

수소연료전지 하이브리드 동력시스템 기반 철도차량 DC-DC 컨버터의 기술동향

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/경량화된 DC-DC 컨버터를 요구하고 있다.

따라서 본 특집 원고에서는 현재 수소연료전지 하이브리드 철도차량에 적용되는 승압형 DC/DC 컨버터와, 현재 연구되고 있는 더욱 고밀도/경량화가 가능한 고주파 기반의 승압형 DC/DC 컨버터를 소개하고자 한다.

1. 서론

국·내외로 철도기술이 발전하면서, 타 산업분야의 요소기술을 접목하려는 시도가 계속 진행되고 있다. 특히 화석연료의 고갈과 환경문제를 극복하기 위해, 신재생에너지를 철도차량의 추진동력을 발생시키기 위한 에너지원으로 접목하려는 연구가 여러 방법으로 수행되고 있다. 신재생에너지 중 외부로부터 전력을 공급받지 않으며 철도차량의 제한된 공간과 중량, 연료공급의 용이성과 안정성 등을 고려해 보면, 바이오 디젤, 수소에너지, 연료전지 등이 적합하다고 분석되었으나 현실적으로 바이오 디젤은 환경과 공급 안정성 문제 등으로 친환경 철도차량의 추진동력을 위한 에너지원으로 적용하기 어렵다.

한편 수소연료전지는 기존 에너지 효율이 30%인 내연기관보다 높은 50% 이상의 효율을 갖고 소음이 적어, 다른 신재생 에너지원에 비해 친환경적인 에너지원으로 각광받고 있다. 또한 연료탱크를 통해 지속적으로 에너지를 공급할 수 있으며 다른 신재생 에너지원에 비해 시스템 구축이 용이하여, 현

재 유일하게 자동차와 버스 등의 수송용 추진동력을 위한 에너지원으로 이미 상용화되었다^[1]. 특히 독일, 일본, 중국 등에서 수소연료전지를 철도차량의 추진동력용 에너지원으로 적용하려는 연구가 빠르게 진행되고 있으며, 최근에 독일 연방 철도 기관인 Federal Railway Authority는 알스톰社가 개발한 수소연료전지 열차의 독일 내 상업운전을 최종 승인했다^[2].

수소연료전지는 높은 가격, 느린 동특성, 역행 시 회생에너지 저장의 어려움으로 인해, 그림 1과 같이 ‘슈퍼커패시터 또는 배터리’와 같은 에너지 저장장치를 수소연료전지 시스템에

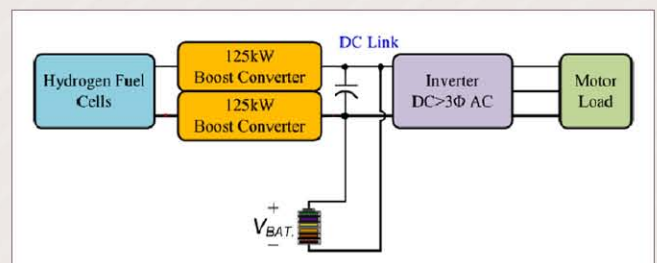


그림 1 '수소연료전지 하이브리드 철도차량용' 추진시스템

적용한 '수소연료전지 하이브리드 추진시스템'이 빠른 동특성과 회생에너지 저장이 가능하여 에너지 절감을 요구하는 자동차, 버스, 철도차량에 주로 적용되고 있다^{[3],[4]}.

그림 1은 수송용 추진동력을 위해, 수소연료전지와 배터리와 같은 에너지 저장장치를 에너지원으로 동시에 사용하는 '수소연료전지 하이브리드 철도차량 추진시스템'을 나타낸다. 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^{[5],[6]}.

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

2. 철도차량의 기존 승압형 DC/DC 컨버터

본 장에서는 현재 국·내외의 '수소연료전지 하이브리드 철도차량'에 적용되고 있는 승압형 DC-DC 컨버터에 대해 살펴 보도록 한다.

2.1 2-Level 부스트 컨버터

철도차량에 적용되는 승압형 DC/DC 컨버터로써 2-Level 부스트 컨버터는 입력전류가 연속적이므로, 느린 동특성을 갖는 수소연료전지를 입력 에너지원으로 사용하는 시스템에 적합하다^{[7],[8]}. 또한 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.

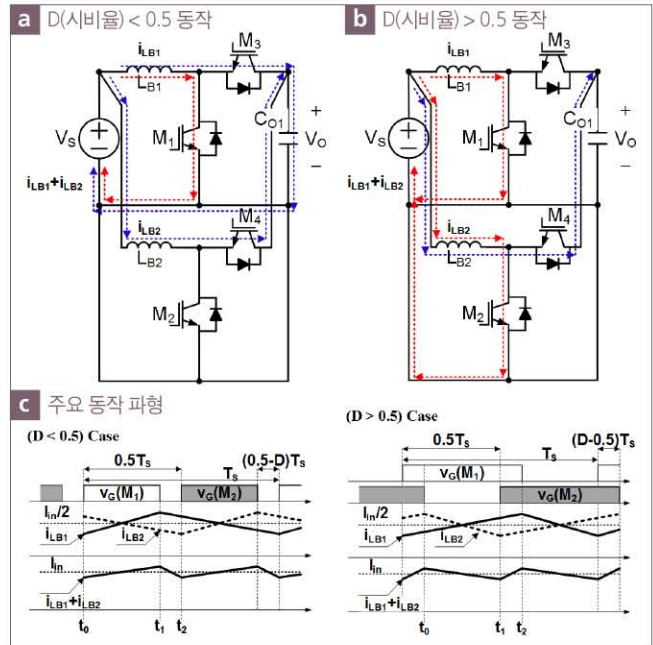


그림 2 2-Level 인터리빙 부스트 컨버터

2.2 2-Level 인터리빙 부스트 컨버터

그림 2의 2개의 리액터(L_{B1} , L_{B2})를 갖는 인터리빙 부스트 컨버터는 스위치 M_1 과 M_2 의 위상차를 180° 로 제어하며, 그림 2(c)와 같이 2개의 리액터로 흐르는 전류가 서로 상쇄되어 낮은 스위칭 주파수에도 불구하고 작은 입력전류 맥동을 갖는다. 하지만 인터리빙 부스트 컨버터 또한 출력전압이 소자의 전압스트레스(=1,500V)이며, 스위칭 특성이 떨어지는 높은 전압내압의 소자(3,300V급)가 선정되어야 한다. 따라서 스위칭 주파수를 증가시키는데 어려움을 갖는다. 또한 각각의 리액터에 흐르는 전류의 맥동 주파수는 스위칭 주파수와 동일하므로, 스위칭 주파수와 반비례 관계에 있는 인덕턴스를 저감시키는 데 한계를 갖는다. 따라서 인터리빙 부스트 컨버터는 기존 2-Level 부스트 컨버터에 비해 작은 인덕턴스로 설계될 수 있으나 낮은 스위칭 주파수로 인해 비교적 큰 인덕턴스를 갖는다.

2.3 3-Level 부스트 컨버터

그림 3의 3-Level 부스트 컨버터 역시 스위치 M_1 과 M_2 의 위상차를 180° 로 제어한다. 따라서 1개의 리액터(L)에 흐르는 전류의 맥동 주파수는 스위칭 주파수의 2배이다. 또한 3-Level 부스트 컨버터는 출력전압의 반이 소자의 전압스트레스(=750V)이므로, 기존 부스트 컨버터에 비해 스위칭 특성이 우수한 낮은 전압내압의 소자(1,200V급)가 선정될 수 있어 스위칭 주파수를 증가시킬 수 있다. 따라서 3-Level 부스트 컨버터는 리액터 전류의 비교적 높은 맥동 주파수와 비교적 높은 스위칭 주파수로 인해 인덕턴스를 저감하여, 부스트

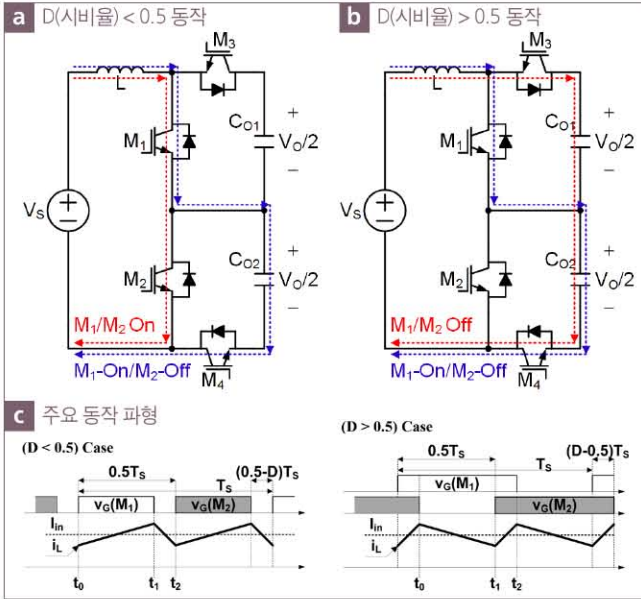


그림 3 3-Level 부스트 컨버터

컨버터에서 가장 큰 부피를 차지하는 리액터의 부피를 저감시킬 수 있다. 하지만 3-Level 부스트 컨버터 역시 소자의 '영전압/영전류 스위칭'을 성취할 수 없어, 여전히 큰 '턴-온/오프 스위칭 손실'과 '역회복 손실'로 인해 여전히 인덕터와 출력커패시터의 부피가 크다는 한계를 갖는다.

3. LLC 공진형 컨버터의 적용성 검토

앞서 살펴본 현재 철도차량용 추진전력변환장치(DC-DC 컨버터)로써 사용되는 여러 형태의 부스트 컨버터는 모두 소자의 영전압/영전류 스위칭을 성취할 수 없어, 고주파 구동이 어려워 공통적으로 인덕터와 출력커패시터의 부피가 크다는 단점을 갖는다.

이러한 단점을 극복하기 위해, 소자의 영전압/영전류 스위칭이 가능한 '고주파의 공진형 컨버터'를 수소연료전지 하이브리드 철도차량의 승압형 DC-DC 컨버터로 도입함으로써, 높은 효율, 작은 부피, 낮은 중량을 실현할 수 있다.

다양한 공진형 컨버터 중에 영전압/영전류 스위칭 및 출력전압 제어 특성이 가장 우수한 LLC 공진형 컨버터를 적용할 수 있으나, 철도차량의 높은 전력을 부담하기에는 변압기의 구현이 어렵고, 병렬로 연결되는 반도체 소자의 개수가 증가하는 단점이 있다. 따라서 다중의 LLC 공진형 컨버터로 구현하여 설계할 수 있다.

본 장에서는 '병렬입력-병렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터'와 '병렬입력-직렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터'의 적용 가능성을 검토한다.

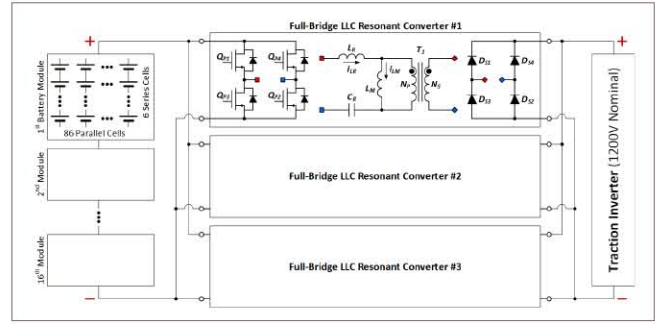


그림 4 병렬입력-병렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터

3.1 병렬입력-병렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터

병렬입력-병렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터는 그림 4와 같이 입력과 출력이 모두 병렬로 연결되며, 모듈의 개수에 따라 모듈마다 위상차를 갖고 인터리빙 구동을 하게 된다 [9],[10]. 따라서 입력 전류 리플뿐만 아니라 출력 전류 리플을 저감할 수 있어서, 고전압의 출력커패시터의 부피를 저감할 수 있는 장점이 있다. 또한 영전압/영전류 스위칭 특성으로 인해 고주파 구동이 가능하여 변압기 및 출력커패시터의 부피를 더욱 저감할 수 있다.

하지만 각 모듈의 LLC 공진형 컨버터는 높은 출력전압(=1,500V)으로 인해 2차 측 다이오드의 전압 스트레스(=1,500V)가 높은 단점이 있다. 특히, 역회복 특성이 우수한 SiC 다이오드의 경우에는 최대 1,700V의 내압을 가지므로, 전압 스트레스의 여분이 11.8%에 불과하다. 따라서 IPC-9592의 국제 권장 규격인 20%의 여분을 만족시키기 위해서는 출력전압을 1,360V 이하로 사용해야 하므로, 인버터의 성능을 극대화할 수 없게 된다. 뿐만 아니라, 위상차를 갖는 인터리빙 구동을 통하여 전류 리플을 저감할 수 있지만, 각 단의 소자가 편차를 가지면 LLC 공진형 컨버터의 전력 전달 특성에 따라 다중 LLC 공진형 컨버터가 균일하게 전력을 전달할 수 없어, 인터리빙 구동에 대한 전류 리플 저감 효과가 거의 없으며, 하나의 LLC 공진형 컨버터로 전력이 편중되어 전력 변환 시스템 전체의 신뢰성을 악화시킨다.

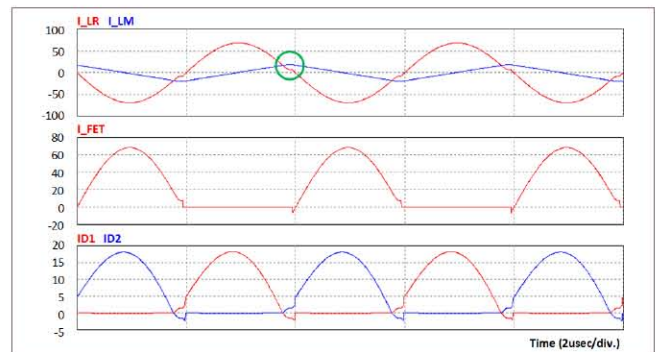


그림 5 병렬입력-병렬출력 구조의 3단 LLC 컨버터의 ZVS 시뮬레이션 파형
[조건 : 입력전압=400V, 출력전압=1,500V, 출력파워=50kW, LR=4 μH, L_M=20μH, C_R=99nF, N_F=8, N_S=30, F_S=250kHz, C_F=180pF]

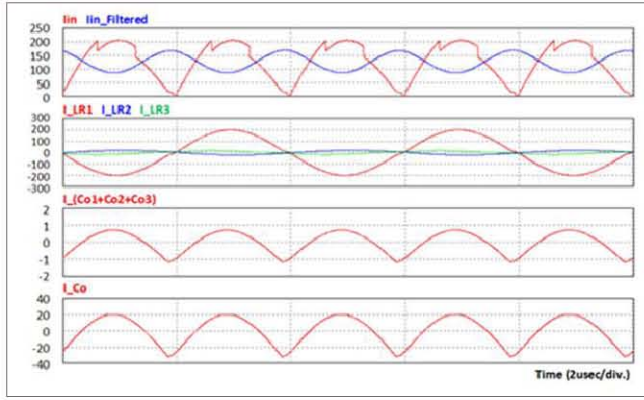


그림 6 병렬입력-병렬출력 구조의 3단 LLC 컨버터의 전력 분배 특성
[소자편차 조건 : $V_f=1.5V/1.6V/1.7V$, $L_R=3.8\mu H/4.0\mu H/4.2\mu H$]

출력 다이오드는 SiC 다이오드의 최대 전압인 1,700V의 내압을 갖는 소자를 선정할 수 있으며, 전압 스트레스 여분은 단지 11.8%이다. 뿐만 아니라, 다이오드의 고전압 사양에 의해, Junction-Capacitance (C_j)가 180pF로 다소 커서, 1차 측 소자의 영전압 스위칭 특성을 악화시킨다. 그림 5의 시뮬레이션 결과에서 살펴볼 수 있듯이, 다이오드의 큰 C_j 로 인하여 역회복 전류가 크며, 이는 1차 측 FET의 턴-오프 시 전류 크기, 즉 영전압 스위칭 전류가 감소하게 된다. 또한, 변압기의 턴-비의 차이가 커서 변압기의 구현이 다소 복잡하게 된다.

뿐만 아니라, 실제적으로 다중 LLC 공진형 컨버터 간의 부품 편차가 발생할 수 있으며, 이로 인하여 각 컨버터 간에 전력이 균일하게 전달되지 못하는 치명적인 문제점이 있다. 특히, 1차 측 FET의 시비율, 공진 탱크의 소자 값, 출력 다이오드의 순방향 전압(V_f)의 작은 차이로 인해 전력의 불균형이 발생할 수 있다. 그림 6은 시뮬레이션 파형을 나타내며, 그림 6에서 주어진 약간의 소자편차에 따라 1차 측 공진 전류(I_{LRn})의 편차가 매우 커짐을 확인할 수 있다. 결과적으로, 1번 LLC 공진형 컨버터의 설계 전력 초과로 시스템이 Shut-Down 됨으로써 신뢰성이 악화된다.

3.2 병렬입력-직렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터

병렬입력-직렬출력 구조의 다중 LLC 컨버터는 그림 7과 같이 입력은 병렬로 출력은 직렬로 연결되며, 모듈의 개수의 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 내압의 MOSFET 모두 스위칭 특성이 우수하여 턴-오프 스위칭 손실이

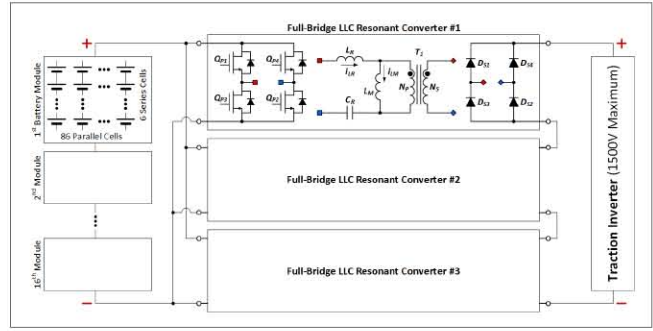


그림 7 병렬입력-직렬출력 구조의 다중 LLC 공진형 컨버터

크게 차이가 나지 않는다. 반면 직렬연결의 경우 1차 측으로 흐르는 전류가 분배되지 않아서 과도하게 증가한다.

출력 측은 1,500V의 높은 전압을 분배하여 사용할 수 있는 직렬연결이 적합하다. 3단의 LLC 공진형 컨버터가 출력 전압을 나눠가지므로, 각 컨버터의 출력 측은 다이오드 소자는 500V의 전압 스트레스를 갖는다. 따라서 그림 7과 같이 전력 변환 시스템을 구현할 수 있으며 LLC 공진형 컨버터의 공진탱크는 앞서 살펴 본 병렬입력-병렬출력의 경우와 동일하게 $L_R=4\mu H$, $L_M=20\mu H$, $C_R=99nF$ 로 선정하고, 각 LLC 공진형 컨버터의 출력 전압 감소(=500V)에 따라서 변압기의 턴 수는 $N_p=8$, $N_s=10$ 으로 변경된다. 출력 다이오드는 650V의 SiC 다이오드를 적용할 수 있게 되며, 23.1%의 충분한 전압 스트레스 여분을 확보할 수 있다. 뿐만 아니라, C_j 가 190pF로 인가 전압(=500V) 대비 작은 장점으로 인하여, 그림 8의 시뮬레이션 결과와 같이 2차 측 다이오드의 역회복 전류가 저감되어 영전압 스위칭 특성이 개선됨을 확인할 수 있다.

뿐만 아니라, 변압기 1/2차 측 턴-비 차이가 감소하여 변압기의 구현이 용이하게 된다.

특히, 실제적으로 발생하는 다중 LLC 공진형 컨버터 간의 부품 편차에 대해 둔감해지는 바람직한 특성을 얻을 수 있다. LLC 공진형 컨버터의 전력 전달 원리에 따라, 입력 전압과 출력 전압의 매우 작은 차이로 공진 전류가 형성되며 평형점을

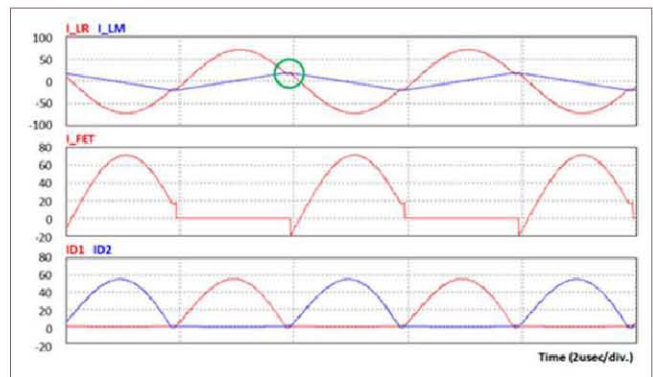


그림 8 병렬입력-직렬출력 구조의 3단 LLC 컨버터의 ZVS 시뮬레이션 파형
[조건 : 입력전압=400V, 출력전압=1,500V, 출력파워=50kW, $L_R=4\mu H$, $L_M=20\mu H$, $C_R=99nF$, $N_p=8$, $N_s=10$, $F_s=250kHz$, $C_j=190pF$]

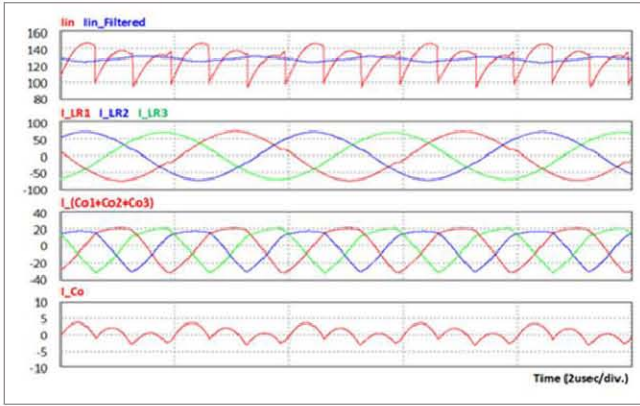


그림 9 병렬입력-직렬출력 구조의 3단 LLC 컨버터의 전력 분배 특성
 [소자편차 조건 : $V_i=1.5V/1.6V/1.7V$, $L_r=3.8\mu H/4.0\mu H/4.2\mu H$]

만족시키는 등가 부하에서 전력 전달을 이루게 된다. 따라서, 병렬입력-병렬출력 구조에서 동일 스위칭 주파수에 대하여 각 LLC 공진형 컨버터의 입·출력 이득이 다를 경우, 높은 이득을 가지는 컨버터가 높은 출력을 내고 이 출력 전압이 다른 컨버터의 출력으로 인가됨으로써 다른 컨버터의 전력 전달을 방해하고 높은 이득을 가지는 컨버터가 대부분의 전력을 공급하게 된다.


반면, 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 그림 6과 같이 동일한 소자 편차에도 불구하고 1차 측 공진 전류(I_{LRn})의 편차가 거의 없음을 알 수 있다.

4. 결론

최근에 에너지 효율이 높은 수소연료전지 기반의 철도차량용 추진시스템이 주목받고 있다. 하지만 수소연료전지와 배터리로 인해, 더욱 제한된 '공간과 중량'을 갖는 수소연료전지 하이브리드 철도차량은 고밀도/경량화 된 DC-DC 컨버터를 요구하고 있다.

본 특집 원고에서는 현재 수소연료전지 하이브리드 철도차량에 적용되는 승압형 DC/DC 컨버터인 2-Level 부스트 컨버터, 2-Level 인터리빙 부스트 컨버터, 3-Level 부스트 컨버터의 특징과 한계점에 대해 살펴보았다. 또한 여러 형태의 부스트 컨버터의 한계를 보완하기 위해 현재 연구되고 있는 공진형 컨버터 중, 병렬입력-병렬출력 구조의 LLC 공진형 컨버터

와 병렬입력-직렬출력 구조의 LLC 공진형 컨버터의 특징을 통해 수소연료전지 하이브리드 철도차량의 승압형 DC-DC 컨버터로써 적용 가능성을 검토하였다. 병렬입력-직렬출력 구조의 LLC 공진형 컨버터는 출력을 직렬구조로 선정함으로써, 2차 측 다이오드의 전압 스트레스를 줄일 수 있어 2차 측 다이오드의 Junction-Capacitance가 인가 전압 대비 작은 장점으로 인해 1차 측 스위치의 영전압 스위칭 특성을 더욱 우수하게 할 수 있다. 또한 병렬입력-직렬출력 구조의 경우에는 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.

결론적으로 수소연료전지 하이브리드 철도차량용 DC-DC 컨버터로써, 현재는 구조가 간단하지만 효율, 부피, 중량이 불리한 여러 형태의 비절연형 부스트 컨버터를 사용하지만, 최근에는 영전압 스위칭 특성이 우수하고 모듈 간 전류 불평형을 최소화할 수 있는 병렬입력-직렬출력 구조의 LLC 공진형 컨버터가 많이 연구되고 있다. 

참고문헌

- [1] S. K. Heo, S. B. Yoon, B. S. Kim, and S. H. Lee, "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*, Vol. 40 No. 4, pp. 72-76, 2018.
- [2] H. Glickenstein, "March 2019 land transportation news," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 14, No. 1, pp. 18-26, 2019.
- [3] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 589-598, 2010.
- [4] P. Thounthong, S. Rael, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 193, No. 1, pp. 376-385, 2009.
- [5] K. Jin, X. Ruan, M. Yang, and M. Xu, "A hybrid fuel cell power system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 4, pp. 1212-1222, 2009.
- [6] O. Hegazy, J. V. Mierolo, and P. Lataire, "Analysis, modeling, and implementation of a multidevice interleaved DC/DC converter for fuel cell hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4445-4458, 2012.
- [7] K. C. Tseng and C. C. Huang, "High step-up high-efficiency interleaved converter with voltage multiplier module for renewable energy system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 3, pp. 1311-1319, 2014.
- [8] H. Xu, X. Wen, E. Qiao, X. Guo, and L Kong, "High power interleaved boost converter in fuel cell hybrid electric vehicle," *Proceedings of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, San Antonio, TX, pp. 1814-1819, 2005.
- [9] B. C. Kim, K. B. Park, C. E. Kim, and G. W. Moon, "Load sharing characteristic of two-phase interleaved LLC resonant converter with parallel and series input structure," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009.
- [10] E. Orietti, P. Mattavelli, G. Spiazzi, C. Adragna, and G. Gattavari, "Current sharing in three-phase LLC interleaved resonant converter," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009.

이재범 한국교통대 철도공학부 철도전기전자전공 조교수

1983년 9월 29일생. 2010년 고려대 전기전자전파공학부 졸업. 2016년 KAIST 전기 및 전자공학부 졸업(공학).
2016년~2019년 한국철도기술연구원 추진시스템연구팀/전철전력연구팀 선임연구원.
2019년~현재 한국교통대 철도공학부 철도전기전자전공 조교수.

