

배터리 충방전 시스템을 위한 양방향 커플드 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터 특성 연구

서정민, 이우철
한경대학교

A Study on Bidirectional Coupled-Inductor Interleaved DC-DC Converter for Battery Charging and Discharging System

Jung-Min Seo, Woo-Cheol Lee
Hankyung National Univ

ABSTRACT

최근 신재생 에너지를 이용한 발전 방법에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. 이로 인해 배터리 충, 방전 분야에서 양방향 DC-DC 컨버터의 수요가 증가 되고 있다. 본 논문에서는 배터리 충, 방전용 양방향 DC-DC 컨버터에 관한 연구로 Interleaved 기법을 적용하여 충전 시 배터리 전압 리플 감소 및 Coupled 인덕터를 적용해 인덕터 전류 리플 감소를 하고 배터리에서 방전 시 출력 전력 증가 및 출력 리플을 감소시키는 연구를 진행하였다. 제안된 컨버터의 특성 및 성능은 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 화석 에너지의 고갈과 환경오염으로 인해 세계적으로 신재생 에너지를 이용한 발전 방법의 연구 및 개발이 활발해지고 있다. 이러한 사회적 추세 가운데 태양광 발전 시스템, 배터리 충, 방전 분야, 전기자동차, 연료전지 발전 시스템에서 양방향 DC-DC 컨버터의 수요가 늘어나고 있다. 신재생 에너지원 중 큰 비중을 차지하는 태양광 발전 산업은 국내에서 정부의 보조금 정책에 힘입어 각 중소기업체와 일반 가정에서도 설치를 확대하고 있다.^[1]

배터리 충, 방전을 위해 사용되는 양방향 단상 DC-DC 컨버터는 인덕터 전류 리플과 출력 전류 리플로 인해 스위치와 인덕터에서 많은 전력 손실이 발생한다. 이러한 문제로 인해 다상 DC-DC 컨버터를 사용한다. 단상보다 2상일 때 출력 전류 리플이 감소하고 상이 증가하면 출력 전류 리플 감소와 스위치에서 발생하는 손실을 줄인다. 단상과 다상의 출력 전류 리플을 같게 한다면 인덕턴스를 줄이고 인덕터의 부피를 줄일 수 있다. 그리고 인터리브드 기법을 적용하여 두 개 이상의 컨버터를 병렬 동작시키면서 각 스위칭 위상을 지연시켜 운전한다. 스위칭 주파수 성분을 두 배가 되고 인덕터 전류를 감소됨에 따라 출력 커패시터의 수명이 늘어나는 장점이 있다. 그러나 인덕터가 결합 되지 않은 PWM 방식으로는 인덕터 전류 리플은 줄어들지 않는 단점과 양방향 DC-DC 컨버터의 효율이 낮아지는데 커플드 인덕터를 사용하여 해결 할 수 있다.^{[2],[3]}

본 논문에서는 배터리 충, 방전에 사용되는 양방향 DC-DC 컨버터의 효율을 높이고 배터리의 수명 연장을 위해 그림 1과 같이 양방향 커플드 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터의 연구를 진행하였다.

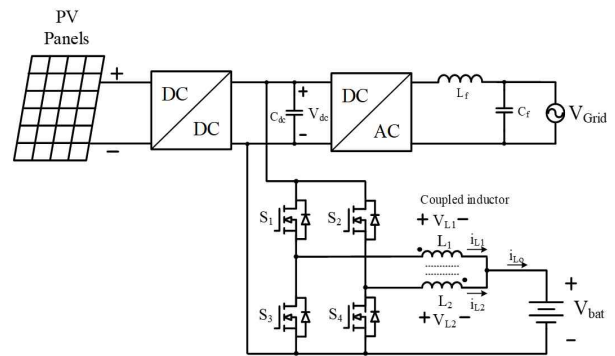


그림 1 양방향 커플드 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터.
Fig. 1 Bidirectional Coupled-Inductor Interleaved DC-DC Converter.

2. 양방향 커플드 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터

2.1 비결합(Non-coupled) 인덕터를 사용한 2상 양방향 DC-DC 컨버터

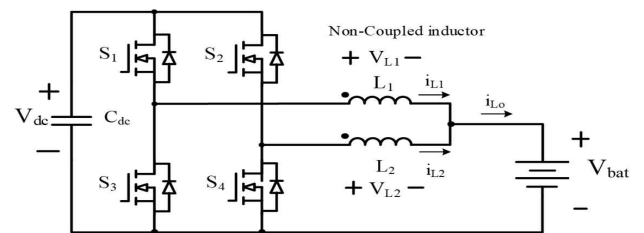


그림 2 양방향 비결합 커플드 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터.
Fig. 2 Bidirectional Non-coupled-inductors Interleaved DC-DC Converter.

그림 2에서 비결합 인덕터를 사용한 2상 양방향 DC-DC 컨버터의 경우 인덕터 L_1, L_2 은 상호 작용을 하지 않기 때문에 인덕터에 흐르는 전류 리플은 식 (1), (2)와 같다.

$$\Delta i_{L_1} = \frac{V_{bat}}{L_1} (1 - D) T_s \quad (1)$$

$$\Delta i_{L_2} = \frac{V_{bat}}{L_2} (1-D) T_s \quad (2)$$

만약 여기서 $L_1=L_2=L$ 라고 하면 인덕터 전류 리플은 식 (3)과 같다.

$$\Delta i_L = \frac{V_{bat}}{L} (1-D) T_s \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)에서 T_s 는 주기를 나타내고 인덕터 출력 전류 리플은 식 (4)와 같다.

$$\Delta i_{out,two-phase} = \frac{V_{bat}}{2R} \left(\frac{1}{1-D} \right) + \frac{V_{bat}}{2L} (1-D) T_s \quad (4)$$

그림 3에서 비결합 인덕터를 사용한 양방향 DC-DC 컨버터의 Buck 컨버터 동작 시 각 모드 동작 파형은 다음과 같다.

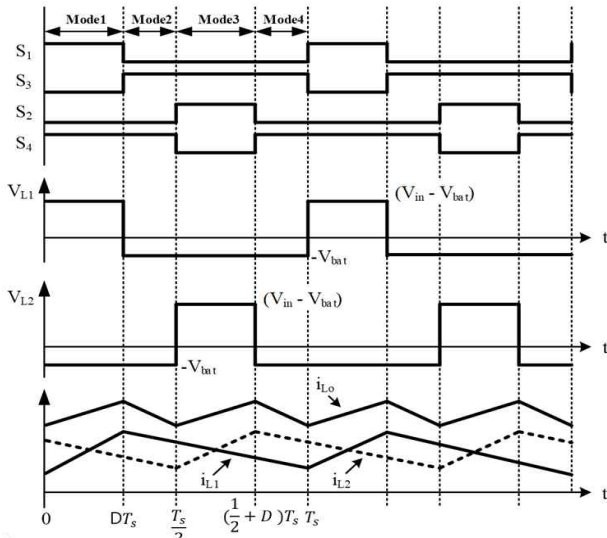


그림 3 양방향 비결합 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터의 주요 파형 ($D < 0.5$).

Fig. 3 Key waveforms of Bidirectional Non-coupled-inductors Interleaved DC-DC Converter. ($D < 0.5$).

2.2 결합(coupled) 인덕터를 사용한 2상 양방향 DC-DC 컨버터

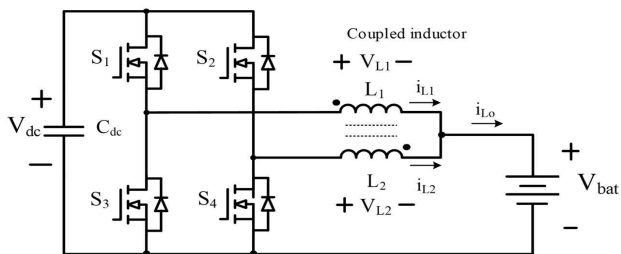


그림 4 양방향 커플드 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터.

Fig. 4 Bidirectional Coupled-Inductor Interleaved DC-DC Converter.

제한한 컨버터는 그림 4와 같이 기존의 2상 비결합 인덕터를 사용한 2상 양방향 DC-DC 컨버터에서 인덕터 L_1, L_2 를 결합 인덕터로 대체한 컨버터이다. 커플드 인덕터는 이상적인

1:1 변압기와 두 개의 누설 인덕턴스인 L_{lk1}, L_{lk2} 및 자화 인덕턴스 L_m 으로 구성된다. 이상적인 변압기는 양 끝단의 극성 점들과 위상이 다르게 연결되어 있다. 따라서 전류 관계식은 식 (5)와 같다.

$$i_{L_m} = i_{L_1} - i_{L_2} \quad (5)$$

전압 관계식은 식 (6)-(8)과 같다.

$$V_{L_1} = V_{L_{lk1}} + V_{L_m} \quad (6)$$

$$V_{L_2} = V_{L_{lk2}} - V_{L_m} \quad (7)$$

$$V_{L_m} = L_m \frac{d}{dt} i_{L_m} = L_m \frac{d}{dt} (i_{L_1} - i_{L_2}) \quad (8)$$

인덕터의 전류 리플은 같은 Duty Ratio를 가지면 결합 계수 k 가 클수록 인덕터 전류 리플이 줄어든다. 그림 5에서 결합 인덕터를 사용한 양방향 DC-DC 컨버터의 Buck 컨버터 동작 시 각 모드 동작 파형은 다음과 같다.

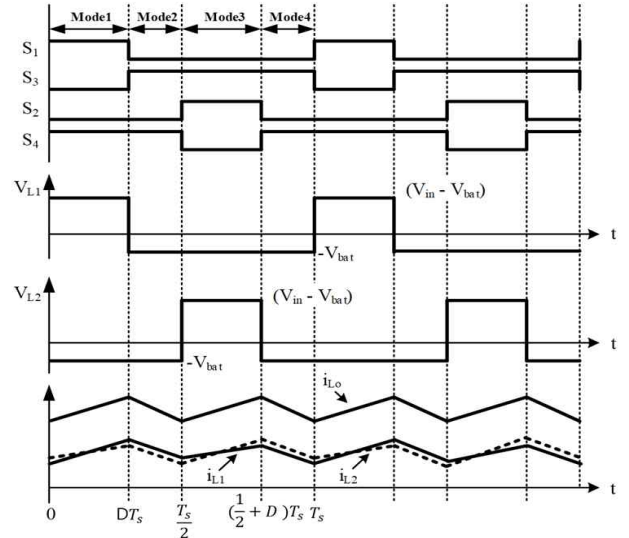


그림 5 양방향 비결합 인덕터 인터리브드 DC-DC 컨버터의 주요 파형 ($D < 0.5$).

Fig. 5 Key waveforms of Bidirectional coupled-inductors Interleaved DC-DC Converter. ($D < 0.5$).

2.3 시뮬레이션

표 1 실험조건

Table 1 EXPERIMENTAL CONDITIONS

Parameters	Value
Input Voltage (V_{dc})	380 V
Output Voltage (V_{bat})	200 V
Switching Frequency (f_s)	20 kHz
Self Inductors (L_s)	3 mH
Magnetizing Inductors (L_m)	2.76 mH
Inductors (L_1, L_2)	240 μ H
Coupling coefficient (k)	0.92

연구내용을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 조건으로는 표1과 같이 선정하였다. 시뮬레이션은 그림

6과 같이 실시하였다. 그림 7, 그림 8 시뮬레이션 파형에서 D 의 값을 0.2과 0.45로 하여 비교하였다.

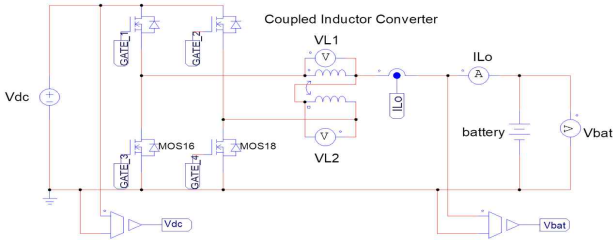
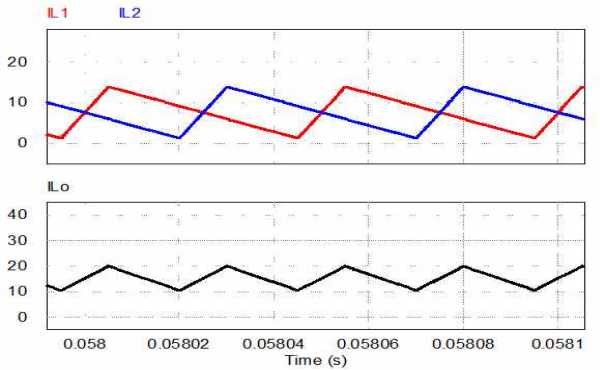
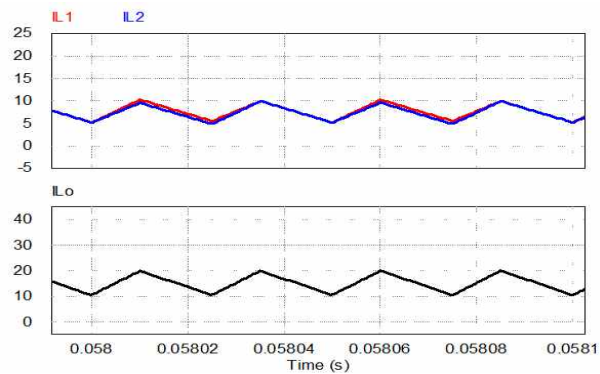


그림 6 시뮬레이션 회로
Fig. 6 Simulation circuit

그림 7, 그림 8 시뮬레이션 파형에서 D 의 값을 0.2과 0.45로 하여 비교하였다. 그림 7과 그림 8 시뮬레이션 파형과 같이 결합 인덕터를 사용한 시뮬레이션에서는 인덕터 전류 리플을 감소하고 출력 전류 리플은 하계 유지하였다.

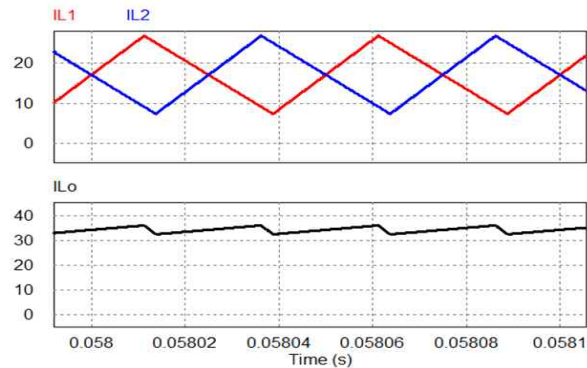


(a) 비결합 인덕터. (Non-coupled inductor)

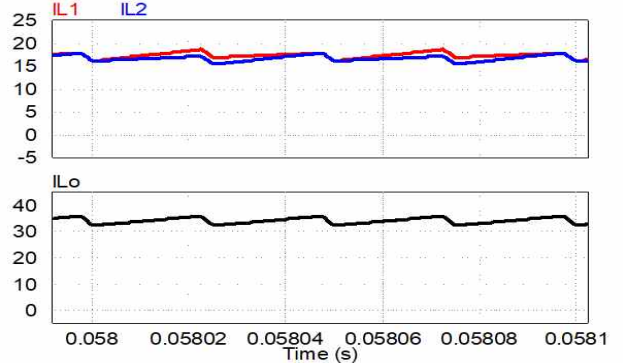


(b) 결합 인덕터. (coupled inductor)

그림 7 $V_{dc} = 380V$, $D = 0.2$ 일 때 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation waveform when $V_{dc} = 380V$, $D = 0.2$.



(a) 비결합 인덕터. (Non-coupled inductor)



(b) 결합 인덕터 (coupled inductor)

그림 7 $V_{dc} = 380V$, $D = 0.45$ 일 때 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation waveform when $V_{dc} = 380V$, $D = 0.45$.

3. 결론

본 논문에서는 커플드 인덕터를 사용한 2상 양방향 인터리브드 DC-DC 컨버터에 대해서 연구하였다. 비결합 인덕터를 사용한 2상 인터리브드 양방향 DC-DC와 비교분석을 하였다. 커플드 인덕터를 사용한 2상 양방향 인터리브드 DC-DC 컨버터를 사용하여 인덕터에 흐르는 전류 리플이 감소하고 같은 출력 전류 리플을 가지기 위해서는 매우 작은 인덕턴스를 사용할 수 있다. 인덕터 리플의 감소로 양방향 DC-DC 컨버터가 필요한 배터리 충, 방전 분야에서 배터리의 수명과 컨버터의 효율을 향상하는데 사용할 수 있을 것이다.

본 논문은 중소기업벤처부의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음.
[S2653189, 전역 최대전력점 추적기능을 갖는 5kW급 가정용 ESS 개발]

참고 문헌

- [1] F. Blaabjerg, F. Iov, T. kerekes, and R. Teodorescu, "Trends in power electronics and control of renewable energy systems," in Proc. 14th Int. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), pp. 1-19, Sep. 2010.
- [2] Lee, H. Cha, D. Shin, K. J. Lee, D. W. Yoo, and J. Y. Yoo, "Analysis and design of coupled inductors for two-phase interleaved DC-DC converters," Journal of Power Electronics, Vol. 13, No. 3, pp. 339-348, May 2013.
- [3] P.-W. Lee, Y.-S. Lee, D. K. W. Cheng, and X.-C. Liu, "Steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors," IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 47, no. 4, pp. 787 - 795, Aug. 2000.