

DC 배전을 위한 다중 모드 단일 인덕터 컨버터

김지연, 김재국
인하대학교

Dual Input Single Inductor Converter

Ji-Yeon Kim, Jae-Kuk Kim
INHA University

ABSTRACT

본 논문에서는 DC 배전 시스템을 위한 새로운 다중 모드 단일 인덕터 회로를 제안한다. 제안하는 컨버터는 벡 컨버터에 배터리 스위칭 셀이 병합된 구조로서, 단일 인덕터를 사용하여 두 개의 출력 제어가 가능하다. 기존의 회로와 비교해보았을 때, 전체 소자수가 증가하였음에도 불구하고 감소한 인덕터 개수로 인해 전체 시스템의 가격 저감에 효과적이며 높은 전력밀도를 달성할 수 있다.

1. 서론

최근 DC 전원을 필요로 하는 신재생 에너지 발전과 정보통신 부하가 크게 늘어남에 따라 DC 그리드에 대한 관심이 증가하고 있다. DC 배전 시스템은 각 기기마다 내부 AC/DC 컨버터를 이용해 DC로 변환하는 전력변환이 제거되어 전체 변환 효율 개선이 가능하다.^[1]

이러한 DC 그리드 시스템은 DC 부하와 더불어 배터리와도 연결되어 사용된다. 신재생 에너지의 간헐적인 특성 때문에 이를 기반으로 하는 DC 그리드 시스템은 안정적인 전력 계통을 위하여 배터리를 필요로 한다. 저부하에서 배터리는 충전되고, 고부하에서 배터리는 방전하며 DC 그리드 시스템의 부담을 줄여줌으로써 효율적으로 에너지를 사용할 수 있다. 추가적으로 배터리를 사용하면 전력망의 정전이 발생한 경우 독립적으로 전력을 공급하는 아일랜드모드 운전이 가능하다는 장점이 있다.^[2]

기존의 회로는 두 개의 DC/DC 컨버터를 병렬로 연결하여 배터리와 부하를 제어한다.^[3] 그러나 두 개의 인덕터를 사용하였기 때문에 전체 시스템의 가격이 증가하고 낮은 전력밀도를 가진다. 따라서 본 논문에서는 DC 배전을 위한 새로운 다중 모드 단일 인덕터 컨버터를 제안한다. 벡 컨버터에 배터리 스위칭 셀이 병합된 구조로, 인덕터의 개수를 줄임으로써 전체 시스템의 가격 저감에 효과적이며 높은 전력밀도를 달성할 수 있다.

2. 제안하는 회로 분석

제안하는 회로는 그림 2와 같이 두 개의 컨버터를 하나로 결합하여 단일 인덕터를 가진다. 따라서 제안회로는 전체 소자

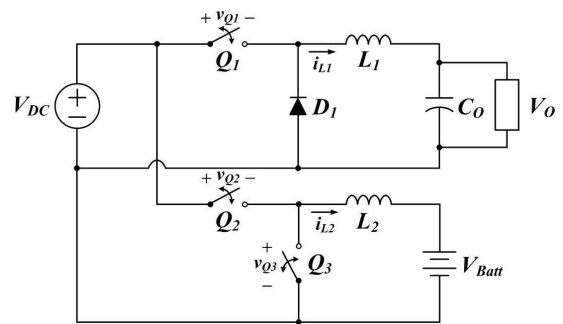


그림 1 기존의 컨버터

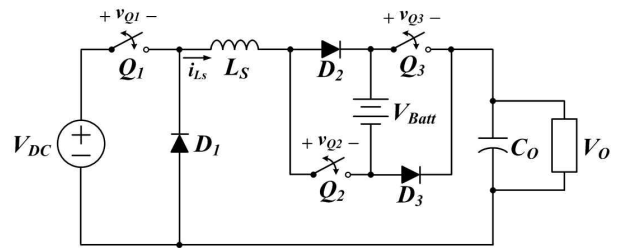


그림 2 제안하는 컨버터

수의 증가에도 불구하고 감소한 인덕터 개수 때문에 낮은 가격과 높은 전력밀도를 가질 수 있다. 또한 낮은 전압 정격의 소자를 사용할 수 있어 효율, 가격 측면에서 이득일 수 있다.

2.1 회로 동작

제안하는 다중 모드 단일 인덕터 컨버터의 동작은 4가지 모드로 나뉘며, 각 모드의 동작 파형은 그림 3과 같다.

Mode 1 DC 그리드가 부하에 충분한 에너지를 공급할 수 있을 때, 오직 DC 그리드에서 부하로 에너지를 전달한다. 이때 배터리는 충/방전 되지 않는다. 벡 컨버터로 동작하며, Q₁이 켜지면 $(V_{DC} - V_O)/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 증가하고, Q₁이 꺼지면 $-V_O/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 감소한다.

Mode 2 이 모드에서는 DC 그리드와 배터리가 동시에 부하로 전력을 전달한다. 이 모드는 배터리에 저장된 전력을 경제적으로 사용할 수 있으며 DC 그리드의 계통에 대한 부담을 줄여준다는 장점이 있다. Q₁과 Q₃가 켜지면 $(V_{DC} + V_{Batt} - V_O)/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 증가하고, 꺼지면 $-V_O/L$ 의 기울기로 인덕터 전류는 감소한다.

Mode 3 DC 그리드가 부하에 전력을 전달하며 동시에 배터리를 충전하는 모드이다. 부하의 전력 소모가 평소보다 작을

때, 부하로 전달되고 남은 전력은 배터리에 저장된다. Q_1 과 Q_2 가 동시에 켜지면 $(V_{DC} - V_0)/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 증가하며, 이 때 Q_2 가 꺼지면 $(V_{DC} - V_{Batt} - V_0)/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 감소하며 배터리에 부하에 전력을 전달한다. Q_1 이 꺼지고 Q_2 가 켜지면 $-V_0/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 감소한다.

Mode 4 DC 전력망의 정전이 발생한 경우 혹은 배터리가 부하조건을 만족할 수 있는 경우 독립적으로 전력을 공급하기 위해 오직 배터리에서 부하로 전력을 전달하는 아일랜드모드로 동작한다. Q_3 가 켜지면 V_{Batt}/L 의 기울기로 인덕터 전류가 증가하며, 꺼지면 $-V_0/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 감소한다.

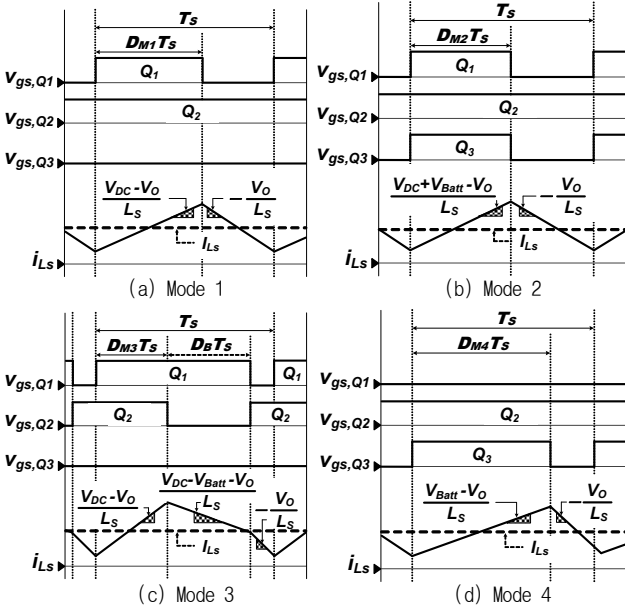


그림 3 제안하는 컨버터의 동작 파형

2.2 인덕터 설계

인덕턴스는 인덕터 전류리플을 고려하여 다음과 같이 설계된다.

$$L_1 \geq \frac{V_{DC} - V_0}{x \times i_{L1,avg}} \frac{1}{f_s} D \quad (1)$$

$$L_2 \geq \frac{V_{Batt}}{x \times i_{L2,avg}} \frac{1}{f_s} D \quad (2)$$

$$L_s \geq \frac{V_{DC} + V_{Batt} + V_0}{x \times i_{Ls,avg}} \frac{1}{f_s} D \quad (3)$$

D 는 컨버터의 시비율, x 는 허용 전류리플 비율, $i_{L,avg}$ 는 인덕터 평균전류, f_s 는 스위칭 주파수이다. 본 논문에서는 모두 70 kHz의 주파수, 60%의 같은 인덕터 리플을 갖도록 설계한다. 따라서 L_1 은 1.61 mH, L_2 는 2.52 mH, L_s 는 1.30 mH로 설계된다.

인덕터의 코어 면적(A_c)과 창 면적(W_a)의 영향을 받은 총면적(A_p)은 다음과 같이 나타낸다.

$$A_p = A_c W_a = \frac{L(I_{L,avg} + \frac{i_{L,max}}{2})}{B_{max} K_u} \left(\frac{i_{L,rms}}{J} \right) \quad (4)$$

Δi_L 은 인덕터의 전류 리플, B_{max} 는 최대 자속 밀도, K_u 는 권선 면적과 창면적의 비, J 는 인덕터의 전류밀도이다.

2.3 전력밀도

인덕터는 다른 소자에 비해 높은 가격과 크기를 가지므로, 인덕터의 수가 작을수록 더 효율적인 시스템이 될 수 있다. 제안된 회로는 두 개의 다이오드가 추가됨에도 불구하고 감소한

인덕터 개수로 인하여 기존의 회로에 비해 높은 전력밀도를 가진다. 표 1은 각 회로의 추가된 소자 부피를 나타낸다. 다이오드의 경우 방열판 부피를 포함하여 계산되었다.

표 1 소자 부피 비교

추가 소자	제안된 회로	기존의 회로
인덕터 코어	-	CH234125 × 2ea 8997 mm ³
다이오드	RURP1560 × 2ea 4382 mm ³	-

3. 실험 결과

제안하는 컨버터의 유효성은 380 V 입력, 250 V 배터리 전압, 200 V/500 W 출력, 70 kHz 스위칭 주파수를 갖는 프로토타입의 실험을 통해 검증하였다. 실험에 사용된 소자 및 가격은 표 2와 같다. 추가된 다이오드에도 불구하고, 줄어든 인덕터 개수와 낮은 전압 정격의 소자 사용으로 인해 전체 시스템의 가격을 줄일 수 있다.

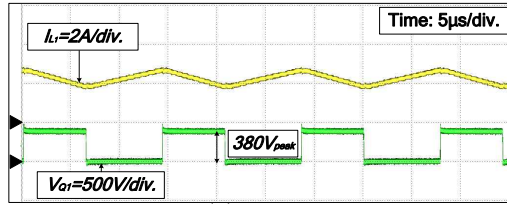
표 2 소자 부피 비교

	기존의 회로	제안된 회로	가격비교
Q_1	IPP60R280C6	IPP60R280C6	-454 ₩
Q_2		IPP50R190CE	
Q_3		IPP50R190CE	
D_1	RURP1560	RURP1560	+1661 ₩
D_2	-		
D_3	-		
코어	CH330125(2ea) L1=1.61 mH CH234125(2ea) L2=2.52 mH	CH330125(2ea) LS=1.30 mH	-3000 ₩
C_0	270 μF, 400 V		-

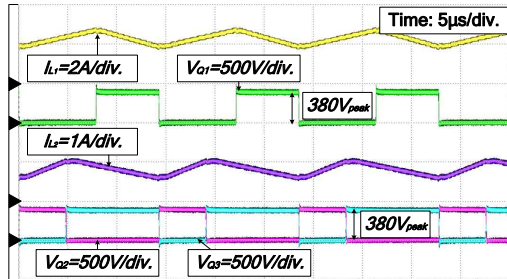
그림 4와 5는 각각 기존, 제안 다중 모드 단일 인덕터 컨버터의 각 모드 별 주요 파형이다. 그림 4에 따르면, 기존의 회로는 DC 그리드와 병렬 연결된 구조를 가지기 때문에 모든 스위치의 전압은 380 V로 클램핑된다. 그러나 그림 5에서 볼 수 있듯이, 제안하는 회로의 경우 Q_2 와 Q_3 는 각각 250 V의 비교적 낮은 전압 스트레스를 가진다. 따라서 낮은 전압 정격의 스위치를 사용할 수 있고, 전체 시스템의 가격을 줄일 수 있다.

그림 6은 제안된 회로와 기존의 회로의 각 모드별 측정 효율을 나타낸다. Mode 1, 2에서 제안하는 회로는 기존의 회로에 비해 추가적인 다이오드 D_2 와 D_3 가 도통하므로 높은 다이오드 도통손실로 인해 낮은 효율을 가진다. 반면 Mode 3, 4에서 제안하는 회로는 낮은 인덕터 자속밀도 리플을 가지기 때문에 인덕터의 코어손실을 줄일 수 있다. 또한 스위칭하는 소자의 개수가 기존회로에 비해 적기 때문에 스위치의 스위칭 손실을 줄여 높은 효율을 달성할 수 있다.

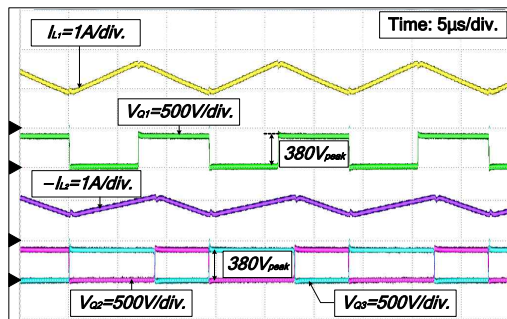
가정용 부하는 전부하가 아니며 배터리가 완전히 충전되어 있지 않은 상황에서 동작하는 것이 일반적이기 때문에 제안하는 회로는 주로 Mode 3을 이용하여 동작된다. 특히, 효율이 높은 Mode 3과 4를 이용하면, DC 그리드는 부하와 배터리에 전력전달이 가능하며, DC 그리드가 연결되지 않거나 배터리가 부하조건을 만족 시킬 수 있는 경우 배터리만으로 부하에 전력전달이 가능하다. 따라서 제안회로는 일반적인 상황에서 높은 효율을 얻을 수 있다.



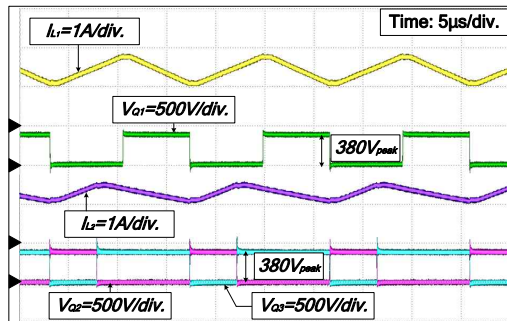
(a) Mode 1



(b) Mode 2

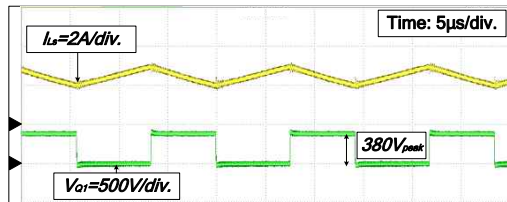


(c) Mode 3

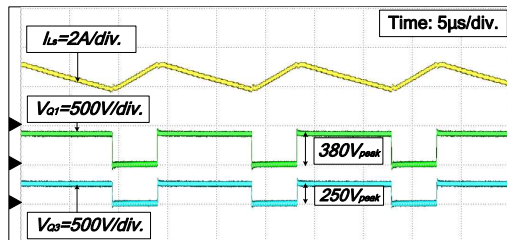


(d) Mode 4

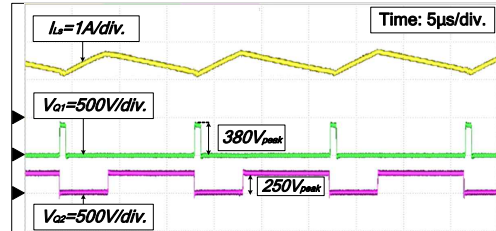
그림 4 기존 회로의 모드 별 주요 파형



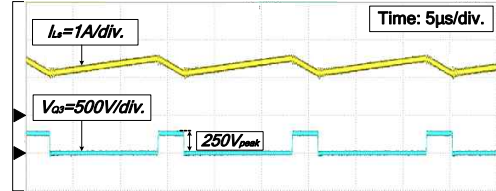
(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(d) Mode 4

그림 5 제안 회로의 모드 별 주요 파형

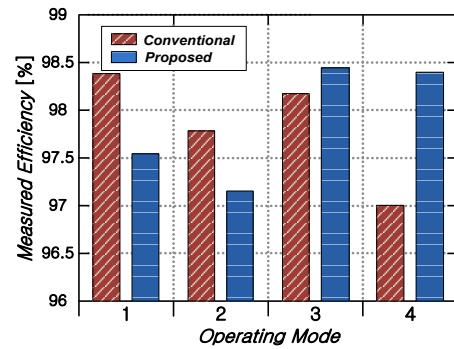


그림 6 측정 효율 비교

4. 결론

제안하는 컨버터는 두 회로가 하나의 컨버터로 결합된 구조로 기존의 회로에 비해 인덕터 개수를 줄일 수 있으며 낮은 정격을 가지는 스위치 사용이 가능하다. 따라서 회로 가격 저감에 효과적이며 높은 전력밀도를 달성할 수 있다. 또한 제안회로는 일반적인 상황에서 높은 효율을 달성할 수 있다.

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(개별과제)에 의해 지원되었음 (과제번호 : R18XA06-70)

참고 문헌

- [1] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, and Toshifumi Ise, "Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010.
- [2] Sathish Kumar Kollimalla, Mahesh Kumar Mishra, and N. Lakshmi Narasamma, "Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1137-1144, Oct. 2014.
- [3] Z. Wang and H. Li, "An integrated three-port bidirectional dc-dc converter for PV application on a dc distribution system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 4612-4624, Oct. 2013.