

소프트 스위칭이 가능한 토렘폴 브리지리스 역률보상회로

이영달¹, 김정은², 백재일¹, 김동관¹, 문건우¹
한국과학기술원¹, 솔루엠²

A Soft-Switching Totem-pole Bridgeless Boost Power Factor Correction Rectifier Having Minimized Conduction Losses

Young Dal Lee¹, Chong Eun Kim², Jae Il Baek¹, Dong Kwan Kim¹, and Gun Woo Moon¹
KAIST¹, SOLUM²

ABSTRACT

본 논문에서는, 경부하 조건에서 저감된 스위칭 손실과 중부하 이상 조건에서 영전압 스위칭을 통해 높은 효율을 가지는 토렘폴 브리지리스 역률보상회로를 제안한다. 토렘폴 브리지리스 역률보상회로는 기존 브리지 다이오드를 포함한 역률보상회로의 단점인 도통패스 구간의 비교적 많은 소자 수를 통한 도통손실이 다소 큰 단점을 보완한 회로이다. 하지만, 토렘폴 브리지리스 역률보상회로는 여전히 하드 스위칭을 통한 손실과 주 파워링 다이오드의 역회복 손실로 인한 단점을 지니고 있게 되며, 그로 인해 현재로서는 높은 효율과 안정적인 동작을 위해서는 부득이 GaN FET를 적용한 개발이 대부분이다. Full 부하 조건의 전류 용량을 고려하여 높은 전류 정격을 가지는 GaN FET를 주 스위치로 활용할 경우, 전류용량과 비례하여 기생 커패시턴스에 의한 손실이 커지기 때문에 경부하 조건에서 높은 효율을 확보하기가 다소 어렵다. 또한 구조상 물리적으로 여전히 하드 스위칭 동작을 할 수 밖에 없기 때문에 서버용 전원장치에서 요구하는 높은 효율을 달성하는데 한계를 지니며 높은 비용이 요구되는 단점을 지니게 된다. 이를 해결하기 위해, 제안하는 회로는 간단한 회로를 통해 경부하 조건에서 저감된 스위칭 손실과 중부하 이상 조건에서 소프트 스위칭을 만족하여 전체 부하 조건에서 기존의 GaN FET를 활용한 토렘폴 구조 대비 높은 효율을 가지게 된다. 또한, 토렘폴 구조임에도 불구하고 중부하 이상 영역에서 소프트 스위칭 동작을 통해 주 스위치를 비교적 저렴하고 신뢰성이 검증된 Si MOSFET을 적용할 수 있다는 장점을 지닌다. 제안하는 회로의 효용성을 증명하기 위해, 하이라인 입력 전압과 750W 출력 조건에서 실험을 진행하였다.

1. 서론

최근 들어 인터넷이 전 세계적으로 보급됨에 따라서, 데이터 센터의 전력 소비량이 급격하게 증가하고 있다. 이와 같은 추세에 따라서 서버용 전원장치는 높은 효율을 요구하고 있으며, 서버용 전원장치의 특징인 Redundancy 동작을 통한 시스템 운용으로 인해 경부하 조건에서도 높은 효율을 요구하고 있다.

서버용 전원장치는 일반적으로 역률보상회로와 시스템에 주 전원을 공급하는 DC/DC 컨버터로 구성된다. 그 중 브리지가이드를 포함한 역률보상회로는 규격 IEC 61000 3 2에서 요구하는 높은 PF와 낮은 THD를 만족하기 위해 필요한 회로로 널리 쓰이고 있다[1]. 하지만 도통패스 구간에 비교적 많은 수의 소자로 인한 도통 손실로 인해 최근 유수의 전원장치 개발 업체에서는 브리지 다이오드를 통합한 브리지리스 형태의 역률

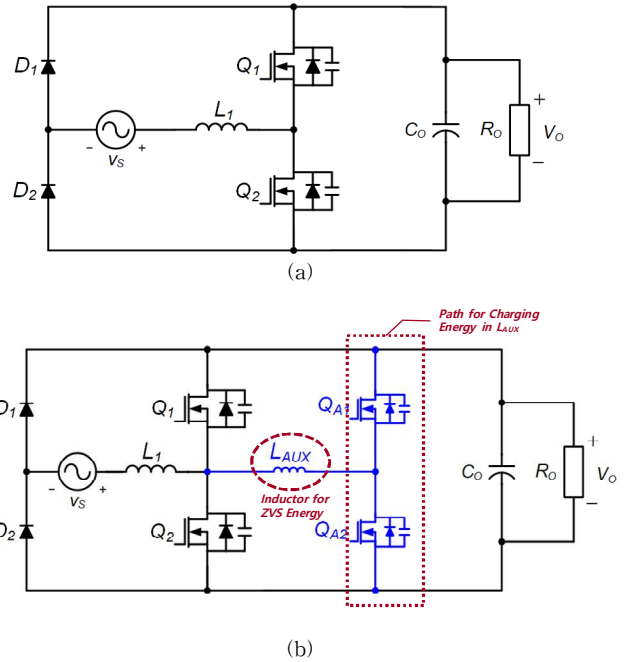


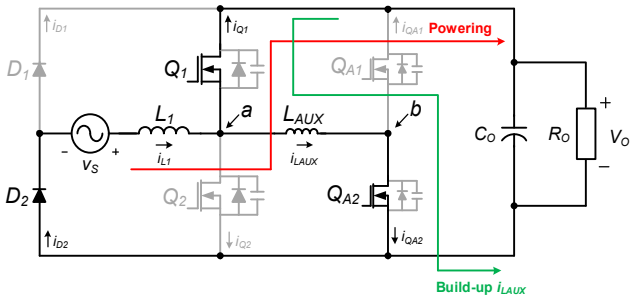
그림 1. (a) 기존의 토렘폴 브리지리스 역률보상회로, (b) 제안하는 토렘폴 브리지리스 역률보상회로

보상회로에 대한 개발을 활발히 진행하고 있다[2]. 다양한 브리지리스 역률보상회로 중, 그림 1(a)의 토렘폴 브리지리스 역률보상회로는 전력밀도를 고려할 때 상대적으로 적은 수의 소자를 가질 수 있는 장점과 한 쪽 레그에 저주파수의 다이오드가 배치됨에 따라 전자방해대성(EMI)에 강한 특징을 지니 이를 활용한 회로 개발이 활발히 이루어지고 있다. 하지만, 토렘폴 브리지리스 역률보상회로 역시 물리적 구조상 하드 스위칭 동작 및 주 다이오드의 역회복 특성으로 인해 높은 비용의 GaN FET를 활용한 개발에 집중되어 있다는 단점과 향후 지속적으로 시장에 요구되는 효율향상에는 한계가 있게 된다.

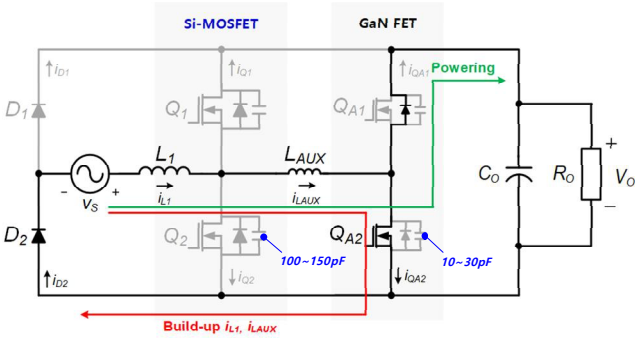
따라서 본 논문에서는, 간단한 회로와 제어를 통해 경부하 영역에서 저감된 스위칭 손실을 획득하고 중부하 이상 영역에서는 소프트 스위칭 동작을 바탕으로 토렘폴 구조임에도 주 스위치를 Si MOSFET을 통해 안정적으로 시스템을 운용하고 전 부하영역에서 향상된 효율을 가져갈 수 있는 방법을 제안한다.

2. 제안하는 회로의 컨셉

제안하는 회로는 그림 1(b)와 같다. 그림 1(a)의 기존 토렘폴 브리지리스 역률보상회로를 기반으로 뒷 단에 소프트 스위칭 동작을 위해 그림 1(b)와 같이 전류 패스를 추가한다. 각각의 소자에 대한 역할은 다음과 같다.



(a)



(b)

그림 2. 제안하는 컨버터의 특징 (a) 중부하 조건에서 영전압 스위칭을 위한 동작 (b) 경부하 조건에서의 빌드업과 파워링 동작

L_{AUX} 는 소프트 스위칭 동작을 위해 에너지를 전달하는 매개체의 역할을 수행하고 보조스위치 QA_1 과 QA_2 는 부하별로 구별된 동작을 위한 도통 구간으로 활용된다. 이와 같은 구조로 인하여 제안하는 컨버터가 갖는 특징은 그림 2와 같다. 먼저 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이, 기존의 토렘폴 브리지리스 역률보상회로는 주 스위치 Q_1 과 Q_2 의 빌드업과 파워링 동작을 통해 에너지를 전달하게 되는 하드스위칭 동작을 하게 되고 파워링이 끝날 무렵의 주 다이오드의 역회복 특성으로 인해 스위치에 인가되는 스트레스가 크다는 문제점을 지니게 된다. 하지만 제안하는 컨버터의 경우, 그림 2(a)와 같이 뒷단의 회로를 활용하게 됨에 따라, 그림 3과 같이 주 스위치 Q_1 과 Q_2 의 소프트 스위칭 동작을 할 수 있게 되고, 동시에 주 다이오드의 턴 오프시 역회복 특성을 다소 완화할 수 있게 된다. 따라서, 기존의 토렘폴 브리지리스 역률보상회로와 달리, 영전압 스위칭 동작과 완화된 역회복 특성으로 인해 스위치에 인가되는 스트레스를 현저히 줄일 수 있게 되어 주 스위치를 Si MOSFET으로 대체할 수 있게 된다.

제안하는 컨버터의 또 다른 장점은 경부하 영역에서 스위칭 손실을 크게 저감할 수 있다는 것이다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 기존의 토렘폴 브리지리스 역률보상회로의 경우, 100% 부하 조건을 고려하여 높은 전류 정격을 가지는 주 스위치를 활용하여 빌드업과 파워링 동작을 수행한다. 이 경우 스위치의 일반적인 특성상 높은 전류 정격 특성은 기생 커패시턴스의 값과 비례하기 때문에 스위칭 손실에 부담을 주어 경부하에서 높은 효율을 획득할 수 없다는 문제를 지닌다. 하지만 제안하는 회로의 경우, 그림 2(b)와 같이 낮은 전류정격을 가지고 그로 인해 기생 커패시턴스가 상대적으로 주 스위치 대비 상대적으로 작은 보조스위치 QA_1 과 QA_2 를 통해 빌드업과 파워링 동작을 수행함으로써 스위칭 손실을 대폭 저감할 수 있게 되어 경부하 효율 향상을 가져갈 수 있게 된다. 따라서 그림에서 볼 수 있듯이, 보조회로의 활용을 특정부하 조건에만 국한하지 않고 전부하 조건에서 활용할 수 있기 때문에 보조스위치의 활용도가 높다는 장점을 지닌다.

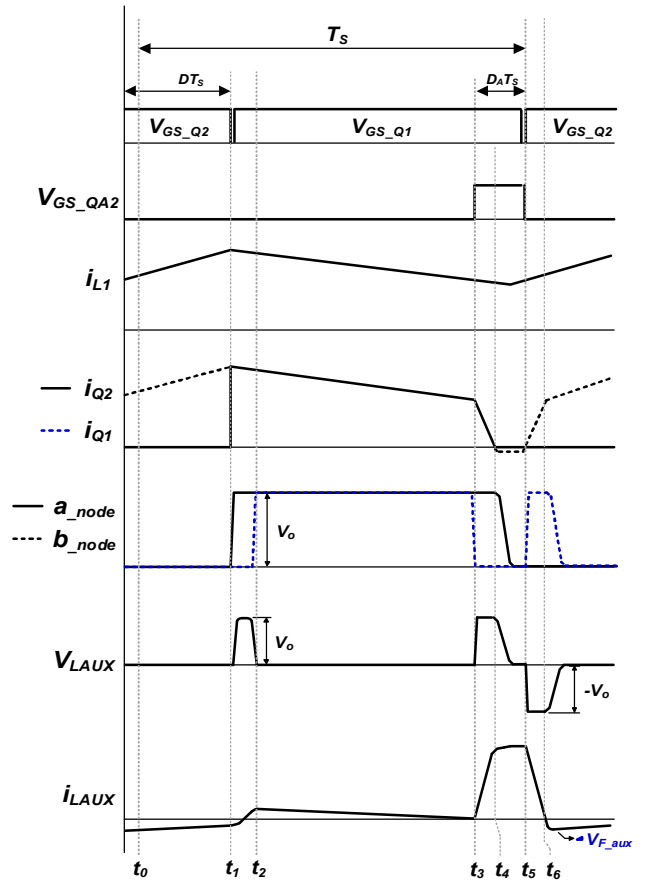


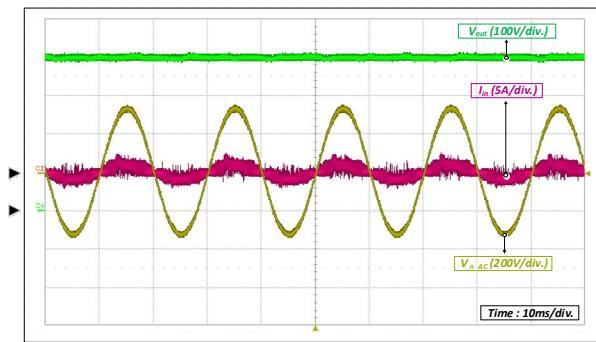
그림 3. 제안하는 회로의 주요 동작원리

3. 실험 결과

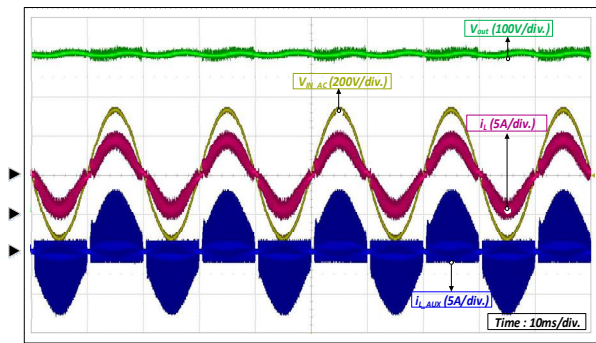
앞서 설명한 내용들을 검증하기 위해, 하이라인 입력 조건, 750W(400V/1.875A) 출력의 프로토타입을 통해 실험을 진행하였다. 그림 4는 경부하과 중부하 이상 영역에서 제안하는 토렘폴 브리지리스 역률보상회로의 주요 파형을 나타낸다.

앞서 언급한 바와 같이, 제안하는 컨버터는 일정부하영역을 기점으로 다른 형태의 동작을 수행한다. 먼저, 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 경부하 조건에서는 보조스위치를 활용한 빌드업과 파워링 동작을 하게 되어 일반적인 토렘폴 브리지리스 역률보상회로와 유사한 형태의 동작을 진행한다. 또한, 아래 그림 4(b) 파형을 통해 살펴보게 되면 중부하 조건에서는 보조회로를 통해 추가적인 인덕터 전류를 생성시키는 동작을 하게 되고 이로 인해 소프트 스위칭 동작을 수행하게 된다.

그림 5는 동일 부하조건에서 제안하는 회로의 AC입력 만주기 동안 소프트 스위칭 동작의 제어가 원활히 이뤄지고 있는 것을 나타낸 파형이다. 제안하는 회로는 주 인덕터의 평균전류값을 센싱하여 이를 통해 보조스위치의 턴온타임을 결정하게 된다. 보조스위치를 턴 온 시켜주는 시간은 영전압 스위칭 안정성과 더불어 보조회로의 도통손실에 기여하는 주요한 요소이기 때문에 이에 대한 적절한 제어가 필요하다. 본 파형을 통해 확인할 수 있듯이, 제안하는 회로의 경우 동일 부하조건에서 보조회로의 턴 온 시간이 적절히 제어되고 있고, 이에 따라 중부하 영역에서 원활한 소프트 스위칭이 이뤄지고 있어 부하가 높은 영역에서 스위칭 손실을 크게 저감할 수 있다. 또한, 제안하는 회로는 기존의 토렘폴 브리지리스 역률보상회로와 달리 영전압 스위칭이 가능하기 때문에, 상대적으로 크게 완화된 역회복 특성의 획득이 가능하므로 스위치에서 부담하게 되는 스트레스를 크게 줄일 수 있어 높은 효율을 달성할 수 있다.

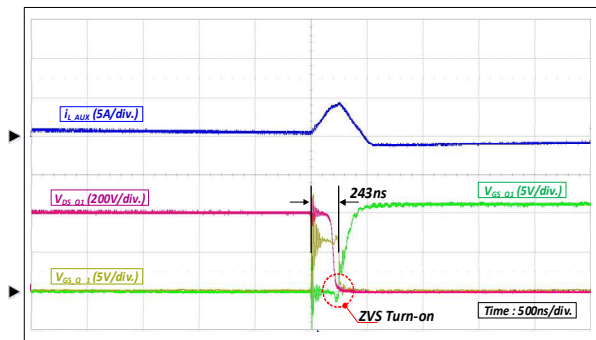


(a)

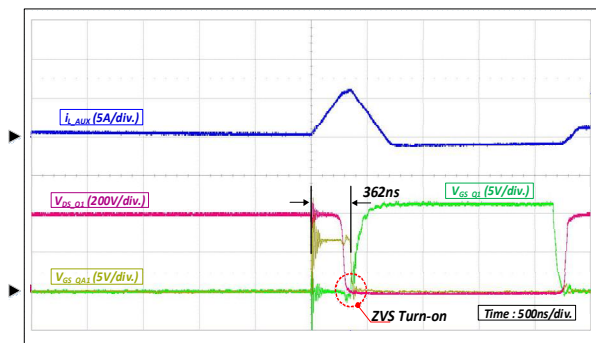


(b)

그림 4. 특정 부하에서의 주요 파형. (a) 경부하 영역에서의 동작 파형, (b) 중부하 영역에서의 동작 파형



(a)



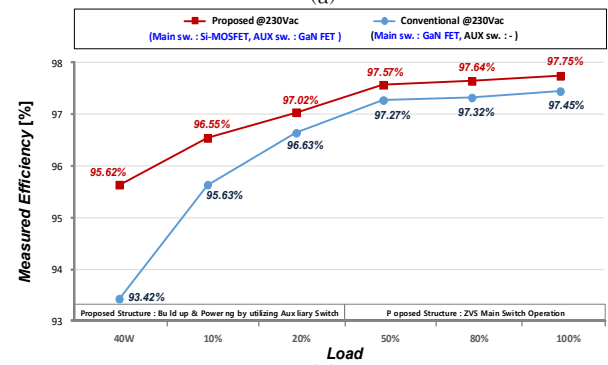
(b)

그림 5. 230V_{RMS}, 100% 부하 조건에서 영전압 스위칭 주요 파형. (a) $i_{LAUX} = 2.5[A]$, (b) $i_{LAUX} = 5[A]$

그림 6은 전 부하 영역에서 제안하는 회로와 기존의 토타폴 브리지리스 역률보상회로의 효율을 비교한 그래프이다. 앞서 언급한 바와 같이, 제안하는 회로는 경부하 영역에서 낮은 전류정격을 가지고 그에 따라 주 스위치 대비 낮은 기생 커패시턴스를 가지는 보조스위치를 활용한 빌드업과 파워링 동작을 바탕으로 스위칭 손실을 크게 저감하였다. 또한, 제안하는 회로는 기존의 토타폴 브리지리스 역률보상회로와 달리 중부하 영역에서 보조회로를 활용한 영전압 스위칭이 가능하기 때문에, 중부하 영역에서도 높은 효율을 달성할 수 있었다. 뿐만 아니라, 제안하는 회로는 소프트 스위칭 동작을 통해 주 다이오드

Components	Conv. Conventional Totem-pole Converter	Proposed Totem-pole Converter
Input	High Line (230Vrms)	
Output	400V/1.875A (750W)	
Fsw	100kHz	
Main Switches	2pcs, GaN FET GS66508T (650V, 30A, 50mΩ) (\$13.92 x 2)	2pcs, Si-MOSFET IPP65R110CFDA (650V, 34A, 110mΩ) (\$2 x 2)
Auxiliary Switches	-	2pcs, GaN FET GS66502B (650V, 7A, 200mΩ) (\$7.78 x 2)
Inductors	1 Main Inductor	1 Main Inductor 1 Aux Inductor
Cost (Active Components)	High cost	Low cost
Efficiency	Better	Best

(a)



(b)

그림 6. 효율 비교. (a) 기존과 제안하는 회로의 설계 사양, (b) 기존과 제안하는 구조의 측정된 효율 비교 결과

의 역회복 특성을 크게 완화할 수 있게 됨에 따라 스위치에서 부담하는 스트레스를 저감할 수 있게 된다. 그로 인해 토타폴 구조임에도 주 스위치를 Si MOSFET을 활용함에도 안정적인 운용이 가능하게 된다.

따라서 이러한 특징들로 인해, 제안하는 회로는 기존의 토타폴 브리지리스 역률보상회로에 비해 주 스위치를 Si MOSFET을 활용함에도 안정적인 운용, 비교적 낮은 비용 및 전 부하 영역에서 높은 효율을 달성하였다.

4. 결론

본 논문에서는, 기존의 토타폴 브리지리스 역률보상회로에 간단한 보조회로를 통해 전 부하 영역에서 높은 효율을 가지는 토타폴 브리지리스 역률보상회로를 제안하였다. 제안하는 회로는 보조 회로를 통해 경부하와 중부하에서 구별된 동작을 통해 손실을 저감하게 된다. 경부하 영역에서는 낮은 전류정격을 가지는 보조회로를 통한 빌드업과 파워링 동작을 통해 스위칭 손실을 저감시킨다. 또한, 중부하 영역에서는 보조회로를 통한 소프트 스위칭 동작을 바탕으로 스위칭 손실을 크게 저감하게 된다. 더불어 소프트 스위칭 동작을 통해 주 다이오드의 역회복 특성을 대폭 완화하여 주 스위치에 인가되는 스트레스를 대폭 줄일 수 있는 장점을 지닌다. 이를 통해 제안하는 회로는 주 스위치를 GaN FET에서 Si MOSFET으로 대체가 가능하다는 장점을 지닌다. 이와 같은 특징들로 인해, 제안하는 회로는 토타폴 구조임에도 불구하고 주 스위치를 Si MOSFET을 활용함에도 안정적인 운용, 낮은 비용 및 전 부하 영역에서 높은 효율 달성이 가능하다.

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1A2B2010328)

참고 문헌

- Y. H. Jeong, J. K. Kim, and G. W. Moon, "A Bridgeless Dual Boost Rectifier with Soft Switching Capability and Minimized Additional Conduction Loss," IEEE Trans. Industrial Electron., Jun. 2017.
- Muntasir Alam, Wilson Eberle, Deepak S. Gautam, and Chris Botting, "A Soft Switching Bridgeless AC DC Power Factor Correction Converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 10, pp. 7716-7726, Oct. 2017.