

특집 : 자동차에서 전력전자 기술 동향

전기자동차용 저전압 직류변환 장치 기술 동향

김 준 호

(계명대 전기에너지공학과 조교수)

본고에서 중점으로 다루는 저전압 직류변환 장치(Low-Voltage DC-DC Converter, LDC)는 친환경차 배터리 시스템의 고전압을 차량 내 전장 부품이 사용할 수 있는 직류 저전압(12V)으로 변환하는 장치를 일컫는다. 최근 화두가 되고 있는 유해 배출물이 없는 새로운 개념의 파워트레인을 적용하기 위해서 LDC는 반드시 필요한 장치이며, 전장 부품의 급속한 전자화에 따른 차량 내 전력 소비의 증가로 중요도가 높아지고 있다. 전기 자동차에 사용되고 있는 LDC 장치의 전력 변환 회로와 그 연구 개발 동향을 소개하고자 한다.

1. 서 론

최근 지구 온난화 및 미세 먼지, 질소 산화물에 의한 대기 오염의 심각성이 대두됨에 따라 유해 배출물 저감 규제가 매우 엄격해지고 있다. 이에 따라, 자동차 메이커들은 유해 배출물이 없는 새로운 개념의 파워트레인 개발을 강화하고 있다. 특히, 하이브리드 전기 자동차와 순수 전기 자동차의 개발이 활발해 지고 있으며, 정부 지원을 바탕으로 판매가 약진하고 있다^[1]. 이들 자동차 시스템에서 LDC가 담당하는 전력량이 증가하고 있다. 이는, 엔진의 대표적 역할인 알터네이터(발전기)를 이용한 12V 배터리의 충전이나 브레이크의 유압기 동작을 위한 진공 환경 형성과 같은 역할이 축소됨에 따라 이를 대체할 수 있는 추가적인 전동기의 사용이 증가하고, 사용자의 편의성과 안전성을 확보하기 위한 전자 제어 장치 및 센서의 사용 빈도가 높아짐에 따른 변화이다. 이로 인해, LDC의 효율이 자동차 전체 연비에 상당한 영향을 주게 됨으로써 중요도가 높아지고 있다.

2. 기존 저전압 직류변환 장치 및 개발 동향

그림 1은 순수 전기 자동차의 전력 변환 시스템을 블록으로 나타낸 것이다. 그림과 같이 전기 에너지를 저장하는 고전압/저전압 배터리와 고전압 배터리에 저장된 전기 에너지를 동력원으로 하여 구동력을 발생시키는 인버터와 전동기, 그리고 이들을 제어하는 차량 제어 장치(Vehicle control unit, VCU), 220V AC 단상 전원이 있는 곳에서 고전압 배터리의 충전이 가능토록하기 위한 탑재형 충전기(On-Board Charger, OBC), 마지막으로 고전압 배터리와 저전압 배터리 간의 전력 변환을 담당하는 LDC로 구성된다. LDC가 전기 동력 자동차 시스템을 구성하는 기본 장치임을 확인할 수 있다. 현재 판매되고 있는 자동차 메이커의 차량들을 기준으로 LDC가 담당하는 최대 전력량은 3kW이고, 300~400V의 전압을 12V로 변환하도록 설계하며, 차종마다 설계 조건에는 차이가 있다. 이러한 스펙 하에서 기존에 사용되는 전력 변환 토폴로지와 차세대 기술로 주목받고 있는 연구에 대해 이야기하고자 한다.

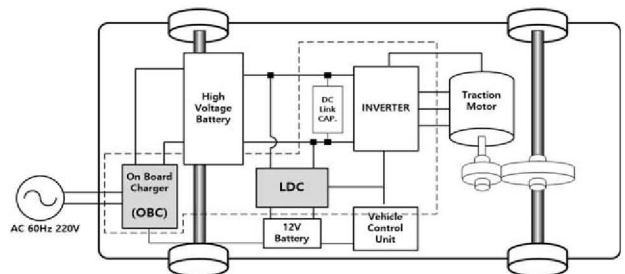


그림 1 순수 전기자동차의 전력변환 시스템 구조도

2.1 기존 회로 및 개선

현재 LDC를 위한 전력 변환 회로로 보편적으로 많이 사용되는 회로는 위상천이 풀-브리지 토폴로지이다. 그 중에서도 전기적 절연을 위한 트랜스포머의 2차측을 center-tap 형태로 결선하고 SR(Synchronous Rectifier)을 사용한 구조로

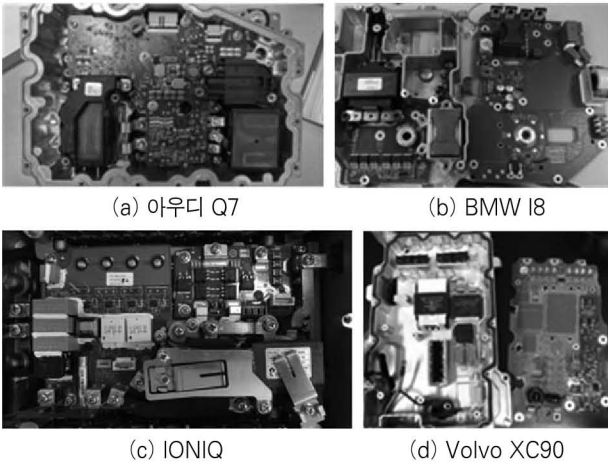


그림 2 위상 천이 풀브리지 토폴로지가 적용된 LDC

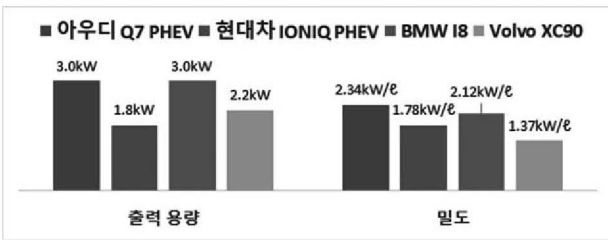
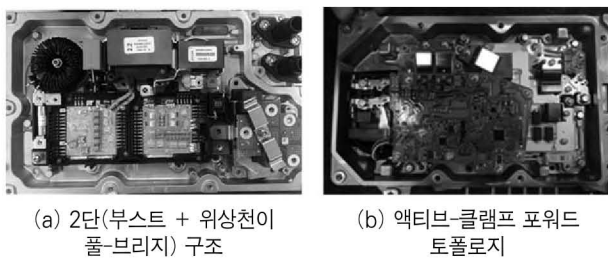
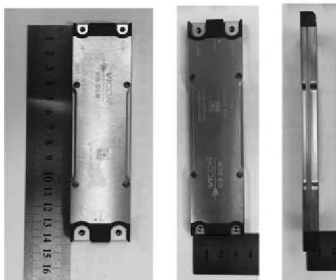


그림 3 차량별 LDC 출력 용량과 밀도 비교



(a) 2단(부스트 + 위상천이 풀-브리지) 구조 (b) 액티브-클램프 포워드 토폴로지



(c) VICOR社 초고밀도 컨버터 (142×35.5×9.3mm)

그림 4 다양한 토폴로지가 적용된 LDC

설계하여 도통 손실을 저감함과 동시에, 위상 천이(phase-shift) 기법을 사용하여 출력 전력을 제어함으로써 스위칭 손실을 저감하는 방법을 주로 채택하고 있다.

그림 2는 앞서 설명한 구조 및 제어 기법이 적용된 다양한 메이커社 차량들의 LDC 내부 회로 사진이다. 이들의 출력 용량과 전력 밀도는 그림 3과 같다. 기존 토폴로지를 이용하여 최대 3kW 출력 조건에서 2.3kW/L의 전력 밀도를 달성하였다. 효율은 92%~93% 수준이며, 이는 위상 천이 풀-브리지 토폴로지의 1차측 풀-브리지 인버터의 스위치와 2차측 정류기 회로의 SR 스위치에서 발생하는 도통 손실이 가장 큰 원인이다. 고전압 배터리의 전압 변동 범위를 고려하여 정격 전압에서 트랜스포머를 설계할 시, 배터리 전압이 높아질수록 시비율은 낮아지고 그로 인한 유효 듀티의 감소가 전류의 실효율 상승을 야기하기 때문이다. 따라서 위상 천이 풀-브리지 컨버터의 입력 전압을 일정하게 유지시킴으로 LDC의 효율을 높일 수 있음에 주목한 논문이 발표된 바 있다^[2]. 해당 논문에서는 2단의 컨버터를 사용하는 구조를 사용하였고, 위상천이 풀-브리지 컨버터는 항상 일정한 입력 전압 하에서 동작하게 된다. 이러한 구조적 특징을 활용한 LDC가 폭스바겐 Jetta HEV에 적용된 바 있으며 그림 4 (a)는 해당 제품의 모습이다.

2.2 차세대 소자 적용

LDC가 변환을 담당하는 전력량의 크기는 차량의 종류만큼이나 다양하다. 그 중, 저전압 배터리로부터 사용하는 전력이 1kW~2kW 수준인 차량의 경우, LDC 장치의 전력 밀도 상승을 위해 스위치를 적게 사용할 수 있는 액티브-클램프 포워드(Active Clamp Forward, ACF) 컨버터가 채용된다. 그림 4 (b)는 1.4kW의 출력 용량으로 설계된 LDC 제품으로 도요타 Prius 4 차량에 적용되었다. 해당 컨버터는 다소 낮은 89%의 효율을 보였으나, 0.8 리터의 공간을 이용하여 전체 시스템을 구현함으로써 높은 전력밀도를 달성하였다. 그리고 위상천이 풀-브리지 토폴로지에 비해 스위치 소자의 수가 상대적으로 적은 구조이므로 비용 면에서 유리한 장점이 있다.

최근에는 ACF 토폴로지에 SiC 스위치를 적용하는 연구가 이루어지고 있다. SiC 스위치는 Si 스위치보다 작은 출력 캐패시턴스를 갖는다. 이러한 특성이 ACF 토폴로지의 고주파 구동을 가능케하여 자성체 소자들의 부피를 저감할 수 있다는 점에 착안한 것이다^[3]. 또한, 전류 리플의 감소를 통한 손실 저감 및 SiC 스위치의 낮은 ON저항에 의한 효율 상승을 기대할 수 있다. 이러한 특성에 의해 ACF 토폴로지의 효율을 위상 천이 풀-브리지 컨버터가 갖는 93% 이상으로 높일 수 있다. 뿐만 아니라 소자의 수가 적기 때문에 높은 전력 밀도의 구현이 가능할 것으로 기대된다.

2.3 고주파 공진 회로 기술

높은 전력 밀도를 위해서는 스위칭 주파수의 상승이 필수적이다. 따라서 스위칭 손실이 발생하지 않는 특징을 갖는 공진형 토폴로지는 가장 적절한 구조라고 할 수 있다. 그러나 회로를 구성하는 소자들의 높은 전압 및 전류 스트레스, 그리고 높은 실효 전류로 인한 큰 전도 손실이 단점으로 지적된다. 이를 극복할 수 있는 방법은 스위칭 주파수를 MHz까지 높게 사용하여 공진에 의한 스트레스를 감소시키는 것이다.

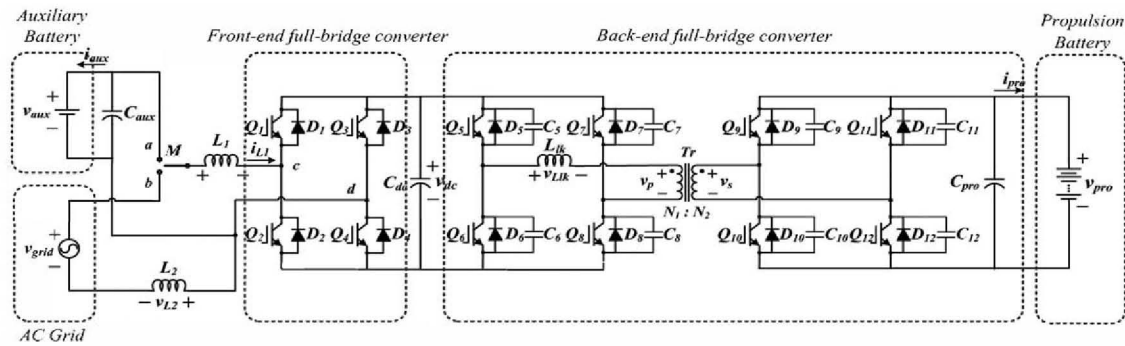
VICOR社は 1MHz 고속 스위칭 속도를 갖는 공진형 전력 변환 토폴로지를 이용한 초고밀도 DC-DC 컨버터 제품을 출시하였다. 이를 가능케 하는 것은 제어기와 전력 변환 회로의 집적 기술과 방열 설계 기술이다. 하나의 칩처럼 개별 소자들을 치밀하게 배치함으로써 외란 및 노이즈에 대한 강건성을 확보하여 MHz의 주파수에서도 안정적인 동작이 가능케 한 것이다. 또한, 칩 형태의 패키징 기술을 바탕으로 소자의 모든 면에서 방열이 가능토록 하였다. 이를 통해 열에 의한 성능 저하 또는 소자의 소손을 막을 수 있다. 이러한 회로 집적 기술과 냉각 기술을 바탕으로 출시된 제품의 외형은 그림 4(c)와 같다.

제품의 전체 부피 및 출력이 46.9mL, 1.8kW로써 전력 밀도 38.4kW/L를 보인다. 이는, 고주파 구동으로 인해 다른

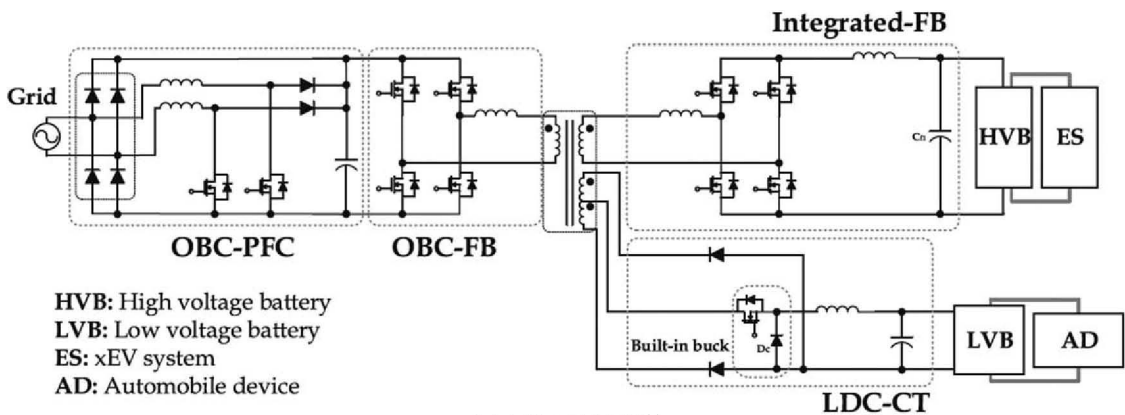
전장 부품들에 고조파 노이즈가 유입되는 것을 방지하기 위한 필터 회로가 추가되어야 한다는 점을 고려하더라도 기존의 토폴로지들에 비해 10배 이상 높은 전력 밀도를 가짐을 의미한다. 모듈의 입출력 전압 조건이 260V~410V, 12V로써 LDC의 스펙에 부합하며, 최대 효율이 96%로 기존의 토폴로지들에 비해 고효율을 갖는다. 그러나 이러한 우수한 성능에도 메이커社 차량에 적용된 예는 아직 없다. 그러나 LDC의 스펙 하에서 고속 스위칭을 사용한 공진형 전력 변환 토폴로지의 구현 및 성능 개선의 가능성을 보인 것이기에 향후, LDC의 고효율화 및 고전력밀도화를 위한 기술 개발의 방향으로써 공진형 구조를 활용한 연구가 증가할 것으로 보인다.

2.4 OBC-LDC 통합 회로 개발

LDC의 고밀도 고효율을 위한 연구 방향으로써 OBC와 LDC를 통합하는 연구가 이루어지고 있다. 전기 자동차 개발 초기에도 이러한 접근이 있었으나, OBC와 LDC 각 회로를 별도로 구성하고 냉각수 유로를 물리적으로 공유하여 하나의 패키지로 만드는 기구적인 통합에 집중하였다. 그러나 최근에는 양방향 전력 변환 기술을 이용하여 OBC와 LDC를 구성하는 회로 부품을 공유하여 개별 목적의 동작이 가능한 통합



(a) 인덕터 공유^[4]



(b) 트랜스포머 공유^[5]

그림 5 OBC-LDC 통합 유닛

HVB: High voltage battery
 LVb: Low voltage battery
 ES: xEV system
 AD: Automobile device

회로를 구성하는 연구가 진행되고 있다^[4,5]. 이를 통해 하나의 회로가 고전압 배터리와 저전압 배터리 그리고 그리드 간의 전력 변환이 가능하게 된다. 또한, 전체 회로 부품의 수를 저감시킴으로써 고밀도의 설계가 가능해 지는 장점이 있다.

그림 5는 브리지리스 부스트 컨버터를 사용하여 AC-DC 변환용 부스트 컨버터의 인덕터를 저전압 배터리의 충전을 위한 벽 컨버터의 출력 인덕터로 사용하는 방식이다. 이를 통해 그리드와 고전압 배터리 간의 양방향 전력 변환 과정 중에 선택적으로 저전압 배터리로 전력을 전달할 수 있다^[4]. 다른 방법은 양방향 Dual Active Bridge (DAB) 회로와 풀-브리지 컨버터를 통합하는 방식이다. 트랜스포머를 공유함으로써 그리드와 고전압 배터리 간의 양방향 전력 전달 및 저전압 배터리의 충전이 가능하다^[5]. 두 방식 모두 자성체의 공유화를 기반으로 한다는 공통점이 있다. 이러한 통합은 가장 큰 부피를 사용하는 자성체의 수를 저감할 수 있으므로, 고밀도의 설계가 가능하다.

3. 결 론

본고에서는 차량에 실장된 LDC와 기존 논문의 조사를 통하여 전기 자동차의 핵심 장치인 LDC의 현 개발 수준과 개발 동향을 간략히 살펴보았다. 현재까지 LDC에 주로 채용되는 회로는 위상천이 풀-브리지 토폴로지이며, 이는 고효율과 안정성의 확보가 용이하기 때문이다. 그러나 토폴로지의 구조적 특징으로 높은 전력밀도의 달성에는 어려움이 있다. 따라서 차량의 연비와 연관되는 LDC의 고효율화와 고전력밀도화를 위해 본고에서 정리한 것과 같이 다양한 연구가 이루어지고 있다. ■

참 고 문 헌

- [1] IEA, "Global EV Outlook 2017," 2017.
- [2] J. P. Kim, W. Y. Lee, S. G. Kim, S. W. Ha, and S. J. Kim, "High-efficiency two-stage LDC Design for HEV/ PHEV," in *proc. The Korean Society Of Automotive Engineers*, pp. 1879-1886, 2013.
- [3] A. Melkonyan, "High efficiency power supply using new SiC devices," Kassel University, 2007.
- [4] S. H. Kim and F. S. Kang, "Hybrid battery charging system combining OBC with LDC for electric vehicles," *International Power Electronics Conference*, 2014.
- [5] Y. S. Kim, C. Y. Oh, W. Y. Sung, and B. K. Lee, "Topology and control scheme of OBC-LDC integrated power unit for electric vehicles," *Trans. on Power Electro.* Vol. 32, No. 3, pp. 1731-1743, Mar. 2017.

〈 필 자 소 개 〉



김준호(金駿浩)

1985년 8월 15일생. 2009년 카이스트 공과대학 전기전자공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학). 2016년~2017년 현대자동차 연구개발본부 책임연구원. 2017년~현재 계명대 전기에너지공학과 조교수.