

하이브리드 Fuel cell system를 위한 두 개의 공진 탱크를 가진 LLC 직렬 공진 컨버터

이일운, 조신영, 문건우
KAIST

Abstract

새로운 LLC 직렬 공진 컨버터가 본 논문에서 제안된다. 제안된 컨버터는 1차측에 두 개의 공진 탱크를 가진다. 이 두 개의 공진 탱크로 인하여 컨버터의 입력 전류는 풀 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터에서처럼 연속이고, 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터보다 훨씬 낮은 입력 전류 리플을 가진다. 또한, 공진 캐패시터 양단 전압이 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터보다 낮아 낮은 전압 정격을 가진 캐패시터를 사용할 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 제안된 컨버터는 fuel cell 시스템과 같이 낮은 source 전류 리플과 넓은 입력/출력 동작 범위가 요구되는 응용에 적합하다.

본 논문에서 제안된 컨버터의 동작 원리를 간단히 설명하고, 380Vdc 입력, 24V/10A 출력 프로토타입 컨버터를 통해 그 동작을 검증한다. 그리고, 제안된 컨버터에서 확장된 두 개의 공진 탱크를 가진 LLC 직렬 공진 컨버터들을 소개한다.

1. 서론

높은 전력 밀도와 친환경적이고, 중간 변환 단계 없이 직접적으로 전기를 생산할 수 있는 특성 때문에 fuel cell은 최근까지 많은 관심을 받아 왔다. 건물 내 DC 전력 배전을 위한 fuel cell 시스템은 그림 1에서 보듯 fuel cell stack, 단방향 DC/DC 컨버터, 양방향 DC/DC 컨버터, DC bus, 그리고 보조 에너지 저장 장치로 구성된다. 이와 같은 구성에서 최적의 단방향 DC/DC 컨버터를 개발하기 위해서는 특별한 설계 개념을 따라야 한다. 우선, fuel cell의 느린 응답 특성으로 인해 그것의 출력 전압이 부하에 따라 넓게 변동하기 때문에 단방향 DC/DC 컨버터는 뛰어난 regulation 특성과 넓은 입력 전압 변동에서도 높은 변환 효율을 가져야 한다. 두 번째로, fuel cell의 수명을 연장하기 위해 단방향 DC/DC 컨버터의 입력 전류 리플이 낮도록 해야 한다. 세 번째로는, fuel cell system의 초기 시작점에서 fuel cell의 파괴를 일으킬 수 있는 돌입 전류(Inrush current)를 단방향 DC/DC 컨버터에서 제어가 될 수 있도록 해야 한다. 그리고, 낮은 가격과 높은 제품 신뢰성을 가지기 위해 단방향 DC/DC 컨버터는 적은 부품수를 가져야 한다[1].

LLC 직렬 공진 컨버터는 그것의 단순한 구조와 사용된 모든 파워 반도체 소자들의 소프트 스위칭 동작 가능, 높은 변환 효율, 넓은 입력/출력 정류 범위 때문에 지금까지 많은 응용 분야에서 관심을 받아 왔다. 그리고, LLC 직렬 공진 컨버터는 초기 start시 그것의 스위칭 주파수를 적절히 설계하여 쉽게 돌입 전류를 제어할 수 있는 장점도 가진다. 이와 같은 장점들은 fuel cell 동작 특성과 잘 매칭되어 LLC 직렬 공진 컨버터는 hybrid fuel cell 시스템에서 단방향 DC/DC 컨버터로써 적합하다고 판단된다. 그러나 그림 2에서 보듯 기존의 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터는 입력 전류가 불연속이고, 큰 입력 전류 리플을 가져 앞에서 언급한 fuel cell system에서 단방향 DC/DC 컨버터가 갖추어야 할 요건에 부합되지 않는다. 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터의 입력 전류 특성의 문제는 풀 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터에서 극복된다. 즉, 풀 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터에서 입력 전류는 연속이며, 입력 전류 리플이 낮다. 그러나, 1차측에 많은 반도체 스위칭 소자가 요구되는 단점을 가진다[2].

본 논문에서 새로운 LLC 직렬 공진 컨버터가 제안된다. 제안된 컨버터는 1차측에 두 개의 공진 탱크를 가진다. 이 두 개의 공진 탱크로 인하여 추가적인 반도체 스위칭 소자 없이 풀 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터처럼 입력 전류가 연속이고, 낮은 입력 전류

리플을 가지게 된다. 또한, 공진 전류가 두 개의 공진 탱크로 각각 나뉘어져 공진 캐패시터 양단 전압 스트레스가 감소하게 되어 낮은 전압 정격을 가진 캐패시터를 사용할 수 있게 한다. 그리고, 제안된 LLC 직렬 공진 컨버터는 기존 LLC 직렬 공진 컨버터의 모든 장점을 가진다. 제안된 컨버터의 이러한 장점들은 fuel cell system과 같이 낮은 source 입력 리플과 넓은 입력/출력 동작 범위가 요구되는 응용에서 제안된 컨버터의 적합성을 높인다.

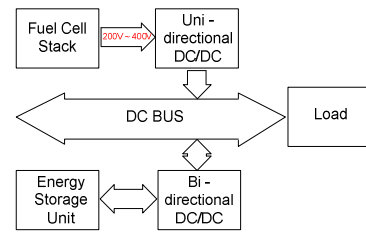


그림. 1 DC 전력 배전을 위한 하이브리드 Fuel cell 시스템.

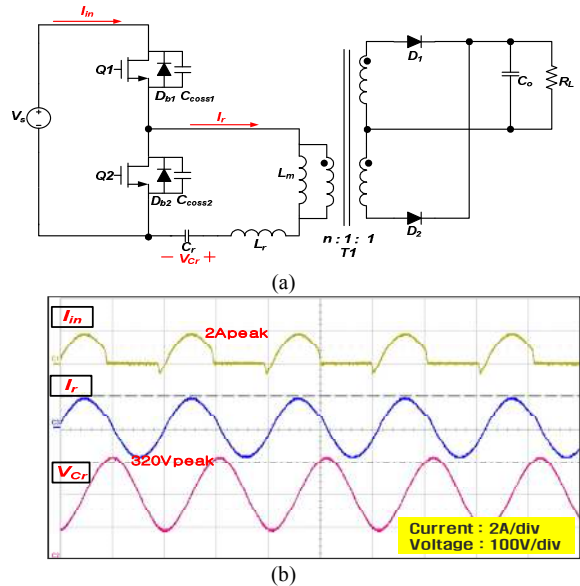


그림. 2 a) 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터 (b) 380Vdc input, 24V/10A output 에서 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터 실험 파형들.

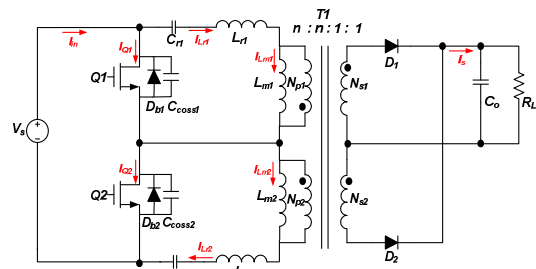


그림. 3 두 개의 공진 탱크를 가진 제안된 LLC 직렬 공진 컨버터.

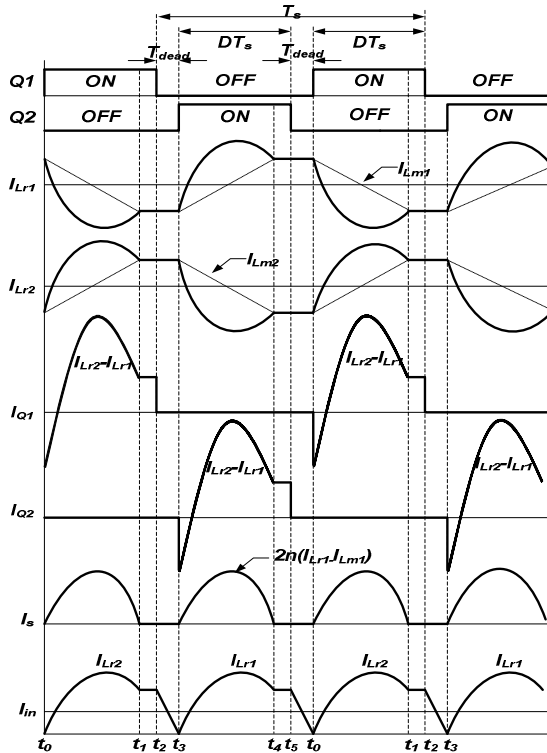


그림.4 제안된 컨버터의 주요 동작 파형들

2. 동작 원리

그림.4는 정상 상태에서 제안된 컨버터의 주요 동작 파형들을 보여준다. 그림.4에서 보듯 한 스위칭 주기 동안 제안된 컨버터의 동작은 6개의 모드로 설명이 되며, 모드4~6은 모드1~3의 반복이므로 본 논문에서는 설명을 생략한다. 제안된 컨버터는 4개의 모드로도 동작할 수 있으며, 이 경우 모드2와 모드 5의 동작이 없어진다.

2.1 정상 상태 동작 분석

Mode 1 [$t_0 \sim t_1$]: 모드1은 Q1이 ZVS를 만족하며 온되면서 시작하며, Cr1와 Lr1 그리고 Cr2와 Lr2의 공진 모드이다. 그것의 동작 등가 회로는 그림. 5의 (a)와 같다.

Mode 2 [$t_1 \sim t_2$]: 모드2은 모드1에서 I_{Lr1} 과 I_{Lr2} 가 변압기의 자화 인덕터에 흐르는 전류 I_{Lm1} 과 I_{Lm2} 와 같아 질 때 시작하며, Cr1과 Lr1+Lm1 그리고 Cr2와 Lr2+Lm2의 공진 모드이다. 이 모드 동안 2차측 다이오드는 ZCS 오프되며, 출력 부하는 입력단에서가 아닌 출력 캐패시터로부터 에너지를 공급 받는다.

Mode 3 [$t_2 \sim t_3$]: 모드3은 Q1 스위치가 오프되면서 시작하며, Q2가 온되면서 끝난다. 이 모드 동안 변압기 자화 인덕터에 흐르는 전류는 1차측에서 순환하며, Q2가 ZVS 턴 온 될 수 있도록 한다.

그림. 5는 제안된 컨버터에서 입력단에서 출력단으로 파워가 전달되는 모드1과 모드4의 동작 등가 회로를 보여준다. 그림에서 보듯 입력 전압 V_s 가 파워 스테이지와 항상 연결되어 있으며, 따라서 V_s 에서 공급되는 입력 전류가 연속이 된다.

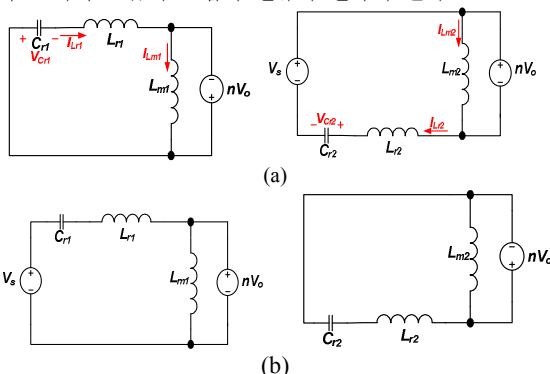


Fig 5 (a) 모드1 동작 등가 회로 (b) 모드4 동작 등가 회로

3. 실험 결과

380Vdc 입력, 24V/10A 출력을 가진 제안된 컨버터의 프로토타입에서 그림. 6와 같은 실험 파형을 얻었다. 제안된 컨버터의 프로토타입은 한 스위칭 주기 동안 4개의 동작 모드를 가지도록 설계가 되었기 때문에 파형에서 모드2와 모드5 구간을 볼 수 없다.

그림. 6의 실험 파형과 그림. 2의 하프 브릿지 LLC 직렬 공진 컨버터의 실험 파형에서 보듯 제안된 컨버터의 입력 전류는 연속이며, 그것의 peak 전류는 1.1A로 하프 브릿지 직렬 공진 컨버터의 2A와 비교해 약 50% 낮다. 따라서, 제안된 컨버터의 입력 전류 리플이 훨씬 낮게 된다. 또한, 공진 캐패시터의 전압 stress도 하프 브릿지 컨버터가 320V인 반면 제안 컨버터는 260V로 낮아 낮은 전압 정격을 가진 공진 캐패시터의 사용을 가능케 한다.

본 실험을 통해 제안된 컨버터에서 입력 전류는 연속이고, 입력 전류 리플이 낮으므로 fuel cell system과 같은 응용에서 단방향 DC/DC 컨버터 후보로 고려 될 수 있음을 알 수 있다.

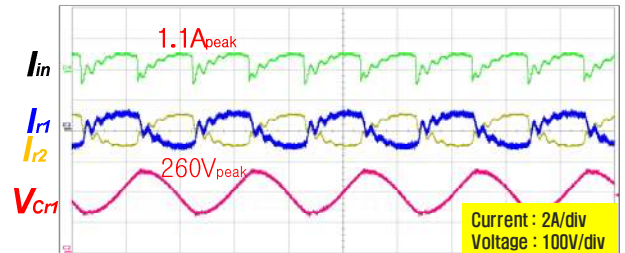


Fig. 6 380Vdc input, 24V/10A output 에서 제안 LLC 직렬 공진 컨버터의 실험 파형들.

4. Topology 확장

앞에서 제안된 컨버터를 확장하여 두 개의 공진 tank를 가진 LLC 직렬 공진 컨버터들이 그림. 7에서처럼 제안된다. 제안된 컨버터들의 동작 원리는 그림. 3의 회로와 같으며, 주요 동작 파형들 또한 그림. 4와 같고, 동일한 장점들을 가진다.

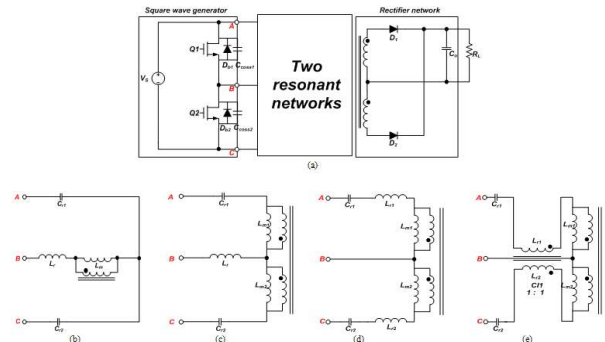


Fig. 7 두 개의 공진 tank를 가진 LLC 직렬 공진 컨버터들

5. 결론

본 논문에서는 fuel cell system를 위한 두 개의 공진 탱크를 가진 LLC 직렬 공진 컨버터가 제안되었다. 제안된 컨버터의 동작은 380Vdc 입력, 24V/10A 출력 프로토타입을 통해 검증되었다. 그리고, 제안 컨버터에서 확장된 두 개의 공진 탱크를 가진 LLC 직렬 공진 컨버터들이 소개되었다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 20100009888)

참고 문헌

- [1] K. Jin, and X. Ruan, "Hybrid Full-Bridge Three-Level LLC Resonant Converter-A Novel DC-DC Converter Suitable for Fuel-Cell Power System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1492-1503, Oct. 2006
- [2] B. Yang, F. C. Lee, A. J. Zhang, and G. Huang, "LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion," in *Proc IEEE APEC'02 Conf.*, 2002, pp. 1108-1112.