

Wireless EV 배터리 충전용 공진형 ZVZCS 벅 컨버터

김재준¹, 전준혁², 경신수², 박지수¹, 이은수¹
 한양대학교 ERICA 전자공학부¹, (주)파워큐브세미²

Resonant ZVZCS Buck Converters for Wireless EV Battery Charging

Jae Joon Kim¹, Joon Hyeok Jeon², Sin Su Kyoung², Ji Soo Park¹, and Eun Soo Lee¹
 Hanyang University ERICA Electrical Engineering¹, PowerCubeSemi, Co., Ltd²

ABSTRACT

본 논문에서는 무선충전 수신부에 적용되는 전기차 배터리 충전을 위한 고효율 및 고출력 밀도 ZVZCS(Zero-Voltage & Zero-Current Switching) 벅 컨버터를 제안한다. 제안된 벅 컨버터는 ZCS Turn-on 및 ZVS Turn-off 동작에 SiC 스위치 1개와 SiC 다이오드 3개만을 사용하여 99.6% 이상의 높은 효율을 달성했다. 제안된 논문의 전력 변환 효율 결과는 스위칭 및 전도 손실을 고려시 스위치 1개와 다이오드 1개를 갖는 기존의 벅 컨버터(99.0%)보다 효율이 우수하다. 제안하는 공진형 ZVZCS 벅 컨버터는 광범위한 듀티 및 소프트 스위칭에 최적화되었으며, 선정된 파라미터를 토대로 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

1. Introduction

전기 자동차(EV)의 세계적인 보급이 가속화되면서, EV 배터리 충전 인프라에 대한 수요는 전례 없이 증가하고 있다. 이러한 환경 변화는 전기차 충전 시스템에 대한 효율적인 전력 변환을 필요로 하는 새로운 도전과제를 제시하고 있다. 특히, 충전 인프라의 증가와 함께 EV 전력 변환장치의 효율 개선은 더욱 중요해지고 있으며, 특히 EV 배터리를 충전하는 전력 변환 장치의 DC-DC 컨버터의 고효율 구동이 필수적이다. 최근 EV 충전 편의성을 위해 SAE J2954에 기반한 EV용 무선충전 송수신 기술이 활발히 진행 중에 있다 [1]. 11kW급 고속 EV 무선충전의 경우 입력 800V DC를 입력으로 하여 수신측 정류기를 거쳐 200 V ~ 700 V의 전압 범위를 갖는 배터리를 충전할 수 있는 컨버터를 사용해야 하며, 그림 1과 같은 벅 컨버터 뿐만 아니라 양방향 CLLC 컨버터, DAB 컨버터 등이 사용될 수 있다 [2]-[3]. 그러나, 높은 전압 수준에서 턴 온 및 턴 오프 구동 시 발생하는 스위칭 손실로 인하여 상대적으로 효율이 낮고, 해당 스위칭 손실을 냉각하기 위해 큰 부피의 방열판을 필요로 한다. 본 논문에서는 1개의 스위치, 3개의 다이오드, 그리고 탭 인덕터를 사용한 공진형 ZVZCS 벅 컨버터를 제안하였다. 본 논문에서 제시된 컨버터는 800V의 입력 전압과 출력 동작점을 고려한 500V의 출력전압을 가진 10kW급 벅 컨버터를 설계하였고 이를 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 ZVZCS 벅 컨버터는 기존 벅 컨버터의 99.1%의 효율(컨버터 총손실 $P_{U1} = 99.0W$) 대비 99.6%의 높은 효율($P_{U2} = 38.9W$)을 달성하였음을 확인하였다.

2. Static Analysis of the Proposed Converters

2.1 The Topology Selection

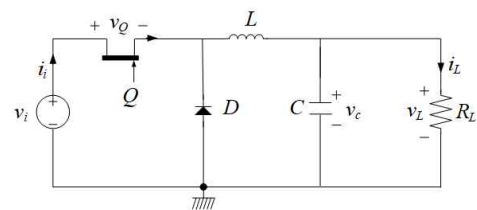


그림 1 기존 벅 컨버터 토폴로지의 예
 Fig. 1 The conventional buck converter

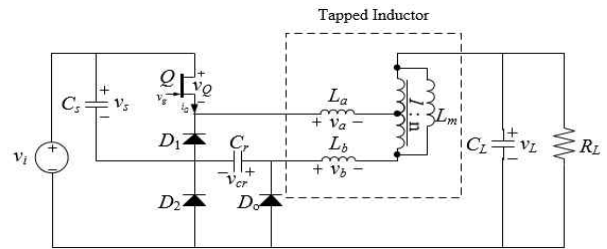


그림 2 제안하는 공진형 ZVZCS 벅 컨버터
 Fig. 2 The proposed resonant ZVZCS buck converter

기존 벅 컨버터는 그림 1과 같이 스위치 1개 및 다이오드 1개의 스위칭 소자를 통해 구현 가능하다. 컨버터의 경우 토폴로지가 정해진 경우, 우선적으로 동작 주파수를 선정해야 한다. 벅 컨버터의 동작 주파수는 그 설계와 성능에 많은 영향을 미치므로, 이를 선정하는 것은 중요하다. 높은 스위칭 주파수는 보통 더 작은 인덕터와 커패시터를 요구한다. 이는 전체 회로의 크기를 줄이는 데 도움이 된다. 하지만 높은 주파수는 스위칭 손실이 증가하므로, 전력 효율성이 감소할 수 있다. 본 논문에서 그림 1에 대한 동작 주파수 f_s 및 인덕턴스 L 에 따른 손실분석을 표 1에 요약하였다. 결과값에 따르면 컨버터 기존 컨버터 총손실(=스위칭 손실 + 다이오드 손실 + 인덕턴스 손실). $P_{U1}(=P_Q+P_D+P_m)$ 은 주파수 및 인덕턴스 증가에 따라 증가함을 알 수 있으며 본 논문에서는 100kHz를 동작 주파수로 선정하였다. BCM의 경우 고효율이 가능하나, 인덕턴스 전류용량 증가 및 EMI noise로 인해 본 논문에서는 각 동작 주파수의 인덕턴스 수치를 BCM 인덕턴스의 5, 10, 15배를 기준으로 CCM 동작에서 시뮬레이션 분석을 실시하였고, 최종적으로 1번 케이스인 $L = 0.200mH$ 로 선정함을 가정한다.

구분	f_s (kHz)	L(mH)	P_Q (W)	P_d (W)	P_m (W)	P_{tl} (W)	효율(%)
1	100	0.200	73.25	19.99	3.12	96.36	99.04
2		0.400	77.16	18.80	4.69	100.65	98.99
3		0.800	79.16	18.22	6.25	103.63	98.96
4	200	0.100	129.25	17.06	1.94	148.25	98.52
5		0.200	137.13	16.99	3.12	157.24	98.43
6		0.400	141.09	16.67	4.69	162.45	98.38
7	300	0.067	187.77	16.71	1.80	206.28	97.94
8		0.133	198.00	16.67	2.19	216.86	97.83
9		0.267	203.28	16.66	3.45	223.39	97.77

표 1 기존 부스트 컨버터의 손실 및 효율 비교
Table. 1 Power and efficiency by the conventional buck converters in Fig. 1.

2.2 Mode Analysis of the Proposed Converter

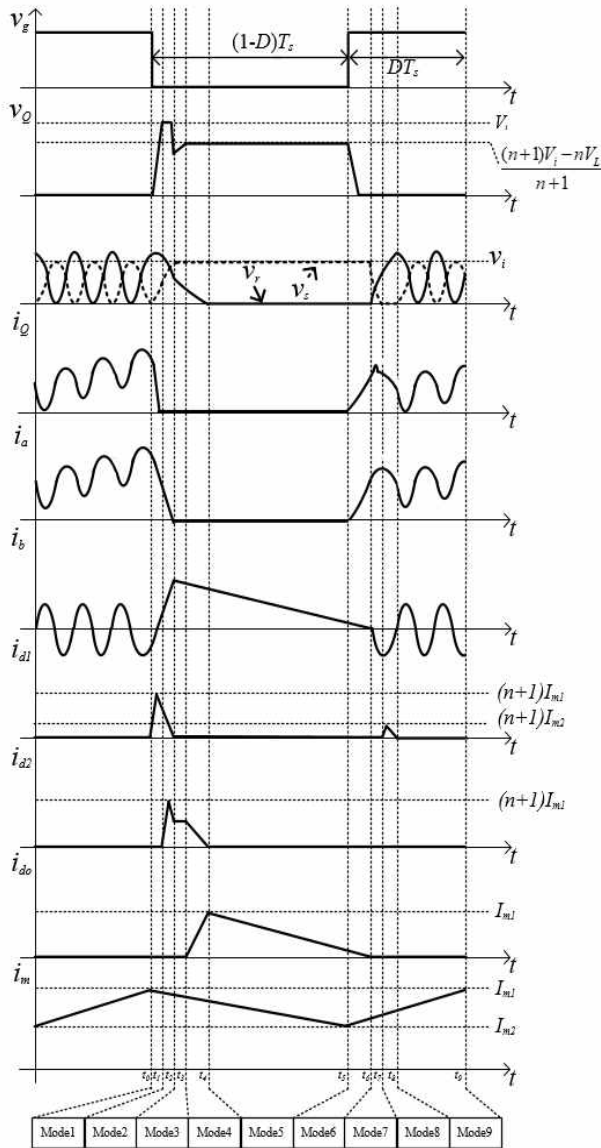


그림 3 제안하는 컨버터의 동작 파형 다이어그램.
Fig. 3 Waveform diagrams of the proposed converter.

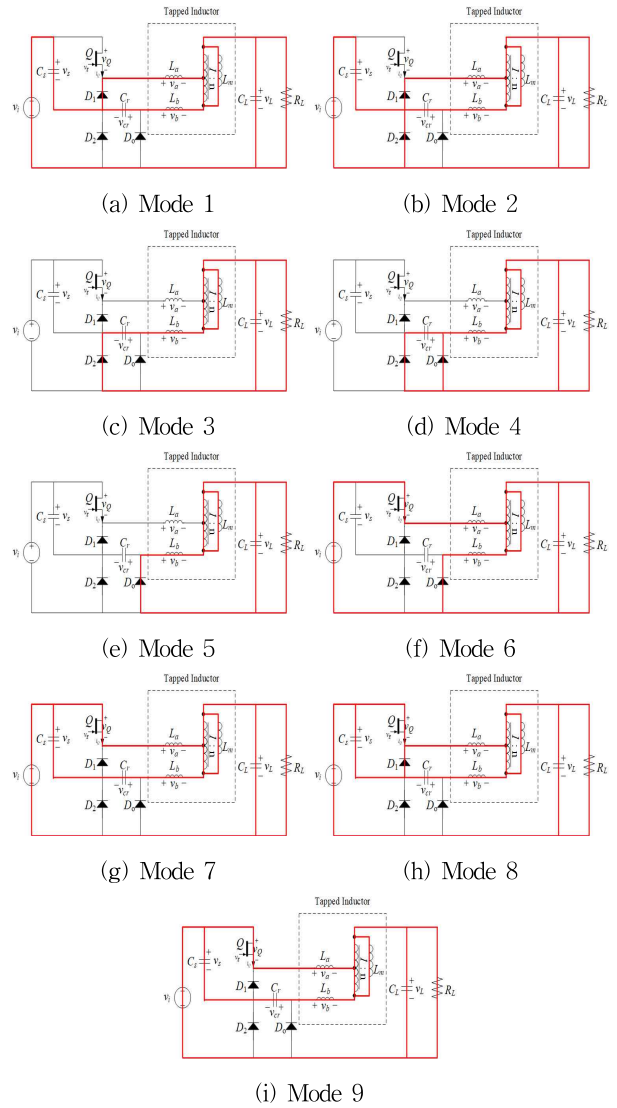


그림 4 제안하는 컨버터의 동작 모드
Fig. 4 Operating modes of the proposed converters.

제안하는 컨버터의 동작 모드는 그림 4와 같이 9가지의 모드로 구분되며, 그림 3은 한 주기의 스위칭 과정을 보여준다. 제안하는 회로는 DCM 모드에서도 작동할 수 있으며, 본 논문에서는 CCM 모드의 작동 분석만을 실시하였다. CCM 모드에서의 제안하는 컨버터의 전압 게인은 식(1)과 같고 n은 탭 인덕터의 턴 비율, D는 스위치의 듀티 사이클을 나타낸다.

$$G_v \equiv \frac{V_L}{V_i} \cong \frac{n+1}{n+1/D} \quad (1)$$

Mode 1 $[t_0-t_1]$: 턴-오프 시 스너버 커패시터 C_s 양단전압 V_s 가 충전되면서 V_o 의 rising slope을 낮출 수 있다. 현재 모드에서 스너버 커패시터 C_s 의 전압 V_s 의 완충은 이루어지지 않는다.

Mode 2 $[t_1-t_2]$: 해당 모드에서는 V_s 가 완충될 때까지 지속되며 리버커리 커패시터 C_r 의 양단 전압 V_r 의 방전이 시작된다.

Mode 3 $[t_2-t_3]$: 이전 모드에서 C_s 의 완충이 이루어진 이후 C_r 의 방전이 지속된다.

Mode 4 $[t_3-t_4]$: 해당 모드에서 출력 다이오드 D_o 의 동작 이후 C_r 의 방전이 완료될 때까지 지속된다.

Mode 5 $[t_4-t_5]$: 해당 모드에서 스위치 Q의 턴 온 상태 도달 이전

까지 현재 상태가 지속된다. 이 상태는 C_s 의 완충 C_r 의 완전 방전 상태이다.

Mode 6[t_5-t_6]: 스위치 Q가 턴 온 되고, 탭 인덕터의 누설 인덕턴스 성분 L_a 에 의해 전류 rising slope를 낮출 수 있어 Turn-on ZCS가 가능하다.

Mode 7[t_6-t_7]: 현재 모드에서 턴 온 상태에 진입한 이후 D_0 의 잔류전하가 모두 방전되고, C_s 의 방전과 C_r 의 충전이 시작되는 단계이다.

Mode 8[t_7-t_8]: 마지막 모드에서 페 루프의 공진 파형 이전 링크 다이오드 D_1 의 도통을 통한 해당 공진 파형에 도달하기 위한 커패시터의 전압값을 조절한다.

Mode 9[t_8-t_9]: 마지막 모드인 페 루프의 공진 파형이 형성되고 다음과 같은 루프로 스위치의 턴 오프 상태가 되기 전까지 현재 모드가 지속된다. 그리고 해당 공진 주파수 f_r 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left\{(n+1)^2L_a + L_b\right\}\left(\frac{C_r C_s}{C_r + C_s}\right)}} \quad (2)$$

2.3 Parameter Selection

본 논문에서 주요 파라미터인 커패시턴스 C_s , C_r 과 누설 인덕턴스인 L_a , L_b 의 선정은 컨버터의 전체 성능에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 스너버 커패시터 및 리커버리 커패시터의 값은 명시적으로 계산되지 않으며, 시뮬레이션을 통해 결정된다. 본 논문에서는 먼저 턴 비율 n 의 선정을 가정하였다. n 의 상승은 누설 인덕턴스의 증가로 인한 전력 손실 증가와 스위칭 소자에 부담이 증가하기 때문에 이를 경감시키기 위하여 $n = 1$ 로 가정한다. n 이 결정되면 턴 비율에 따라 L_a 와 L_b 의 비율은 자동으로 결정된다. 2.4절에서 제안하는 영 전압점 스위칭의 듀티 정밀도를 위한 공진 주파수 $f_r = 500\text{kHz}$ 로 선정된 이후 가능한 파라미터의 경우의 수를 표2에 요약하였다. 해당 케이스에서 전력 변환 효율이 가장 좋은 3번 케이스를 최종 파라미터로 선정하였다.

구분	$C_s(\text{nF})$	$C_r(\text{nF})$	$L_a(\mu\text{H})$	$L_b(\mu\text{H})$	Effi[%]
1	2	2	20	20	99.51
2	4	4	10	10	99.44
3	6	6	6.7	6.7	99.61
4	8	8	5	5	99.60
5	10	10	4	4	99.53

표 2 소자 파라미터에 따른 전력 변환 효율 비교

Table. 2 Power conversion efficiency comparison according to the device parameter.

2.4 Logic Circuit for Zero Voltage Switching

본 논문에서 V_s 가 0V에 도달하였을 때 자동으로 스위칭 되는 논리 회로를 구현하였다. 그림 3의 Mode 9 공진 루프 구간에서 Mode 1로 진행 시 스위치 전압의 기울기는 V_s 의 잔류전하가 모두 방전되고 스위칭 되어야 스위치 전압의 기울기를 최대한 낮출 수 있고, 이는 스위치 전압과 전류의 교차 면적을 감소하게 하여 스위치 손실을 최소화에도달하게 한다. 이를 위해 본 논문에서는 제어기의 인가 듀티인 V_d 를 latch 회로의 세트(Set)

에 연결하여 High 신호일 때 리셋(Reset) 부분에 반전 신호로 연결하여 게이트 인가 신호를 High로 유지한다. 인가 듀티가 Low 신호로 반전되었을 때 V_s 의 전압이 0V에 도달하였을 시기에 리셋에 High 신호가 인가되어 최종적으로 스위치의 신호가 Low에 도달하게 된다. Duty를 0.2에서 0.8까지 가변하였음에도 $V_s = 0V$ 시에 스위칭하여 컨버터가 정상 동작함을 확인하였다. 제안하는 논리 회로를 그림 5에 나타내었고, 그림 5의 논리 회로를 활용한 컨버터 시뮬레이션 파형을 그림 6에 나타내었다.

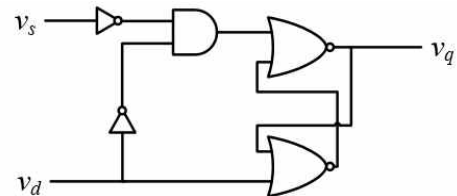


그림 5 제안하는 Turn-off ZVS를 위한 논리 회로
Fig. 5 The proposed logic circuit for Turn-off ZVS

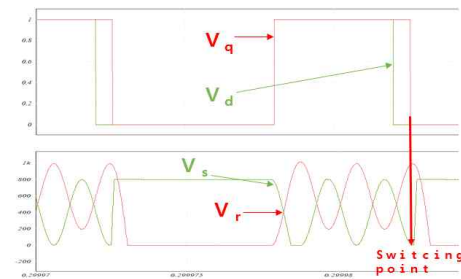


그림 6 래치 회로를 적용한 스위칭 결과 파형
Fig. 6 Simulation result by using latch circuit for the proposed circuit

3. 결론 및 향후계획

논문에서 제안된 탭 인덕터 기반 벽 컨버터의 성능 검증을 위해 (주)파워큐브세미社의 SiC 스위치 소자인 PCCM60120B과 SiC 다이오드 소자인 P2CD40120B의 특성을 시뮬레이션에 반영하여 손실 특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 100kHz 동작 주파수 구동 시 출력전력이 10kW 도달 가능함을 확인하였고, 기존 99.04%의 효율(손실 99.0W) 대비 99.61%의 고효율(손실:38.9W)이 가능함을 확인하였다. 향후 보드 제작 및 실험을 통해 진행 시뮬레이션에 대한 검증과 10kW급 전기자동차 무선 충전 어플리케이션에 적용할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology, International Standard SAE J2954, 2023. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j2954_201904/
- [2] Shenli Zou *et al*, "Sliding Mode Control Scheme for a CLLC Resonant Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 34, No. 12, pp. 12274-12284, Dec. 2019.
- [3] Eun S. Lee, Jin H. Park*, Myung Y. Kim, and June S. Lee, "High Efficiency Module Design of Solid-State Transformers for Railway Vehicles," *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, vol. 8, no. 1, pp. 98-120, Mar. 2022.