

전류 리플 저감을 위한 인터리브드 부스트 컨버터의 보조 상 기반 최적 제어 기법

김승수, 김승민, 김동희[†]
 전남대학교 전기공학과

Optimal Control Technique based on Sub Phase of Interleaved Boost Converter for Current Ripple Reduction

Seung-Soo Kim, Seung-Min Kim and Dong-Hee Kim[†]
 Department of Electrical Engineering Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 3상 부스트 컨버터의 리플 전류 저감을 위한 3+1상 부스트 컨버터 및 리플 전류 저감 방안을 제안한다. 3상 부스트 컨버터는 인터리빙 제어를 통해 특정 시비율에서 리플 전류 저감이 가능하지만, 시비율 변동 시 리플 전류가 증가하는 문제를 갖는다. 이를 위해 3상 부스트 컨버터의 시비율 크기에 따른 리플 전류 특징을 분석하며, 3+1상 부스트 컨버터에 입력 전류 리플 저감 목적으로 동작하는 보조 상의 동작 방안과 보조 상을 흐르는 평균 전류 크기가 주요 상보다 낮도록 보조 상을 제어하는 방안을 제시한다. 마지막으로, 제안하는 방안의 타당성 검증을 위해 시뮬레이션을 통해 확인한다.

1. 서론

최근 급속한 산업발달로 인한 전력수요 증가, 기존 에너지원의 환경 오염 문제와 고갈 문제로 인해 재생 에너지 관련 산업이 주목을 받으면서 태양광, 풍력 및 연료전지와 같은 재생 에너지에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 중 연료전지 시스템의 경우 낮은 셀 전압 등의 특징으로 인하여 승압형 전력변환장치가 필수적이다^[1]. 다양한 승압형 전력변환장치 중, 다수의 부스트 컨버터를 병렬 연결한 다상 부스트 컨버터는 인터리빙 제어를 통해 특정 시비율에서 입력 전류 리플 저감이 가능하므로 리플 전류에 취약한 연료전지 시스템에 효과적으로 적용할 수 있다. 하지만 인터리빙 제어 특정 상 특정 시비율을 제외한 그 외 시비율 범위에서는 리플 전류 저감 동작이 원활히 수행되지 않는 문제를 가진다. 이를 저감하기 위해 더 많은 부스트 컨버터를 추가적으로 병렬 연결하는 것은 전력밀도 및 구축 비용 측면에서 단점을 갖는다^[2].

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 n상 부스트 컨버터에 오직 전류 리플 저감 목적으로 동작하는 한 개의 보조 상 부스트 컨버터를 추가한 n+1상 부스트 컨버터를 활용하여 전체 시비율 범위에서 리플 전류 저감 방안을 제시한다. 또한, n+1상 부스트 컨버터의 보조 상에 흐르는 평균 전류를 주요 상보다 작게 흐르도록 보조 상 제어 방안을 제시한다. 전체 시비율에서 전류 리플 저감이 가능해서 연료전지 수명 연장을 기대할 수 있으며, 보조 상에 흐르는 전류가 주요 상보다 작으므로 보조 상을 구성하는 모든 소자들의 전류 정격을 주요 상보다 낮게 설계할 수 있다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 3상 부스트 컨버터에 한 개의 보조 상 부스트 컨버터를 추가한 3+1 부스트 컨버터를 기준으로 분석을 수행하며, 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 PowerSIM 시뮬레이션을 통해 확인한다.

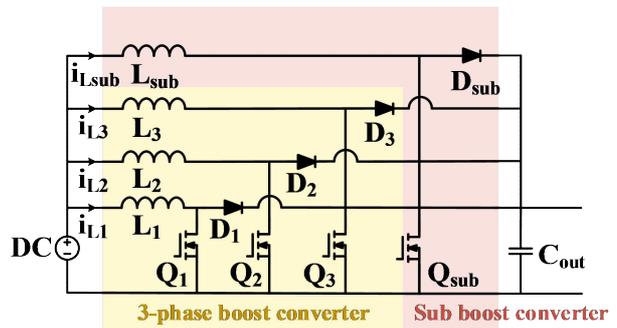


그림 1 제안하는 3+1상 부스트 컨버터
 Fig. 1 Proposed 3+1 phase boost converter

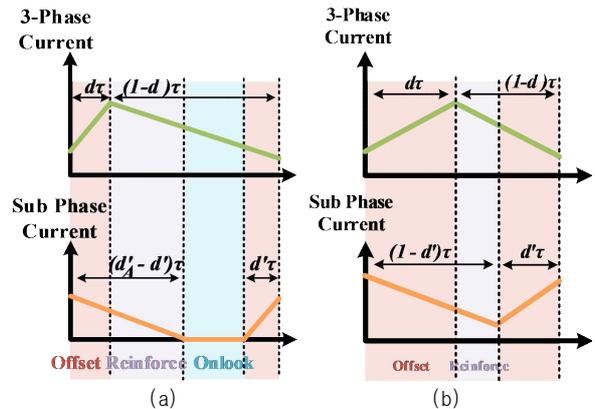


그림 2 입력 전류 리플 저감을 위한 보조 상 동작 (a) DCM, (b) CCM
 Fig. 2 sub phase operation for reduction of input current ripple (a) DCM, (b) CCM

2. 입력단 전류 리플 저감 원리

3+1상 부스트 컨버터의 입력 전류 리플은 모든 상 부스트 컨버터들의 인덕터 전류 합으로 발생하므로 입력 전류의 리플 성분 저감을 위해서 보조 상의 전류는 3상 부스트 컨버터의 인덕터 전류의 합과 동일한 주파수로 발생해야 한다. 그러므로 보조 상 부스트 컨버터는 3상으로 구성된 주요 상 부스트 컨버터 스위칭 주파수의 3배로 동작한다. 또한 서로 상쇄되는 위상에 위치하도록 위상 제어가 이루어져야 한다. 그리고 보조 상은 주요 상보다 시비율을 작게 동작하여, 상에 흐르는 전류가 주요 상에 흐르는 전류보다 작아서 보조 상을 구성하는 소자들의 전류 정격이 주요 상보다 작게 설계할 수 있다.

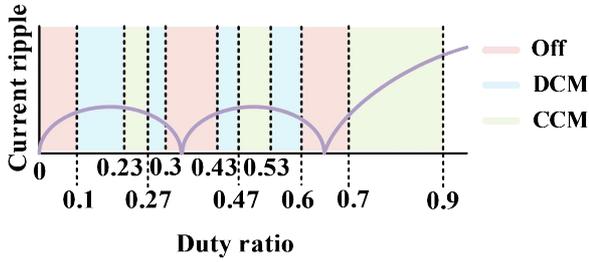


그림 3 시비율 구간별 보조 상 동작
Fig. 3 Sub Phase Operation according to duty cycle section

표 1 컨버터 설계 사양
Table 1 Design specification of converter

Parameter	Value
Inductance [uH]	50
Capacitance [uF]	250
Input voltage [V]	100
Output voltage [V]	175 - 200
Power [kW]	8
Switching frequency [kHz]	50
sub-switching frequency [kHz]	150

2.1. 제안하는 3+1 부스트 컨버터의 상 제어 방안

3상 부스트 컨버터는 시비율이 0.33 또는 0.66에 가까운 값 일 때, 3상 전류 리플 크기가 작아서 보조 상을 동작시키지 않는다. 하지만 보조 상의 시비율 d' 과 3상의 시비율 d 의 차이가 클 경우, 3상 전류 기울기와 보조 상 전류 기울기가 동시에 감소해서 입력 전류 리플이 기존보다 더 증가한다. 그러므로 그림 2(a)와 같이 보조 상을 DCM으로 동작하여 두 전류 기울기가 동시에 감소하는 시간을 단축해서 입력 전류 리플을 저감한다. 보조 상의 시비율 d' 과 3상의 시비율 d 의 차이가 작을 경우, 그림 2(b)와 같이 보조 상을 CCM으로 동작해서 보조 상 전류가 3상 전류를 상쇄하여 입력 전류 리플을 저감한다.

3상 부스트 컨버터의 경우, 시비율 0.33 및 0.66을 기준으로 입력 리플 전류의 특성 차이가 발생한다. 그러므로 시비율 크기에 따라 총 3개의 구간으로 구분하여 분석한다.

첫 번째로 시비율이 0.33 이하일 경우, 4상 부스트 컨버터의 입력 전류 리플이 최소가 되는 시비율 근처인 0.23 미만까지 보조 상을 DCM으로 동작하고 이후부터 CCM으로 보조 상 제어를 통해 입력 전류 리플을 저감한다.

두 번째로 시비율이 0.33-0.66일 경우, 4상 부스트 컨버터의 입력 전류 리플이 최소가 되는 시비율 0.5 근처에서 보조 상을 CCM으로 동작시키고 그 외의 영역에서 보조 상을 DCM으로 제어하여 입력 전류 리플 저감이 가능하다.

세 번째로 시비율이 0.66 이상일 경우, 3상의 전류 리플은 시비율에 비례해서 증가한다. 하지만 4상 부스트 컨버터는 시비율이 0.75에서 최소가 되기 때문에 시비율 D 가 0.7 이상부터는 CCM 동작으로 보조 상 제어를 통해 입력 전류 리플 저감이 가능하다. 그림 3은 3+1 부스트 컨버터의 시비율 크기에 따른 보조 상 동작 방안을 나타낸다.

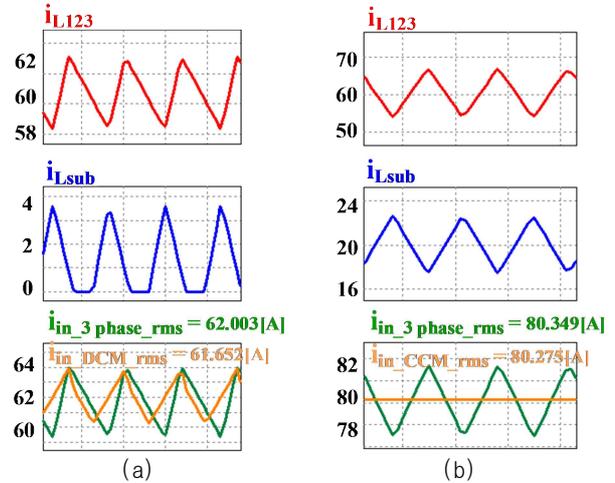


그림 4 시뮬레이션 파형 (a) 출력 전압 175V (b) 출력 전압 200V
Fig. 4 Simulation result (a) Output voltage 175V, (b) Output voltage 200V

3. 시뮬레이션 검증

본 논문에서 제안한 3+1상 부스트 컨버터를 사용한 입력단 리플 전류 저감 방법의 타당성 검증을 수행하기 위해 PowerSIM 시뮬레이션을 통해 확인한다. 3상과 보조 상은 스위칭 주파수를 제외한 모든 파라미터가 동일한 값이며, 표 1에 표시된 파라미터를 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 4(a)는 주요 상의 시비율이 0.43이고 보조 상을 DCM으로 동작하였을 때, 3상 전류 i_{L123} , 보조 상 전류 i_{Lsub} , 보조 상 동작 유무에 따른 입력 전류 파형을 나타낸다. 보조 상 동작 시, 입력 전류의 리플과 실효값 모두 상대적으로 저감했다.

그림 4(b)는 주요 상의 시비율이 0.5이고 보조 상을 CCM으로 동작하였을 때의 파형을 나타낸다. 보조 상을 동작하였을 때, 입력 전류 리플 크기와 실효값 모두 저감했으며, 보조 상에 흐르는 평균 전류 크기는 주요 상에 흐르는 전류보다 작다.

4. 결론

본 논문은 3+1상 부스트 컨버터를 넓은 시비율 범위에서 입력 전류 리플을 저감하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 시비율 크기에 따른 보조 상 동작 방법을 설명하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 방법이 기존 3상 부스트 컨버터보다 향상된 입력 전류 리플 저감 능력과 보조 상의 평균 전류 크기 감소를 확인하였다. 정확한 확인을 위해 향후 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증할 계획이다.

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관 리원(KEIT)의 연구비 지원에 의한 연구임(2002670602)

참고 문헌

- [1] Kitamoto, R., Sato, S., Nakamura, H., and Arano, A., "Development of fuel cell boost Converter using coupled-inductor for new FCV", SAE Technical Paper, 2017-01-1224, 2017.
- [2] 최규영, 김중수, 강현수, 이병국, "연료전지용 다상부스트 컨버터의 최적 설계기법", 대한전기학회, 2008, vol.57, no.6, pp. 1003-1011