

다상 DC-DC 컨버터의 입력 전류 리플 저감 제어 알고리즘

주동명, 김동희, 이병국*
성균관대학교 정보통신대학

Input Current Ripple Reduction Algorithm for Interleaved DC-DC Converters

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

ABSTRACT

본 논문은 주파수 제어를 통한 인터리브드 DC-DC 컨버터의 입력 전류 리플 최소화 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 시스템을 전류 불연속 모드에서 0.33 또는 0.67의 고정 듀티로 제어하여 입력전류 리플을 저감한다. 제안한 알고리즘을 3상 부스트 컨버터에 적용하고 그 타당성을 실험 및 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

최근 석유에너지 자원 고갈 및 환경 문제가 전 지구적 문제로 대두됨에 따라 석유에너지의 대체를 위한 신재생에너지에 대한 연구 개발이 수행되고 있다. 이러한 신재생 에너지 중 연료전지 및 태양광 발전 등은 발전 조건에 따라 출력 전압 또는 전류가 변화하는 특성을 갖고 있기 때문에 안정적인 출력 전압 및 전류를 얻기 위하여 부스트 컨버터가 주로 사용되고 있다.

부스트 컨버터는 인덕터 전류의 연속/불연속에 따라 연속도통 모드 (CCM: Continuous Conduction Mode) 및 불연속도통 모드 (DCM: Discontinuous Conduction Mode)의 동작 모드를 갖는데 DCM으로 동작하면 스위치가 영 전류에서 턴 온이 가능한 장점이 있다. 또한, 입력 전류 리플 저감을 위하여 다상 부스트 컨버터 (IBC: Interleaved Boost Converter)에 대한 연구 연구가 수행되었으며, DCM 동작을 하는 3상 IBC의 입력전류 리플의 크기는 듀티 비 0.33 및 0.67에서 최소가 되는 것이 알려져 있다^[1]. 이러한 입력 전류 리플의 크기는 EMI의 발생에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 저감하면 EMI 필터의 부담을 줄일 수 있다^[2].

CCM 동작을 하는 다상 IBC는 특정 듀티에서 입력 전류 리플이 0이 되므로 가장 이상적이지만 손실이 크고 입력 전압이 변하는 시스템에서는 입력 전류 리플을 최소로 유지시킬 수 없다. 마찬가지로, 일반적인 DCM 동작을 하는 IBC는 스위칭 주파수를 고정시키고 스위치의 듀티 비를 비례적분제어를 통해 제어하기 때문에 입력 전압에 따라서 스위치의 듀티 비 및 입력 전류 리플이 변하는 특성을 갖는다. 반면, IBC의 듀티를 조건에 따라 0.33 또는 0.67로 고정하고 DCM으로 동작시키면 효율 획득과 함께 입력 전류 리플을 최소화할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 입력전류 리플의 저감과 동시에 영전류 턴 온을 통한 고효율 획득이 가능한 DCM 동작을 하는 3상 IBC컨버터의 주파수 가변 동작 알고리즘을 제안한다.

2. 제안하는 입력 전류 리플 저감 알고리즘

2.1 DCM 동작을 위한 듀티 비 판별

DCM 동작을 하는 부스트 컨버터의 승압 비는 식 (1)과 같으며 여기서 D_A 는 인덕터의 전류가 0으로 떨어지는 시점을 나타낸다. 이 때, D_A 는 항상 1보다 작기 때문에 동일 듀티 비에서 CCM 동작일 때의 승압 비에 비해 항상 크다. 따라서 3상 IBC에서 입력전압이 출력전압의 1/3 이하인 경우 승압비가 3 이상이 되도록 듀티 비는 0.67으로 결정되며, 1/3 이상 2/3 이하인 경우에는 3/2이상 3이하의 승압비가 요구되므로 듀티 비가 0.33으로 결정된다. 반면에 입력전압이 출력전압의 2/3 이상이면 요구되는 승압비가 0.33의 최소 승압비 3/2 이하이기 때문에 DCM으로 동작할 수 없으며, IBC는 CCM에서 동작하게 된다. 따라서 입력 전압과 출력전압의 비에 따른 컨버터의 듀티 비는 그림 1과 같이 결정된다.

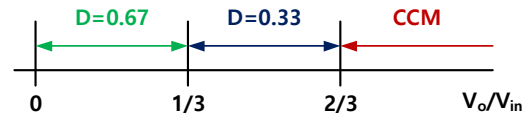


그림 1. 입력전압 및 출력전압의 비에 따른 듀티비.
Fig. 1. Duty ratio according to V_{in} and V_{out} .

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D_A}{(D_A - D)} \geq \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

2.2 스위칭 주파수 결정 및 가변 제어 알고리즘

DCM 동작에서는 듀티 비 이외에도 식 2와 같이 부하저항, 인덕턴스 및 스위칭 주파수에 의해 전압 전달비가 결정된다^[3].

따라서 입력 전압과 출력전압의 비에 따라 듀티 비가 고정되면 그에 따른 전압 전달 비를 낼 수 있도록 하는 스위칭 주파수가 결정 되어야 하며, 이를 위해 식 (2)를 스위칭 주파수에 대해 정리하면 식 (3)으로 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2D^2 V_o}{L f_{sw} T_o}} \right) \quad (2)$$

$$f_{sw} = \frac{2D^2 V_o}{\left\{ \left(\frac{2V_o}{V_{in}} - 1 \right)^2 - 1 \right\} L T_o} \quad (3)$$

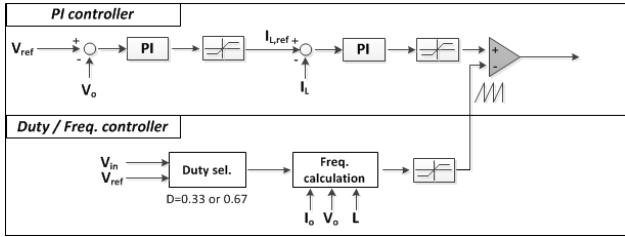


그림 2. DCM 동작 주파수 가변 제어 알고리즘.
Fig. 2. Variable frequency control algorithm for DCM operation.

실제 동작 환경에서는 인덕터에 흐르는 전류가 커질수록 코어의 투자율이 감소하여 인덕턴스가 감소하기 때문에 식 (3)에서의 인덕턴스 항을 보정해주어야 한다. 따라서 계산된 듀티비 및 스위칭 주파수와 기존의 PI 제어를 이용하여 출력 전압을 제어한다. 이에 따라 정확히 0.33 또는 0.67의 듀티 비에서 동작하는 것이 아니고 약간의 변동이 발생하지만, 인덕턴스 변화에 의한 출력 전압의 변동을 억제 할 수 있다.

그림 2는 DCM 동작을 하는 3상 IBC의 한 상의 제어 블록도이며, 나머지 두 상은 동일한 제어기를 사용하되 120°의 위상차를 갖는다. 이 때, 입력전압이 낮아 필요한 듀티비를 얻기 위한 주파수가 너무 작은 경우 인덕터의 포화 위험성의 존재 및 입력 전류 리플의 크기가 기존 제어 방법보다 커질 수 있다. 따라서 이러한 경우에는 주파수를 고정하여 제어한다.

2.3 시뮬레이션 및 실험결과

제안한 알고리즘을 검증하기 위해 DCM으로 동작하는 3상 IBC에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 기존의 고정주파수 제어 알고리즘과 제안한 듀티 고정 가변주파수 제어 알고리즘을 각각 시스템에 적용하여 비교하였으며 시뮬레이션 및 실험 파라미터는 표 1과 같다. 신재생 에너지의 특성을 모의하기 위하여 입력 전압의 가변에 따라 입력 전류 리플 크기의 변화 양상을 확인하였다.

그림 3은 입력전압에 따른 입력 전류 리플을 기존 알고리즘을 적용하였을 때와 제안한 알고리즘을 적용하였을 때의 시뮬레이션 이론 값 및 실험값을 비교한 그래프이다. 입력전압이 39 V 이하일 때는 승압에 필요한 주파수가 9 kHz 이하로 매우 낮아지게 된다. 따라서 입력 전류 리플의 크기가 기존의 고정 주파수 제어에 비해 낮아지기 때문에 20 kHz의 스위칭 주파수로 동작하도록 하였다. 전 입력 전압 범위에서 제안한 알고리즘을 적용하였을 때의 입력 전압 리플 크기가 항상 작거나 같은 것을 확인할 수 있으며 이 때 스위칭 주파수는 설계 범위에서 최소 11.3 kHz에서 37 kHz까지 변동한다. 특히 그림 4와 같이 입력 전압이 45 V, 스위칭 주파수가 13 kHz일 때에는 D_A

표 1 3상 IBC 시스템 파라메타
Table 1 System parameter of 3-phase IBC

Parameter	Value
Rated Output Power	600 W
Input Voltage	33 60 V
Output Voltage	90 V
Output Current	6.67 A
Switching Frequency	20 kHz (fixed), 11 37 kHz (variable)

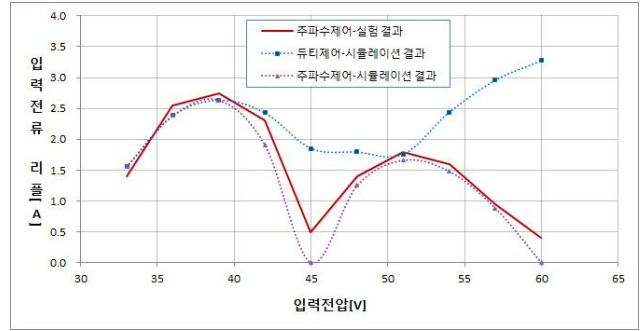
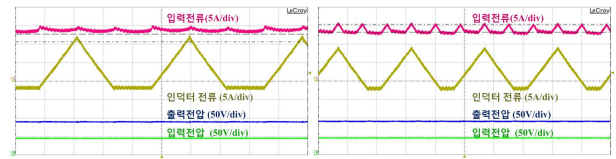


그림 3. 입력 전압에 따른 각 알고리즘 별 입력 전류 리플 비교.
Fig. 3. Comparison of Input current ripple according to V_{in} .



(a) 제안한 알고리즘 $F_{sw}=13$ kHz (b) 기존 알고리즘 $F_{sw}=20$ kHz
그림 4. 입력전류가 45 V일 때의 알고리즘 별 입력 전류 리플.
Fig. 4. Input current ripple of each algorithm @ $V_{in}=45$ V.

가 0.67이 되어 각 상의 인덕터 전류의 상승 및 하강이 대칭적으로 입력전류에 나타나기 때문에 입력전류 리플이 거의 0에 가까운 것을 확인 할 수 있다. 따라서 20 kHz 고정주파수 제어보다 스위칭 주파수가 낮음에도 불구하고 입력전류 리플이 크게 저감되는 영역이 존재하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과와 실험결과 값의 차이는 전류에 의한 인덕턴스 변화에 기인한다.

3. 결 론

본 논문은 DCM에서 동작하는 다상 부스트 컨버터의 입력 전류 리플 저감을 위한 주파수 제어 알고리즘을 제안하였다. 입력전압에 따라 듀티 비 및 스위칭 주파수를 결정하는 알고리즘을 제안하였으며, 기존의 주파수 고정 듀티 비 가변 알고리즘과 제안한 알고리즘을 시뮬레이션 및 실험을 통해 비교하여 타당성을 검증하였다.

본 연구는 2010년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20124010203300)입니다.

참 고 문 헌

- [1] 김동희, 최규영, 김종수, 이병국 “연료전지용 다상 부스트 컨버터 불연속 모드 특성 해석”, 대한전기학회 논문지, pp. 88 95, 2010.
- [2] N.K. Poon, J.C.P. Liu, C.K. Tse, and M.H. Pong, “Techniques for Input Ripple Current Cancellation: Classification and Implementation”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, NO. 6, pp. 1144 1152, Nov. 2000.
- [3] Daniel W. Hart, “Introduction to Power Electronics”, *Prentice Hall*, 1997.