

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 벽 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. 벽 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

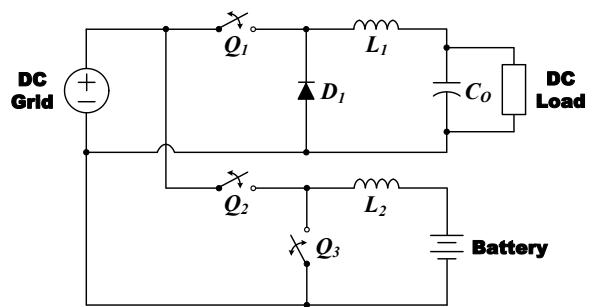


그림 1 기존의 컨버터

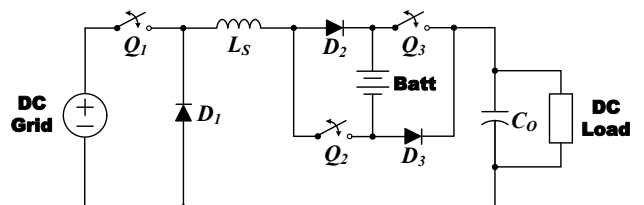


그림 2 제안하는 컨버터

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 회로의 동작 분석을 위해 다음과 같은 조건을 가정한다. 1) 출력 커패시터가 충분히 크기 때문에 출력 전압 리플은 무시될 수 있다. 2) 충전, 방전되더라도 배터리 전압은 변동하지 않는다. 3) 그림 2에 표시되지 않은 소자들의 기생성분들은 무시한다. 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 충전/방전 되지 않는다. 벽 컨버터로 동작하며, Q1이 켜지면 powering하며 인덕터 전류가 증가하고, Q1이 꺼지면 freewheeling하며 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 powering하며 인덕터 전류가 증가하고, 꺼지면 freewheeling하며 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 인덕터 전류가 증가하며, 이 때 Q_1 이 꺼지면 $-V_{OUT}/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 감소한다. Q_1 이 켜지고 Q_2 가 꺼지면 $(V_{DC} - V_{BATT} - V_{OUT})/L$ 의 기울기로 인덕터 전류가 감소하며 배터리에 전력을 전달한다.

Mode 4 DC 전력망의 정전이 발생한 경우 독립적으로 전력을 공급하기 위해 오직 배터리에서 부하로 전력을 전달하는 아일랜드모드로 동작한다. Q_3 가 켜지면 powering하며 인덕터 전류가 증가하고, 꺼지면 freewheeling하며 인덕터 전류가 감소한다.

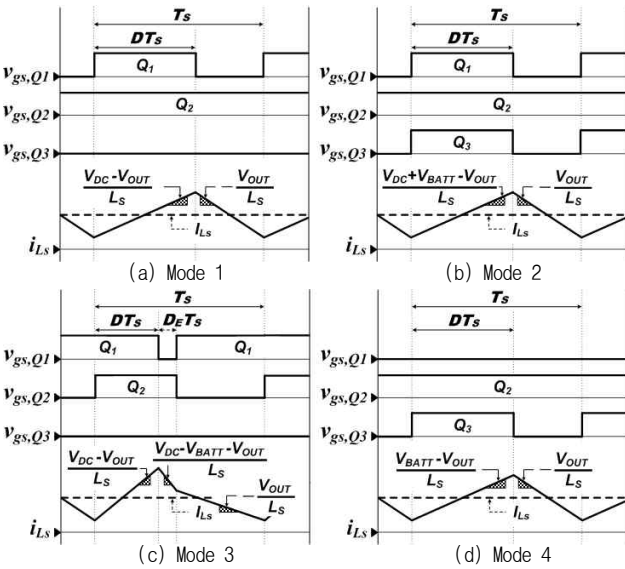


그림 3 제안하는 컨버터의 동작 파형

2.2 인덕터 설계

인덕터는 허용 전류리플을 고려하여 다음과 같이 설계된다.

$$L \geq \frac{(V_{IN} - V_{OUT})D}{x\%I_L} \frac{1}{f_s} \frac{1}{100} \quad (1)$$

D 는 컨버터의 시비율, $x\%$ 는 허용 전류리플 비율, I_L 은 인덕터 전류, f_s 는 스위칭 주파수이다. 본 논문에서는 모두 60%의 같은 인덕터 리플을 갖도록 설계한다. 따라서 L_s 는 $1300\mu\text{H}$, L_1 은 $1611\mu\text{H}$, L_2 는 $2524\mu\text{H}$ 로 설계된다.

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

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

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 10945 mm ²
다이오드	RURP1560 × 2ea 6300 mm ²	-
총 합	6300 mm ²	10945 mm ²

2.4 가격

표 2는 실험에 사용된 소자 및 가격을 나타낸다. 소자들은 전압 스트레스 값의 약 1.5 배를 견딜 수 있도록 설계하였으며 가격은 전자부품유통업체 mouser를 통해 500세트 제작 기준으로 책정하였다. 인덕터는 다른 소자들에 비해 높은 가격을 가지므로, 제안된 회로는 감소한 인덕터 개수로 인해 전체 시스템 가격을 저감할 수 있다는 장점이 있다.

표 2 실험에 사용된 소자 및 가격

소자	제안된 회로		기존의 회로	
	부품번호	가격[₩]	부품번호	가격[₩]
Q_1	IPP60R280C6	1718.2	IPP60R280C6	4283.4
Q_2	IPP50R190CE	2541		
Q_3				
D_1	RURP1560	2820.6	RURP1560	1133.8
D_2			-	-
D_3				
코어	CH330125(2ea) $L_s=1300\mu\text{H}$	5000	CH330125(2ea) $L_1=1611\mu\text{H}$	5000
			CH234125(2ea) $L_2=2524\mu\text{H}$	3000
총합	12079.8		13417.2	

3. 실험 결과

제안하는 컨버터의 유효성은 380 V 입력, 250 V 배터리 전압, 200 W/500 W 출력, 70 kHz 스위칭 주파수를 갖는 프로토타입의 실험을 통해 검증하였다. 실험에 사용된 소자는 표 2와 같으며, 그림 4는 제안하는 다중 모드 단일 인덕터 컨버터의 각 모드 별 주요 파형이다. 기존의 회로는 DC 그리드와 병렬 연결된 구조를 가지기 때문에 모든 스위치의 전압 스트레스는 380 V 이다. 그러나 그림 3에서 볼 수 있듯이, 제안하는 회로의 경우 Q_1 , Q_2 , Q_3 은 각각 380 V, 250 V, 250 V의 비교적 낮은 전압 스트레스를 가진다. 따라서 낮은 전압 정격의 스위치를 사용할 수 있고, 전체 시스템의 가격을 줄일 수 있다.

그림 5는 제안된 회로와 기존의 회로의 각 모드별 측정 효율을 나타낸다. 제안하는 회로는 Mode 3, 4에서 기존의 회로보다 높은 효율을 달성할 수 있다. 두 개의 컨버터를 하나로 결합하여 단일 인덕터를 사용하기 때문에 인덕터의 도통손실과 코어손실을 줄일 수 있다. 또한 스위칭하는 소자의 개수가 기존 회로에 비해 적기 때문에 스위치의 스위칭 손실을 줄여 높은 효율을 달성할 수 있다. 반면 Mode 1, 2에서는 기존 회로보다 많은 다이오드가 도통하므로 높은 다이오드 도통손실로 인해 낮은 효율을 갖게 된다.

4. 결 론

제안하는 컨버터는 두 회로가 하나의 컨버터로 결합된 구조로 단일 인덕터를 사용하여 두 개의 출력 제어가 가능하다. 기존의 회로에 비해 감소한 인덕터 개수로 인하여 회로 가격 저감에 효과적이며 높은 전력밀도를 달성할 수 있다. 또한 기존의 회로에 비해 낮은 정격을 가지는 스위치 사용이 가능하여 더욱 효율적으로 회로를 구성할 수 있다.

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

참 고 문 헌

- [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.

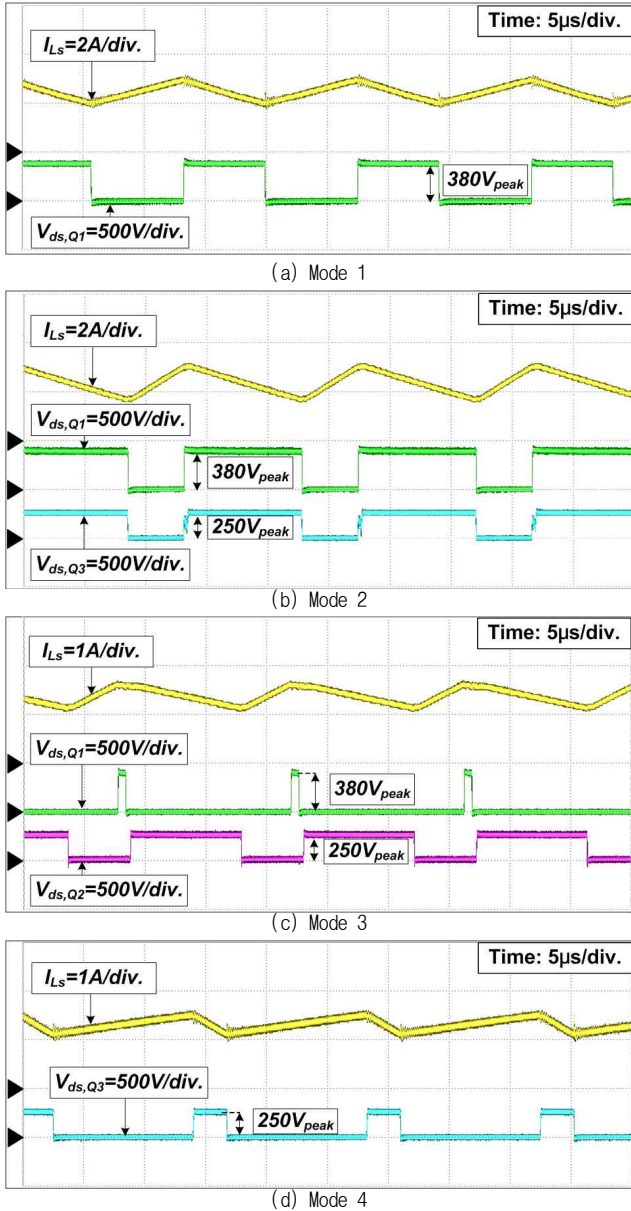


그림 4 제안하는 회로의 모드 별 주요 파형

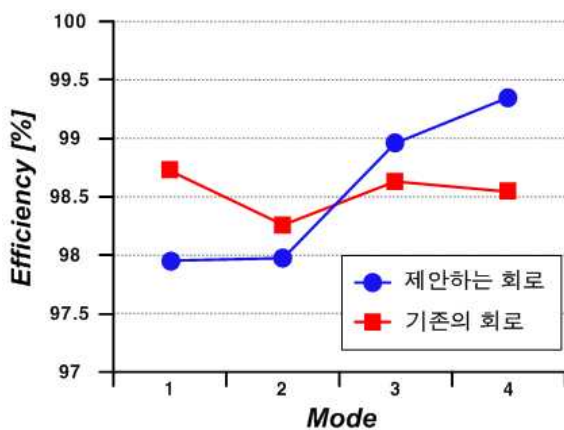


그림 5 측정 효율