

3kW급 3상 절연형 인터리브드 배터리 충방전기 설계 및 실험

이종경, 차한주
충남대학교 전기공학과

A Design and Experiment of 3kW Three-phase Isolated Interleaved Battery Charger

Jongkyung Lee, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 납축전지 모델링, 파라미터 도출 및 3kW급 3상 절연형 인터리브드 배터리 충방전기를 설계하고 부하실험 결과를 분석하였다. 제작된 컨버터는 모든 스위치가 ZVS로 동작하여 높은 효율을 갖고 3상 구조를 채택하여 전류경로의 분산을 통한 전력전달 능력 증대의 효과 및 입력전류 리플크기를 줄여주는 인터리브드 효과를 갖는다. 승압/강압 능력이 있는 부스트/벅 컨버터 구조를 갖도록 하여 낮은 권선비의 변압기로 높은 승압/강압 전력변환, 에너지원과 부하사이에 절연이 가능해진다. 이러한 동작을 실험을 통해 확인하고 3kW 부하에서 약 95% 효율로 동작하는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

1. 서론

온실가스 저감을 위해 신재생에너지, 전기자동차 등의 친환경 발전 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 배터리를 통해서 낭비되는 에너지를 회수하거나, 기저부하 시에 에너지를 저장하고 피크부하 시에 에너지를 공급하여 효율적으로 사용하려는 노력이 많이 이루어지고 있으며, 이를 구현하기 위해서는 고효율의 양방향 dc dc 컨버터가 필요하다.

그러나 배터리의 저전압, 대전류 특성과 급격한 부하변동에 따른 dc 링크의 전압변동은 시스템의 불안정한 전력공급 문제를 초래하여 효율 및 성능이 저하될 수 있다. 또한 배터리를 안정적으로 제어하기 위해서는 입력전류의 리플크기를 감소시키고, 절연 및 충방전이 가능한 높은 효율의 양방향 컨버터가 요구된다. 또한, 대용량 전력저장 시스템, 높은 출력의 갖는 전기자동차등을 갖추기 위해 높은 용량의 전력변환장치가 요구되고 있다^[1,2]. 본 논문에서는 납축전지의 모델 및 위의 조건을 만족하는 3상 절연형 인터리브드 양방향 dc dc 컨버터를 제작하여 벅/부스트 모드를 확인하고 ZVS 동작 및 입력전압, 듀티, 부하를 가변시키며 넓은 부하범위에서 특성을 파악하였다.

2. 납축전지 파라미터 도출

납축전지는 가장 널리 사용되고 내부저항이 작으며 잔존용량에 따른 개로전압이 다른 배터리 타입보다 비교적 선형의 특성을 갖는다. 그림 1은 간단한 형태의 Randles 등가회로로 가정 널리 사용되는 전기회로 기반의 배터리 모델이다. 파라미터

R_i 는 내부저항을 나타내고 C_{dl} 과 R_{ct} 는 분극을 나타내며 이 병렬회로는 배터리 충방전 전류에 따른 동적응답을 표현한다. 파라미터는 온도, 잔존용량, 충방전 전류의 크기, 노후화에 따라 변화하며 단자전압과 충방전 전류를 센싱하여 RLS(Recursive Least Square) 알고리즘으로 파라미터를 도출하고 매트랩 시뮬링 환경에서 배터리 모델을 구현하였다. 배터리 단자전압은 식 (1)과 같은 회로 방정식에 의해 나타난다. 파라미터 도출결과는 3.3 실험결과에 제시되어 있다.

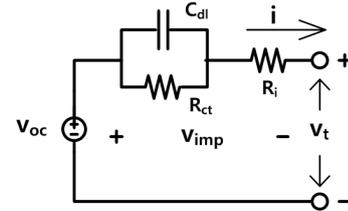


그림 1 Randles 등가회로
Fig.1 Randles equivalent circuit

$$V_t = V_{oc}(SOC) - i(R_i + R_{ct}(1 - e^{-t/\tau})) \quad (1)$$

3. 배터리 충방전기 설계 및 실험

3.1 3상 절연형 충방전기 구조

그림 2는 3상 절연형 인터리브드 충방전기를 나타낸다. 전력회로 구조는 Δ Δ 결선된 3상 고주파 변압기를 중심으로 저전압측과 고전압측으로 구성된다. 저전압측은 3개의 MOSFET 주 스위치 ($S_1 \sim S_3$) 및 3개의 인덕터($L_1 \sim L_3$)로 구성된 부스트

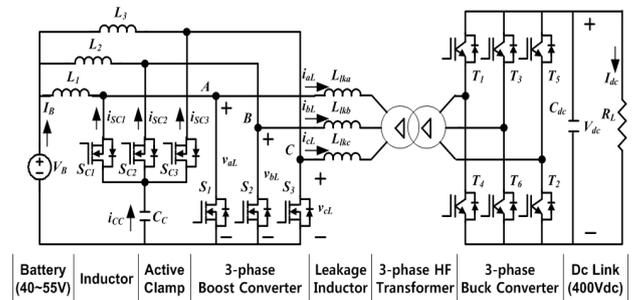


그림 2 3상 절연형 인터리브 양방향 DC-DC 컨버터 전력회로 구조
Fig. 2 Power circuit configuration of three-phase isolated interleaved by-directional DC-DC converter

Battery (40~55V)	Inductor	Active Clamp	3-phase Boost Converter	Leakage Inductor	3-phase HF Transformer	3-phase Buck Converter	Dc Link (400Vdc)
------------------	----------	--------------	-------------------------	------------------	------------------------	------------------------	------------------

컨버터부와 3개의 MOSFET 보조 스위치와($S_{C1} \sim S_{C3}$)와 클램프 커패시터(C_c)로 이루어진 능동 클램프부로 구성되어 있으며 누설 인덕터를 통해 고주파 변압기로 연결된다. 고전압측은 6개의 IGBT($T_1 \sim T_3$)와 DC 링크로 구성되어 있다. 부스트 모드 동작 시 저전압측 주스위치와 보조스위치는 상보동작하며 고전압측 IGBT는 모두 다이오드로 동작하여 풀 브리지 정류기를 구성한다. 벡 모드 동작 시에는 고전압측 IGBT 주스위치가 풀 브리지 컨버터로 동작하며, 저전압측은 주스위치가 다이오드로 동작하여 3개의 인덕터와 하이브리드 정류기를 구성한다^[1].

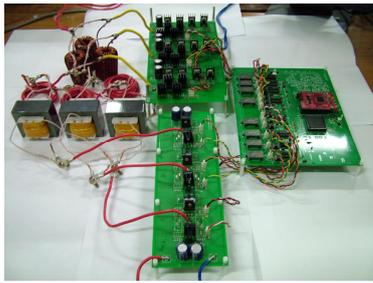
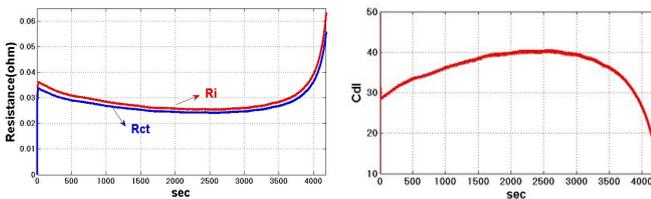


그림 3 3상 절연형 인터리브 양방향 DC-DC 컨버터
Fig. 3 Three-phase isolated interleaved by-directional DC-DC converter

3.2 3상 절연형 충방전기 제작

3상 절연형 충방전기의 동작을 측정하기 위해 그림 3과 같이 설계 및 제작하였다. 양방향 컨버터는 총 3개의 PCB로 제어부, 고전압측, 저전압측으로 나누어진다. 제어부는 스위칭 신호 생성을 위한 DSP 보드 (TMS320F2808) 및 FPGA (EPM7128)와 게이트 드라이버로 구성되며, 각각의 게이트 드라이버는 절연을 위해 분리하여 설계하였다. 고전압측의 스위치는 IGBT(IXGH30N60C2D1)로 구성되었으며 저압측은 MOSFET(IRFB4227)로 구성하였다. 또한, 인덕터 및 단상 3대를 Δ Δ 결선하여 고주파 변압기를 설계 및 제작하였다. DC 파워서플라이 (SGI 80125, SORENSEN), 파워미터 (WT230, YOKOGAWA)를 사용하여 실험 및 효율을 측정하였다.

3.3 실험결과



(a) 내부저항 R_i , 분극저항 R_{ct} (b) 분극 커패시턴스 C_{dl}
그림 4 배터리 파라미터 도출 결과
Fig. 4 Battery parameter extraction result

그림 4는 1C rate로 정격전압 12V, 정격용량 24Ah인 납축 전지를 방전 종지전압까지 방전하였을 때의 파라미터의 변화를 나타낸다. 방전 종지전압 부근에서 저항 성분이 급격하게 증가 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 부스트 모드 시 주스위치 S_1 의 ZVS turn on 파형을 나타낸다. 이 파형은 S_1 에 게이트 신호가 인가되기 전 스위치 내장 역병렬 다이오드가 도통되어 스위치 양단전압이 영이므로 정상적인 ZVS 동작을 보여준다. 그림 5는 벡 모드 시 각 상의 인덕터 전류를 나타낸다. 3상 및 인터리브 방식을 채용하여 출력전류의 리플 주파수는 단상에 비해 3배로 증가하지만 각 상의 인덕터 전류는 합쳐져서 리플전

류의 크기는 1/3로 줄어든다. 즉, 배터리를 충방전 할 경우 작은 리플전류의 충방전 전류로 제어 안정성을 확보할 수 있다^[2]. 그림 6은 0.1~3kW 부하범위에서의 효율을 나타낸다. 이때 저압측 입력전압 48V, DC링크 전압 400V의 조건에서 효율을 나타낸다. 부하 용량이 증가할수록 전류가 증가하여 스위치, 회로의 전도손실로 인해 효율이 감소한다. 그럼에도 불구하고 3kW이하의 부하에서 약 95%의 높은 효율을 보였다.

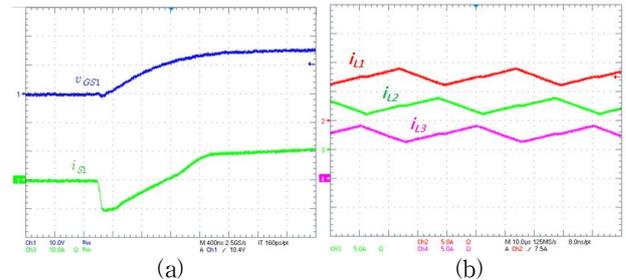


그림 5 ZVS turn-on 파형 및 인덕터 전류
Fig. 5 ZVS turn-on waveform and Inductor current
(a) 부스트 모드 주스위치 (S_1) ZVS turn-on 파형
(b) 벡 모드 인덕터 전류
(a) Boost mode ZVS turn-on waveform of main switch (S_1)
(b) Buck mode inductor current

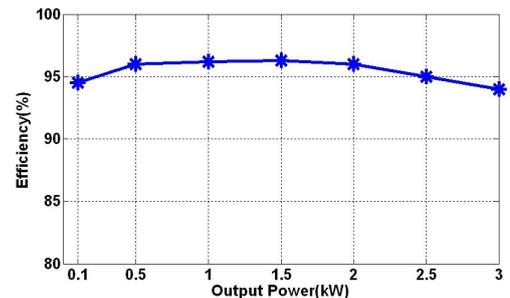


그림 6 0.1~3kW 효율실험 결과
Fig. 6.5 0.1~3kW experimental result for efficiency

4. 결론

본 논문에서는 납축전지 모델링, 파라미터 도출 및 3kW급 3상 절연형 인터리브 배터리 충방전기를 제작하고 3kW 이하의 부하 조건에서 실험 및 결과를 해석하였다. 제작된 컨버터는 3상 전류형 dc dc 컨버터로 배터리에 적합한 대전력 고효율의 작은 리플전류를 갖는 컨버터를 구현하였고, 능동 클램프 회로와 모든 스위치의 ZVS 동작으로 손실 저감 효과를 보였다. 제작된 컨버터는 0.1~3kW 부하의 범위에서 효율이 약 95%의 결과를 보였으며, 본 실험을 통하여 신재생에너지 분야의 에너지 저장시스템 및 전기자동차 시스템 등에 적합한 높은 전압전달비, 절연, 작은 리플전류, 대용량 고효율의 전력변환장치임을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Jungwan Choi, Hanju Cha, Byung moon Han, "A Three Phase Interleaved DC DC Converter with Active Clamp for Fuel Cells", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25, no. 8, pp. 2115~2123, August 2010
- [2] J. Larminie and J. Lowry, "Electric Vehicle Technology Explained", 1st ed. New York: Wiley, 2003.