

새로운 전압채배 정류기가 결합된 LLC 공진형 컨버터

여정현, 김다운, 이동욱* 김정은
국립한국교통대학교

A New Voltage Doubling Rectifier Combined with LLC Resonant Converter

Jung-Hyun Yeo, Da-Un Kim, Dong-Wook Lee* and Chong-Eun Kim
Korea National University of Transportation, Infineon Korea*

ABSTRACT

LLC 공진형 컨버터는 1차측 스위치의 영전압 스위칭(ZVS)과 2차측 스위치 정류기의 영전류 스위칭(ZCS)으로 인해 고효율, 고주파 동작에 매우 효과적인 솔루션이다. 기존 센터탭 정류기(CTR), Full-Bridge, 전압채배 정류기(VDR) 등을 구현할 때 발생하는 점퍼를 제거함으로써 PCB 구현이 용이해지며, 저전압 SR FET 적용 시 구동 전원 구현을 위한 별도의 전원 및 Boot-Strap 회로 없이 2차측 전압채배 커패시터의 전압을 활용하여 구현할 수 있다. 본 논문에서는 VDR을 기반으로 하는 새로운 정류 회로를 제안하고 LLC 공진형 컨버터에 적용하였다.

1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 전부하 조건에서 1차측 스위치의 영전압 스위칭(ZVS)이 가능하며, 2차측 정류 다이오드의 영전류 스위칭(ZCS)을 통해 효율의 희생 없이 스위칭 주파수를 높일 수 있으므로 자성 소자의 사이즈를 저감할 수 있다. 따라서, 고효율 및 고전력밀도의 전력 변환 시스템에 가장 적합한 토폴로지이다.

LLC 공진형 컨버터는 스위칭 주파수가 증가함에 따라 전압 이득이 낮아지는 특성에도 불구하고 무부하 조건에서 출력 전압을 제어할 수 없다.^[1] 이러한 현상은 2차측 정류 다이오드의 기생 캐패시턴스(C)에서 기인하며, 정류 회로가 저전압/고전류 출력 전력 모듈을 위해 SR FET을 사용하여 구현된 경우 쇼트키 다이오드보다 훨씬 더 큰 FET의 C_{oss} 값으로 인하여, 출력 전압 제어 특성이 악화된다.

경부하에서의 제어 특성을 개선하기 위한 다양한 방법이 제안되었지만 전체 효율이 저하될 수 있다는 한계점을 가진다. 한편, [2]에 분석된 바와 같이 CTR 대신 VDR를 채택한 LLC 공진 컨버터는 1차측 공진 회로로 등가화되는 기생 캐패시터 값이 더 낮다. 결과적으로, VDR을 사용하는 LLC 컨버터는 저부하시 더 우수한 제어 특성을 보여준다.

하지만 VDR은 Boot-Strap 또는 추가 변압기 권선을 포함하는 High-Side 게이트 구동 회로가 필요하며, 이는 대전류의 고주파 전력 모듈에 큰 부담이 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터를 위한 새로운 VDR 회로를 제안한다.

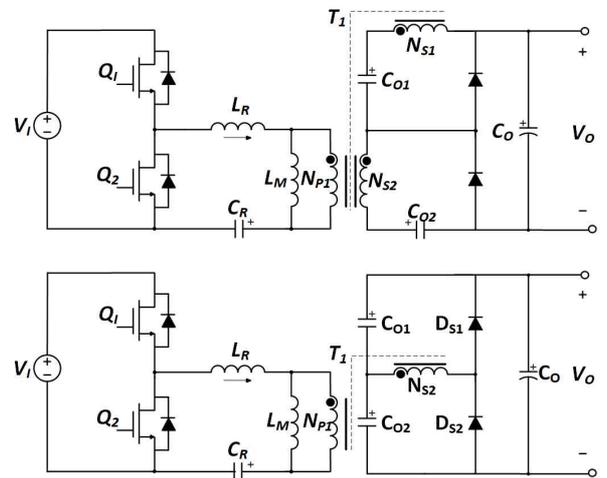


그림 1. 기존 VDR 컨버터 (상) 제안된 VDR 컨버터 (하)

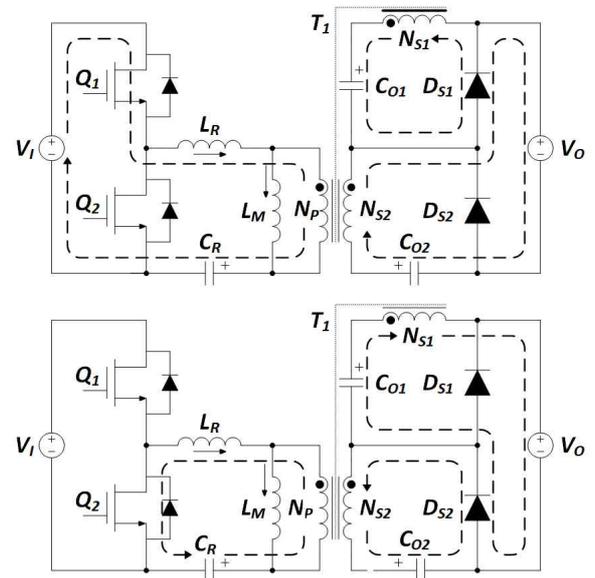


그림 2. 제안된 VDR에서의 모드 동작

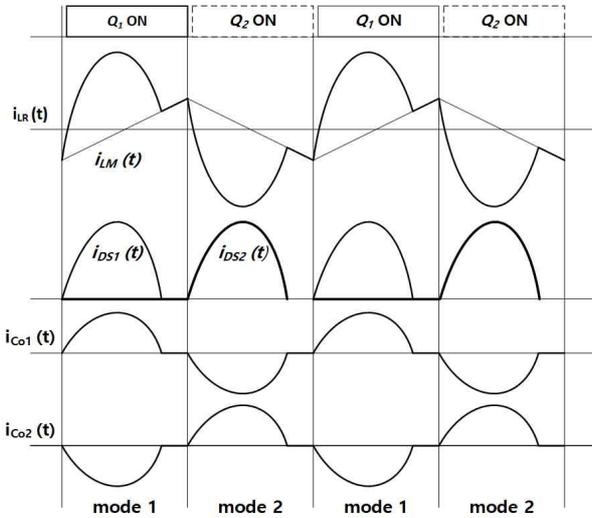


그림 3. 제안된 VDR에서의 전류 파형

2. 새로운 VDR을 갖는 LLC 컨버터

2.1 기본적인 동작 특성

제안된 VDR의 1차측 회로는 기존의 Half-Bridge LLC 공진형 컨버터와 동일하지만, 2차측 정류기는 새로운 VDR을 사용한다. 제안된 VDR은 기존 VDR과 마찬가지로 두 개의 커패시터와 두 개의 정류 다이오드로 구성된다.

제안된 컨버터의 동작은 기존의 LLC 공진형 컨버터와 마찬가지로 두 개의 대칭 모드로 나눌 수 있다. 모드 1에서 Q_1 이 On 된 상태이면, 그림 1과 같이 D_{S1} 을 C_{O1} 을 충전하고 C_{O2} 를 방전한다. Q_2 가 On된 상태이면, 모드 2는 C_{O1} 의 방전 전류와 C_{O2} 의 충전 전류가 D_{S2} 를 통해 흐르도록 한다.

그림 2의 제안된 컨버터의 주요 전류 파형을 살펴보면, 모드 1과 2에서 공진 전류가 변압기의 두 2차 권선을 통해 흐르며, RMS 값이 낮음을 확인할 수 있다. $N_{S1}=N_{S2}$ 라고 가정하면, 모드 1에서 N_{S1} 의 전압은 V_{CO1} 과 같고 N_{S2} 의 전압은 $V_O - V_{CO2}$ 와 같다. 모드 2는 이와 반대이므로 $V_{CO1}=V_{CO2}=V_O/2$ 가 된다. 제안된 VDR은 기존의 VDR과 동일하게 V_O 와 같은 낮은 전압 스트레스를 가진다. 더불어, 제안된 컨버터는 기존 VDR과 1차측 전류 파형 및 다이오드 전류 등의 기본적인 동작 특성이 동일하다.

제안된 VDR이 적용된 LLC 컨버터의 입출력 관계식은 기존의 VDR이 적용된 LLC 컨버터의 입출력 관계식과 동일하며, 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{k \cdot f_n^2}{\sqrt{[(k+1) \cdot f_n^2 - 1]^2 + f_n^2 \cdot (f_n^2 - 1)^2 \cdot k^2 \cdot Q^2}}$$

$$\left(f_n = \frac{f_{sw}}{f_r}, f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}}, k = \frac{L_m}{L_r}, Q = \frac{1}{n^2 R_e} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, R_e = \frac{2R_o}{\pi^2} \right)$$

2.2 평면형 변압기를 적용한 PCB 구현 용이성

기존 CTR, 기존 VDR, 제안된 VDR 모두 점퍼 사용이 불가피하다. 그러나 제안된 VDR을 적용하면 2차측 권선과 소자가 직접 연결되므로, UU Core를 적용한 평면 변압기로 구현 시, 점퍼를 사용하지 않고 2차측 회로를 구현할 수 있다.^[3]

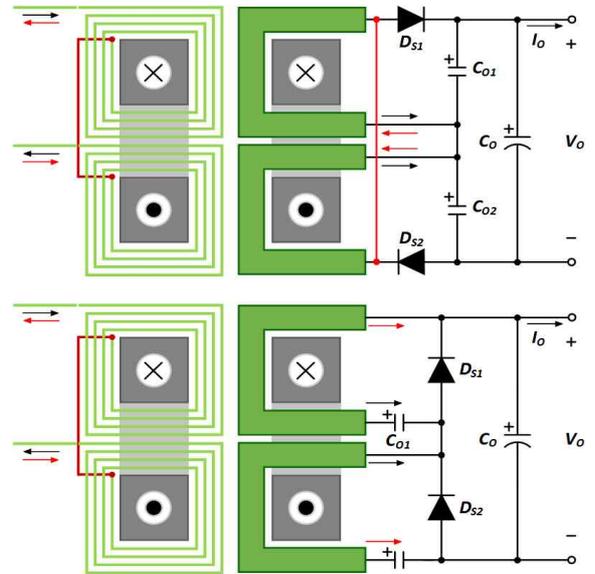


그림 4. 평면변압기를 적용한 기존 VDR (상), 제안된 VDR (하)

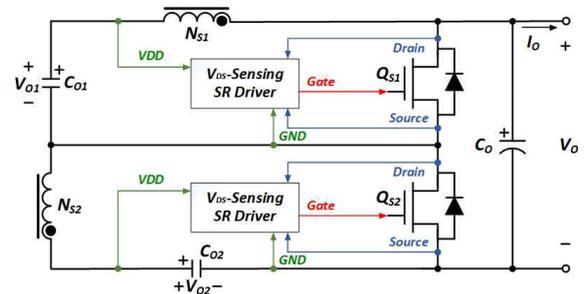


그림 5. 제안된 VDR의 SR FET 드라이버 구동 회로

따라서 제안된 VDR에 평면형 변압기를 삽입하면 점퍼를 줄임으로써 PCB 구현이 용이하며, 각 PCB 층을 효율적으로 활용할 수 있다.

2.3 SR FET의 구동 용이성

기존 VDR의 High-Side FET 소스 전압은 1차측 FET의 스위칭에 따라 변화하므로 게이트 전압 인가가 번거로운 단점이 있다. 정류 다이오드 D_{S1} 과 D_{S2} 의 Anode 단자는 각각 C_{O1} 과 C_{O2} 의 음극에 연결된다. 따라서 정류 회로를 저전압/고전류 전력 모듈용 SR FET로 구현하는 경우, Boot-Strap 회로 또는 부동 전압 소스용 보조 권선 없이 C_{O1} 과 C_{O2} 의 전압을 전원으로 하여 각각 상단 및 하단 FET를 용이하게 구동할 수 있다. 출력 전압의 가능한 범위는 Threshold 이상의 충분한 게이트 전압과 절대적인 최대 게이트 전압 사이를 고려하여 12~36V다.

특히, TEA2093TS 및 UCC24630과 같은 SR FET 게이트 드라이버를 사용할 경우, 제안된 VDR은 기존 VDR보다 직접적인 SR FET 구동이 가능하다.

3. 모의실험결과

새로운 VDR의 기본 동작을 검증하기 위해 24V/240W 출력의 기존 VDR LLC 컨버터와 제안된 VDR LLC 컨버터를 PSIM 회로를 구현하였다.

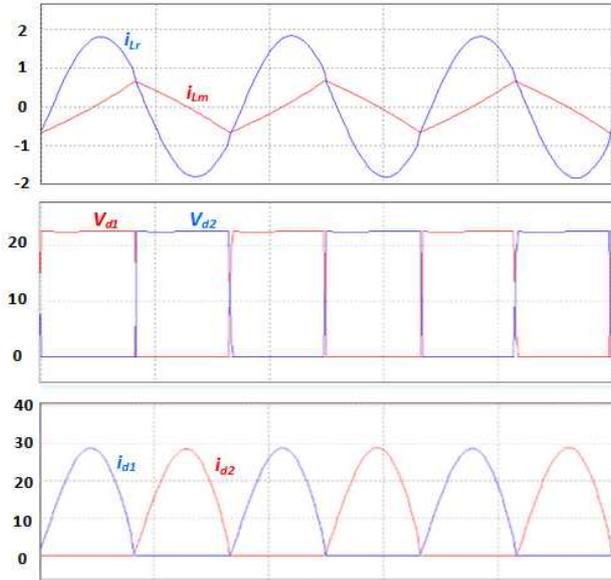


그림 6. 제안된 VDR의 전압 및 전류 파형

그림 5와 같이, 제안된 컨버터는 기존의 VDR과 1차측 전류 및 정류 다이오드의 전류, 전압 파형이 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 기존 VDR과 기본적인 동작 특성이 동일하면서도 SR FET 구동 용이하며, PCB 제작 과정에서 접퍼를 제거함으로써 구현 용이성 및 효율성이 향상될 것으로 기대된다. 이러한 결과는 제안된 컨버터가 기존 VDR에 비해 전반적인 성능 개선을 제공할 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 논문에서는 새로운 VDR 방식을 도입한 LLC 컨버터의 성능 향상에 대해 연구하였다. 제안된 VDR은 SR FET의 구동을 용이하게 할 수 있는 구조를 갖추고 있으며, UU Type의 평면형 변압기 삽입을 통해 접퍼의 사용을 줄임으로써 PCB 구현의 효율성을 향상시킬 수 있는 장점을 제공한다.

모의실험을 통해 확인한 바와 같이, 제안된 컨버터는 기존 VDR과 동일한 기본 동작 특성을 유지하므로 LLC 컨버터의 모든 장점을 가진다. 그러므로 제안된 컨버터는 저전압/고전류 전원 모듈 애플리케이션을 위한 기존 VDR LLC 공진형 컨버터를 대체할 수 있다.

이 논문은 2024년도 한국교통대학교의 교내 학술연구비 지원을 받아 수행한 연구임.

참 고 문 헌

[1] Chong-Eun Kim, "Minimization of Abnormal Output Voltage Rising for LLC Resonant Converter at Very Light Load", Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 12, pp. 10295-10303, 2020, December.

[2] Byoung-Hee Lee, "Analysis of LLC Resonant Converter Considering Effects of Parasitic Components", Proceedings of the IEEE, 2009, October.
 [3] Vamsi K. Pathipati, "Performance Analysis of a High-efficiency Multi-winding Wireless EV Charging System Using U-U and U-I Core Geometries", Proceedings of the IEEE, 2016, June.