

## SiC SBD 적용한 고효율 Bridgeless PFC 컨버터에 대한 연구

전준혁\*,\*\*, 김형식\*\*\*, 김희준\*\*\*\*, 안준선\*\*\*\*\*

### A Study on high efficiency Bridgeless PFC Converter applied SiC SBD

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

**요약** 본 논문은 Bridgeless PFC Converter의 환류 다이오드를 SiC SBD(Schottky Barrier Diode)로 제안하여 고효율화를 달성하였다. 또한 Bridgeless PFC Converter의 동작원리에 대한 설명을 통해 Bridgeless PFC Converter에서 환류 다이오드의 도통 구간을 나타내어 환류 다이오드의 손실에 따른 시스템 손실의 기여도를 검증하였고, SiC SBD 소자의 물성 및 역회복 특성에 따른 장점을 설명하였으며 턴 온 손실과 턴 오프 손실을 측정하여 효율을 비교 분석하고, 소자 단품 특성을 확인하기 위한 다이오드의 역회복 파형 분석을 통하여 소자의 역회복 손실을 계산하였다. 소자 특성을 고려한 시뮬레이션 결과 값을 도출해내어 실제 시스템의 파형 분석 및 비교를 통해 그 결과 값을 검증하였다. 소자 특성을 고려하기 위하여 PSIM의 Thermal Module을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 결과로 턴 온 손실 0.6W, 턴 오프 손실 20.6W로 전체 스위칭 손실은 22.2W로 나타났다. 시제품 실험을 통하여 분석한 결과 턴 온 손실 0.608W, 턴 오프 손실 21.62W로 전체 스위칭 손실 22.228W의 결과 값을 도출하였고, 두 결과 값의 비교로 실험 방법의 타당성을 입증하였다. 또한 최대 효율 94.58%의 고효율을 달성하였다.

**Abstract** This paper proposes a flyback diode of bridgeless PFC converter as SiC SBD (Schottky Barrier Diode) to achieve high efficiency. In addition, through the explanation of the operation principle of the bridgeless PFC converter, the conduction section of the freewheel diode is shown in the bridgeless PFC converter to verify the contribution of system loss due to the loss of the freewheel diode. The advantages of the SiC SBD device's physical properties and the reverse recovery characteristics are explained, and the efficiency is measured by measuring the turn-on and turn-off losses. The loss was calculated. The simulation results were calculated in consideration of device characteristics and verified through the waveform analysis and comparison of the actual system. In order to consider the device characteristics, the simulation was conducted using the thermal module of PSIM. As a result of the prototype test, the turn-on loss was 0.608W and the turn-off loss was 21.62W, resulting in the total switching loss of 22.228W. The comparison of the two results proved the validity of the experimental method. In addition, a high efficiency of 94.58% is achieved.

**Key Words** : SiC SBD, Bridgeless PFC Converter, Diode, Switching Loss, Reverse recovery

This work was supported by the Technology Innovation Program (or Industrial Strategic Technology Development Program-Material Parts Industry Future Growth Driving Business)(20003935, Development of low loss high efficiency high reliability 1700V Grade Trench Gate SiC power semiconductor for renewable energy conversion system for low carbon emission)funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE,Korea)

\*Department of Electronic Systems Engineering, Hanyang University(joonhyeok91@hanyang.ac.kr)

\*\*PowerCubeSemi, Inc.(jhjeon@powercubesemi.com)

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

Received August 08, 2019

Revised August 27, 2019

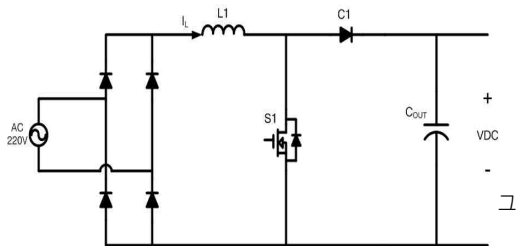
Accepted August 27, 2019

### 1. 서론

SiC(Silicon Carbide)전력반도체는 산업기기, 태양전지, 전기자동차, 철도 등 전력 전자분야에서 기존에 주로 사용되어진 Si(Silicon)전력반도체보다 전력변환 손실이 적고, 재료물성이 우수한 반도체로 알려지면서 그 응용분야의 폭을 확대해 나가고 있다.[1] 이러한 SiC의 개발속도를 추정할 때 2020년에는 현재보다 60배 이상으로 요구될 컴퓨팅파워 및 저장 용량에 대한 응용에 있어서 SiC 전력반도체가 이를 충분히 충족시킬 수 있을 전망이다.[2] 또한 바이오헬스, 에너지, 자동차, 로봇 등 여러 분야의 융합 기술에 SiC 전력반도체가 적용될 것으로 전망되어 새로운 성장엔진으로 대두될 전망이다.

특히 220V 상용 전원을 입력으로 사용하고 있는 AC-DC컨버터의 경우 소형·경량화 및 고효율을 위하여 SiC전력반도체의 사용 비중이 점차 확장되고 있다.

대표적인 AC-DC컨버터의 하나인 역률보상회로(Power Factor Correction Circuit)의 경우 그림 1과 같이 브릿지 다이오드와 부스트 컨버터를 사용한 토폴로지를 주로 사용하는데 입력에 사용되는 브릿지 다이오드의 도통 손실에 의한 효율저하가 문제점으로 대두되어 왔다. 따라서 이를 개선하기 위한 여러 연구가 진행되고 있으며 그 중 대표적인 토폴로지가 브릿지 다이오드를 제거한 Bridgeless PFC 컨버터이다.



림 1. 부스트 PFC 컨버터 회로도  
Fig. 1. Boost PFC Converter Circuit Diagram

Bridgeless PFC 컨버터는 효율저하의 주된 요인이 되는 브릿지 다이오드를 제거함으로써 고효율을 달성할 수 있으나 회로의 구성 요소 중 2개의 다이오드가 여전히 손실의 요인으로 작용한다.[3][4][5]

본 논문에서는 Bridgeless PFC 컨버터의 고효율에 대한 특징을 극대화하기 위해서 환류 다이오드에 SiC SBD(Schottky Barrier Diode)를 적용하여 실험하였고, 실험을 통하여 SiC SBD 사용 시 개선된 다이오드의 역 회복 특성에 의하여 Bridgeless PFC 컨버터의 효율이 개선됨을 확인하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 SiC SBD특성

SiC SBD는 Si와 비교하여 밴드갭이 3배, 절연 파괴전계가 10배, 열전도율이 10배 높은 SiC를 쇼트키 배리어 다이오드 구조로 제작한 소자이다.[6]

SiC SBD는 고속 스위칭이 가능한 다수 캐리어 다이오드이며, 고속 스위칭으로 인한 시스템의 소형화, 역 회복 손실 감소 등의 특성을 얻을 수 있다.[7] 그림 2는 SBD와 Si-FRD의 역 회복 특성을 나타낸 그림이다. 이 결과를 통해 SBD의 역 회복 특성이 Si-FRD와 비교 하여 우수하다는 점을 알 수 있다.

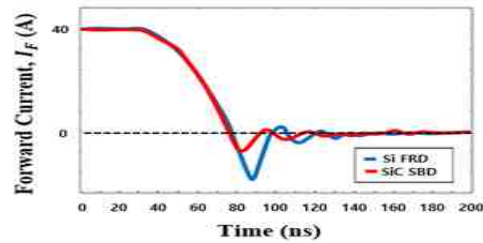


그림 2. Si-FRD와 SiC SBD의 역 회복 시간 특성  
Fig. 2. Reverse recovery time characteristics of Si-FRD and SiC SBD

Si-FRD는 전기 전도에 소수 캐리어를 사용하기 때문에 다이오드가 ON에서 OFF 할 때 축적되었던 소수 캐리어가 소멸될 때까지 역 회복 시간이 길어지며, 역 회복 전류도 높다. 반면 SiC SBD는 소수 캐리어가 아닌 다수 캐리어를 사용하기 때문에 소수 캐리어의 축적이 발생하지 않고, 역 회복 전류도 영에 가깝다.

이에 따라서 SiC SBD를 Bridgeless PFC 컨버터에 적용하였을 때, 노이즈 및 스위칭 손실에 대한 감소 효과를 기대 할 수 있다.

또한 순방향 특성에 있어서 Si-FRD는 온도가 올라갈수록 순방향 전압( $V_f$ )이 감소하며, 동시에 순방향 전류( $I_f$ )가 증가하게 되어 손실이 증가하게 된다. 이에 따라 발열량이 커지며 열 폭주에 의하여 소자 파손 위험이 높아진다.[8]

그러나 SiC SBD는 온도가 증가 할수록  $V_f$ 가 증가하고, 동시에  $I_f$ 가 감소하므로 열 폭주에 의한 소자 파손의 가능성이 없기 때문에 높은 내열성에 의한 동작의 안정성이 보장된다.

### 2.2 Bridgeless PFC 컨버터

그림 3은 Bridgeless PFC Converter의 회로도를 나타내었다. 기존 부스트 컨버터와는 다르게 전파 정류용 다이오드를 사용하지 않고 입력 부스트 인덕터(L)와 2개의 다이오드 및 MOSFET로 구성되어있다. 경 부하 에서는 다른 토폴로지에 비하여 효율이 다소 낮기 때문에 500W이상의 중·대용량의 범위에서 이용되며[9][10], 600V이상의 고내압 SiC SBD의 적용이 적합한 토폴로지이다.[11][12][13]

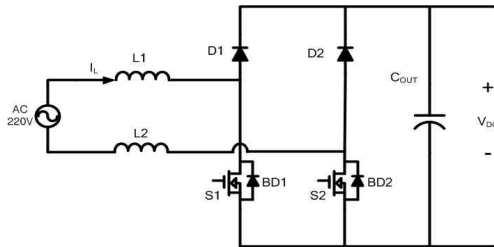


그림 3. Bridgeless PFC Converter 회로도  
Fig. 3. Bridgeless PFC Converter Circuit Diagram

그림 4에 Bridgeless PFC 컨버터의 정상 상태 동작 모드를 나타내었으며 그림 5에 동작 파형을 나타내었다.

그림 4에 AC 220V상용전원 양의 반주기 전압에서의 동작 모드를 나타내었으며 그림 5에 동작 파형을 나타내었다. 음의 반주기 전압에서의 동작 모드 및 동작 파형은 양의 반주기 전압에서의 동작파형과 비교 하여 대칭관계에 있으므로 양의 반주기에 대한 해석으로 음의 반주기에서의 동작 모드 및 파형에 대한 해석이 가능하다.

**Mode 1( $t_0 \sim t_1$ )** : S1 ON, BD2 ON

스위치 S1이 턴 온 되면 입력 전류의 흐름은 L1 → S1 → BD2 → L2가 되며 L1과 L2에는 에너지가 축적되며 출력 커패시터  $C_{out}$ 에 축적되어있던 전하는 부하로 방전한다.

**Mode 2( $t_1 \sim t_2$ )** : S1 OFF, D1 ON, BD2 ON

스위치 S1이 턴 오프 되면 D1이 턴 온 되어 입력 전류의 흐름은 L1 → D1 → BD2 → L2가 되며 Mode1에서 L1과 L2에 축적되었던 에너지가 출력으로 방출한다. 에너지가 축적되며 출력 커패시터  $C_{out}$ 에 축적되어있던 전하는 부하로 방전한다.

Mode1, Mode2의 동작을 보면 기존의 부스트 컨버터를 사용한 동작과 동일한 동작을 보임을 알 수 있으며 D1, D2 및 S1, S2의 Body Diode인 BD1, BD2를 SiC SBD를 적용할 경우 역 회복 손실 감소, 높은 내열성의 특성을 통하여 스위칭 손실 절감 효과 및 온도 변화에 대한 안정적인 동작을 기대할 수 있다.

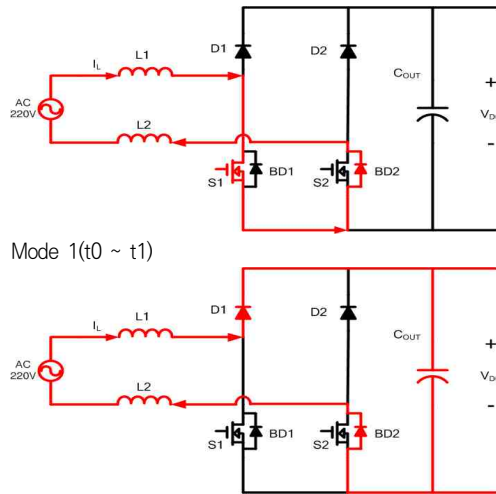


그림 4. Bridgeless PFC컨버터의 동작 모드(양의 반주기)  
Fig. 4. Operation Mode of Bridgeless PFC Converter(positive half-cycle)

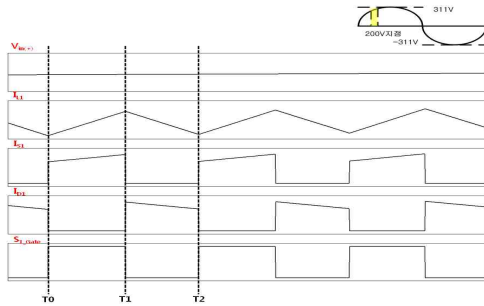


그림 5. Bridgeless PFC컨버터의 동작 파형(양의 반주기)  
Fig. 5. Operation Waveform of Bridgeless PFC Converter(positive half-cycle)

### 3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 시스템의 검증을 위하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였으며 그림 6에 시뮬레이션 회로도를 그림 7과 그림 8에 시뮬레이션 결과를 나타 내었다.

시뮬레이션 진행시 실제 적용할 SiC SBD 주요 사양을 모델링하여 시뮬레이션 하였으며 시뮬레이션 결과 SiC SBD 역 회복 특성에 의한 턴 온 손실은 최대 0.6W, 턴 오프 손실은 최대 20.6W로 매우 낮은 결과를 확인 하였다. 손실은 스위치 전압과 다이오드 전류를 곱하여 적분하고 턴 온, 턴 오프 시의 적분값 변화량을 측정하여 에너지를 구하였다. 턴 온 에너지는 3.03 $\mu$ J, 턴 오프 에너지는 103 $\mu$ J로 측정 되었으며, 스위칭 주파수를 곱하여 손실을 구하였다.

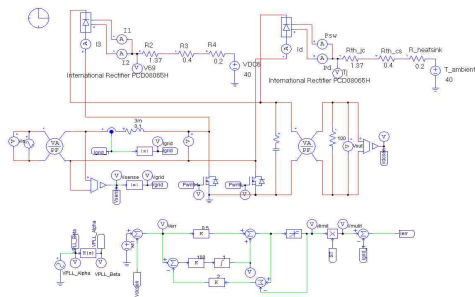


그림 6. Bridgeless PFC컨버터의 손실 분석 시뮬레이션 모델.  
Fig. 6. Simulation model for loss analysis of bridgeless PFC converter

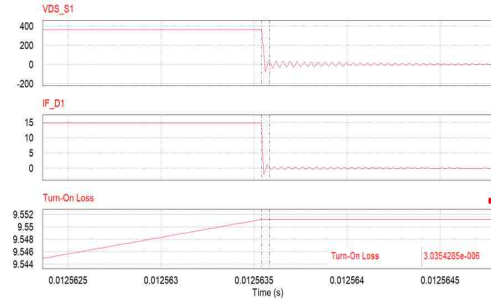


그림 7. Bridgeless PFC컨버터의 손실 분석 시뮬레이션 파형(턴 온 손실)  
Fig. 7. Simulation waveform for loss analysis of bridgeless PFC converter(Conduction Loss)

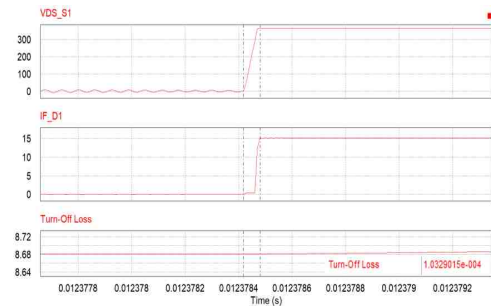


그림 8. Bridgeless PFC컨버터의 손실 분석 시뮬레이션 파형(턴 오프 손실)  
Fig. 8. Simulation waveform for loss analysis of bridgeless PFC converter(Switching Loss)

### 4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 시스템의 검증을 위하여 500W급 시작품을 제작하였으며 시작품에 적용된 SiC SBD 디바이스의 주요 제원 및 시작품의 주요사항을 표1 및 표2에 정리하였다.

표 1. SiC SBD의 주요 사양  
Table. 1. Main specification of SiC SBD

Parameter	Unit	Value
Repetitive Peak Reverse Voltage	[V]	650
Forward Current	[A]	8
Forward Voltage	[V]	1.47
Reverse Current	[ $\mu$ A]	10
Total Capacitive Charge	[nC]	30

표 2. Bridgeless PFC 컨버터의 주요사항  
Table 2. The Main parameter of Bridgeless Converter

Parameter	Unit	Value
Rated Power	[W]	500
Input Voltage	[V <sub>AC</sub> ]	90 ~ 264
Output Voltage	[V <sub>DC</sub> ]	390
Switching Frequency	[kHz]	200
Power Factor	-	0.99

그림 9는 제작된 시작품의 사진이다. D1과 D2에 SiC SBD를 적용하여 시작품을 제작하였다.

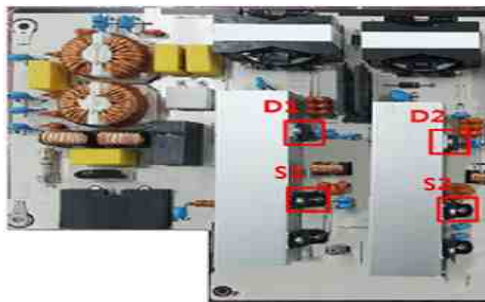


그림 9. Bridgeless PFC 컨버터의 시작품  
Fig. 9. The Prototype of Bridgeless PFC Converter

그림 10은 Bridgeless PFC 컨버터에 적용된 SiC SBD의 Reverse recovery 파형이다. 객관적인 다이오드의 특성을 표현하기 위하여  $di/dt$ 를 200A/us로 측정하였으며, SiC SBD에 400V의 전압을 인가하여 TEST하였다. 그 결과 역 회복 시간  $t_{rr}$ 은 38ns, 역 회복 전류  $I_{rr}$ 는 1A로 측정 되었으며, 역 회복 전하량은 30nC으로 매우 작은 값을 나타내었다.

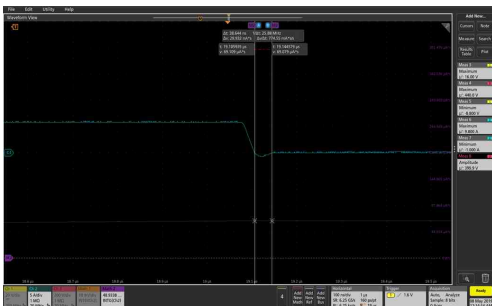


그림 10. SiC SBD의 역 회복 전류 파형(100ns/div)  
Fig. 10. Reverse recovery current waveform fo SiC SBD(100ns/div)

그림 11과 그림12는 SiC SBD 디바이스를 시작품에 적용하여 스위칭 손실을 측정한 실험 파형이며, 각각 스위치의 턴 온 손실 및 턴 오프 손실의 파형을 나타내었다. 측정 결과로 SiC SBD의 스위칭 손실은 턴 온 손실 0.608W, 턴 오프 손실 21.62W로 측정 되었으며 총 스위칭 손실은 22.2W로 측정되었다.



그림 11. 시작품에 적용된 SiC SBD의 스위칭 턴 온 손실 (500ns/div)  
Fig. 11. Switching turn-on losses of SiC SBD applied to the prototype(500ns/div)



그림 12. 시작품에 적용된 SiC SBD의 스위칭 턴 오프 손실 (500ns/div)  
Fig. 12. Switching turn-off losses of SiC SBD applied to the prototype(500ns/div)

그림 13은 Bridgeless PFC컨버터에 SiC SBD를 적용하였을 때 출력 전력의 전 구간에서 효율 측정 결과를 나타내었으며 최대 효율 94.58%의 결과를 확인하였다.

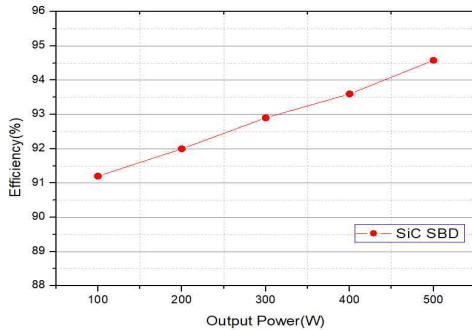


그림 13. SiC SBD의 부하에 따른 효율

Fig. 13. Efficiency according to load of SiC SBD

## 5. 결론

본 논문에서는 Bridgeless PFC에 고효율에 대한 특징을 극대화하기 위해서 구성 요소 중 2개의 환류 다이오드에 SiC SBD를 제안하여 고효율화를 실현하였다. 실험을 통하여 턴 온 손실과 턴 오프 손실을 측정하여 손실 전력을 비교분석하였으며, 소자 특성을 고려한 시뮬레이션 결과 값은 각각 0.6W(턴 온 손실), 20.6W(턴 오프 손실)로 총 손실 22.2W로 측정되었다. 또한, 시작품 동작 실험의 결과 값은 각각 0.608W(턴 온 손실), 21.62W(턴 오프 손실)로 총 손실 22.228W로 측정되어 시뮬레이션 값의 타당성을 검증하였다. 또한 역회복 손실이 매우 적은 SiC SBD의 적용을 통해 턴 온 손실을 극소화 하여, 최대 효율 94.58%의 고효율화를 달성 하였다. 본 논문에서 제안한 Bridgeless PFC Converter 구성 및 SiC SBD 적용 실험결과를 통하여, 향후 Si-FRD와의 스위칭 턴 온, 턴 오프 및 역 회복 특성에 따른 비교 테스트 및 온도 변화에 따른 시스템의 안정성에 대한 테스트 진행을 통한 Si-FRD와 SiC SBD의 비교분석을 진행할 예정이다.

## REFERENCES

[1] Spiazzi, G, Buso, S., Citron, M., Corradin, M. Pierobon, R. "Performance evaluation of a Schottky SiC power diode in a boost PFC application", IEEE

Transactions on Power Electronics, 18(6), 1249-1253, 2003.

[2] Takao, Kazuto, T. Yatsuo, K. Arai. "High di/dt switching characteristics of a SiC Schottky barrier diode.", IEEJ Transactions on Industry Applications 124, 917-923, 2004.

[3] B. K. Yu, S. S. Lee, S. K. Han, K. W. Moon. "Bridgeless Boost Converter Operates in Boundary Current Mode to Improve Power Factor", Power Electronics Conference, 90-94, 2003.

[4] K. M. Cho, B. K. Yu, K. W. Moon. "High efficiency ZVZCS power factor improvement circuit without bridge for PDP.", Power Electronics Conference, 704-708, 2004.

[5] T. H. Kim, W. C. Lee, "Bridgeless CRM PFC Converter for Digital Control-Based HID Ballasts" Power Electronics Conference, 263-264, 2016.

[6] Omura, I., Tsukuda, M., Saito, W., Domon, T. "High power density converter using SiC-SBD", In Power Conversion Conference-Nagoya. PCC'07 (pp. 575-580). IEEE, 2007.

[7] J. H. Jeon, S. S. Kyoung, H. J. Kim, "Characteristic Improvement of a Bridgeless PFC Converter by using SiC SBDs", The Korean Institute of Electrical Engineers Conference on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, 2018.

[8] W. M. Choi, H. G. Ahn, "The Switching Characteristic and Efficiency of New Generation SiC MOSFET", The Korean Institute of Information and Communication Engineers, 2, 353-360, 2017.

[9] C. Guoen, H. J. Kim. "An improved



- bridgeless interleaved boost pfc rectifier with optimized magnetic utilization and reduced sensing noise”, Industrial Technology (ICIT), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014.
- [10] D. W. Kim, Y. H. Jeong, G. W Moon, “A Study on Bridgeless Power Factor Correction Circuit Topology for High Power Density Based on Common Noise Analysis” The Korean Institute of Power Electronics Summer Conference, 2016.
- [11] H. S. Kim, H. J. Kim, “Development of Constant Current Driving Module for High Power LED Lighting Using LLC DC-DC Converter”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 1130 ~ 1139, 2012.
- [12] Y. J. Lee, G. M. Yoo, H. C. Shin, D. Y. Ko, H. C. Jung, Y. S. Jeong, J. Y. Lee, “High Efficiency 2 Bridgeless PFC Converter for using DSP”, Power Electronics Conference, 359 ~ 360, 2010.
- [13] L. Huber, Y. T. Jang, M. M. Jovanovic, “Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers”, Ieee Transactions on power electronics, vol. 23, no. 3, may 2008.

---

## 저자약력

---

### 전 준 혁(Joon-Hyeok Jeon) [정회원]



- 2014년 목포해양대학교 전자과 졸업.
- 2017년 한양대학교 대학원 전자 시스템 공학과 수료 (석·박사)
- 2017년 ~ 현재 동 대학원 박사 과정

〈관심분야〉 전력전자, 전력변환

### 김 형 식(Hyung-sik Kim) [정회원]



- 2010년 강원대학교 전기전자공학과 졸업
- 2012년 한양대학교 대학원 전자 전기제어계측공학과 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 전자 공학과 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 오산대학교 전기 과 부교수

〈관심분야〉 전력전자, 전동기제어, 전력변환