

배터리 충전기용 양방향 DC-DC Dual Active Bridge 컨버터 제어기 설계 및 구현

박성현, 김주원, 곽보승, 김인동
부경대학교

Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Dual Active Bridge Converter Controller for Battery Charger

Sunghyeon Park, Juwon Kim, Boseung Kwak In-dong Kim
Pukyong National University

ABSTRACT

최근 DC-DC 컨버터 중에서도 Dual Active Bridge (DAB) 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 배터리 충전기용으로 DAB 컨버터의 효율적인 구동을 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 효율적으로 컨버터를 구동하기 위해 기존의 스위칭 방식을 보완한 SPS, DPS, TPS 세 가지 방식을 통합한 스위칭 방식을 이용한다. 제안하는 배터리 충전기용 양방향 DC-DC DAB 컨버터 제어기는 CC-CV 모드 전환 시 원활한 동작이 가능하며, 자체 보호 기능을 갖추고 있다. 또한, 10kW급 출력의 DAB 컨버터를 이용한 실험을 통해 제안된 제어기의 동작 특성을 검증하였다.

1. 서론

최근 DAB 컨버터는 다양한 분야에서 DC-DC 컨버터로서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히, DAB 컨버터는 변압기를 통한 절연이 가능하고 ZVS 동작과 대칭적인 Full-Bridge 구조로 양방향 전력 전달이 가능하다는 장점을 가지고 있어, 전기자동차 배터리 충전기를 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다.

DAB 컨버터를 효율적으로 구동하기 위해 다양한 스위칭 방식이 사용되고 있다[1]. 일반적으로는 2레벨 Phase Shift 방식 중 하나인 SPS 기법이 주로 사용된다. 그러나 이를 보완한 DPS, TPS 스위칭 방식도 사용되고 있지만, 이러한 방식을 사용하기 위해서는 많은 제어 변수가 필요하여 제어가 어려운 단점이 있다. 또한, 단일적으로 한 가지 스위칭 방식만을 사용하는 경우 여러 부하 영역에서 원하는 특성을 얻기 어려운 경우도 있다. 본 논문에서는 이러한 단점들을 보완하여 모든 부하 영역에서 효율적으로 스위칭을 할 수 있도록 TPS, DPS, SPS 세 가지 방식을 통합하여 스위칭 동작을 수행한다.

배터리 충전 시에는 반드시 보호 기능이 사용되어야 한다 [2]. 그렇지 않으면 배터리 절연 과피가 발생할 수 있으며, 특히 과전류로 인해 배터리 내부 분리가 손상을 입어서 장기적인 손상은 배터리 수명 단축 및 안전 위험을 초래할 수 있다. 제안하는 제어기는 CC-CV 모드를 원활히 동작하는 동시에 내부 전류 제한 동작을 수행하여 급격한 부하 변동에도 안전하게 보호 조치를 할 수 있다.

본 논문은 CC-CV 모드를 원활히 동작하고 자체 보호 동작을 수행할 수 있는 제어기를 제안하며, 10kW급 출력의 DAB 컨버터를 이용하여 실험을 통해 동작 특성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 제안하는 배터리 충전용 DAB 컨버터 제어기

그림 1은 제안하는 DAB 컨버터 회로도와 제안하는 제어기이다. 그림 2는 제안하는 제어기가 배터리 충전 시 초기 기동부터 정상상태에 도달할 때까지의 전류, 전압, 변수 K값 출력을 나타내는 그래프이다. 배터리의 초기 전압이 0이라 가정하고 V_{o_ref} 까지의 출력을 제어할 때 I_o 값은 I_{o_ref} 에 도달할 때까지 변수 K 값은 1로 최댓값을 가진다. 여기서 I_{o_ref} 는 배터리 충전제어에서 I_{limit} (전류 제한 값)의 의미로 사용된다. I_{o_ref} 구간에서 K는 0과 1사이의 값을 가지면서 출력에 비례하여 조절된다. I_{o_ref} 값으로 고정이 되면서 정전류 제어를 하게 되고 배터리 출력전압은 상승하며, V_o error값은 0으로 수렴함에 따라 α 값이 점점 감소하게 된다. V_o 가 V_{o_ref} 값으로 거의 도달할 때 I_o 값은 점점 줄어들게 되며 그에 따라 I_{o_error} 값이 증가함과 동시에 K값이 1로 수렴하게 된다. V_o 값이 V_{o_ref} 값에 도달하였을 때 정전압 제어 동작을 하게 된다. I_{o_error} 값을 적분 시킨 변수 K값을 사용함으로써 인해 CC-CV모드 변환 시 체터링현상이 없으며 전압, 전류제어기 두 가지 제어기를 통합한 형태로 구성되어 있기 때문에 설계의 부담이 적다. V_{o_ref} 와 I_{o_ref} 는 각각 정전류 모드일 때와 정전압 모드일 때 V_{o_limit} (전압제한값), I_{o_limit} (전류제한값)으로 이용할 수 있어 제어기 내에서 자체 보호동작이 가능하다.

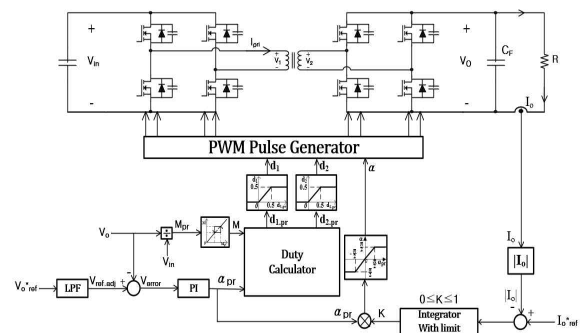


그림 1 DAB 컨버터 회로도 및 제안하는 제어기

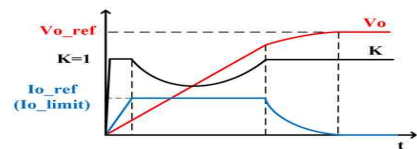


그림 2 제안하는 제어기의 배터리 충전 시 출력 그래프

2.2 제안하는 DAB 컨버터 제어기 실험

그림 3은 제안하는 Dual Active Bridge 컨버터 제어기를 실험하기 위한 DAB 컨버터 실험 구성이며, 그림 1의 회로도를 이용하여 표 1과 같은 파라미터로 실험을 하였다.

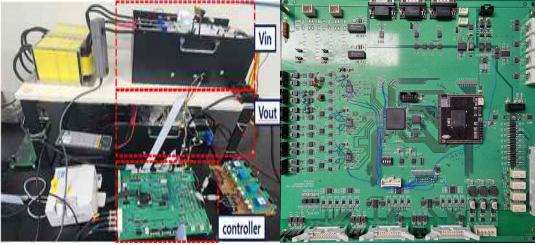


그림 3 DAB 컨버터 실험구성 전력회로 및 제어보드
표 1 실험 사양

Parameter	Value
입력전압 V_i	450V
출력전압 V_o	0V - 450V
변압기 누설인덕턴스 L	20uH
변압기 권선비 $K = \frac{n_2}{n_1}$	1
스위칭 주파수 f_{sw}	40kHz
입, 출력 커패시터 C_f	600uF
부하 저항 R	19.8Ω-50Ω

2.2.1 정전압(CV) 및 정전류(CC) 제어

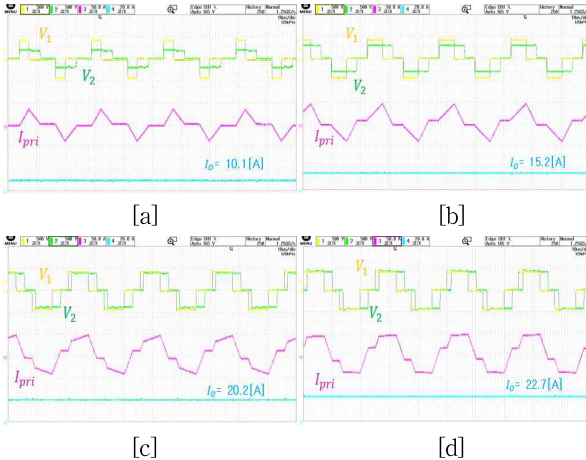


그림 4 $V_i=450V$ 일 때, 정전압제어 출력 파형
([a] $V_o=200V$, [b] $V_o=300V$, [c] $V_o=400V$, [d] $V_o=450V$)

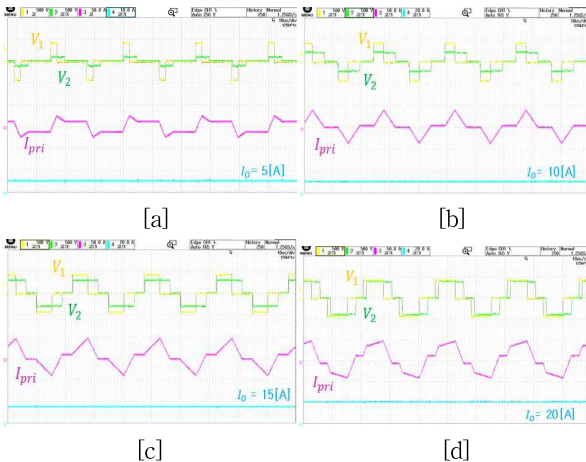


그림 5 $V_i=450V$ 일 때, 정전류제어 출력 파형
([a] $I_o=5A$, [b] $I_o=10A$, [c] $I_o=15A$, [d] $I_o=20A$)

그림 4는 입출력 전압비가 1:1이 아닌 구간에서 부하저항이 19.8[Ω]일 때 정전압 제어 파형을 나타낸 것이다. 큰 출력을 내기 위해 변압기 1,2차 측 전압인 V_1 , V_2 는 듀티비 및 위상차가 커지게 되며, 최종적으로 출력 전압이 450[V]일 때 약 10[kW]의 출력을 내는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 정전류 출력 제어 파형을 나타낸다. 출력 V_o 는 최고 지령치 450[V]로 고정시키고 I_o 만 이용하여 5, 10, 15, 20[A]로 고정 전류값을 가지는 출력이 나오는 것을 확인할 수 있다.

2.2.2 보호동작 제어

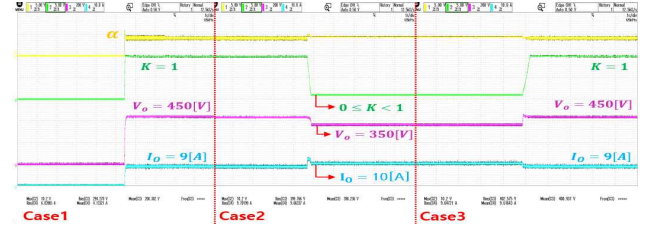


그림 6 부하 급변 시 보호동작 및 CC-CV모드 출력 파형

그림 6은 부하 급변으로 인한 보호동작 및 CC-CV모드 출력 파형을 나타낸다. Case1의 동작은 부하저항 50[Ω]과 V_o ref=450[V]로 설정하여 I_o ref(=I_limit)=10[A]로 고정하여 기동을 한 것이다. Case1 동작에서 출력전류는 10[A]를 초과하지 않으므로 450[V]와 9[A]의 출력이 나오게 된다. Case2의 경우는 부하저항을 50[Ω]에서 35[Ω]으로 급변하는 동작으로 전류제한을 하지 않을 시 450[V], 12.8[A]가 출력으로 나와야 하지만 전류제한제어로 인해 10[A]와 그에 따른 전압 350[V]가 출력으로 나오게 된다. 이것은 CV모드였던 동작이 전류 지령치에 맞춰 K값이 0과 1사이 값을 가지고, CC동작으로 자동 변환 동작이 가능함을 보여준다. Case3인 경우 Case1일 때와 같이 50[Ω]으로 저항을 변경하였으며, K값이 다시 1로 수렴하면서 원활한 CC-CV모드 변환을 보여준다.

3. 결론

제안하는 배터리 충전기용 양방향 DC-DC DAB 컨버터 제어기는 전 부하 영역에서 높은 효율을 얻기 위해 SPS, DPS, TPS 통합 스위칭방식을 이용하였으며, CC-CV 모드 변환 시 자동으로 전압 및 전류 제한이 가능하기 때문에 제어기 내에서 자체 보호동작을 수행하고 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 배터리 충전기용 제어기는 10kW급 DAB 컨버터에 적용하여 동작 및 특성을 실험을 통해 검증하였고, 독립적 동작이 가능하기 때문에 모듈로 구성된 DC-DC컨버터에 제한한 제어기를 이용하여 제어 시스템을 구현하는데 활용될 것으로 기대된다.

이 논문은 2024년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0012451, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] A. Kumar, A. H. Bhat and P. Agarwal, "Comparative analysis of dual active bridge isolated DC to DC converter with single phase shift and extended phase shift control techniques," ,Roorkee, India, 2017, pp. 397-402,
- [2] A. Masakure, A. Gill and M. Singh, "The Impact of Battery Charging and Discharging Current Limits on EV Battery Degradation and Safety," , India, 2023, pp. 1-5