

고밀도 미래모빌리티용 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터

정승용
페오스

High-density Interleaved Five-phase Step-down DC-DC Converter for Future Mobility

Jeong Seung Yong
PEOS

ABSTRACT

본 논문에서는 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터를 이용하여 높은 전력밀도의 직류-직류 컨버터를 제작하는 방안을 제안하고자 한다.

기존의 강압형 직류-직류 컨버터를 이용하여 저전압 고전류의 컨버터를 제작할 경우 높은 전류로 인하여 인덕터의 크기가 커지고, MOSFET의 발열량이 높게 증가하여 발열량에 대한 문제로 인해 방열판에 팬을 부착 후 국부에서 발생하는 열을 배출하였다. 그렇기에 소형화를 시키기에 많은 어려움이 있어 이를 해결하고자 병렬구조의 강압형 직류-직류 컨버터를 이용해 전류를 분산시킨 후 열을 평준화 시킨다. 다만 이렇게 할 경우, 높은 전류 리플에 의해 출력측 커패시터의 용량 및 전류 리플이 높아야해 크기가 커지고, 많은 양의 커패시터를 추가하여야 한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 유/무인항공기용 고밀도 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터로 상의 개수를 높임으로써 출력측의 전류 리플을 개선하고 전류를 분산하며 열을 분산시키기 위한 병렬 구조를 통해 높은 전력밀도를 가질 수 있는 장점이 있다.

1. 서론

전력 전자 장치에서 효율적인 고전력 고밀도 강압형 직류-직류 컨버터에 대한 수요는 전기자동차(EV) 및 UAV/UAM과 같은 미래모빌리티와 전기 통신 장비와 같은 응용 분야에 의해 크게 증가하였다. 기존 단상 강압형 직류-직류 컨버터의 단점을 해결하기 위해 5상 인터리브드 토폴로지는 각 위상의 스위칭 주기를 엇갈리게 작동하여 에너지 전달이 연속적이고 출력에서의 리플을 최소화시킨다. 또한 여러 단계에 걸쳐 분산된 열 부하로 시스템의 신뢰성이 향상되어 추가적인 냉각 조치의 필요성을 줄인다. 5상 인터리브드 강압형 직류-직류 컨버터의 동작모드와 이점을 확인하고 이 접근 방식은 전력밀도를 높이는 동시에 열 문제를 해결할 수 있는 효율적인 방법임을 확인하고자 한다.

2. 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터

2.1 토폴로지 기본구조

인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터는 5개의 독립적인

벽 컨버터로 그림 1과 같이 나타낸다. 각 벽 컨버터는 제어 스위치(Q1~Q5), 다이오드(D1~D5), 인덕터(L1~L5)로 구성된다. R_o 는 부하 저항, C_{OUT} 은 필터 커패시터, V_{in} 과 V_{out} 은 각각 입력 전압 및 출력전압을 나타낸다. G1~G5의 각 게이트 신호는 5상의 위상차 및 스위치 ON-OFF 제어를 발생시키며, 각 PWM 게이트 신호의 지연 위상은 360도/5인 72도를 갖게된다.

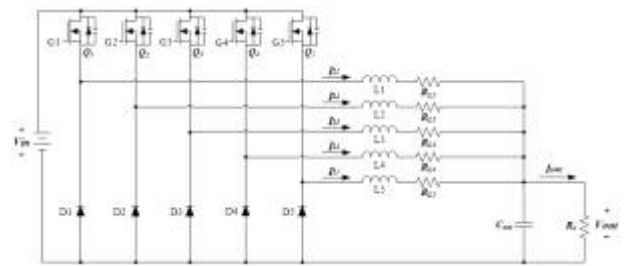


그림 1 인터리브드 5상 강압형 컨버터 토폴로지
Fig. 1 Three-Phase Interleaved Buck Converter Topology

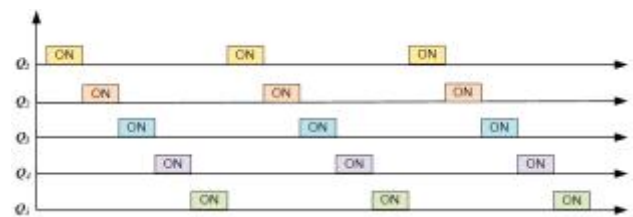


그림 2 5상 MOSFET의 스위칭 턴-온 파형
Fig. 2 Switching Turn-on Waveform of 5-Phase MOSFET

2.2 동작모드

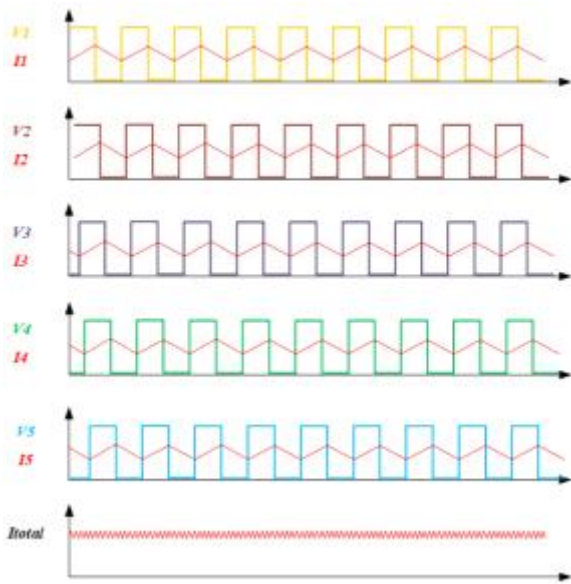


그림 3 5상 인터리브드 강압형 컨버터의 파형
(인덕터 전압 및 인덕터 전류, 통합 출력 전류)

Fig. 3. Waveforms of a 5-Phase Interleaved Step-down Converter
(Inductor voltage and Inductor current, Integrated output current)

5상 인터리브드 컨버터에서 5개의 각 위상은 전류를 분배하고, 리플을 최소화하고, 지속적인 에너지 전달을 유지하기 위해 단계적으로 작동한다. 동작모드 1단계에서는 Q1~Q5가 오프되고 D1~D5가 전도되며 V_{in} 은 L1~L5에 에너지를 저장하고, 출력은 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 2단계에서는 Q1은 온, Q2~Q5가 오프되어 D2, D3, D4, D5는 전도되고, D1는 오프된다. V_{in} 은 L1에 에너지를 저장하고 L2~L5는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 3단계에서는 Q2는 온, Q1, Q3, Q4, Q5가 오프되어 D1, D3, D4, D5는 전도되고 D2는 오프된다. V_{in} 은 L2에 에너지를 저장하고 L1, L3, L4, L5는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 4단계에서는 Q3는 온, Q1, Q2, Q4, Q5가 오프되어 D1, D2, D4, D5는 전도되고 D3는 오프된다. V_{in} 은 L3에 에너지를 저장하고 L1, L2, L4, L5는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 5단계에서는 Q4는 온, Q1, Q2, Q3, Q5는 오프되어 D1, D2, D3, D5는 전도되고, D4는 오프된다. V_{in} 은 L4에 에너지를 저장하고 L1, L2, L3, L5는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 6단계에서는 Q5는 온, Q1~Q4는 오프되어 D1~D4는 전도되고, D5는 오프된다. V_{in} 은 L5에 에너지를 저장하고 L1~L4는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 7단계에서는 Q2과 Q3은 온, Q1, Q4, Q5는 오프되어 D1이 전도되고, D2, D4, D5는 오프된다. V_{in} 은 L2와 L3에 에너지를 저장하고 L1은 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 8단계에서는 Q3, Q4는 온, Q1, Q2, Q5는 오프되어 D1, D2, D5는 전도되고 D3는 오프된다. V_{in} 은 L3, L4에 에너지를 저장하고 L1, L2, L5는 V_{out} 으로 에너지를 전달한다. 9단계에서는 Q2, Q5가 온, Q1, Q3, Q4는 오프되어 D1, D3, D4는 전도되고 D2는 오프된다. V_{in} 은 L2, L5에 에너지를 저장하고 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 10단계에서는 Q1, Q3, Q4, Q5가 온, D2는 오프된다. V_{in}

은 L1, L3, L4, L5에 에너지를 저장하고 V_{out} 으로 에너지를 전달한다.

이러한 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터는 단상 벡 컨버터에 비하여 각 위상의 MOSFET은 72도 엇갈리게 켜지므로 부하에 대한 전력 전달이 모든 위상에서 연속적이다. 하나의 위상은 항상 활성 상태이며, 추가적인 중첩 전류로 인해 우수한 리플 감소를 가지며, 부하 전류가 5상으로 분할되기 때문에 열 부하가 더 고르게 분산되어 과열을 방지하고 최적의 효율성에 우수한 이점을 가진다.

3. 결론

단상 설계에 비해 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터는 다양한 강점을 보여준다. 먼저, 위상을 인터리빙함으로써 출력 전압 리플과 전류 리플이 최소화되어 전력 공급이 더욱 원활해지므로 출력 리플 감소의 효과를 가진다. 두 번째로 여러 위상에 걸쳐 전류를 공유하면 인덕터 및 MOSFET의 전도 손실이 줄어들어 효율면에 용이하다. 세 번째로 전류로 인한 발열이 심한 소자인 인덕터가 5개로 분산되어 핫 스팟이 줄어들고 대형 방열판의 필요성이 줄어들어 열 관리면에서 이점을 가진다. 수동 부품의 크기가 줄어들어 높은 전력밀도 면에서 컴팩트한 설계를 할 수 있다. 네 번째로 각 단계에서 작은 인덕터를 사용하게 되어 시스템이 부하 변화에 더 빠르게 응답한다. 이러한 결과들로 5상 인터리브드 설계는 EV 및 UAM/UAV와 같은 미래모빌리티와 전기 통신 장비와 같은 고전류, 저전압 어플리케이션에 이상적임을 알 수 있다.

이 논문은 2024년도 대구대학교 창업중심대학의 지원을 받아 수행된 연구임(2024년 지역특화 프로젝트 레전드 50+ 연계창업중심대학)

참고 문헌

- [1] Chakraborty, S.; Vu, H.-N.; Hasan, M.M.; Tran, D.-D.; Baghdadi, M.E.; Hegazy, O. DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends. *Energies* 2019, 12, 1569.
- [2] Liu, K.L.; Yang, Z.L.; Tang, X.P.; Cao, W.P. Automotive Battery Equalizers Based on Joint Switched-Capacitor and Buck-Boost Converters. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2020, 69, 12716 - 12724.
- [3] Zhou, X.; Sheng, B.; Liu, W.B.; Chen, Y.; Wang, L.L.; Liu, Y.F.; Sen, P.C. A High-Efficiency High-Power-Density On-Board Low-Voltage DC-DC Converter for Electric Vehicles Application. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 12781 - 12794.
- [4] 정재현, 노의철. (2015). 3상 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터의 경부하 동작 시 전류 리플 최소화를 위한 스위칭 기법. *조명·전기설비학회논문지*
- [5] 李雨鐘 외. (2011). "5kW 배터리 충전기용 양방향 3상 인터리브드 DC-DC 컨버터 설계 및 실험" *전력전자학회논문지*