

PWM 제어로 구현된 직렬 공진형 컨버터의 승압 동작에서 ZVS를 활용한 효율 향상 기법

장재혁, 김종우, 신유진, 김진경, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

Utilizing Zero Voltage Switching for Efficiency Enhancement in Pulse Width Modulation Controlled Series Resonant Converter's Boost Operation

Jaehyeok Jang, Jongwoo Kim, Yujin Shin, Jinkyung Kim, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

전기자동차 충전기 시스템의 고전력밀도, 고효율화에 따라 공진형 컨버터가 주로 사용되고 있으며, 전기자동차의 배터리 전압이 400V에서 800V로 증가하는 추세에 따라 공진형 컨버터의 넓은 출력 전압 범위는 큰 장점이 되고 있다. 또한 공진형 컨버터 중 직렬 공진형 컨버터 (SRC, Series Resonant Converter)는 작은 순환전류로 인한 고효율로 널리 사용된다.

그러나 SRC의 특성 상 동작주파수를 공진주파수로 고정시켜 높은 효율을 얻기 때문에, 넓은 출력 전압 범위를 얻기 위해서는 PWM 제어가 필요하다. PWM 제어를 통해 2차측 풀 브릿지 정류기를 배전압 정류기의 형태로 변환하며 넓은 이득 곡선을 얻을 수 있고, 이로써 넓은 출력 전압 범위와 높은 효율을 동시에 달성할 수 있다. 그러나 PWM 제어의 경우 자화전류의 순환으로 인해 영 전압 스위칭(ZVS, Zero Voltage Switching) 동작을 달성하지 못하는 구간이 발생할 수 있어, 스위칭손실이 증가하고 컨버터의 효율이 저하될 수 있다. 본 논문에서는 SRC에서 넓은 출력 전압 범위를 갖도록 하는 PWM 제어에서 전 구간 ZVS 동작 달성을 위한 제어 기법을 제안한다.

1. 서론

전기자동차 산업의 성장과 함께, 전기자동차의 전력 변환 시스템의 고효율, 고전력밀도는 더욱 중요해지고 있다. 특히, OBC(On Board Charger)는 전기자동차 내에서 AC전원을 DC전원으로 변환하는 배터리 충전의 핵심 역할을 수행하며, OBC의 고효율 및 고전력밀도는 지향해야 할 차량 구성요소의 핵심 기술이라고 할 수 있다. OBC는 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터로 이루어진 구조를 일반적으로 사용하며, 넓은 출력 전압 범위에서의 고효율과 고전력밀도를 위해 DC-DC 컨버터에는 공진형 컨버터가 주로 사용되고 있다. 또한 공진형 컨버터 중 직렬 공진형 컨버터 (SRC, Series Resonant Converter)를 사용하여 큰 자화 인덕턴스로 인한 작은 순환전류로 공진 주파수 대역의 동작에서 높은 효율을 얻을 수 있다. 하지만 SRC의 특성 상 최대 전압이득이 단위이득에 가깝기 때문에 승압 동작에 제한적이다. 최근 전기자동차는 배터리 전압을 800V로 상승시켜 낮은 전류를 사용하고, 전선의 비중을 줄여 차량의 무게를 감소시키고 최대 주행거리를 늘리는 추세에 따라^[1], SRC의 최대 전압이득이 단위이득에 가까운 특성은 단점이 되고 있다. 이러한 단점을

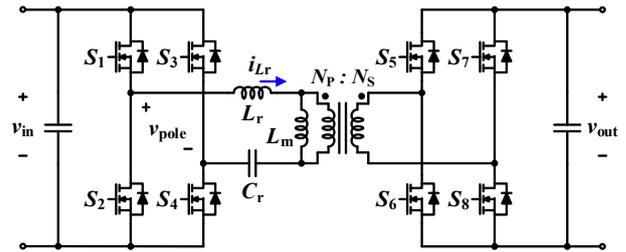


그림 1 직렬 공진형 컨버터
 Fig.1 Series Resonant Converter

극복하기 위해, SRC에서는 PWM 제어를 적용하여 단위이득보다 높은 전압이득을 얻는다.

PWM 제어는 동작주파수를 공진주파수 대역에 고정한 뒤, SRC의 2차측 풀 브릿지 정류기의 스위치 S8의 Duty를 조절하여 배전압 정류기의 형태로 변환하여 두 배의 전압이득을 달성할 수 있다.^[2] 하지만 컨버터의 고효율 동작을 위해 2차측 풀 브릿지 정류기를 전부 스위치로 구성할 경우, 2차측 풀 브릿지 정류기의 스위치를 켜고 끄는 시점에 따라 스위치의 영 전압 스위칭(ZVS, Zero Voltage Switching) 동작에 성공하거나 실패할 수 있으므로, 2차측 풀 브릿지 정류기의 스위칭 동작 시점 조절은 컨버터의 고효율화에 중요한 요소가 된다.^[3]

본 논문에서는 스위치로 구성된 2차측 풀 브릿지 정류기를 갖는 SRC의 PWM 제어를 이용한 승압 동작에서 ZVS 동작을 통해 안정적인 고효율 운전을 달성하는 PWM 제어를 제안한다. 제안하는 PWM 제어의 유효성을 검증하기 위하여 PSIM 프로그램을 이용한 시뮬레이션과 입력전압 420V, 출력전압 880V, 출력전력 7.3kW의 프로토타입 SRC를 제작하여 제안하는 PWM 제어를 적용한 동작실험을 진행하였다.

2. 본론

2.1 SRC의 2차측 풀 브릿지 정류기 스위칭 동작 시점

그림 1은 SRC의 토폴로지를 보여준다. SRC는 1차측 풀 브릿지 스위치 S1~S4와 공진 커패시터 Cr, 공진 인덕터 Lr, 자화 인덕터 Lm, 1차측, 2차측 턴 수가 각각 Np, Ns인 변압기와 2차측 풀 브릿지 스위치 S5~S8로 이루어져 있다. SRC의 PWM 제어는 1차측과 2차측 풀 브릿지 스위치인 S1~S8의 동작주파수는 공진주파수 대역으로 고정되어 동작하며, 2차측 풀 브릿지 스위치 중 S8의 Duty D88를 증가시켜 풀 브릿지 정류기에서 배전압 정류기의 형태로 변환하며, D88이 1에 도달하면 완전한 배전압 정류기의 동작으로 풀 브릿지 정류기 대비 두 배의 전압이득을 달성할 수 있다. 풀 브릿지 정류기에서 배전압 정류기로 변환하는

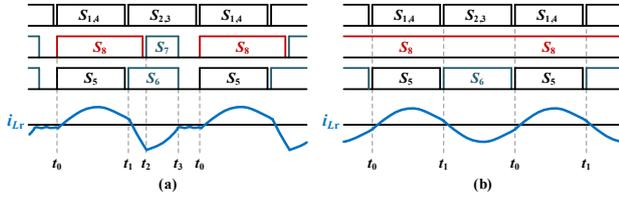


그림 2 SRC의 PWM 제어 스위칭 신호 및 1차측 공진전류 파형 (a) $D_{S8} = 0.6$, (b) $D_{S8} = 1$

Fig.2 Switching Signals of PWM Controlled SRC and Primary Resonant Current Waveform (a) $D_{S8} = 0.6$, (b) $D_{S8} = 1$

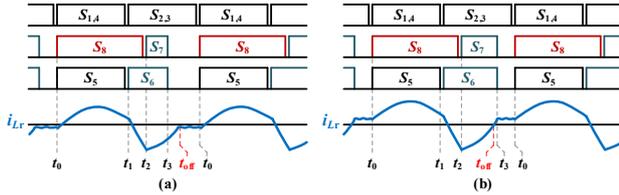


그림 3 스위치가 꺼지는 시점에 따른 PWM 제어 스위칭 신호 및 1차측 공진전류 파형 (a) t_{off} 보다 앞선 시점, (b) t_{off} 보다 뒤진 시점

Fig.3 PWM Controlled Switching Signals and Primary Resonant Current Waveform Based on Switch Turn Off Timing (a) Earlier than t_{off} , (b) Later than t_{off}

과정의 SRC 스위칭 신호 및 1차측 공진전류 i_{Lr} 파형은 그림 2와 같다. 그림 2에서 S_6, S_7 스위치가 꺼지는 시점은 i_{Lr} 이 0이 되는 시점인 t_{off} 시점이며, PWM 제어의 D_{S8} 에 따라 t_{off} 시점은 변동된다. 그림 1의 SRC 2차측 정류기는 고효율 달성을 위해 다이오드가 아닌 스위치로 이루어져 있으므로, t_{off} 시점에서 벗어나 스위치를 끄게 될 경우에 효율이 감소하거나 시스템에 손상을 줄 수 있다.

그림 3은 t_{off} 시점에서 벗어나 스위치가 꺼지는 경우의 스위칭 신호 및 1차측 i_{Lr} 파형이다. 그림 3(a)는 스위치가 꺼지는 시점이 t_{off} 보다 앞선 경우이며, 스위치가 꺼진 시점부터 t_{off} 까지의 2차측 공진전류는 2차측 정류기 스위치의 바디 다이오드를 통해 도통하게 된다. 따라서 스위치가 켜져 있을 때보다 도통손실이 커지게 되므로 효율이 감소하게 된다. 그림 3(b)는 스위치가 꺼지는 시점이 t_{off} 보다 뒤진 경우이다. 2차측 정류기가 다이오드로 구성되어 있을 경우, t_{off} 에서 2차측 공진전류는 더 이상 증가하지 않는다. 그러나 2차측 정류기가 스위치로 구성되어 있고, 스위치가 꺼지는 시점이 t_{off} 보다 늦어질 경우에는 2차측 공진전류가 역방향으로 흐르게 되어 2차측의 에너지가 1차측으로 다시 전달된다. 이러한 에너지 역전은 높은 순환 전류를 발생시켜 도통손실이 증가하고 시스템에 손상을 줄 수 있으며, ZVS 동작에 실패하여 효율이 감소하게 된다.^[3]

2.2 제안하는 PWM 제어를 통한 ZVS 동작

본 논문에서 제안하는 PWM 제어는 앞서 서술한 바와 같이 스위치가 꺼지는 시점이 t_{off} 와 일치하지 않아 발생하는 각 상황에서의 효율 감소 문제를 개선한다. 그림 4는 제안하는 PWM 제어의 스위칭 신호 및 1차측 i_{Lr} 파형이다. 그림 4의 제안하는 PWM 제어는 그림 2(a)의 PWM 제어에서 SRC의 LC 직렬 공진을 통한 전력전달을 위해 공진주기의 앞 반주기 $t_0 \sim t_1$ 은 고정된 후, PWM 제어를 하는 공진주기의 뒤 반주기 중 $t_2 \sim t_0$ 를 조절하여 구현된다. 뒤 반주기는 안정적인 ZVS 동작을 확보하기 위해 t_{off} 보다 앞선 시점으로 조절하게 되며, 그림 2(a)의 $t_2 \sim t_3$ 의 뒷부분 일부와 $t_3 \sim t_0$ 구간이 사라지게 된다. 그러므로 그림 3(a)와 같이 t_{off} 보다 앞선 시점에서 스위치를 끄더라도, 그림 4와

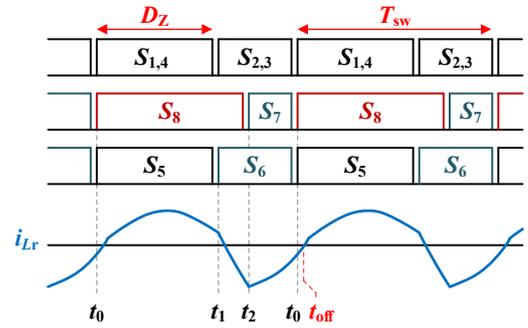


그림 4 제안하는 PWM 제어 스위칭 신호 및 1차측 공진전류 파형

Fig.4 Proposed PWM Controlled Switching Signals and Primary Resonant Current Waveform

같이 다음 공진주기가 시작하게 된다. 이 결과, 스위치의 바디 다이오드 도통이 사라져 도통손실을 증가시키지 않고, ZVS 동작을 통해 고효율 운전을 달성할 수 있다.

제안하는 PWM 제어의 스위칭주파수 f_{sw} 는 공진주기 $t_{resonant}$ 와 t_{off} 의 비율 K_Z 와 공진주파수 $f_{resonant}$ 를 통해 계산되어 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 공진주기의 앞 반주기 $t_0 \sim t_1$ 의 Duty인 D_Z 는 식(3)으로 표현된다.

$$K_Z = \frac{t_{off}}{t_{resonant}} \quad (1)$$

$$f_{sw} = \frac{f_{resonant}}{K_Z} \quad (2)$$

$$D_Z = \frac{0.5}{K_Z} \quad (3)$$

그림 2의 D_{S8} 에 따라 t_{off} 시점이 결정되고, t_{off} 시점은 그림 2(b)와 같이 D_{S8} 이 1에서 공진주기와 같아지므로 D_{S8} 이 1일 때 식 (1)에 의해 K_Z 는 1이 된다. 따라서 제안하는 PWM 제어의 D_{S8} 이 1일 경우에 그림 2(b)와 같은 동작을 하므로 기존과 동일하게 두 배의 전압이득을 얻을 수 있다.

표 1 SRC 시뮬레이션 및 실험 조건

Table 1 SRC Simulation and Experimental Parameters

Param.	Value	Param.	Value
V_{in}	420V	V_{out}	880V
L_m	180uH	L_r	13uH
C_r	66nF	$N_p : N_s$	11:13
$f_{resonant}$	171.82kHz	P_{out}	7300W

2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

제안하는 PWM 제어의 유효성을 검증하기 위해 PSIM 프로그램을 이용한 시뮬레이션과, 입력전압 420V, 출력전압 880V, 출력전력 7300W의 프로토타입 SRC의 동작실험으로 유효성을 검증하였다. SRC 시뮬레이션 및 실험 조건은 표 1과 같다. 그림 5는 스위치가 꺼지는 시점에 따른 스위칭 신호와 1차측 극전압, 1차측 공진전류의 시뮬레이션 파형을 나타낸다.

그림 5(a)와 같이 t_{off} 보다 앞선 시점인 t_3 에서 스위치를 끄 경우 $t_3 \sim t_0$ 구간에 2차측 공진전류는 2차측 정류기 스위치의

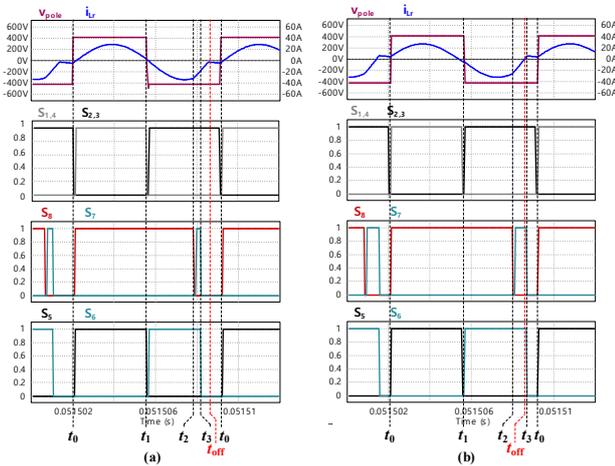


그림 5 스위치가 꺼지는 시점에 따른 PWM 제어 스위칭 신호 및 1차측 공진 전류, 1차측 극전압 시뮬레이션 파형 (a) t_{off} 보다 앞선 시점, (b) t_{off} 보다 뒤진 시점

Fig.5 PWM Controlled Switching Signals and Primary Resonant Current, Primary Pole Voltage Simulation Waveform Based on Switch Turn Off Timing (a) Earlier than t_{off} , (b) Later than t_{off}

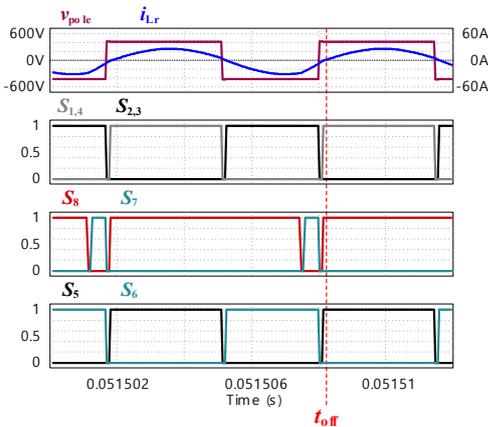


그림 6 제안하는 PWM 제어 스위칭 신호 및 1차측 공진전류, 1차측 극전압 시뮬레이션 파형

Fig.6 Proposed PWM Controlled Switching Signals and Primary Resonant Current, Primary Pole Voltage Simulation Waveform

바다 다이오드로 도통하며 도통손실을 증가시킨다. 그림 5(b)와 같이 t_{off} 보다 뒤진 시점의 t_3 에서 스위치를 끌 경우에는 에너지 역전에 의한 순환 전류가 생겨 도통손실이 증가하며 ZVS 동작에 실패하여 스위칭손실이 증가하는 파형을 확인할 수 있다. 그림 6은 제안하는 PWM 제어의 스위칭 신호와 1차측 극전압, 1차측 공진전류 시뮬레이션 파형이다. 그림 6에서 t_{off} 시점보다 앞서 스위치를 끄기 때문에 안정적인 ZVS 동작과 함께 다음 공진주기가 시작되는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 프로토타입 SRC를 이용하여 입력전압 420V, 출력전압 880V, 출력전력 7.3kW의 조건에서 기존의 PWM 제어와 제안하는 PWM 제어를 적용한 동작실험 파형과 Yokogawa 社의 WT1802E 전력계를 이용하여 측정한 효율 사진이다. 그림 7과 같이 기존의 PWM 제어를 이용할 경우 97.28%이며, 제안하는 PWM 제어 기법을 이용할 경우 효율은 97.8%로 약 0.52% 효율이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안하는 PWM 제어로 인하여 안정적인 ZVS 동작을 달성할 수 있기 때문이다.

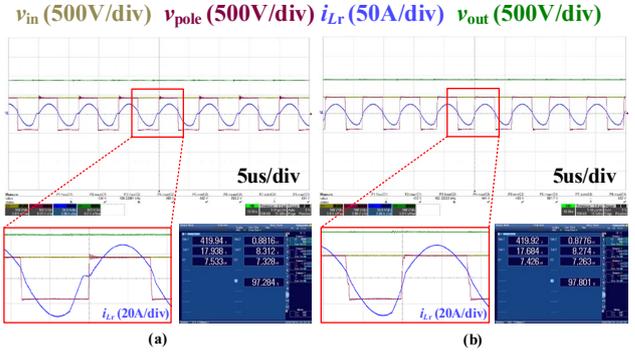


그림 7 PWM 제어를 적용한 SRC동작 파형 및 효율 (a) 기존의 PWM 제어, (b) 제안하는 PWM 제어

Fig.7 SRC Operation Waveforms and Efficiency with PWM Control (a) Conventional PWM Control, (b) Proposed PWM Control

3. 결론

본 논문에서는 2차측 풀 브릿지 정류기가 스위치로 구성된 SRC의 PWM 제어를 이용한 승압 동작에서 ZVS 동작을 통해 안정적으로 고효율 운전을 달성할 수 있는 PWM 제어를 제안하였다. PWM 제어에서 스위치를 끄는 시점을 기존의 PWM 제어보다 앞당겨서 설계 오차에도 안정적으로 ZVS에 달성하여 최적의 효율점을 찾을 수 있도록 하였다.

제안하는 PWM 제어는 시뮬레이션과 프로토타입을 통한 동작실험으로 유효성을 검증하였으며, 이를 통해 기존 PWM 제어를 하는 SRC보다 더 안정적으로 고효율 동작을 달성하는 SRC를 설계할 수 있다. 시간영역 분석을 통해 t_{off} 시점을 수식적으로 도출해내어 최적의 스위칭 시점을 찾고, 제안하는 PWM 제어의 최적화를 진행할 예정이다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20204010600220)

참고 문헌

- [1] I. Aghabali, J. Bauman and A. Emadi, "Analysis of Auxiliary Power Unit and Charging for an 800V Electric Vehicle," 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Detroit, MI, USA, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790562.
- [2] J. -W. Kim and P. Barbosa, "PWM-Controlled Series Resonant Converter for Universal Electric Vehicle Charger," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 12, pp. 13578–13588, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3072991.
- [3] Y. Wei, Q. Luo and H. A. Mantooth, "Synchronous Rectification for LLC Resonant Converter: An Overview," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, pp. 7264–7280, June 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3040603.