

유/무인항공기용 고밀도 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터

정승용
(주)주원

High-density Interleaved Five-phase Step-down DC-DC Converter for Manned/Unmanned Aircraft

Jeong Seung Yong
JUWON

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

최근 다양해진 형태로 수송드론, 택시드론, UAM, UAV, PAV 등 고정익과 회전익의 형태로 미래항공교통에 대한 관심이 극대화됨에 따라 승객과 물류 운송에 적극 사용되며 아마존과 같은 대형 물류회사는 수송드론을 사용하여 택배를 배송하고 비행 허가가 된 국가의 여러 지역에서는 승객이 탑승 가능한 UAM 택시를 운영을 실시하고 있다. 군용 미래항공교통에는 군 물자 이동 및 감시 등에 활용될 계획으로 개발이 진행되며, 기동성 및 운항시간을 확보하기 위해 초경량, 소형화를 목표로하고 있다. 배터리를 사용해 내부 직류전력변환장치가 필수불가결하게 장착됨에 따라 기존 전력변환장치는 단일화된 형태로 장치의 방열을 위하여 크기가 크고 무거워 부피를 많이 차지하기에 4kW/L이상의 전력밀도로 장착성을 고려해 개발이 필요할 것으로 예상된다.

미래항공교통은 크기에 따라 운항안전장치, 운항보조장치, 블랙박스, 감시용카메라, 무선통신장치 등 내부 장치가 시스템의 형태에 따라 다양해질 것으로 보이며 많은량의 직류전력변환용량이 필요할 것으로 예측된다. 그리고 항공기의 중요 제어 및 운항 장치의 전원을 공급하므로 높은 신뢰성과 환경조건을 필요로하며, 민간/군 유무인기, UAM, UAV, PAV 및 e-모빌리

티 시장의 성장에 따라 해외수입에 의존하고 있는 항공기 직류 전력변환장치의 국산화 및 충분한 공급이 필요할 것으로 예상된다. 이에 모듈형 적용을 통한 유지-관리-확장성과 Planner/Brick Type 전력변환기 개발 기술을 적극 활용하여 유지-관리-확장이 용이한 미래항공기용 모듈형 500W급 고신뢰성 고밀도 초경량 직류전력변환기 기술개발을 필요로 하고 있다. 기존 단상 강압형 직류-직류 컨버터의 단점을 해결하기 위해 5상 인터리브드 토폴로지는 각 위상의 스위칭 주기를 엇갈리게 작동하여 에너지 전달이 연속적이고 출력에서의 리플을 최소화 시킨다. 또한 여러 단계에 걸쳐 분산된 열 부하로 시스템의 신뢰성이 향상되어 추가적인 냉각 조치의 필요성을 줄인다. 5상 인터리브드 강압형 직류-직류 컨버터의 동작모드와 이 점을 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 벡 컨버터로 그림 1과 같이 나타낸다. 각 벡 컨버터는 제어 스위치(Q1~Q5), 다이오드(D1~D5), 인덕터(L1~L5)로 구성된다. Ro는 부하 저항, COUT은 필터 커패시터, Vin과 Vout은 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.

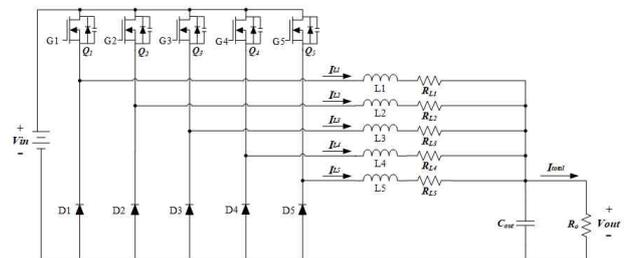


그림 1 인터리브드 5상 강압형 컨버터 토폴로지
Fig. 1 Three-Phase Interleaved Buck Converter Topology

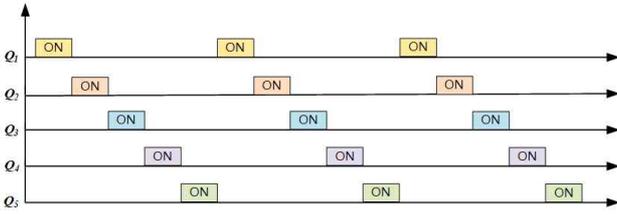


그림 2 5상 MOSFET의 스위칭 턴-온 파형
Fig. 2 Switching Turn-on Waveform of 5-Phase MOSFET

2.2 동작모드

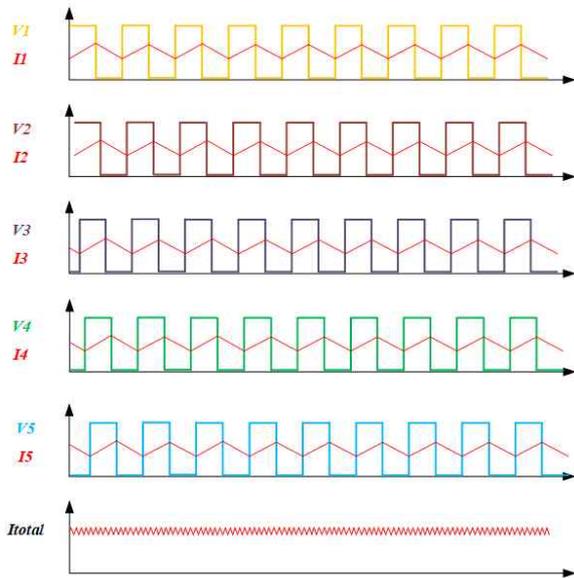


그림 3 5상 인터리브드 강압형 컨버터의 파형
Fig. 3. Waveforms of a 5-Phase Interleaved Step-down Converter

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 Vin은 L1~L5에 에너지를 저장하고, 출력은 Vout에 에너지를 전달한다. 2단계에서는 Q1은 온, Q2~Q5가 오프되어 D2, D3, D4, D5는 전도되고, D1는 오프된다. Vin은 L1에 에너지를 저장하고 L2~L5는 Vout에 에너지를 전달한다. 3단계에서는 Q2는 온, Q1, Q3, Q4, Q5가 오프되어 D1, D3, D4, D5는 전도되고 D2는 오프된다. Vin은 L2에 에너지를 저장하고 L1, L3, L4, L5는 Vout에 에너지를 전달한다. 4단계에서는 Q3는 온, Q1, Q2, Q4, Q5가 오프되어 D1, D2, D4, D5는 전도되고 D3는 오프된다. Vin은 L3에 에너지를 저장하고 L1, L2, L4, L5는 Vout에 에너지를 전달한다. 5단계에서는 Q4는 온, Q1, Q2, Q3, Q5는 오프되어 D1, D2, D3, D5는 전도되고, D4는 오프된다. Vin은 L4에 에너지를 저장하고 L1, L2, L3, L5는 Vout에 에너지를 전달한다. 6단계에서는 Q5는 온, Q1~Q4는 오프되어 D1~D4는 전도되고, D5는 오프된다. Vin은 L5에 에너지를 저장하고 L1~L4는 Vout에 에너지를 전달한다. 7단계에서는 Q2와 Q3은 온, Q1, Q4, Q5는 오프되어

D1이 전도되고, D2, D4, D5는 오프된다. Vin은 L2와 L3에 에너지를 저장하고 L1은 Vout에 에너지를 전달한다. 8단계에서는 Q3, Q4는 온, Q1, Q2, Q5는 오프되어 D1, D2, D5는 전도되고 D3는 오프된다. Vin은 L3, L4에 에너지를 저장하고 L1, L2, L5는 Vout으로 에너지를 전달한다. 9단계에서는 Q2, Q5가 온, Q1, Q3, Q4는 오프되어 D1, D3, D4는 전도되고 D2는 오프된다. Vin은 L2, L5에 에너지를 저장하고 Vout에 에너지를 전달한다. 10단계에서는 Q1, Q3, Q4, Q5가 온, D2는 오프된다. Vin은 L1, L3, L4, L5에 에너지를 저장하고 Vout으로 에너지를 전달한다.

이러한 인터리브드 5상 강압형 직류-직류 컨버터는 단상 벽 컨버터에 비하여 각 위상의 MOSFET은 72도 엇갈리게 커지므로 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 유/무인기 항공기용 전원장비와 같은 미래모빌리티 분야의 고전류, 저전압 어플리케이션에 이상적임을 알 수 있다.

이 논문은 2024년도 경상북도 재원으로 (재)경북테크노파크의 지원을 받아 수행된 연구임(2024 미래항공교통 기술개발 및 사업화 지원사업)

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