

# 절연형 전류원 PFC 컨버터를 사용한 넓은 출력범위를 가지는 고효율 OBC에 대한 연구

김 형 식\*, 김 희 준\*\*, 안 준 선\*\*\*

## A Study on High Efficiency OBC with Wide Range Output Using Isolated Current-Fed PFC Converter

Hyung-Sik Kim\*, Hee-Jun Kim\*\*, Joon-Seon Ahn\*\*\*

**요 약** 전기 자동차의 배터리 충전용 OBC는 주로 PFC회로와 절연형 DC-DC 컨버터 회로를 포함한 2단으로 구성된다. 일반적으로 PFC 회로로는 구조가 간단한 비절연형 부스트 컨버터가 사용되고, 절연형 DC-DC 컨버터로는 ZVS(Zero Voltage Switching)가 가능한 공진형 컨버터가 이용되고 있다. 전기자동차의 주행거리 증가에 따른 넓은 배터리 출력에 대응하기 위해서는 OBC의 넓은 출력범위가 필요하지만, 이러한 시스템 회로 구성에서는 ZVS를 위한 회로 설계의 한계와 제어기 구성이 복잡해지기 때문에 배터리 충전에 요구되는 넓은 범위의 출력에 효과적으로 대응하기에는 어려움이 있다. 본 논문에서는 절연형 전류원 방식의 PFC 회로와 벡 DC-DC 컨버터로 구성된 OBC를 제안하였다. 제안된 OBC는 회로 및 제어기 구성이 용이하고, 넓은 출력범위에 대한 대응이 가능하다. 제안된 회로의 유효성을 검증하기 위해 3.3kW급 시제품을 제작 하였으며, 동작결과 출력전압 150V~400V에서 동작안정성 및 정격 부하 조건에서 최대 효율 94.4%, 최대 역률 99.2%를 확인하였다.

**Abstract** OBC for battery charging of electric vehicles mainly consist of two stages including PFC circuit and isolated DC-DC converter circuit. In general, a non-isolated boost converter is used as the PFC circuit, and a resonant converter capable of ZVS (zero voltage switching) is used as the isolated DC-DC converter. In this paper, we propose an OBC composed of isolated current-fed type PFC circuit and buck DC-DC converter. The proposed OBC is easy to configure the circuit and controller, and can cope with a wide output range. In order to verify the validity of the proposed circuit, a prototype 3.3 kW class prototype was fabricated. As a result, the maximum efficiency and the maximum power factor of 99.2% were confirmed under the operational stability and rated load conditions at the output voltage of 150V ~ 400V.

**Key Words** : Converter, Current-Fed, Isolated, OBC, PFC

### 1. 서 론

최근 세계 각국의 온실 가스 배출에 대한 규제 강화에 따라서 HEV(Hybrid Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle), BEV(Battery Electric Vehicle)등의 친환경 전기자동차에 대한 개발과 보급이 빠르게 증가하고 있다.

특히 BEV의 경우 배터리만을 가지고 구동해야하기 때문에 이에 상응하는 배터리 충전기가 반드시 필요하다.[1] 배터리 충전기는 장착 위치에 따라서 차량에 탑재되는 내부 탑재형 충전기(On Board Charger)와 외부에 설치되는 설치형 충전기(Off Board Charger)로 분류된다[2]. 내부 탑재형 충전

This Paper was supported by research Fund of Hanyang University in 2018.

\*Department of Electronic Systems Engineering, Hanyang University(lhkhs1@hanyang.ac.kr)

\*\*Corresponding Author : Department of Electronic Systems Engineering, Hanyang University(hjkim@hanyang.ac.kr)

Received January 30, 2019

Revised February 01, 2019

Accepted February 05, 2019

기의 경우 주로 AC상용 전원을 사용하여 전기 요금이 저렴한 심야 시간대에 장시간 충전하는 완속 충전용으로 사용되며, 외부 설치용 충전기는 3상 AC 전원을 직류로 변환하여 20A~400A까지 용량을 사용할 수 있어 고속 충전용으로 주로 사용된다[3].

AC상용전원을 사용하는 내부 탑재형 충전기의 일반적인 회로 구성은 PFC(Power Factor Correction)회로, 절연형 DC-DC컨버터의 2단으로 구성되어 있다 [4]. PFC회로는 비절연형 부스트 컨버터를 많이 사용하며[5,6], 절연형 DC-DC컨버터는 ZVS(Zero Voltage Switching)가 가능한 LLC 또는 Phase-Shift 컨버터 등의 공진형 컨버터가 많이 사용되고 있다 [5,7]. 또한 배터리의 안정적인 충전을 위하여 정 전류, 정 전압 제어를 한다. 그러나 이러한 시스템의 구성은 절연형 DC-DC단 트랜스포머 턴 비에 의한 제한된 범위의 출력 전압과 이에 대응되는 ZVS 회로 및 제어기의 복잡한 구성 및 주행거리 증가에 따른 넓은 배터리 출력에 효과적으로 대응하기가 어렵다.

본 논문은 기존 구성과는 다른 절연형 전류원 컨버터를 사용한 PFC회로와 벡 컨버터로 구성된 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 회로 구성 및 제어기 구성이 상대적으로 용이하며 기존에 주로 적용되었던 250V ~ 410V까지의 출력 범위 보다 넓은 출력범위의 출력에 대한 대응이 가능하다. 3.3kW급 시제품을 제작하였고 실험결과를 통해 시스템의 효율성을 입증하였다. 동작결과 150V~400V의 넓은 출력 범위에서 정 전류, 정 전압 제어시 해당 동작에 대한 안정성 입증 할 수 있었으며 정격 부하 조건에서 최대 효율 94.4%, 최대 역률 99.2%를 달성 하였다.

## 2. 시스템 구성

그림 1은 제안된 OBC시스템의 기본 구성을 나타내었다.

구성된 시스템을 살펴보면 AC상용 전원을 다이오드 정류기로 정류한 뒤 절연형 전류원 컨버터를 통하여 400V ~ 450V의 DC-Link전압을 생성한다. DC-Link단의 전압은 벡 컨버터를 통해서 150V ~ 400V의 전압을 생성하게 되며 해당 전압을 사용하

여 배터리 충전을 하게 된다. 배터리 충전시 안정적인 충전을 위해 정 전류, 정 전압 제어를 해야 하며 정 전류 제어시 약 8A의 레벨에서 제어한다. 본 시스템에서 절연형 전류원 컨버터는 시스템의 1차, 2차간의 절연 및 PFC역할을 하게 되며 벡 컨버터는 배터리의 충전 역할을 하게 된다. 제안된 시스템은 AC입력전압, 입력전류, DC-Link출력전압을 센싱 받아 절연형 전류원 컨버터에서 PFC제어를 하게 되며 벡 컨버터의 출력 전압, 출력 전류를 센싱 받아 배터리 충전 제어를 한다.

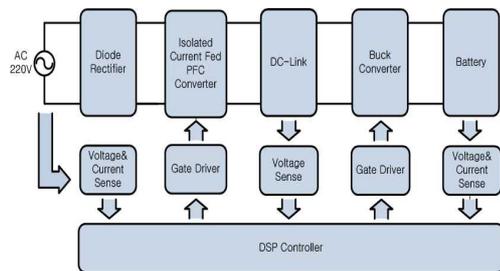


그림 1. 제안된 시스템의 기본 구성  
Fig. 1. Basic configuration of proposed system

제안된 시스템의 최적 제어를 위해 디지털 제어를 사용하였으며, 디지털 제어 소자는 차량용에서 많이 사용되는 120MHz 연산능력을 가진 NXP사의 MPC5643L DSP Controller를 사용하였다.

### 2.1 절연형 전류원 PFC 컨버터

그림 2에 절연형 전류원 PFC 컨버터의 회로도 나타내었다. 4개의 스위치와 트랜스포머를 2차측 다이오드 정류기로 구성된 풀 브릿지 토폴로지 구조로 되어 있으며 입력 단에 삽입된 인덕터를 전류원 소스로 사용한다.

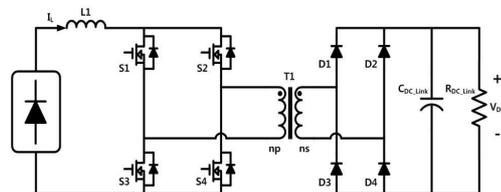


그림 2. 절연형 전류원 PFC컨버터 회로도  
Fig. 2. Circuit diagram of Isolated Current-Fed Converter

그림 3과 그림 4에 정상 상태 동작 모드 및 동작 파형을 나타내었다. 절연형 전류원 PFC 컨버터의 기본 동작은 트랜스포머의 포화를 막기 위해 스위치를 교번으로 동작 시키는 것 외에는 비절연형 부스트 컨버터의 동작과 유사하다. 모드별 동작을 설명 하면 다음과 같다.

Mode 1( $t_0 \sim t_1$ ) : S1, S2, S3, S4 ON

S1, S2, S3, S4 스위치가 턴 온 되면 전류의 흐름은 그림 3의 Mode 1과 같다. 모든 스위치가 턴 온 된 상태이기 때문에 트랜스포머 T1을 통해 1차에서 2차로 에너지가 전달되지 않고 인덕터  $L_i$ 에 에너지가 축적된다. 인덕터  $L_i$ 에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타내어진다.

$$i_L(t) = i_L(t_0) + \frac{V_i}{L_i}(t - t_0) \quad (1)$$

Mode 2( $t_1 \sim t_2$ ) : S1, S4 ON, S2, S3 OFF

S2, S3의 스위치가 턴 오프 되면 전류의 흐름은 그림 3의 Mode 2와 같이 나타내어진다. 스위치 S2, S3이 턴 오프 되면서 트랜스포머 T1에 전압이 인가되어 입력 에너지와 인덕터  $L_i$ 에 축적되어 있던 에너지가 함께 1차에서 2차측으로 전달된다. 이 때 인덕터  $L_i$ 에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타내어진다.

$$i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{1}{L_i} \left( V_i - \frac{N_p}{N_s} V_o \right) (t - t_1) \quad (2)$$

Mode 3( $t_2 \sim t_3$ ) : S1, S2, S3, S4 ON

Mode 3과 같은 형태로 스위치가 동작 하며 인덕터  $L_i$ 에 흐르는 전류는 앞의 수식(1)과 같다.

Mode 4( $t_3 \sim t_4$ ) : S1, S4 OFF, S2, S4 ON

S1, S4스위치가 턴 오프 되면 전류의 흐름은 그림 3의 Mode 4와 같이 나타내어진다. 스위치 S1, S4가 턴 오프 되면서 트랜스포머 T1에 전압이 인가 되어 입력 에너지와 인덕터  $L_i$ 에 축적되어 있던 에너지가 함께 1차에서 2차측으로 전달된다. 이 때 인덕터  $L_i$ 에 흐르는 전류는 앞의 수식(2)와 같다.

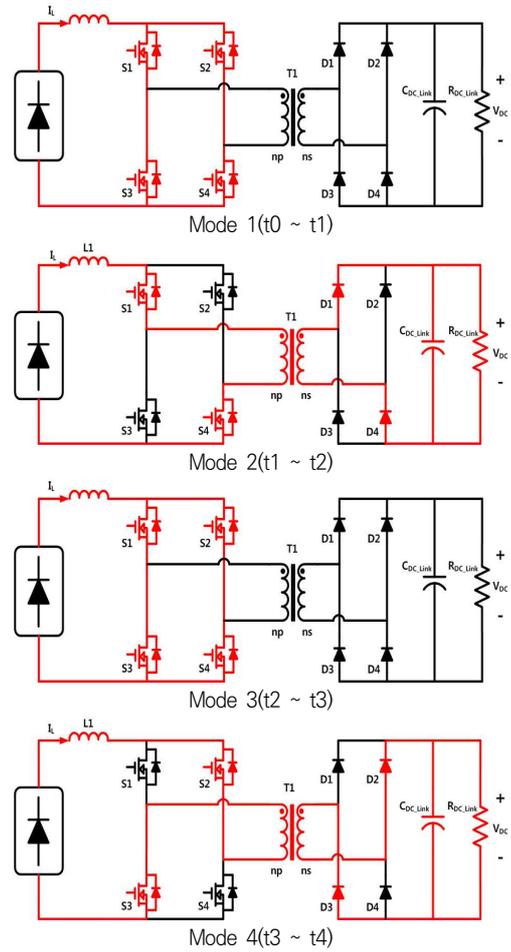


그림 3. 절연형 전류원 PFC 컨버터의 동작 모드  
Fig. 3. Operation of Isolated Current-Fed PFC Converter

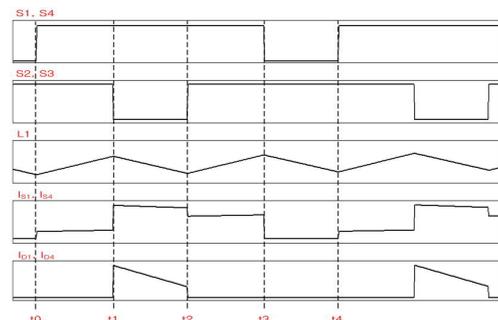


그림 4. 절연형 전류원 PFC 컨버터의 동작 파형  
Fig. 4. Waveform of Isolated Current-Fed PFC Converter

### 2.2 벅 컨버터

그림 5에 벅 컨버터의 회로도를 나타내었다. 하나의 스위치와 하나의 다이오드로 구성되어 있으며 제어기가 용이하다. 절연형 전류원 PFC 컨버터의 출력 전압  $V_{DC}$ 를 배터리 충전에 맞는 전압으로 변환 및 제어 하는 역할을 한다.

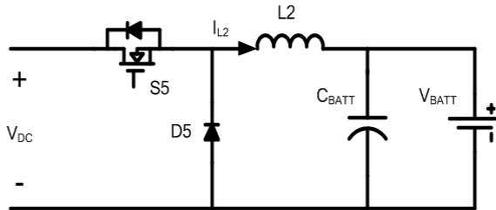


그림 5. 벅 컨버터 회로도  
Fig. 5. Circuit Diagram of Buck Converter

그림 6과 그림7에 벅 컨버터의 정상 상태 동작 모드 및 동작 파형을 나타내었다.

Mode 1( $t_0 \sim t_1$ ) : S5 ON, D5 OFF

스위치 S5가 턴 온 되면  $V_{DC}$ 단 입력으로부터 전류가 L2를 통하여 출력으로 흐른다. 이 때 L2에 에너지를 축적한다. L2에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타내어진다.

$$i_{L2}(t) = i_{L2}(t_0) + \frac{V_{DC} - V_{BATT}}{L_2}(t - t_0) \quad (3)$$

Mode 2( $t_1 \sim t_2$ ) : S5 OFF, D5 ON

스위치 S5가 턴 오프 되면 L2에 축적된 에너지가 환류 다이오드 D5를 통하여 출력 측으로 방출한다. 이 때 L2에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$i_{L2}(t) = i_{L2}(t_1) + \frac{V_{BATT}}{L_2}(t - t_1) \quad (4)$$

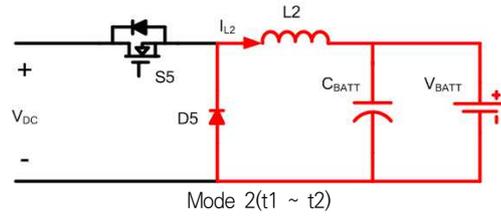
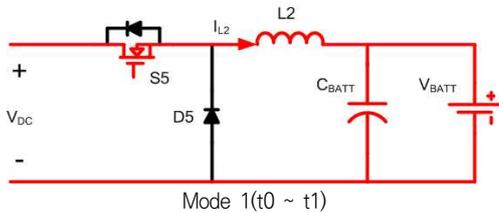


그림 6. 벅 컨버터의 동작 모드  
Fig. 6. Operation Mode of Buck Converter

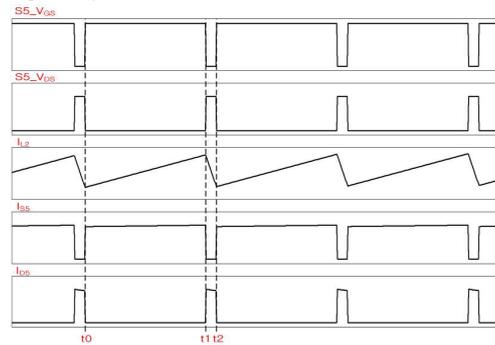


그림 7. 벅 컨버터의 동작 파형  
Fig. 7. Waveforms of Buck Converter

### 2.3 제어기 구성

제어기는 절연형 전류원 PFC 컨버터 제어기와 벅 컨버터 제어기로 구성되어 있다. 절연형 전류원 PFC 컨버터 제어기는  $V_{DC}$ 출력단 으로부터 전압을 센싱 받아 기준 전압과 비교하고 PI제어기를 거친 결과와 AC단 전압을 사용하여 생성한 PLL(Phase Lock)값과 곱한 후 절대 값을 취한다. 이 값과 AC 단에서 센싱 받은 전류 값의 절대 값을 비교하여 PI 제어기의 결과를 제어기 기준 값으로 사용하여 최종 PWM값을 형성하게 된다. 그림 8은 절연형 전류원 PFC컨버터의 제어기 구성을 나타내었으며 그림 9는 PLL제어기를 나타내었다.

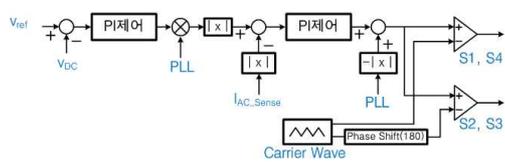


그림 8. 절연형 전류원 PFC 컨버터의 제어기 구성  
Fig. 8. Isolated Current-Fed PFC Converter controller Block Diagram

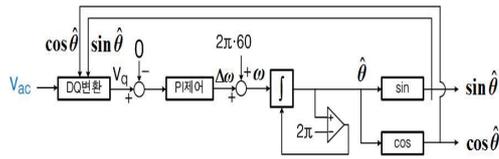


그림 9. PLL제어기 구성도  
Fig. 9. PLL Controller Block Diagram

벅 컨버터의 제어기는 그림 10과 같이 구성되어 있다. 출력 전압  $V_{BATT}$ 와 기준전압  $V_{BATT\_ref}$  값을 비교한 뒤 오차 증폭 하고 이 값을 다시 출력 전류 센싱 값과 비교 후 오차 증폭하여 톱니파와 비교하여 최종 PWM값을 생성하게 된다.

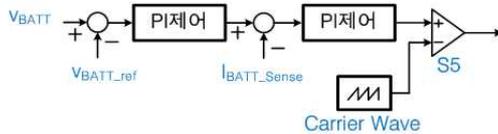


그림 10. 벅 컨버터 제어기 구성도  
Fig. 10. Buck Converter controller Block Diagram

### 3. 실험 결과

제안된 시스템의 주요사항을 표1에 정리하였다.

표 1. 제안된 시스템의 주요사항  
Title. 1. The parameter of proposed system

Parameter	Unit	Value
Max Power	kW	3.3
Input Voltage	V	220
DC_Link Voltage	V	400 ~ 450
Output Voltage	V	150 ~ 400
Rated output Current	A	8.3
Isolated Current-Fed PFC Converter Switching Frequency	kHz	20
Buck Converter Switching Frequency	kHz	50
Transformer Turn Ratio		1:1

그림 11은 제작된 시작품의 사진이다. AC 220V 입력전압이 절연형 전류원 PFC 컨버터, 트랜스포머, 2차 정류기를 통해서 400V ~ 450V DC전압으로 변환되며 배터리 충전에 사용될 150V ~ 400V의 전압은 벅 컨버터를 통해서 변환된다. 여기서 절연형 전류원 PFC컨버터는 정 전압 제어를 하고 있으며, 벅

컨버터는 정 전류, 정 전압 제어를 수행 하고 있다.

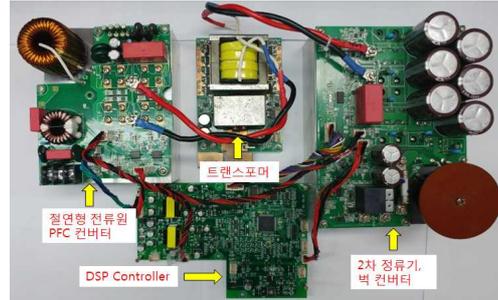


그림 11. 제안된 OBC 시스템 시작품  
Fig. 11. The prototype of Proposed OBC system

그림 12는 배터리단의 출력전압 150V, 출력전류 8.3A 부하조건에서 파형을 그림 13은 출력전압 400V, 출력전류 8.3A 부하조건에서의 파형을 나타 내었으며 CH1은 AC단의 입력전압, CH3은 입력전류, CH2는 출력전압, CH4는 출력전류를 나타내었다. 배터리 부하의 경우 안정적인 충전을 위하여 정 전류 정 전압 제어를 통한 충전 실험을 진행하였다.

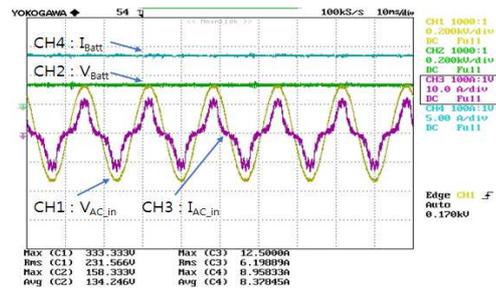


그림 12. 150V 정격출력 실험 파형  
Fig. 12. Experimental Waveform of 150V Rated output

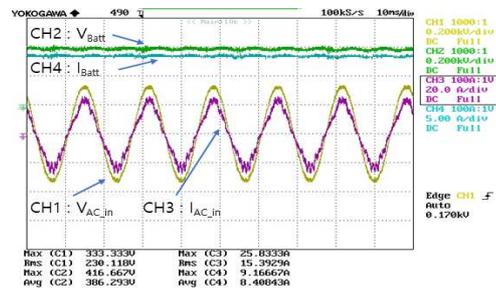


그림 13. 400V 정격출력 실험 파형  
Fig. 13. Experimental Waveform of 400V Rated output

그림 14는 해당 파형에 대한 전력 분석기 결과를 나타내었다. 출력전압 150V, 8.3A 의 부하 조건에서 효율 92.5%, 역률 92.2%를 달성하였으며, 400V, 8.3A의 정격 부하 조건에서 최대 효율 94.4%, 최대 역률 99.2%를 달성하였다.

8 charge items				8 charge items			
P1	1.347 kW	P3	3.534 kW				
Urms1	230.47 V	Urms3	228.72 V				
Irms1	6.338 A	Irms3	15.573 A				
λ1	0.9222	λ3	0.9923				
P2	1.247 kW	P4	3.337 kW				
Urms2	150.22 V	Urms4	400.92 V				
Irms2	8.304 A	Irms4	8.324 A				
η1	92.597 %	η4	94.420 %				

(a)출력 150V/8.3A      (b)출력 400V/8.3A

그림 14. OBC 시스템 전력 시험 분석 결과  
Fig. 14. Analysis of OBC system power test

#### 4. 결론

본 논문에서는 기존의 비 절연형 PFC 컨버터와 절연형 DC/DC 컨버터로 구성된 OBC시스템과 달리 넓은 출력범위에 대응이 가능한 절연형 PFC컨버터와 비 절연형 벡 컨버터로 구성된 OBC시스템을 제안하고, 시작품을 제작하여 제안된 시스템의 성능을 확인 하였다. 실험 결과 150V~400V의 넓은 출력범위에서의 동작안정성 및 시스템의 정격 부하 조건에서 최대 효율 94.4%, 최대 역률 99.2%의 결과를 확인하였다. 제안된 시스템은 기존에 비해서 용이한 제어기 구성과 넓은 출력 전압에 대한 효율성을 가지고 있음을 확인 하였다. 향후 트랜스포머를 공용화 하는 형태의 LDC기능을 포함하는 통합형 OBC 시스템에 대해서 연구할 예정이다.

#### REFERENCES

[1] Yoon-Jae Kim, Jun-Young Lee, Il-Oun Lee, Byung-Kwon Lee, Seung-Won Choi and Young-Gun Hong. Study on 3-Phase Isolated PFC Converter for the Electric Vehicle Charger, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 22,

No. 5, 404-413, October 2017.  
 [2] Shin, Min-Ho. Design and Control Technique of High-efficiency On-Board Charger for extending Battery Lifetime. The Graduate School of Sungkyunkwan University. 2016.  
 [3] Hyungjun Chae, Wonyong Kim, Suyoung Yun, Hyungtae Moon, Yuseok Jeong, Junyoung Lee. PHEV Battery Chareger with Power Factor Corrector, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, 341-342, 2010. 7.  
 [4] Keun-Wan Koo, Dong-Hee Kim, Min-Jung Kim, Byoung-Kuk Lee. Study about Topology for High Capability On-Board Charger of EVs, The Korean Institute of Electrical Engineers, 412-414, 2012. 4.  
 [5] Hyungjun Chae, Junyoung Lee, Hyungtae Moon, Sunmin Hwang. On-board battery charger for EV with 2-stage DC/DC converter. The Koera Society Of Automotive Engineers, 1513-1516, 2012. 11.  
 [6] Jun Hyok Lee, Kwang-Soon Jung, Kyung-Jung Lee, Jae Yeop Jung, Ho Kyung Kim, Sung-Soo Hog, Hyun-Sik Ahn, Design and Implementation of a Control System for the Interleaved Boost PFC Converter in On-Board Battery Chargers. The Korean Institute of Electrical Engineers, 843-850, 2016. 5.  
 [7] Jun Huok Lee, Kwang-Soon Jung, Ho Kyung Kim, Jung-Soo Hong, Hyun-Sik Ahn. Design and Implementation of a Control System for ther Phase Shift Full-Bridge Converter of the On-board Charger for Electric Vehicles. The Korean Institute of Electrical Engineers, 1860-1867, 2016. 11.  
 [8] Sang-Sik Kim. Active-clamp Current-fed Push-Pull Converter. Pohang University of Science & Technology. 2007.  
 [9] Hyung-Sik Kim, Joon-Seon Ahn. A Study of Using Battery Charger Current-Fed Isolated AC-DC PFC Converter, The Korea Institute of Information & Electronic Communication Technology, 152-157, 2018, 10.  
 [10] Jiann-Fuh Chen ; Ren-Yi Chen ; Tsomng-Juu Liang "Study and Implementation of a Single-Stage Current-Fed Boost PFC Converter with ZCS for High voltage Applications" IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 23, Issue: 1 Page s: 379 - 386, Year: 2008

---

저자약력

---

김 형 식(Hyung-sik Kim)

[정회원]



- 2010년 강원대학교 전기전자공학과 졸업
- 2012년 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사)
- 2016년~현재 동 대학원 전자시스템공학과 박사과정

〈관심분야〉 전력전자, 전력변환, 전동기 제어

김 희 준(Hee-jun Kim)

[정회원]



- 1976년 한양대 전자 공학과 졸업.
- 1978년 동 대학원 전자 공학과 졸업(석사).
- 1986년 일본 큐슈대 전자공학과 졸업(공학박).
- 1987년 ~ 현재 한양대 전자공학과 교수.
- 2015년 대한전기학회 회장. IEEE 수석 멤버.

〈관심분야〉 전자회로, 전력전자, 전력변환

안 준 선(Joon-seon Ahn)

[정회원]



- 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업.
- 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
- 2008년 ~ 현재 오산대학 전기과 부교수

〈관심분야〉 전력전자, 전력변환, 전동기 제어