

수소연료전지 철도차량용 고밀도 다중 LLC 공진형 DC-DC 컨버터

High Density and Multiple LLC Resonant DC-DC Converter for Hydrogen-Fuel-Cell Railway System

류상균*, 지우영**, 정거철*, 이형우*, 박찬배*, 이재범*†

Sang-Gyun Ryu*, Woo-Young Ji**, Geo-Chul Jeong*, Hyung-Woo Lee*, Chan-Bae Park*, Jea-Bum Lee**†

초 록 최근에 에너지 효율이 높은 수소연료전지 기반의 철도차량용 추진시스템이 주목받고 있다. 수소연료전지는 높은 가격으로 인해 견인전동기 구동에 필요한 인버터의 높은 DC 전압을 직접적으로 공급하기 어려우므로, 낮은 전압을 갖는 수소연료전지와 인버터 사이에 승압형 DC/DC 컨버터를 필요로 한다. 또한 높은 가격으로 인해 수소연료전지만으로 견인전동기의 구동에너지를 공급하기 어렵고, 역행 시 회생에너지를 저장하기 위해 배터리도 필요하다. 하지만 가선으로부터 전력을 공급받는 기존 철도차량과 달리, 수소연료전지와 배터리로 인해 더욱 제한된 ‘공간과 중량’을 갖는 ‘수소연료전지 하이브리드 철도차량’은 고밀도/경량화 된 DC-DC 컨버터를 요구하고 있다. 따라서 본 논문에서는 고밀도/경량화가 가능한 병렬 입력-직렬 출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터를 제안하고자 한다.

주요어 : 수소연료전지, 철도차량, DC-DC 컨버터, 공진형 컨버터, 병렬 입력-직렬 출력

1. 서 론

수소연료전지는 높은 가격으로 인해 견인전동기 구동에 필요한 인버터의 높은 DC 전압을 직접적으로 공급하기 어려우므로, 낮은 전압을 갖는 수소연료전지와 인버터 사이에 승압형 DC/DC 컨버터가 필요하다. 또한 높은 가격으로 인해 수소연료전지만으로 견인전동기의 구동 에너지를 공급하기 어렵고, 역행 시 회생에너지를 빠르게 저장하기 위해 배터리가 연결되어 있다[1,2].

기존 철도차량에 비해 추가 된 수소연료전지와 배터리로 인해 더욱 제한된 ‘공간과 중량’을 갖는 ‘수소연료전지 하이브리드 철도차량’은 고밀도/경량화 된 DC-DC 컨버터를 요구하고 있다.

2. 본 론

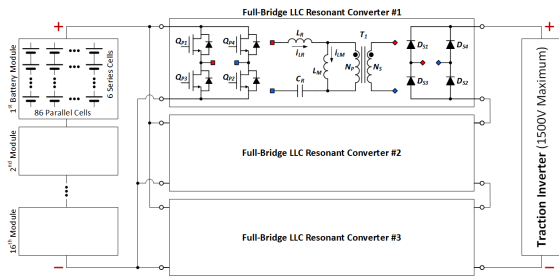
철도차량에 적용되는 승압형 DC/DC 컨버터로써 2-Level 부스트 컨버터는 구조가 매우 간단하여, 일반 철도차량과 달리 차량에 탑재 된 수소연료전지와 배터리로 인해 더욱 제한된 공간과 중량을 갖는 수소연료전지 하이브리드 철도차량에 적합하다. 하지만 2-Level 부스트 컨버터는 소자의 ‘영전압/영전류 스위칭’을 성취할 수 없어, ‘턴-온/오프 스위칭 손실’과 ‘역회복 손실’이 크게 발생한다. 더욱이 부스트 컨버터는 출력전압이 소자의 전압스트레스이며, 인버터의 높은 DC 전압(=1,500V)으로 인해 높은 전압내압의 소자(3,300V급)가 선정되어야 한다. 하지만 높은 전압내압의 소자는 낮은 전압내압의 소자에 비해 턴-온/오프 스위칭 손실과 역회복 손실이 매우 커서, 스위칭 주파수를 올리는데 더욱 한계를 갖는다. 따라서 2-Level 부스트 컨버터는 낮은 스위칭 주파수로 인해 가장 큰 부피를 차지하는 인덕터와 출력커패시터의 부피가 증가한다는 한계를 갖는다.

† 교신저자: 한국교통대학교 철도공학부
(leejb@ut.ac.kr)

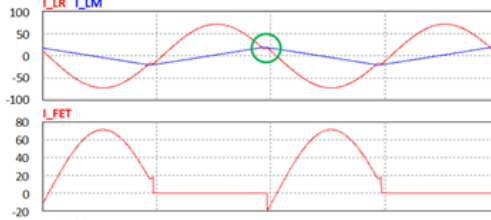
* 한국교통대학교 철도공학부

** 한양대학교 전기공학과

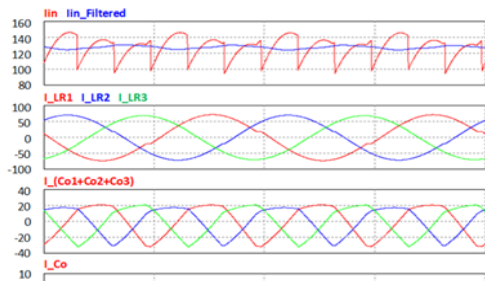
2.1 기존 승압형 DC/DC 컨버터



(a) Multiple LLC Resonant Converter Configuration of Parallel-Input and Series-Output Configuration



(b) ZVS simulation waveform of 3-stage LLC converter [Conditions: Inputvoltage=400V, Outputvoltage=1,500V, Outputpower=50kW, LR=4 μ H, LM=20 μ H, CR=99nF, NP=8, NS=10, FS=250kHz, Cj=190pF]



(c) Power Distribution Characteristics of a Three-Stage LLC Converter [Elemental Deviation Conditions : VF = 1.5V/1.6V/1.7V, LR = 3.8 μ H/4.0 μ H/4.2 μ H]

Fig. 1 Multiple LLC Resonant Converter of Parallel-Input and Series-Output Configuration

2.2 제안 병렬입력-직렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터

병렬입력-직렬출력 구조의 다중 LLC 컨버터는 Fig. 1(a)와 같이 입력은 병렬로 출력은 직렬로 연결되며, 모듈마다 위상차를 갖고 인터리빙 구동을 하게 된다.

수소연료전지의 입력전압이 400V라고 가정하면 입력전압이 낮아 입력전류가 크므로, LLC 공진형 컨버터의 입력 측은 상용 600V MOSFET을 적용할 수 있는 병렬연결이 가장 바람직하다. 직렬연결을 통해 1차 측 소자의 전압 사양을 낮춰 200V MOSFET을 적용하더라도 크게 턴-오프 스위칭 손실이 저감되지 않으며, 즉 200V 내압의 MOSFET이나 600V 내압

의 MOSFET 모두 스위칭 특성이 우수하여 턴-오프 스위칭 손실이 크게 차이가 나지 않는다. 출력 측은 1,500V의 높은 전압을 분배하여 사용할 수 있는 직렬연결이 적합하다. 3단의 LLC 공진형 컨버터가 출력 전압을 나눠 가지므로, 각 컨버터의 출력 측은 다이오드 소자는 500V의 전압 스트레스를 갖는다. 출력 다이오드는 650V의 SiC 다이오드를 적용할 수 있게 되며, 23.1%의 충분한 전압 스트레스 여분을 확보할 수 있다. 뿐만 아니라, Cj가 190pF으로 인가 전압(=500V) 대비 작은 장점으로 인하여, Fig. 1(b)의 시뮬레이션 결과와 같이 2차 측 다이오드의 역회복 전류가 저감되어 영전압 스위칭 특성이 개선됨을 확인할 수 있다. 병렬입력-직렬출력 구조의 경우에는 각 LLC 공진형 컨버터의 입·출력 이득이 다르더라도 서로의 출력 전압에 영향을 주지 않고 각각의 출력 전압을 생성하게 된다. 실제 부품 간 편차에 의하여 발생하는 입·출력 이득의 편차는 5% 이내이므로, 출력 전력의 편차 또한 5% 이내로 우수한 특성을 가지게 된다. 그림 9의 시뮬레이션 파형과 같이 Fig. 1(c)와 같이 동일한 소자 편차에도 불구하고 1차 측 공진 전류(I_{LRn})의 편차가 거의 없음을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서 제안하는 병렬입력-직렬출력 구조의 LLC 공진형 컨버터는 출력을 직렬구조로 선정함으로써, 2차 측 다이오드의 전압 스트레스를 줄일 수 있어 2차 측 다이오드의 Junction-Capacitance가 인가전압 대비 작은 장점으로 인해 1차 측 스위치의 영전압 스위칭 특성을 더욱 우수하게 할 수 있다. 또한 소자편차에 따라 각 LLC 공진형 컨버터의 입·출력 이득이 다르더라도 서로의 출력 전압에 영향을 주지 않고 각각의 출력 전압을 생성하게 된다. 따라서 각 단의 소자편차가 발생하더라도 1차 측 공진 전류의 불평형을 최소화 할 수 있다.

후기

이 논문은 2020년 정부의 재원으로 한국연구재단의

지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2020R1G1A1005023)

참고문헌

- [1] S.K. Heo, S.B. Yoon, B.S. Kim, S.H. Lee (2018) Trends of Diffusion and Development of Hydrogen Filling Stations and Fuel Cell Electronic Vehicles at Domestic and Overseas, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, 40(4), pp.72-76.
- [2] H. Glickenstein (2019) March 2019 Land Transportation News, IEEE Vehicular Technology Magazine, 14(1), pp.18-26.