

# 게이트 구동회로가 간단하고 높은 효율을 가지는 새로운 형태의 브리지리스 PFC 컨버터에 관한 연구

이영달<sup>1</sup>, 김정은<sup>2</sup>, 김동민<sup>1</sup>, 최승현<sup>1</sup>, 문건우<sup>1</sup>  
 한국과학기술원<sup>1</sup>, 솔루엠<sup>2</sup>

## A New Bridgeless PFC Converter With Simple Gate Driving Circuit And High Efficiency for Server Power Application

Young-Dal Lee, Chong-Eun Kim, Dong-Min Kim, Seung-Hyun Choi, and Gun-Woo Moon  
 KAIST<sup>1</sup>, SoluM<sup>2</sup>

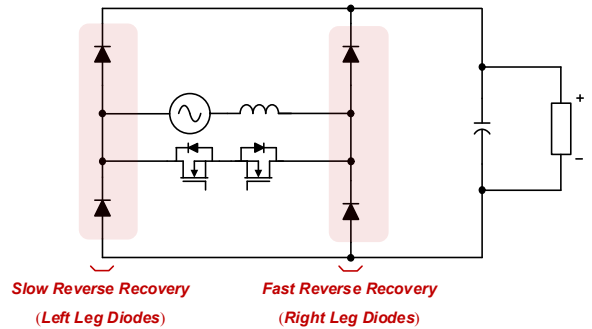
### ABSTRACT

양방향 스위치를 가지는 Bridgeless PFC 컨버터(BBPFC)는 구조상 복잡한 플로팅 게이트 드라이버를 활용함에도 불구하고 좋은 공통모드 잡음 즉, Common-Mode (CM) 노이즈 특성과 간단한 제어 방법으로 인해 많은 브리지리스 PFC 컨버터 중에서도 고전력 응용분야에서 매우 매력적인 토폴로지이다. 이러한 BBPFC는 도통 경로 상에 위치한 정류 다이오드의 역회복 특성의 상대적인 편차를 활용하여 전력 밀도를 감소시키지 않고도 좋은 공통모드 (CM) 노이즈 특성의 확보가 가능하다. 하지만 이러한 장점을 가지는 BBPFC 구조를 고전력 서버용 전원장치분야에서 활용할 경우, 이미 등록된 특허로 인해 매우 높은 개런티를 지불해야 하므로 그 활용이 매우 제한적이다. 따라서, 본 논문에서는 이미 등록된 특허를 회피하고, 동시에 기존 BBPFC 회로가 가지는 단점인 플로팅 게이트 드라이버를 활용하는 단점을 개선하는 새로운 형태의 브리지리스 PFC 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 기존 BBPFC가 가지는 장점인 좋은 (CM) 노이즈 특성을 가지며, 동시에 높은 효율을 달성 할 수 있다. 또한 제안된 컨버터의 경우, 복잡한 플로팅 형태의 게이트 드라이버 회로가 아닌 간단한 부트스트랩 회로를 활용하여 회로를 운용할 수 있다. 더불어 제안된 컨버터는 입력의 양과 음의 주기에서 단 하나의 스위치를 사용하여 회로를 구동할 수 있기 때문에 기존회로 대비 적은 손실을 가져 높은 효율의 획득이 가능하다. 본 논문에서는 제안된 구조에 대해 하이라인 230V<sub>RMS</sub> 입력과 800W / 400V 출력의 조건을 적용하여 제안하는 구조의 효용성을 검증하고자 한다.

### 1. 서론

일반적으로 서버용 전원장치는 Boost PFC(Power Factor Correction, 역률보상회로) 컨버터와 시스템에 주 전원을 공급하는 DC/DC 컨버터로 구성된다. 그 중 브리지 다이오드를 포함한 Boost PFC 컨버터는 국제 규격인 IEC 61000-3-2 항에서 요구하는 높은 PF(Power Factor) 와 낮은 iTHD(Total Harmonic Distortion)를 만족하기 위해 필요한 회로로 널리 활용되고 있다<sup>[1][2]</sup>.

하지만 이러한 브리지 다이오드를 포함한 Boost PFC 컨버터는 도통 경로상 비교적 많은 수의 소자로 인한 도통손실 때문에 고전력 응용분야에서 높은 시스템 효율을 확보하는 것이 어렵다. 따라서 최근 유수의 전원장치 개발업체와 연구기관에서는 브리지 다이오드를 통합한 브리지리스 형태의 Boost PFC 컨버터에 대한 연구개발을 활발히 진행하고 있다.

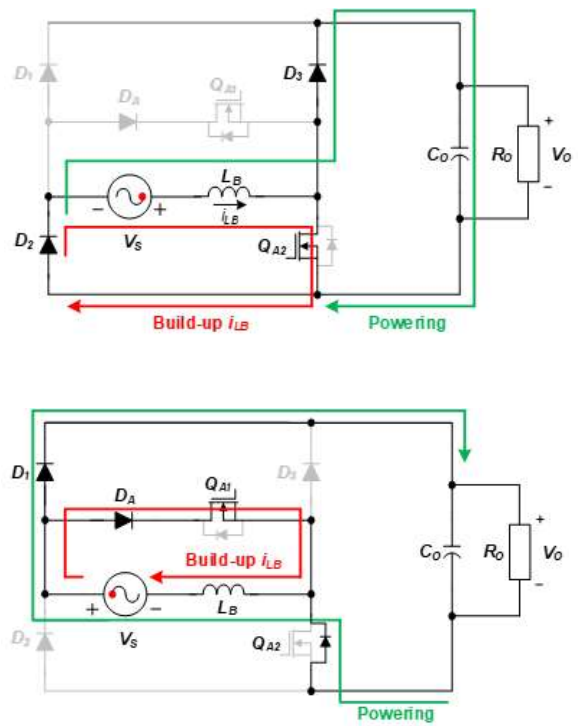
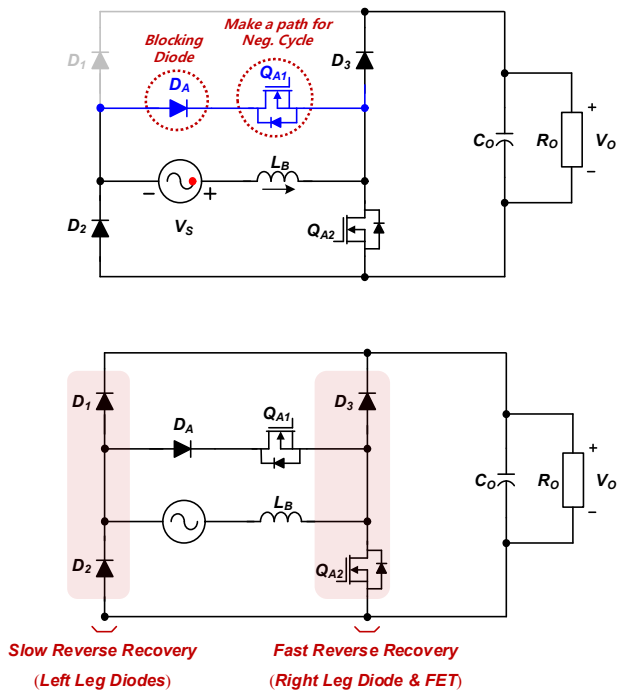


다양한 브리지리스 PFC 컨버터 중, 그림 1의 회로는 양방향 스위치를 가지는 브리지리스 Boost PFC (BBPFC) 컨버터를 나타낸다. 이러한 BBPFC 컨버터는 구조가 매우 단순하고 간단한 제어방법으로 인해 고전력 서버용 전원장치에서 매우 매력적인 토폴로지이다. 이 회로는 양방향 스위치를 활용하고 있기 때문에 양과 음의 주기를 구분하는 Half Cycle Detection 회로없이 제어가 가능한 장점을 지닌다. 또한, 그림에서 표기한 바와 같이 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 의 조합인 왼쪽 레그와 다이오드  $D_3$ 와  $D_4$ 의 조합인 오른쪽 레그의 역회복 특성에 상대적인 편차를 주게 되면 비교적 좋은 CM 노이즈 특성을 보이게 된다. 하지만, BBPFC 컨버터는 물리적 구조상 다소 복잡한 플로팅 형태나 절연형의 게이트 드라이버를 반드시 활용해야 하는 단점을 지닌다. 또한, 양과 음의 주기에서 스위치  $Q_1$ 과  $Q_2$ 를 구동해야 하기 때문에 스위치에서 발생하는 구동손실과 도통손실이 높게 된다. 더욱이 BBPFC에 대한 활용은 이미 등록된 특허로 인한 높은 개런티로 그 활용이 자유롭지 않다.

따라서 본 논문에서는, 이미 등록된 회로 특허를 회피하고 기존 BBPFC가 가지는 단순한 구조와 좋은 CM 노이즈 특성의 장점을 가져가면서, 동시에 BBPFC의 단점을 극복하는 새로운 형태의 브리지리스 PFC 컨버터를 제안하고자 한다. 제안하는 회로는 기존 BBPFC 대비 복잡한 플로팅 형태의 게이트 구동 회로 없이 단순한 부트스트랩 회로로 활용이 가능하다. 또한, 양과 음의 주기에서 오직 하나의 스위치만으로 회로의 운용이 가능하기 때문에 기존 구조 대비 비교적 적은 구동손실과 도통손실을 통해 높은 효율의 확보가 가능하다.

### 2. 제안하는 회로의 컨셉

본 장에서는 제안하는 회로의 컨셉과 특징에 대해 상세히 기술한다. 제안하는 회로는 그림 1(a)에서 보여지는 바와 같은 과정을 통해 산출된다.



먼저, 그림 1(a)에서 검은색의 라인은 입력전압이 DC인 경우를 가정하면 일반적인 Boost 컨버터와 동일한 구조를 지닌다. 본 구조에서 음의 주기의 동작을 만족시켜주기 위해 단순한 다이오드  $D_A$ 와 스위치  $Q_{A1}$ 의 조합을 통해 추가적인 전류 경로를 그림 1(a)의 파란색 라인과 같이 고려해 볼 수 있다. 이러한 과정을 통해 제안하는 구조는 양과 음의 주기에서 도통 경로를 구분하여 만들어줄 수 있게 된다. 여기서, 스위치  $Q_{A1}$ 은 음의 주기 동안 추가적인 도통경로를 만들어 주기 위한 역할을 하게 된다. 또한, 다이오드  $D_A$ 는 양의 주기에서 제안된 구조의 전류 경로를 차단하는 블로킹 다이오드의 역할을 하게 된다. 이러한 과정을 통해 그림 1(b)와 같이 최종적으로 제안하는 컨버터의 형태를 띄게 된다.

제안하는 구조는 간단한 다이오드  $D_A$ 와 스위치  $Q_{A1}$ 의 조합으로 기존 BBPFC가 가지는 장점인 단순한 구조를 지닌다. 또한, 그림 2 (b)와 같이 제안하는 구조는 회로상 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 의 조합인 왼쪽 레그와 다이오드  $D_3$  및 스위치  $Q_{A2}$ 의 조합인 오른쪽 레그의 역회복 특성의 상대적인 편차를 활용하여 기존 구조와 동등 수준의 좋은 CM 노이즈 특성을 가지게 된다. 더불어 구조상 스위치  $Q_{A1}$ 의 소스단과 스위치  $Q_{A2}$ 의 드레인단이 직렬로 연결되어 있어 마치 레그 구조를 띄고 있음을 볼 수 있다. 이러한 구조에 착안하여 제안하는 구조는 기존 BBPFC가 가지는 단점인 플로팅 형태의 게이트 드라이버가 아닌 단순한 부트스트랩 게이트 회로로 구동이 가능하게 된다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 기존 BBPFC의 경우, 양과 음의 주기에서 항상 스위치 두 개를 구동해야 하는 단점을 지닌다. 하지만, 제안하는 구조는 양과 음의 주기에서 오직 하나의 스위치로 양과 음의 동작을 만족시켜줄 수 있기 때문에 기존 구조 대비 스위치에서 낮은 구동손실과 낮은 도통손실을 지니기 때문에 기존 구조 대비 높은 효율을 가져갈 수 있게 된다.

그림 3은 제안하는 구조에서 동작 원리를 보여준다. 그림 3(a)는 제안하는 구조에서 양의 주기 동안 빌드업 동작과 파워링 동작을 나타내며, 그림 3(b)는 음의 주기에서의 동작을 나타낸다.

그림 3(a)에서 보는 바와 같이, 양의 주기에서 제안하는 구조의 빌드업 동작은 다이오드  $D_2$ 와 스위치  $Q_{A2}$ 를 활용하여 붉은색 라인과 같이 빌드업 동작을 수행한다. 양의 주기에서 파워링 동작은 다이오드  $D_2$ 와 다이오드  $D_3$ 를 통해 초록색의 라인과 같이 파워링 동작을 하게 된다. 반면, 그림 3(b)에서 나타난 바와 같이, 음의 주기에서 제안하는 구조의 빌드업 동작은 다이오드  $D_A$ 와 스위치  $Q_{A1}$ 의 경로를 통해 붉은색의 라인과 같이 이루어지고, 음의 주기에서 파워링 동작은 다이오드  $D_1$ 과 스위치  $Q_{A2}$ 의 바디 다이오드의 초록색 경로로 수행하게 된다.

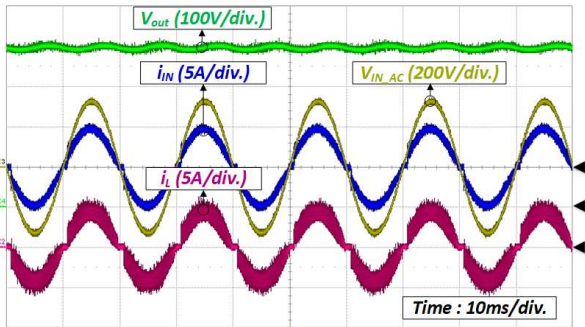
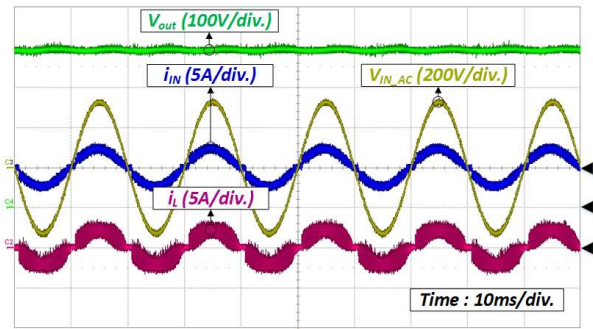
### 3. 실험 결과

앞서 살펴본 분석을 바탕으로, 제안하는 회로의 효율성 검증을 위해 하이라인 입력  $230V_{RMS}$ ,  $800W(400V/2A)$  출력 조건을 프로토타입을 통해 실험을 진행하였다.

실험과 관련된 상세 설계 파라미터는 표 1과 같다. 선정된 스위칭 주파수는 PFC 컨버터에서 범용적으로 사용되는  $65kHz$ 를 적용하였다. 실험에 활용된 주요 소자는 다음과 같다. 먼저 기존 구조의 주 스위치인  $Q_1$ ,  $Q_2$ 와 제안하는 구조의 주 스위치  $Q_{A1}$ 은 동일한 스위치를 활용하였다. 또한, 제안하는 구조의 스위치  $Q_{A2}$ 는 경로상 역회복 특성을 고려하여 Rohm社의 SiC MOSFET를 활용하였다. 더불어, 기존 구조와 제안하는 구조에서 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 는 일반적인 정류 다이오드를 활용하였고, 제안하는 구조에서 블로킹 역할을 담당하는 다이오드  $D_A$ 는 일반적인 FR (Fast Recovery) 다이오드를 활용하여 회로를 구성하였다. PFC 인덕터의 경우, CCM(Continuous Conduction Mode) 동작을 감안하여 풀부하 조건에서 인덕터 전류의 Ripple ratio가 0.35를 기준으로 설계를 진행하였다. 앞서 언급한 설계 조건을 바탕으로 진행된 실험결과는 다음과 같다.

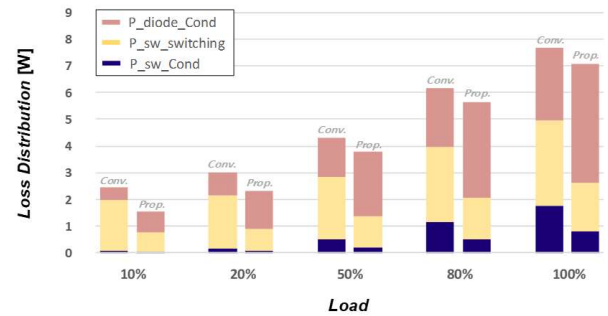
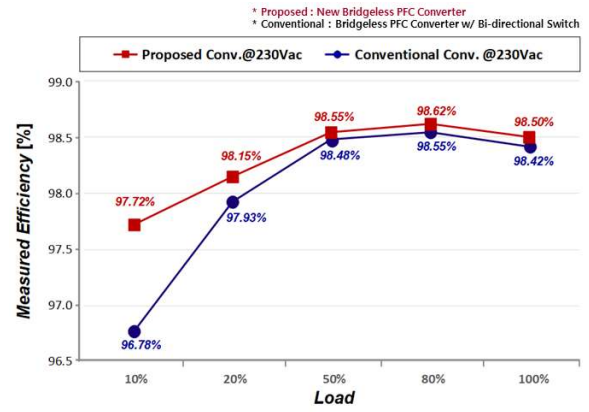
그림 4는 주요 출력조건인 50% 부하와 풀부하 조건에서 제안하는 구조의 정상상태 동작 파형을 보여준다.

Components	Conv. Boost PFC Rectifier	Prop. Boost PFC Rectifier
Input	High Line (230V <sub>RMS</sub> )	
Output	400V/2.0A (800W)	
$f_{sw}$	65kHz	
Main Switches	$Q_1, Q_2$ : IPP60R099C6 (650V, 37A, 99m $\Omega$ )	$Q_{A1}$ : IPP60R099C6 (650V, 37A, 99m $\Omega$ ) $Q_{A2}$ : SCT3080ALGC11 (650V, 30A, 80m $\Omega$ )
Rectifier Diodes	$D_1, D_2$ : LL25X60B (600V, 25A, 3.0 $\mu$ s)	
Powering Diode	$D_3, D_4$ : SCS212AJ (650V, 12A, 16ns)	$D_3$ : SCS212AJ (650V, 12A, 16ns)
Blocking Diode	-	$D_A$ : BYV29X-600 (650V, 9A, 60ns)
Inductors	CH270043, 1.0 $\Phi$ , 82Turns, 820 $\mu$ H	



여기서 초록색 라인은 컨버터의 출력전압, 노란색 라인은 입력전압, 파란색 라인은 입력전류를 나타내고 아래 빨간색의 라인은 인덕터 전류를 나타낸다. 그림 4에서 보인 바와 같이, 제안하는 구조는 입력전압과 입력전류의 위상이 동상에 가까운 파형을 보여준다. 또한, 제안하는 구조에서 주요 출력 부하의 동작 파형을 살펴보면 출력전압이 안정적으로 조절이 된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 실험을 통해 제안하는 구조에 대한 주요 부하 조건에서 안정적인 운용이 가능함을 검증하였다.

그림 5(a)는 실험을 바탕으로 YOKOGAWA 社の WT-1600 기기를 통해 측정된 기존 구조와 제안하는 구조의 효율 측정치를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 기존 구조와 제안하는 구조 모두 서버용 전원장치의 고효율 등급 기준인 Titanium level을 모두 만족한다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림에서 나타난 바와 같이 제안하는 구조가 기존 구조 대비 전 부하 영역에서 높은 효율을 획득할 수 있음을 보여준다.



이와 관련하여 산출된 손실 분포도는 그림 5(b)와 같다. 그래프에서 왼쪽 바는 기존 구조의 손실 분포도이며, 오른쪽 바는 제안하는 구조의 손실 분포도를 나타낸다. 손실 분포도를 통해 살펴보면 제안하는 구조가 도통 경로 상 많은 다이오드의 수로 인해 다이오드에서 발생하는 도통손실이 상대적으로 높다. 그러나, 앞서 설명한 바와 같이 기존 구조는 양과 음의 주기에서 항상 두 개의 스위치를 구동해야 하지만 제안하는 구조는 양과 음의 주기에서 하나의 스위치로도 운용이 가능하다. 이로 인해 스위치에서 발생하는 구동손실과 도통손실이 기존 구조 대비 상대적으로 낮게 된다. 이를 바탕으로 산출된 총 손실을 비교해 보면 전 부하 영역에서 제안하는 구조가 기존 구조 대비 낮은 손실을 가져가게 됨에 따라 전반적으로 높은 효율 달성이 가능하다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 새로운 형태의 브리지리스 PFC 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 기존 구조가 가지는 장점인 간단한 구조의 장점과 구조상 왼쪽 레그와 오른쪽 레그의 역회복 특성의 편차를 활용하여 좋은 CM 노이즈 특성을 가진다. 제안된 컨버터의 경우, 복잡한 플로팅 형태의 게이트 드라이버 회로가 아닌 간단한 부트스트랩 회로를 활용하여 회로를 운용할 수 있다. 더불어 제안된 컨버터는 입력의 양과 음의 주기에서 단 하나의 스위치를 사용하여 회로를 구동할 수 있기 때문에 기존회로 대비 적은 손실을 가져 높은 효율의 획득이 가능하다.

#### 참고 문헌

- [1] Grattan analysis of ABS (2017) "Retail electricity prices rose sharply from the late 2000s"
- [2] 80 Plus Incentive Program. [Online]. Available: <http://www.80plus.org>.