4상 커플드 인덕터를 적용한 4상 인터리브드 부스트 컨버터 설계

현예지, 이동인, 정성욱, 최현준, 권영빈, 윤한신
인천대학교 전기공학과

Design of Four-Phase Interleaved Boost Converter with Four-Phase Coupled Inductor

Ye-Ji Hyeon, Dong-In Lee, Seong-Wook Jeong, Hyun-Jun Choi, Young-Bin Kwon, Han-Shin Youn
Department of Electrical Engineering, Incheon National University

ABSTRACT

최근 각광받고 있는 연료전지 자동차에는 연료전지 스택으로부터 생산된 전력을 배터리 모듈, 인버터에 공급하기 위한 전력변환장치로 연료전지 DC-DC 컨버터(FDC)가 있다. FDC에 사용 가능한 토폴로지로 4상 인터리브드 부스트 컨버터가 있으며, 인터리브드 회로에 커플드 인덕터를 적용함으로써 부품 수, 무게 및 부피 저감을 취할 수 있다. 본 논문에서는 4상 커플드 인덕터를 적용한 4상 인터리브드 부스트 컨버터를 설계하며, 시뮬레이션을 통해 해당 설계의 정합성을 검증한다.

1. 서론

최근 친환경 자동차로 주목받고 있는 연료전지 자동차는 연료전지 스택으로부터 생산된 전력을 인버터 및 배터리 모듈에 전달하기 위해 연료전지용 DC-DC 컨버터(FDC)를 필요로 한다. 다상 인터리브드 DC-DC 컨버터의 경우 전력용 반도체 스위치의 전압 및 전류 정격을 낮출 수 있고, 입력전류 리플 저감이 가능하다는 장점이 있어 FDC에 많이 사용되는 토폴로지 중 하나다.[1] 그러나, 4상 인터리브드 부스트 컨버터는 인덕터 4개를 필요로 하기 때문에 부피가 크다는 단점이 있다. 이를 하나로 통합한 4상 커플드 인덕터 적용을 통해 부피 저감을 달성할 수 있다. 이하에서는 결합계수를 이용해 4상 커플드 인덕터를 적용한 4상 인터리브드 부스트 컨버터를 설계하고자 한다.

2. 본론

2.1 4상 커플드 인덕터가 적용된 4상 인터리브드 부스트 컨버터

본 논문에서는 계산상의 편의를 위해 4상 인덕터가 대칭으로 이루어져 있음을 가정하고 수식을 전개하였다. 시뮬레이션 회로는 그림 1과 같이 모델링하였으며, 결합계수 k를 이용하였다. 그림 1을 볼 때 인덕터의 각 상은 상호적으로 연결되어 있다. 전류 리플 수식을 도출하기 위해 각 자화 인덕턴스 및 누설 인덕턴스에 인가되는 전압을 계산해야 한다. 각 상은 상호적으로 연결되어 있으므로 V_{L1}은 식 (1)과 같으며, 이를 누설 인덕턴스의 전압에 대하여 정리하면 식 (2)와 같다. 또한, 식 (2)를 식 (3)에 적용하면 식 (4)와 같이 정리될 수 있다.

$$V_{L1} = V_{Llkg1} + V_{Lm1} - V_{Lm4} \tag{1}$$

$$V_{Llkg1} = V_{L1} - V_{Lm1} + V_{Lm4} = L_{lkg}\frac{di_1}{dt} \tag{2}$$

$$V_{Lm1} = L_m\frac{d(i_1 - i_2)}{dt} \tag{3}$$

$$\frac{1+k}{k}V_{Lm1} = V_{L1} - V_{L2} + V_{Lm4} + V_{Lm2} \tag{4}$$

4상 커플드 인덕터를 적용한 4상 인터리브드 부스트 컨버터의 경우 Duty 0.25, 0.5, 0.75를 기준으로 동작이 달라진다. 본 논문에서는 연료전지용 DC-DC 컨버터에 적용되는 보편적인 사양을 기준으로 두어 0.5에서 0.75 사이의 듀티를 가질 때의 동작을 기반으로 수식을 정리하였다.

2.2 컨버터 모드별 전압 분석

0.5에서 0.75 사이의 Duty를 가지는 경우 모드를 크게 스위치가 3개 켜진 경우, 스위치가 2개 켜진 경우로 나눌 수 있다.

2.2.1 스위치가 3개가 켜진 경우

스위치 3개가 켜진 경우, 전류의 경로를 그림 1에 나타내었다. 앞서 한 상의 V_{Lm}에 대한 수식을 입출력전압 및 다른 상의 V_{Lm}으로 나타내었다. 이를 각 상에 대하여 모두 도출할 수 있고, 총 4개의 V_{Lm} 관련 수식을 얻을 수 있다. 이를 연립하여 정리하면, 식 (5)-(9)과 같이 자화 및 누설 인덕턴스의 전압을 나타낼 수 있다.

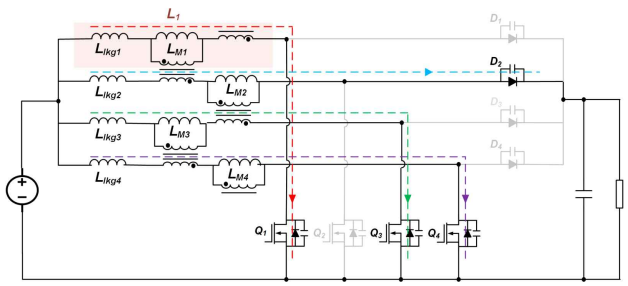


그림 1 4상 인터리브드 부스트 컨버터의 스위치가 3개 켜진 경우의 동작 모드

Fig. 1 Operation mode in which the three switches of the four-phase interleaved boost converter are turned on

$$V_{Llkg1} = V_{Llkg3} = (1 - D - \frac{k}{3k+1})\, V_o \quad (5)$$

$$V_{Llkg2} = (-D + \frac{2k(2k+1)}{(3k+1)(k+1)})\, V_o \quad (6)$$

$$V_{Llkg4} = (1 - D - \frac{2k^2}{(3k+1)(k+1)})\, V_o \quad (7)$$

$$V_{Lm1} = -V_{Lm2} = \frac{k(2k+1)}{(3k+1)(k+1)}\, V_o \quad (8)$$

$$V_{Lm4} = -V_{Lm3} = \frac{k^2}{(3k+1)(k+1)}\, V_o \quad (9)$$

2.2.2 스위치 2개가 켜진 경우

스위치 2개가 켜졌을 때 전류의 도통 경로를 그림 2에 나타내었다. 스위치 3개가 켜진 경우와 동일하게 식을 전개해나가면, V_{Llkg}과 V_{Lm}을 계산할 수 있고, 이는 식 (10)-(13)에 나타내었다.

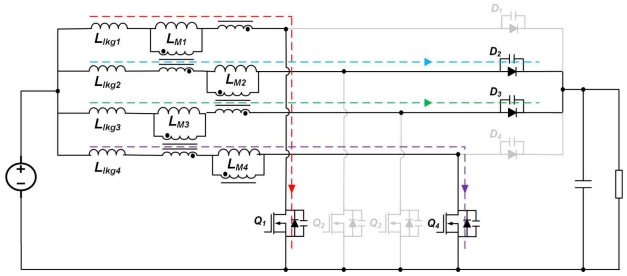


그림 2 4상 인터리브드 부스트 컨버터의 스위치가 2개 켜진 경우의 동작 모드

Fig. 2 Operation mode in which the two switches of the four-phase interleaved boost converter are turned on

$$V_{Llkg1} = V_{Llkg4} = \frac{1 - D - kD}{1+k}\, V_o \quad (10)$$

$$V_{Llkg2} = V_{Llkg3} = \frac{k - D - kD}{1+k}\, V_o \quad (11)$$

$$V_{Lm1} = -V_{Lm3} = \frac{k}{1+k}\, V_o \quad (12)$$

$$V_{Lm2} = V_{Lm4} = 0 \quad (13)$$

두 모드에 대해 도출된 식을 이용해 정리한 입력전류 및 인덕터 전류 리플 수식은 식 (14), (15)에 나타내었다.

$$\triangle i_{in} = \frac{V_o \times T_s}{16\, L_{lkg}} \quad (14)$$

$$\triangle i_L = \frac{((1-D)D + \frac{2k^2 D - 0.5k(1+5k)}{(1+k)(1+3k)})\, V_o}{L_{lkg} \times f_s} \quad (15)$$

3. 시뮬레이션 검증

3.1 컨버터 설계

240V 입력, 600-800V/10kW 출력, 스위칭 주파수 40kHz로 설계하였으며, 전류 리플 사양은 입력전류 10% 이내, 인덕터 전류 리플 40%로 설정하였다.

0.5에서 0.75 사이 듀티를 가지는 경우 듀티가 0.625인 경우 입력전류 리플이 최대가 되며, 이에 따라 요구되는 누설 인덕턴스가 결정된다. 결합계수 및 자화 인덕턴스는 인덕터 전류 리플에 따라 결정된다. 설계 결과, 주어진 설계 사양에서 전류 리플을 만족하기 위한 자화 인덕턴스는 381uH, 누설 인덕턴스는 300uH였다.

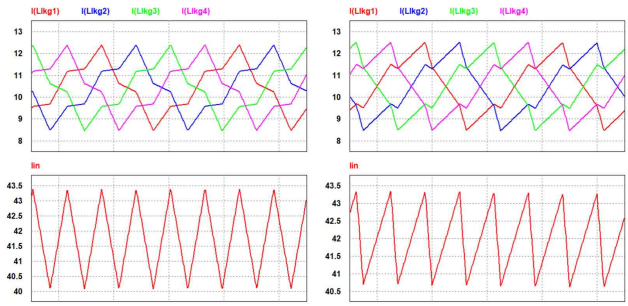
표 1 컨버터 설계 사양

Table 1 Design specification of converter

Parameter	Value
Input voltage [V]	240
Output voltage [V]	600 - 800
Power [kW]	10
Switching frequency [kHz]	40

3.2 시뮬레이션 결과

설계 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3에 입력전류 리플 worst case인 듀티가 0.625일 때와 출력전압 800V에서의 전류 파형을 나타내었다. 결과적으로 해당 설계가 전류 리플 사양을 모두 만족시키는 것을 확인할 수 있다.



(a) (b)

그림 3 인덕터 전류 및 입력전류 시뮬레이션 파형 (a) 출력 640V, (b) 출력 800V

Fig. 3 Simulation waveform of inductor current and input current (a) output 640V, (b) output 800V

4. 결론

4상 커플드 인덕터를 적용한 4상 인터리브드 부스트 컨버터에 대한 설계를 수행하였으며, 시뮬레이션을 통해 해당 설계를 검증하였다. 인덕터가 4상으로 커플링이 되는 경우 인덕터의 형상에 따라 시뮬레이션 회로 상의 모델링이 매우 달라질 수 있기 때문에 추후 인덕터 형상에 따른 추가적인 고려가 필요하다.

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20019386)

참 고 문 헌

[1] LEE, J. P., H. CHA, D. SHIN and K. J. LEE. Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters. Journal of Power Electronics. 2013, vol. 13, iss. 3, pp. 339 - 348. ISSN 1598-2092.