

고효율 획득 및 입력전류 리플 저감을 위한 다상 부스트 컨버터의 제어 알고리즘

주동명, 김동희, 김민국, 이병국*
성균관대학교 정보통신대학

Control Algorithm for Multi-phase Boost Converter with High Efficiency and Low Input Ripple Current

Dong Myoung Joo, Dong Hee Kim, Min Kuk Kim and Byoung Kuk Lee*
College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 고효율 획득 및 입력전류 리플 저감을 위한 3상 부스트 컨버터의 동작 알고리즘을 제안한다. 입력전압별로 인덕터 전류에 따른 투자율 감소를 고려하여 DCM 및 BCM 동작시의 효율과 입력 전류 리플을 수식적으로 분석한다. 이에 따라 3상 부스트 컨버터를 경계 도통 모드+불연속 도통 모드의 혼합 모드에서 동작시키고 타당성을 실험을 통해 검증한다.

1. 서 론

최근 석유에너지 자원 고갈 및 환경 문제가 전 지구적 문제로 대두됨에 따라 신재생에너지를 이용한 전력 발전에 대해 연구개발이 수행되고 있다. 이러한 신재생 에너지는 조건에 따라 출력 전압 또는 전류가 변화하는 특성을 갖고 있기 때문에, 안정적인 출력 전력을 얻기 위하여 부스트 컨버터가 주로 사용되고 있다. 또한, 입력전류 리플 저감을 위하여 다상 부스트 컨버터 (IBC: Interleaved Boost Converter)에 대한 연구 및 고효율 획득을 위하여 영전류 턴 온이 가능한 불연속 도통 모드 (DCM: Discontinuous Conduction Mode) 동작에 대한 연구가 수행되었다^[1]. 이 때, 입력전류 리플의 크기는 컨버터의 동작 모드 및 듀티비에 따라 달라지며 특정 조건에서는 DCM으로 동작할 때의 입력전류 리플이 연속 도통 모드 (CCM: Continuous Conduction Mode)에 비해 작아진다^[2]. 따라서 IBC를 조건에 따라 DCM 및 BCM 모드로 동작시키면 고효율 획득과 함께 입력 전류 리플을 최소화 하여 전원 디바이스에 대한 영향 및 EMI 필터의 공통모드 필터의 부담을 줄일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 입력전류 리플 저감과 동시에 영전류 턴 온을 통한 고효율 획득이 가능한 BCM 동작을 하는 3상 IBC컨버터의 효율 및 입력전류 리플을 분석한다. 또한 컨버터의 설계 범위 내에서 DCM+BCM 혼합 동작을 하여 입력 전압 범위 내에서 최대의 효율 및 최저의 입력 전류 리플을 갖는 운전 알고리즘을 제안한다.

2. 본 론

2.1 BCM 동작을 위한 인덕턴스 선정

IBC의 BCM 동작을 위한 임계인덕턴스 값 L_{crit} 은 입력전압, 부하전류, 듀티비, 스위칭 주파수 및 인덕터에 흐르는 전류에 의해 코어에 가해지는 자화력에 따른 투자율 감소분을 고려한

표 1 3상 IBC 시스템 사양
Table 1 Specifications of the 3-phase IBC

Parameter	Value
Rated Output Power	600 [W]
Input Voltage	33 75 [V]
Output Voltage	90 [V]
Switching Frequency	20 40 [kHz]
Input Current Limit	3.3[A]

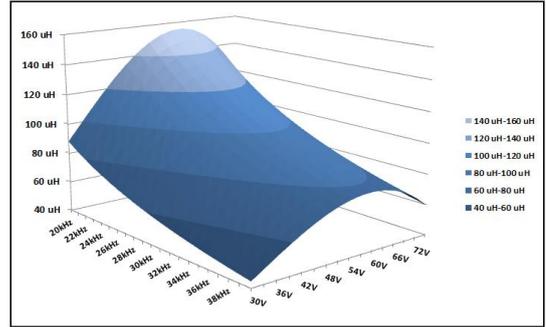


그림 1 입력 전압 및 스위칭 주파수에 따른 임계 인덕턴스
Fig. 1 Critical inductance according to V_{in} and F_{sw}

$$L_{crit} = \frac{V_{in} D(1-D)}{2I_{out} f_{sw}} \times \frac{1}{roll-off(I_L)} \quad (1)$$

식 (1)에 의해 결정된다.

시스템의 스위칭 주파수는 가칭주파수 이상으로 하기 위하여 최소값을 20kHz로 선정하였으며 입력 전압 범위, 정력 출력 전압 및 전력은 표 1과 같다. 그림 1은 시스템 설계 사양에 따른 BCM 동작을 위한 L_{crit} 값을 나타내며, 표 1의 설계 범위 내에서 동작이 가능하도록 인덕턴스 값을 82uH로 선정하였다.

2.2 DCM+BCM 혼합 운전 알고리즘

3상 IBC 컨버터의 입력전류 리플 최소화 및 고효율 획득을 위한 최적 운전을 위하여 DCM 및 BCM 각각의 동작 시의 입력 전류 리플 계산 및 효율 분석이 필요하다.

BCM 동작을 하는 3상 IBC의 입력 전류 리플은 CCM으로 동작하는 IBC의 입력 전류 리플과 같으며, 따라서 동일한 수식에 의해 계산된다^[1]. DCM 동작을 하는 3상 IBC는 듀티비 외에 인덕터에 전류가 흐르는 시간 D_A 에 따라 총 여덟 가지 경우로 나뉘어 계산된다^[2]. 선정된 인덕턴스 값에 대해 시스템 설

계 범위 내에서 DCM으로 동작 가능한 주파수는 20kHz 및 21kHz로 제한되며, 따라서 각 입력전압별로 20kHz DCM 운전, 21kHz DCM 운전 및 가변 주파수 BCM 운전 시의 입력 전류 리플을 계산하여 Look up 테이블로 작성하였다.

시스템의 효율은 식 (2)와 같이 스위치 손실, 인덕터 손실 및 다이오드 손실의 합으로 정의된다. BCM 및 DCM 동작 시 컨버터의 스위치가 영전류에서 턴 온하기 때문에 턴 온 손실은 무시할 수 있으며, 다이오드의 정방향 전압 강하에 의해 발생하는 손실은 다이오드 전류의 평균값으로 계산되므로 동일하다고 가정하였다. 인덕터의 손실은 슈타인메츠 방정식을 통해 식 (3)과 같이 표현되며 스위치의 손실은 스위칭 손실, 도통 손실 및 게이팅 손실을 포함하여 식 (4)와 같이 결정된다. 따라서 시스템의 총 손실은 스위칭 주파수의 함수의 형태로 나타나며 실제 시스템의 제어기 상에서 쉽게 계산될 수 있다.

$$P \quad (2)$$

$$P_L(f_{sw}) = R_{core} i_{max,(f_{sw})}^{2.27} \cdot f_{sw}^{3.2} + R_{copper} i_{rms,(f_{sw})}^2 \quad (3)$$

$$P_{sw}(f_{sw}) = \frac{V_{max} I_{max} t_{d(off)} f_{sw}}{2} + R_{dson} i_{rms,(f_{sw})}^2 + Q_g V_{gs} f_{sw} \quad (4)$$

각각의 동작모드에서 수식적으로 계산된 입력전압 조건에 따른 입력전류 리플 및 컨버터 효율을 기반으로 시스템이 최저의 입력전류 리플에서 동작할 수 있도록 그림 2와 같은 순서도를 통해 입력 전압 조건에 따른 동작 모드를 판별하였다.

그림 3은 그림 2의 알고리즘에 따라 3상 IBC 시스템의 운전 모드를 결정하고 그 때의 입력전류 리플 및 효율을 나타낸 그래프이다. 전 영역에서 DCM 동작을 하는 경우 전반적으로 높은 효율에서 동작이 가능하지만 입력전압이 60V 이상일 때 입력 전류 리플이 설계 제한치인 3.3A를 초과한다. 반면 BCM 동작을 하는 경우 입력 전류 리플 조건은 만족하지만 DCM 동작에 비해 낮은 효율에서 동작할 뿐만 아니라, 입력전압이 51V 이하일 때는 DCM 동작에 비해서도 입력전류 리플이 커지는 단점

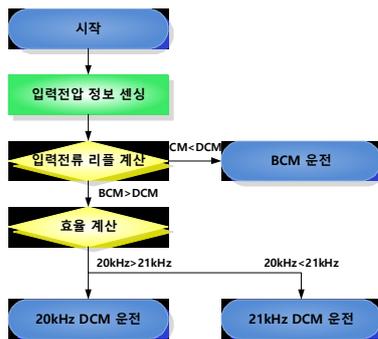
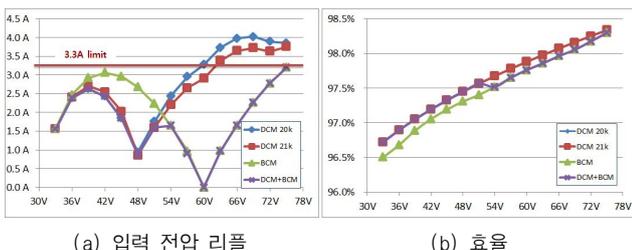
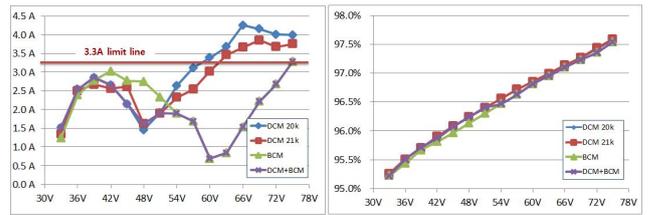


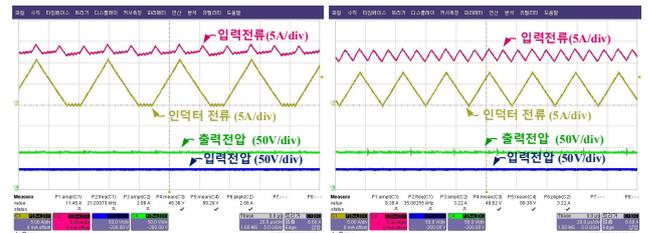
그림 2 동작 모드 판별을 위한 순서도
Fig. 2 Flowchart for mode selection



(a) 입력 전압 리플 (b) 효율
그림 3 계산된 입력 전압 별 입력전류 리플 및 효율
Fig. 3 Calculated Input current ripple and η according to V_{in}



(a) 입력 전압 리플 (b) 효율
그림 4 실험 결과
Fig. 4 Experimental results



(a) DCM 구동 $F_{sw}=21kHz$ (b) BCM 구동 $F_{sw}=35kHz$
그림 5 입력전류가 48V일 때의 DCM 및 BCM 입력전류리플 비교
Fig. 5 Comparison of input current ripple of DCM & BCM at $V_{in}=60V$

이 있다. 제안한 알고리즘에 따라 DCM+BCM 혼합 동작을 하는 경우 입력전압이 낮을 때는 DCM 동작을 하여 작은 입력전류 리플 및 고효율 영역에서 동작하고, 입력전압이 높을 때는 BCM 동작을 하여 입력 전류 리플 설계 사양을 만족한다.

2.3 실험 결과

그림 4는 DCM, BCM 및 DCM+BCM 혼합 동작 시의 입력 전압 리플 및 효율을 나타낸 그래프이다. DCM+BCM 혼합 동작 시 작은 입력전류 리플 및 고효율 획득이 가능하며 입력전류 리플이 설계 사양 이내로 만족함을 확인하였다. 그림 5의 그래프에 따라 특정 입력전압 조건 하에서 BCM 동작 시의 입력전류 리플이 DCM 동작시보다 큼을 실험적으로 검증하였다.

3. 결 론

본 논문은 경계 전류 모드로 동작하는 3상 부스트 컨버터의 특성을 분석하였다. 투자율 감소를 고려하여 인덕터를 설계하고 시스템이 DCM 및 BCM에서 동작할 때의 입력전류 리플 및 손실을 분석하였으며, 시스템이 최대의 효율 및 최저의 입력 전류 리플에서 동작할 수 있는 DCM+BCM 혼합 운전 알고리즘을 제안하고 실험으로 검증하였다.

본 연구는 지식경제부 지원 하에 수행된 신재생에너지융합원천기술개발사업 (No. 20113010030020 12 2 200)의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] G. Y. Choe, J. S. Kim, H. S. Kang, B. K. Lee, "An Optimal Design Methodology of an Interleaved Boost Converter for Fuel Cell Applications", Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 2, pp. 319~328, 2010
[2] 김동희, 최규영, 김종수, 이병국 "연료전지용 다상 부스트 컨버터 불연속 모드 특성 해석", 대한전기학회 논문지, pp. 88 95, 2010.