bidirectional dc-dc converter," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 59, No. 1, pp. 422-434, Jan. 2012.
- [10] R. K. Singh, "A magnetically coupled feedback-clamped optimal bidirectional battery charger," *IEEE Trans. Industrial Electron.*, Vol. 60, No. 2, pp. 422-432, Feb. 2013.
- [11] J. Cao and A. Emadi, "A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 1, pp. 122-132, Jan. 2012.



### 김병석(金秉奭)

1988년 7월 29일생. 2013년 국민대 전자정보통신대학 전자공학부 졸업. 2015년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 2015년~현재 현대위아 제어설계팀 연구원.



### 강경수(姜景琇)

1988년 9월 9일생. 2013년 국민대 전자정보통신대학 전자공학부 졸업. 2015년 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.



### 노정욱(盧政煜)

1971년 9월 10일생. 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 2000년~2004년 삼성전자(주) 영상 디스플레이 사업부 책임연구원. 2004년~현재 국민대 전자정보통신공학부 교수. 미래창조과학부 대학 IT 인력 양성사업(ITRC) 에너지-ICT 융합 연구센터 센터장. 당 학회 편집위원.