

마일드 하이브리드 차량용 Multi-Phase Buck Converter의 설계

임우빈¹⁾, 조현창¹⁾, 박성준²⁾
 한국전자기술연구원¹⁾, 전남대학교²⁾

Design of Multi-Phase Buck Converters for Mild Hybrid Vehicles

Woo Bin Lim¹⁾, Hyun Chang Cho¹⁾, Sung Jun Park²⁾
 Korea Electronics Technology Institute (KETI)¹⁾, Chonnam National University²⁾

ABSTRACT

최근 차량의 전장화에 따른 부하의 증가로 기존 12V 시스템으로는 전력 수요를 모두 충족할 수 없게 되었다. 때문에, 차량 전원 시스템의 전압 향상을 위한 기술 개발이 논의되어 왔고, 이에 따라 48V 시스템이 주목받게 되었다. 본 논문에서는 마일드 하이브리드 차량용 Multi-Phase Buck 컨버터의 설계 및 검증에 대해서 다룬다. 제안된 컨버터는 다중 위상 인터리브 방식을 사용하여 낮은 출력 전류 리플, 수동소자의 소형화를 달성하며 전력을 각 상으로 분산시켜 안정적으로 동작한다. 제안된 회로의 성능을 검증하기 위하여 이론적 해석 및 실제 실험 결과를 제시하였다.

1. 서론

기존의 대부분의 차량의 시스템 전압은 12V를 이용하였다. 12V의 시스템 전압에서 차량의 전장 부품의 증가는 제한된 차량 공간에 전선의 과도한 부피 및 무게의 증가를 초래하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 이러한 전장 부품의 차량 내에서의 비중은 더욱더 증가할 것이라고 예측되며 이를 해결하기 위한 방법으로 48V 시스템이 추가된 마일드 하이브리드 차량이 등장하게 되었다. 48V 시스템은 동일한 전력 레벨에서 12V 시스템에 비해 전류를 4배 줄일 수 있어 전류에 의한 손실(I^2R)을 16배 감소시키며, 케이블의 굵기 및 무게 또한 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 또한, 4-Phase의 다상 인터리브 방식은 각 상의 인덕터 전류가 더해져 출력 리플을 감소시켜 배터리에 가해지는 스트레스를 효과적으로 감소시킬 수 있다.^[1]



그림 1 차량 내 전장부품 비중
 Fig. 1 The proportion of electrical components in the vehicle

2. 컨버터 설계

2.1 컨버터 설계 사양

48V 입력, 12V 출력, 스위칭 주파수 100kHz의 1.6kW급 4-Phase Buck 컨버터로 설계하였으며, 자세한 컨버터의 사양은 표 1과 같다.

Parameter	Value
Phase	4-Phase
입력 전압 V_{in}	24 [V] ~ 54 [V], nominal 48 [V]
출력 전압 V_{out}	6 [V] ~ 18 [V], nominal 12 [V]
출력 Power P_{out}	1.6 [kW]
스위칭 주파수 f_s	100 [kHz]

표 1 4-Phase Buck Converter의 설계 사양
 Table. 1 Design Specifications for 4-Phase Buck Converters

2.2 Multi-Phase 컨버터

그림 2와 같이 각 상마다 한 쌍의 FET, 한 개의 인덕터로 구성되어 4개의 상을 병렬 연결한 4-Phase Buck Converter의 회로를 설계하였다. 다이오드에서 발생하는 손실을 감소시켜 비동기 스위칭에 비해 높은 효율을 얻을 수 있도록 Q1이 턴 온 되면 Q2가 턴 오프, Q2가 턴 온 되면 Q1이 턴 오프 되어 상호적으로 스위칭 동작하게 설계하였다.

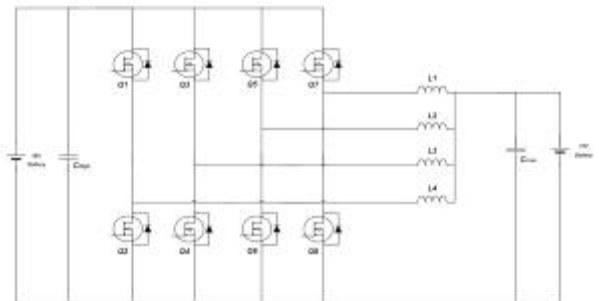


그림 2 4-Phase Buck 컨버터의 구조
 Fig. 2 Structure of 4-phase buck converter

전력단은 각 상으로 1/4만큼 전류를 분산시키고 한 개의 위상에 비해 4배의 주파수의 효과를 가질 수 있도록 각 상의 스위치가 90°의 위상차를 가지고 On/Off 동작하게 설계하였다.

이러한 동작으로 스위칭 소자의 도통 손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 출력 전류의 리플을 감소시켜 인덕터 및 커패시터의 용량을 감소시켰다.^[2]

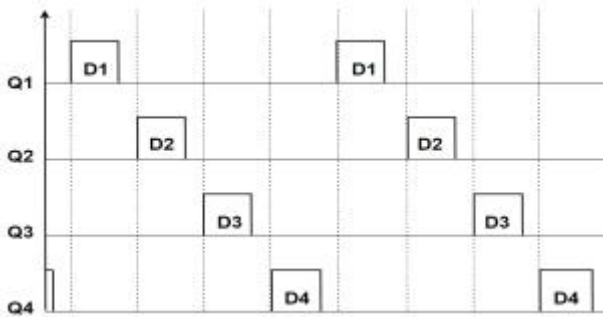


그림 3 4-Phase 컨버터의 ON-OFF 스위칭 순차도
Fig. 3 ON-OFF switching sequence diagram of 4-Phase converter

2.3 인덕턴스 선정

벅 컨버터에서의 최소 듀티 비 D_{min} 는 식 (1)과 같이 최대 입력 전압 V_{INmax} , 효율 η 의 곱과 출력 전압 V_{OUT} 의 비를 통해 정해진다.

$$D_{min} = \frac{V_{OUT}}{V_{INmax} \times \eta} \quad (1)$$

각 채널의 인덕터 전류는 스위치의 On/Off 상태에 따라 삼각파의 형태를 가지며, 인덕턴스 값 L_m 의 경우 peak to peak 전류 리플의 비를 r 이하가 되도록 선정할 경우 식 (3)과 같이 계산된다.

$$L_m \geq \frac{V_{OUT} \times (1 - D_{min})}{r \times I_{max} \times F_{sw}} \quad (2)$$

3. 실험 결과



그림 4 제작된 4-Phase Buck Converter 사진
Fig. 4 Produced 4-Phase Buck Converter Photo

4-Phase Interleaved Converter의 동작 실험 결과 각 상이 90°의 위상차로 스위칭 하여 그림 5의 파형에서 나타난 것과 같이 인덕터의 상전류 또한 정상적으로 인터리빙 동작하며 각 상의 전류가 중첩되어 출력 전류에 리플이 감소하는 것을 확인하였다.

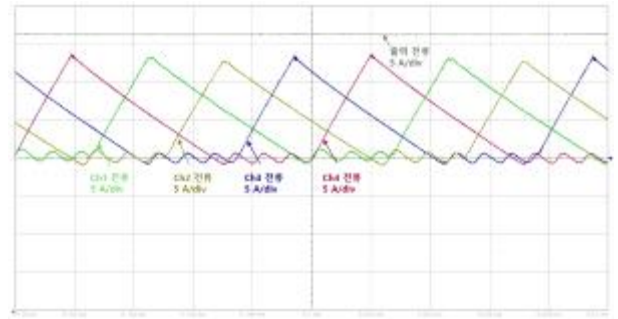


그림 5 인덕터 상전류 및 출력 전류 파형
Fig. 5 Inductor phase current and output current waveform

350 W에서부터 1.6 kW까지 50 W마다 효율을 측정하였다. 측정 결과 그림 6과 같이 전 구간에서 92% 이상의 효율을 가지며 750 W에서 94.76 %의 최고 효율을 확인하였다.

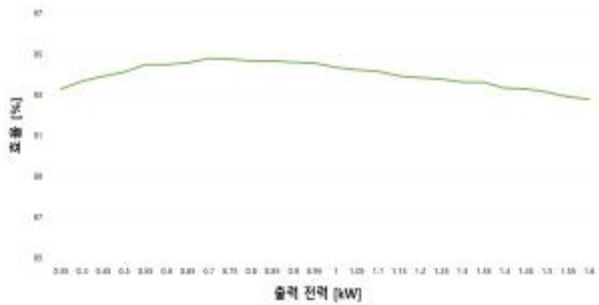


그림 6 출력 전력별 효율
Fig. 6 Efficiency per Output Power

3. 결론

본 논문에서는 Multi-Phase Converter의 구성 및 기본 동작, 설계 방법에 대하여 다루었으며, 마일드 하이브리드 차량용 4-Phase Buck Converter에 관하여 연구 및 제작하고 실험을 통하여 제안한 컨버터의 타당성을 입증하였다. 제작된 컨버터가 1.6 kW의 정격 조건에서 정상적으로 동작함을 확인하였다. 또한, 전 구간에서 92% 이상의 효율을 유지하며 94.76%의 높은 최대 효율을 가지는 것을 확인하였다.

이 논문은 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0021883, 2022년 전기차용 폐배터리 재사용 산업화 기술개발 사업)

참 고 문 헌

- [1] Kurt Seifert, "How to Make the Leap to 48V Electrical Architectures", Aptiv Whitepaper, 2023.
- [2] Hinov, N.; Grigorova, T. Design Considerations of Multi-Phase Buck DC-DC Converter. Appl. Sci. 2023, 13, 11064.