

인터리브드 3상 강압형 직류-직류 컨버터

정승용
(주)주원

Interleaved Three-phase Step-down DC-DC Converter

Jeong Seung Yong
JUWON

ABSTRACT

본 논문에서는 인터리브드 3상 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 인터리브드 3상 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

DC-DC 컨버터는 가전에서 산업용 전력 시스템에 이르기까지 다양한 응용 분야에 널리 사용된다. 더 높은 효율과 콤팩트한 설계에 대한 수요가 증가함에 따라 전력밀도는 컨버터 설계에서 중요한 요소가 되고 있다. 기존의 벡 컨버터는 일반적으로 전압 레벨을 낮추는 데 사용되지만 고전력에서 작동할 때 종종 한계에 직면한다. 필요한 큰 인덕터 크기와 MOSFET에서 발생하는 상당한 열로 인해 고전류 부하를 처리하는데 제한이 있으며, 팬과 방열판을 부착하는 기존 냉각 방법은 고전력 밀도 설계에 비효율적이다. 또한 출력 단계에서 리플 전류가 증가하기 때문에, 특히 높은 전류 레벨에서 안정성을 유지하기 위해 큰 출력 커패시터가 필요하여 전체 컨버터 크기와 비용이 증가하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 인터리브드 3상 벡 컨버터가 제안하고자 한다. 컨버터의 위상을 인터리빙함으로써 이 설계는 전류 리플을 줄여 더 작은 수동 소자 부품을 허용하고 열 분포를 개선합니다. 이 접근 방식은 전력밀도를 높이는 동시에 열 문제를 해결할 수 있는 효율적인 방법이다.

2. 인터리브드 3상 강압형 직류-직류 컨버터

2.1 토폴로지 및 분석

인터리브드 3상 강압형 직류-직류 컨버터는 3개의 독립적인 벡 컨버터로 그림 1과 같이 나타낸다. 각 벡 컨버터는 제어 스위치(Q1, Q2, Q3), 다이오드(D1, D2, D3), 인덕터(L1, L2, L3)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, G2, G3의 각 게이트 신호는 3상의 위상차 및 스위치 ON-OFF 제어를 발생시키며, 각 게이트 신호는 1/3의 위상차(120도)를 갖게 된다.

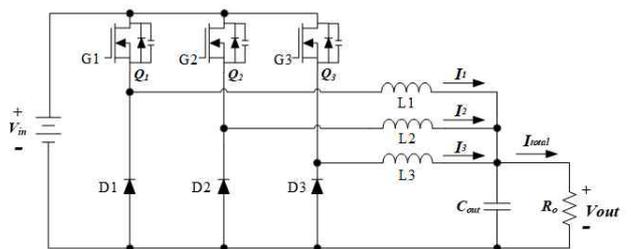


그림 1 인터리브드 3상 강압형 컨버터 토폴로지
Fig. 1 Three-Phase Interleaved Buck Converter Topology

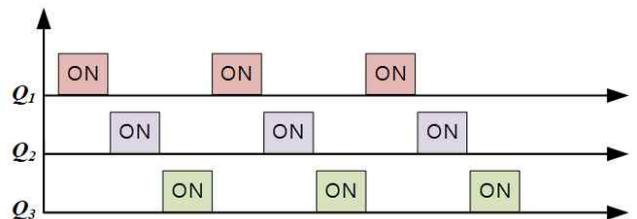


그림 2 스위칭 턴-온 파형
Fig. 2 Switching Turn-On Waveform

2.2 동작모드

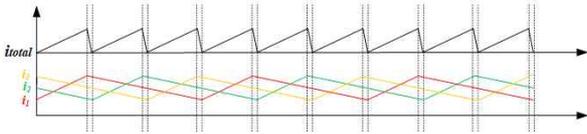


그림 3 $0 < d \leq 1/3$
Fig. 3. $0 < d \leq 1/3$

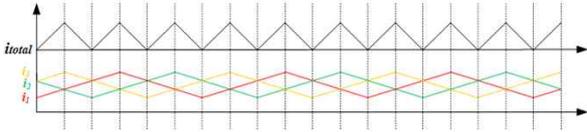


그림 4 $1/3 < d \leq 2/3$
Fig. 4. $1/3 < d \leq 2/3$

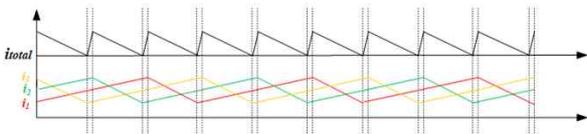


그림 5 $2/3 < d \leq 1$
Fig. 5. $2/3 < d \leq 1$

동작모드 1단계에서는 Q1, Q2, Q3가 오프 된 후, 동시에 D1, D2, D3로 전도되며 V_{in} 은 L1, L2, L3에 에너지를 저장하여 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 2단계에서는 Q1은 온, Q2와 Q3가 오프되어 D2, D3로 에너지가 전도되고, D1은 오프된 후 V_{in} 은 L1에 에너지를 저장하고 L2, L3는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 3단계에서는 Q2는 온, Q1과 Q3가 오프되어 D1, D3로 에너지가 전도되고, D2는 오프된 후 V_{in} 은 L2에 에너지를 저장하고 L1과 L3는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 4단계에서는 Q3는 온, Q1과 Q2가 오프되어 D1, D2로 에너지가 전도되고, D3는 오프된 후 V_{in} 은 L3에 에너지를 저장하고 L1과 L2는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 5단계에서는 Q1과 Q2는 온, Q3는 오프되어 D2로 에너지가 전도되고, D1과 D3는 오프된 후 V_{in} 은 L1과 L3에 에너지를 저장하고 L2는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 6단계에서는 Q1과 Q3는 온, Q2는 오프되어 D3로 에너지가 전도되고, D1과 D2는 오프된 후, V_{in} 은 L1과 L2에 에너지를 저장하고 L3는 V_{out} 에 에너지를 전달한다. 7단계에서는 Q2와 Q3는 온, Q1은 오프되어 D1으로 에너지가 전도되고, D2와 D3는 오프된 후, V_{in} 은 L2와 L3에 에너지를 저장하고 L1은 V_{in} 에 에너지를 전달한다. 8단계에서는 Q1, Q2, Q3가 온, D1, D2, D3는 오프되어 V_{in} 은 L1, L2, L3에 에너지를 저장하여 V_{out} 으로 에너지를 전달한다.

이러한 인터리브드 3상 강압형 직류-직류 컨버터는 단상 벽 컨버터에 비하여 연속전류로 동작하여 단상에 비해서 인덕터 전류의 리플이 감소할 수 있으며 이는 출력 커패시터의 용량을 줄일 수 있고, 인덕터의 배수로 인하여 열 손실을 분담하여 줄일 수 있으므로 전력밀도에서 중요한 부피를 작게 가질 수 있다.

3. 결론

인터리브드 3상 강압형 직류-직류 컨버터는 단상 설계에

비해 상당한 이점을 보여준다. 출력 전류 리플은 분석에서 알 수 있듯이 크게 감소한다. 이러한 개선을 통해 더 작은 커패시터를 사용할 수 있어 컨버터의 전체 크기와 비용이 절감된다. 또한 위상 간 전류의 균일하게 분배함으로써 전류 리플을 줄이고 열 성능을 개선하며 인덕터와 같은 수동 소자 부품의 크기를 최소화한다. 이는 컨버터의 소형화에 더욱 기여한다.

열 성능 측면에서, 인터리브 구조는 열 부하를 여러 구성 요소에 분산시켜 열 방출을 향상시킨다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 이 설계는 주요 부품의 피크 온도를 낮추어 대형 방열판이나 능동 냉각 솔루션이 필요하지 않아 전력밀도에 효과적인 시스템이다.

본 논문은 중소벤처기업부 2024년 경북지역기업 성장사다리 지원에 의하여 연구되었음(S341766 경북지역기업 성장사다리 지원사업)

참고 문헌

- [1] Waffler, S.; Biela, J.; Kolar, J.W. Output Ripple Reduction of An Automotive Multi-Phase Bi-Directional DC-DC Converter. In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), San Jose, CA, USA, 20 - 24 September 2009; pp. 2184 - 2190.
- [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