

다상 Interleaved Boost 컨버터의 소프트 스위칭 셀 회로 구성에 관한 연구

심승애, 황대연, 박상민, 박준성, 김진홍[†]
한국전자기술연구원 전력제어시스템연구센터

Study of Soft Switching Cell Circuit Configuration for Multi-phase Interleaved Boost Converter

Seung Ae Sim, Dae Yeon Hwang, Sang Min Park, Joon Sung Park, Jin-Hong Kim[†]
Korea Electronics Technology Institute (KETI)
Power System Research Center

ABSTRACT

본 논문은 수소 연료 전지 어플리케이션 등 다양한 전력변환 장치에 적용되는 다상(Multi-Phase) Interleaved Boost 컨버터의 Zero Voltage Switching(ZVS)를 위한 Zero Voltage Transition-Partial Resonant Converter(ZVT-PRC) 소프트 스위칭 셀 회로 구성 방식을 제안한다. 모든 상에 소프트 스위칭 셀을 적용하는 기존 방식에서 부피 저감을 위해 공진 스위치를 사용한 단일 소프트 스위칭 셀 구조를 제시하며, 정상 동작 방식 및 설계 시 고려사항에 대해 논의한다. 제안한 방식은 PSIM 시뮬레이션을 기반으로 적용 가능성을 검증한다.

1. 서 론

화석 에너지의 고갈과 환경 오염 문제가 대두됨에 따라 전 세계적으로 친환경 차량 시장의 규모가 성장하고 있으며, 연료 전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)도 그중 하나이다. FCEV에는 주 전력원인 연료 전지(Fuel Cell, FC) 스택의 부하 조건에 따라 가변되는 스택 전압 특성과 전류 리플을 고려하여 차량 시스템에 안정적인 전력을 공급하기 위한 FC DC-DC Converter(FDC)가 탑재된다. 한정된 차내 공간에 맞춰 FDC의 효율과 전력밀도를 높이는 최적 설계 방안 등에 관한 연구가 꾸준히 수행되고 있다^[1].

고전력밀도를 달성하기 위해 스위칭 주파수를 상향하면 스위칭 손실도 비례하여 증가하므로 고효율 동작을 위해 공진을 이용한 Zero Voltage Transition-Partial Resonant Converter(ZVT-PRC)와 같은 소프트 스위칭 기법이 연구되고 있다. 그러나 각 상(Phase)에 흐르는 전류를 분배하여 전력 스트레스와 리플을 감소시킬 수 있어 고전력 FDC 설계에 적합한 다상 Interleaved 구조에 적용하게 되면 추가되는 상의 개수만큼 전력 반도체 소자 및 수동 소자의 개수가 증가하는 문제점이 발생한다. 그러므로 추가되는 소자의 개수는 최소화하면서 소프트 스위칭 동작을 보장하여 고효율 및 고전력밀도를 달성할 수 있는 소프트 스위칭 셀 구조의 적용이 검토되어야 한다.

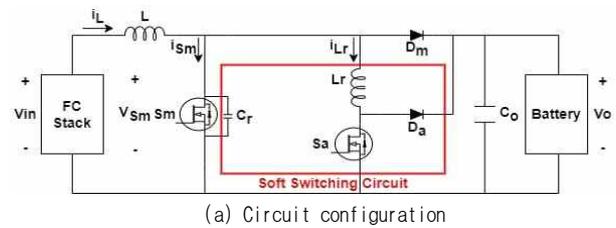
본 논문에서는 공진 스위치를 추가해 단일 소프트 스위칭 셀 회로를 적용한 다상 Interleaved Boost 컨버터 설계 방안을 제시한다. 각 상 35 kW 출력 전력 기준에 따라 선정된 설계 사양을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 제시한 설계 방법에 대한 타당성을 검증한다.

2. 제안하는 ZVT-PRC Boost 컨버터

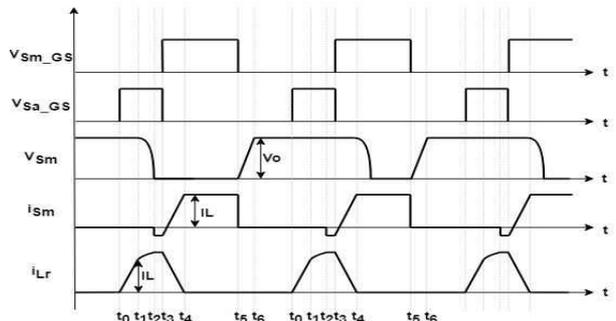
2.1 제안하는 구조 및 동작 특성

기존 Boost형 ZVT-PRC 토폴로지 및 동작 방식은 아래 그림 1과 같다. 공진 인덕터(L_r) 및 커패시터(C_r), 보조 스위치(S_a) 및 다이오드(D_a)로 구성된 소프트 스위칭 회로는 다상 Interleaved 컨버터 설계 시 각 상에 추가 되어 메인 스위치(S_m) 및 다이오드(D_m) 턴 온-오프 시 ZVS 동작을 보장한다. 다만 기존 방식은 추가되는 상의 개수에 비례하여 소프트 스위칭 셀에 필요한 소자의 개수가 증가하는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 그림 2(a)와 같은 구조를 제안한다. 공진 스위치(S_r)를 각 상에 연결하여 하나의 소프트 스위칭 셀을 공유하여 동작함으로써 추가되는 소자의 개수를 최소화한다. 그림 2(b)는 3상 Interleaved Boost 컨버터 동작 파형을 나타낸다. S_r 는 환류 구간 발생을 방지하기 위하여 역병렬 다이오드가 없는 소자로 제한되며, S_m 의 스위칭 주파수에 추가되는 상 개수만큼 비례하는 스위칭 주파수로 동작할 수 있는 소자여야 한다. 공진 파라미터는 공진 셀 동작이 각 상 ZVS 동작에 영향을 주지 않는 제한된 동작 시간에 맞춰 설계되어야 한다.

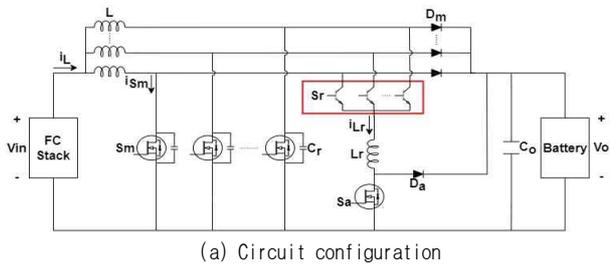


(a) Circuit configuration

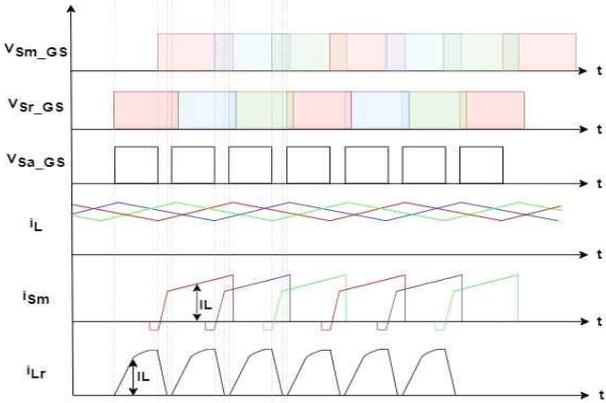


(b) Operation waveform

그림 1 기존 Boost형 ZVT-PRC^[2]
Fig. 1 Conventional Boost ZVT-PRC^[2]



(a) Circuit configuration



(b) Operation waveform

그림 2 제안하는 컨버터 구조 및 주요 파형
Fig. 2 The configuration and waveform of proposed converter

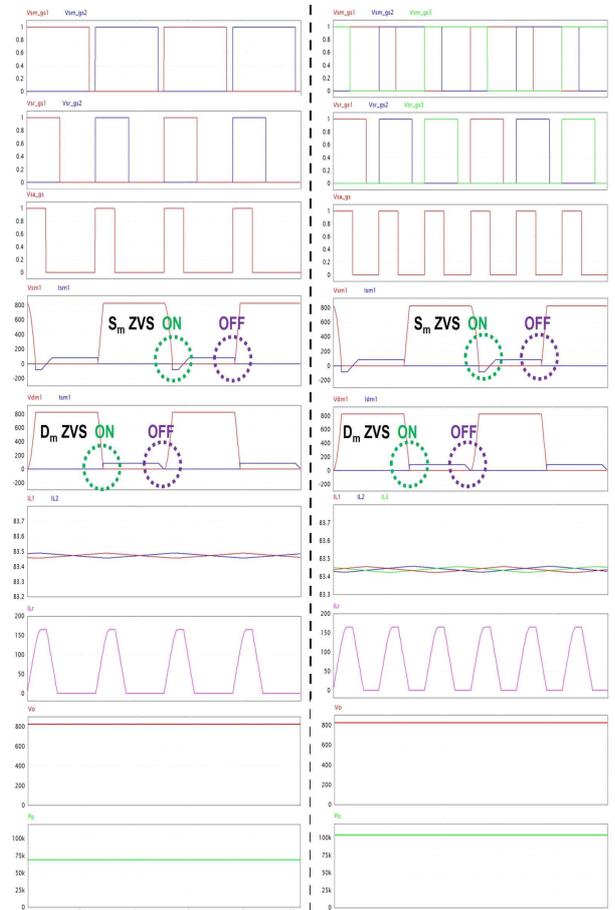
표 1 FDC 설계 사양 및 주요 파라미터
Table 1 Design Specification and Parameters of FDC

Parameter	Value	Unit
입력 전압 범위 (V_{in})	340 - 630	V
출력 전압 범위 (V_o)	530 - 830	V
스위칭 주파수 (f_{sw})	200	kHz
메인 인덕터 (L)	30	mH
DC Link 커패시터 (C_o)	200	μF
상 수 (Phase)	2 3	
상 당 출력 전력 (P_{phase})	35	kW
최대 출력 (P_{max})	70 105	kW
공진 인덕터 (L_r)	2	μH
공진 커패시터 (C_r)	20	nF

2.2 시뮬레이션 결과

표 1은 시뮬레이션에 적용된 FDC의 설계 사양을 나타낸다. 각 상 출력 전력은 35 kW로 고정되어 있으며 상의 개수가 늘어남에 따라 제시한 토폴로지의 적용 가능성을 PSIM 시뮬레이션으로 확인한다.

그림 3은 각각 2상과 3상 구조의 시뮬레이션 파형이다. 상단의 시뮬레이션 파형은 제안한 컨버터에 적용된 스위치들의 게이트 파형을 나타내며, 중앙의 S_m 및 D_m 의 전압과 전류 파형을 통해 ZVS 턴온-오프 특성을 확인할 수 있다. 인덕터 전류 파형은 공진 파라미터가 Interleaved 동작을 방해하지 않도록 설계되었음을 판단할 수 있다. 이외에도 마지막 파형을 통해 최대 전압 및 전력 조건에서 문제없이 정상 동작을 수행하는 것을 확인하였다. 이를 통해 제안한 소프트 스위칭 토폴로지가 다상 Interleaved Boost 컨버터 적용이 가능함을 확인하였다.



(a) 2-phase (b) 3-phase

그림 3 상 개수에 따른 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation result of the proposed converter depending on the number of phase

3. 결론

본 논문에서는 공진 스위치를 활용해 단일 인덕터로 구성된 ZVT-PRC 소프트 스위칭 셀을 다상 Interleaved Boost 컨버터에 적용하는 방안을 제안하였다. FDC 설계 사양에 따라 제안하는 컨버터의 구조 및 동작 특성을 시뮬레이션으로 구현하여 적용 타당성을 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20212020800020)

참고 문헌

[1] J. S. Lee, Y. S. Hwang, S. H. Kang, M. J. Kwon, E. Jang, and B. K. Lee. "Proposal and Analysis of Multi-phase Interleaved Boost Converter With a Single Soft Switching Cell," *Proceedings of the KIPPE Conference 2021.11 (2021)*: 144-146.

[2] E. C. Noh, G. B. Joung, N. S. Choi, Power Electronics: Third Edition, *Munundang Publishing Company, Inc.* pp.465-475, 2011.