

Multi-Phase 인터리브드 방식을 이용한 고효율 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지에 관한 연구

(Study on the High Efficiency Bi-directional DC/DC Converter Topology Using
Multi-Phase Interleaved Method)

최정식* · 박병철 · 정동화 · 오승열**

(Jung-Sik Choi · Byung-Chul Park · Dong-Hwa Chung · Seung-Yeol Oh)

Abstract

This paper proposes an efficient bi-directional DC/DC converter topology using multi-phase interleaved method for power storage system. The proposed converter topology is used for a power storage system using a vanadium redox flow battery(VRFB) and is configured to enable bidirectional power flow for charging and discharging of VRFB.

Proposed DC/DC converter of the 4 leg method is reduced to 1/4 times the rating of the reactor and the power semiconductor device so can be reduce the system size. Also, proposed topology is obtained the effect of four times the switching frequency as compared to the conventional converter in each leg with a 90 degree phase shift 4 leg method. This can suppress the reduction of the life of the secondary battery because it is possible to reduce the current ripple in accordance with the charging and discharging of VRFB and may increase the efficiency of the entire system. In this paper, it proposed bidirectional high-efficiency DC/DC converter topology Using multi-phase interleaved method and proved the validity through simulations and experiments.

Key Words : Redox Flow Battery, Power Storage System, Bidirectional Converter, Phase shift,
Coupled Inductor, High Efficiency

1. 서 론

최근 화석연료(석탄, 석유, 천연가스 등)의 수급 불안정과 일본 후쿠시마 원전사고로 인한 원전건설의 회피로 각국은 전력 수급에 커다란 어려움을 겪고 있으며, 생산 전력의 부하를 평준화하기 위한 전력저장 장치의 필요성이 커지고 있다. 전력의 최대 수요에 대응하기 위해 건설된 발전소는 수요 전력이 낮을 경우

* Main author : Senior Researcher, Energy
Convergence Research Center, KETI
** Corresponding author : Managerial Researcher,
Energy Convergence Research Center, KETI
Tel : 062-975-7056, Fax : 062-975-7069
E-mail : cjs1108@keti.re.kr
Received : 2014. 11. 3
Accepted : 2015. 1. 22

발전을 하지 않아 투자 효율성과 낮은 가동률이 문제가 되고 있다. 특히 신재생에너지원은 출력변동이 심하고 연속 공급이 불가능하여 에너지 생산시점과 수요시점의 시간차가 발생, 이를 완충시켜줄 전력저장시스템의 중요성이 부각되고 있다[1]. 따라서, 전력저장시스템은 전력공급의 안정화, 신재생에너지 확산 등의 부가가치를 창출하는 녹색 분야의 핵심 기술로 급격한 시장 확대가 예상되는 신산업 분야이다. 또한 안정한 전기에너지의 공급과 고효율의 에너지 변환 및 저장시스템의 연구 및 개발이 필요하며 이와 같은 문제 해결의 한 방법으로 대용량, 고효율의 이차전지 개발에 대한 요구가 점차 증가되고 있다. 전력저장시스템은 이차전지, BMS(Battery Management System), PCS(Power Conditioning System)로 구성되어 있으며, 부가적으로 그리드와의 연계 운영을 위한 EMS(Energy Management System)로 구성된다. 전력저장 시스템으로 사용되는 이차전지로는 납축전지, NaS전지, 고용량 커패시터, 리튬이온전지 및 레독스 플로우전지 등이 있으며 이들 중 레독스 플로우전지(RFB)는 안전하고 리사이클링이 가능하며 출력과 용량의 독립적 설계가 가능하여 대용량화가 용이해 전력저장 시스템용 이차전지로 사용할 최적의 전지로 각광받고 있다[2-3].

레독스 흐름전지는 최근 들어 많은 주목을 받고 있는 대용량의 이차전지로서 미국의 NASA, 호주의 NSWU 및 일본의 Moon Light Project의 일환으로서 통산성 산하 전자 기술 종합 연구소와 몇 군데의 민간 연구소 등에서 연구가 수행 중에 있는 유망한 에너지 저장시스템이다[4]. 특히 활물질로 바나듐을 사용하는 바나듐 레독스 흐름 전지(VRFB, vanadium redox-flow battery)는 재생에너지의 원활한 전력공급과 부하 평준화, 비상용 전력을 위한 전력저장 시스템으로 연구가 진행되고 있다[5-8].

RFB는 수용액 중에 서로 다른 산화수를 갖는 2종류의 화학종 레독스 쌍을 전극 반응시킴으로서 충방전하는 전지이다. 이 전지는 레독스 쌍의 조성이 충방전에 따라 가역적으로 변화하는 것과는 대조적으로 전극에서는 단순히 전자의 주고받음만 행해지기 때문에 전극 자체의 변화가 거의 없고 전극과 활물질이 분리

되어 있어 복잡한 전극반응이 일어나지 않으며 전지의 수명이 길고 scale-up이 비교적 용이한 장점이 있다[9]. 또한 양쪽 전극 액이 탱크에 의해 분리 저장되기 때문에 유입 액량에 의해 전지의 출력 제어가 가능하고, 전지 보수 및 관리가 용이하며 탱크의 용량을 변경하는 것만으로도 전력 저장량의 추정이 가능하다. 현재 레독스 흐름전지에 관한 연구는 주로 전지의 소재(전해액, 분리막, 커플 등) 부분에 대한 내용이 주를 이루고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[10]. 이와 같이 VRFB를 이용한 전력저장 시스템은 주로 소재 부분을 중심으로 연구가 다양하게 진행되고 있으나 전력변환장치인 PCS 부분에 대한 연구는 그 아직 미흡한 실정이다.

PCS는 전력변환장치로서 크게 DC/DC 컨버터와 계통과 연계할 수 있는 DC/AC 인버터로 구성된다. DC/DC 컨버터는 방전 시 레독스 흐름전지의 낮은 전압(50V)을 인버터 DC link의 고전압으로 승압하는 역할을 수행하며 충전 시 고전압을 레독스 흐름전지의 낮은 전압으로 강압하는 양방향 전력수수가 가능해야 한다. 이러한 양방향 DC/DC 컨버터는 절연형과 비절연형으로 나눌 수 있다. 절연형 컨버터는 변압기 턴수비로 고승압에 장점이 있으나 고주파 변압기에 의한 손실이 발생하는 단점이 있으며 비절연형 컨버터는 제어가 용이하고 구성이 간단한 장점이 있어 일반적으로 많이 사용된다[11-12]. 이러한 비절연형 DC/DC 컨버터는 안정성과 고효율 및 저단가에 대한 연구가 진행되고 있다[13].

따라서 본 논문에서는 레독스 흐름전지를 이용한 에너지저장장치 시스템의 고효율화 및 고전력밀도를 고려한 Multi Phase Shift 방식의 인터리브 양방향 DC/DC 컨버터를 제안하고 이에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 시스템 구성

2.1 RFB 모델링

2.1.1 기계적 모델링

그림 1은 레독스 흐름전지의 기계적 모델링을 위한

구성도를 나타내고 있다.

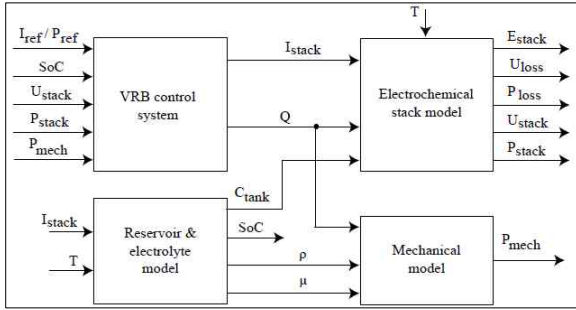


그림 1. RFB 기계적 모델링
Fig. 1. Mechanical Modeling of RFB

기계적인 출력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{mech} = 2 \frac{(\Delta p_{pipe} + \Delta p_{stack})Q(k)}{\eta_{pumps}} \quad (1)$$

여기서 \$Q\$는 유량, \$P_{mech}\$은 기계적인 출력, \$\eta_{pumps}\$은 펌프 효율, \$\Delta p_{pipe}\$ 유로관의 압력, \$\Delta p_{stack}\$은 스택 내 압력을 나타내고 있다.

유로관의 압력과 스택 내부 압력은 다음 식(2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta p_{pipe} = -\gamma \left(\frac{\Delta V_s^2}{2g} + \Delta z + h_f + h_m \right) \quad (2)$$

$$\Delta p_{stack} = Q(k) \times \tilde{R} \quad (3)$$

여기서 \$V_s\$는 유속, \$z\$는 높이, \$h_f\$ 수두 손실, \$h_m\$는 마찰 손실을 나타내고 있다.

2.1.2 전기적 모델링

그림 2는 레독스 흐름전지의 전기적 모델링을 위한 등가회로를 나타내고 있다. 전해질의 유로를 위한 펌프에 대한 모델링도 포함된다.

전기적인 스택 출력은 정격 출력에 대한 다음 식의 비율로 나타낼 수 있으며 총 21% 손실 중 15%의 손실은 레독스 흐름전지의 내부 저항으로 인한 손실이고 6%는 SOC(State of Charge) 20% 부근의 최악 조건

에 대한 기생 손실을 나타내고 있다.

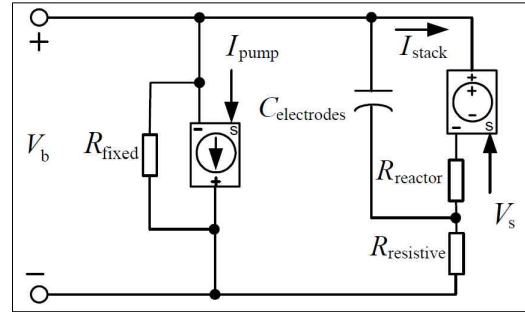


그림 2. RFB 전기적 모델링
Fig. 2. Electrical Modeling of RFB

$$P_{stack} = \frac{P_N}{1-21\%} \quad (4)$$

$$V_{cell} = V_{equilibrium} + 2k \cdot \lg\left(\frac{SOC}{1-SOC}\right) \quad (5)$$

여기서 온도 계수 \$k=0.059\$, 단위 셀 전압 \$V_{equilibrium}=1.25V\$으로 나타낼 수 있으며 기생 손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{parasitic} = P_{fixed} + P_{pump} = P_{fixed} + k \left(\frac{I_{stack}}{SOC} \right) \quad (6)$$

$$R_{fixed} = \frac{V_b^2}{P_{fixed}} \quad (7)$$

$$I_{pumped} = k \left(\frac{I_{stack}}{SOC} \right) / V_b \quad (8)$$

여기서 \$P_{fixed}\$는 내부저항에 따른 소모전력, \$V_b\$는 배터리 전압, \$I_{pumped}\$는 펌프 소모전류 및 \$k\$는 계수를 나타낸다. 또한 SOC 추정 식은 다음 식(9)과 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$SOC = SOC_{t-1} + \Delta SOC \quad (9)$$

$$\Delta SOC = \frac{\Delta E}{E_N} = \frac{I_{stack} \cdot V_b \cdot \Delta t}{P_N \cdot T_N} \quad (10)$$

그림 3은 5kW급 RFB스택의 SOC 변화에 따른 전압 변화를 나타낸다. 충·방전 전류는 100A로 일정 전류 충전 및 방전을 할 경우이다. 최대 충전 전압은 64V, 방전 전압은 50V급으로 이는 양방향 DC/DC 컨버터의 스위칭 소자를 선정하는 중요한 요소이다.

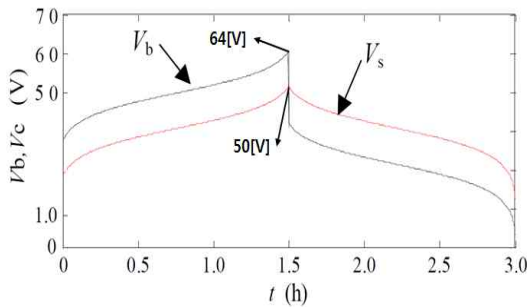


그림 3. 5kW RFB 스택 충·방전 전압변화
Fig. 3. Voltage Variation of 5kW RFB

2.2 전력저장시스템 구성

그림 4는 RFB를 적용한 에너지저장시스템의 구성을 나타낸다. 배터리는 RFB를 적용하였고 양방향 컨버터는 일반적인 비절연형 컨버터와 계통과 연계하는 인버터 및 L-C-L 필터로 구성된다. 이러한 구성 중 본 논문에서는 양방향 DC/DC 컨버터에 대한 효율 향상과 시스템 Size를 축소할 수 있는 인터리브 방식의 토폴로지에 대한 연구를 수행한다.

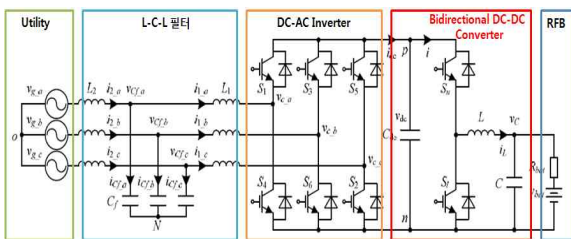


그림 4. RFB를 적용한 에너지저장 시스템 구성도
Fig. 4. ESS Configuration with RFB

3. 제시한 DC/DC 컨버터 토폴로지

그림 5는 본 논문에서 제안하는 결합인덕터를 이

용한 인터리브 양방향 DC/DC 컨버터의 회로도이다. 비절연형 Half-Bridge 컨버터 4개를 병렬로 연결하는 구조로 부품수가 증가하였으나 입력전류의 분배로 소자의 정격용량을 낮추고, 스위칭주파수의 증가로 리플을 저감할 수 있다. 또한 단일 인덕터를 결합된 하나의 인덕터로 사용하여 인덕턴스 요건이 더 낮아지고, 집적도가 우수하다. 결합 인덕터는 자속이 서로 감쇠되는 감극성으로 결선되었으며, 병렬 연결된 4쌍의 스위치는 90° 위상차를 가지도록 제어한다.

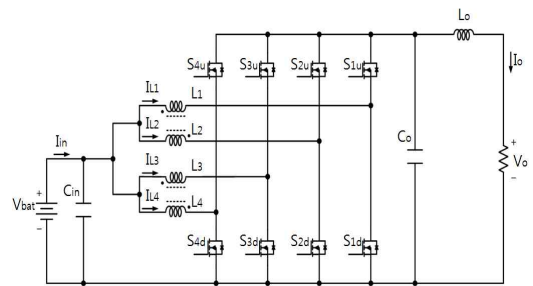


그림 5. 제안한 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지
Fig. 5. Proposed Bidirectional DC/DC Topology

그림 5와 같이 스위치 도통구간 동안 결합 인덕터 코일에 흐르는 전류는 서로 다른 dot로 흐르는 감극성일 때 각 코일에 걸리는 전압은 식 (11)~(14)과 같이 나타낼 수 있으며 이때 L_m 상호인덕턴스를 나타낸다.

$$V_{L1} = L_1 \frac{di_1}{dt} - L_m \frac{di_2}{dt} \quad (11)$$

$$V_{L2} = L_2 \frac{di_2}{dt} - L_m \frac{di_1}{dt} \quad (12)$$

$$V_{L3} = L_3 \frac{di_3}{dt} - L_m \frac{di_4}{dt} \quad (13)$$

$$V_{L4} = L_4 \frac{di_4}{dt} - L_m \frac{di_3}{dt} \quad (14)$$

인덕턴스 $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$ 이라고 가정하면, $L_m = kL$ 이 되고, 식 (11)~(14)을 이용하여 입력전류

리플 값으로 식을 정리하면, 다음 식 (15)~(18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta i_1 = \frac{1 - \frac{d_1 - k}{1 - d_1}}{L(1 - k^2)} V_1 d_1 t \quad (15)$$

$$\Delta i_2 = \frac{1 - \frac{d_2 - k}{1 - d_2}}{L(1 - k^2)} V_2 d_2 t \quad (16)$$

$$\Delta i_3 = \frac{1 - \frac{d_3 - k}{1 - d_3}}{L(1 - k^2)} V_3 d_3 t \quad (17)$$

$$\Delta i_4 = \frac{1 - \frac{d_4 - k}{1 - d_4}}{L(1 - k^2)} V_4 d_4 t \quad (18)$$

위 수식을 이용하여 리플전류가 가장 낮은 최적의 결합계수는 약 0.35가 된다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 6은 본 논문에서 제시한 인터리브 양방향 DC-DC컨버터의 PSIM 회로도를 나타낸다. DC link 전압은 160V로 제어하며 입/출력 전압이득은 약 3.2 배 이고 표 1은 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타낸다.

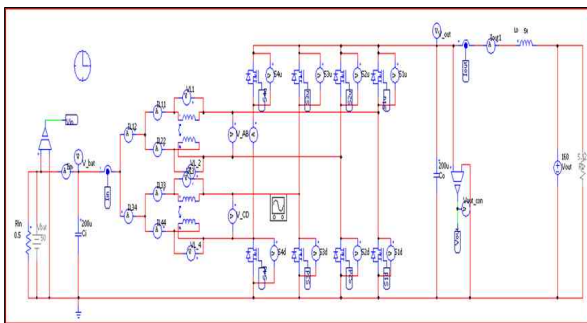


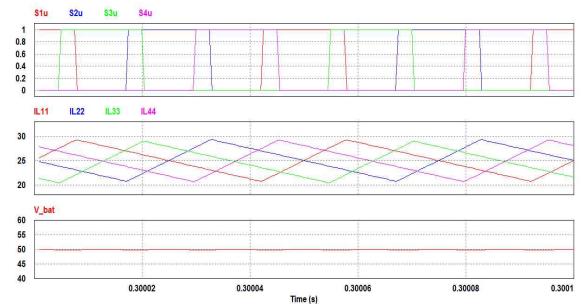
그림 6. 제안한 DC-DC컨버터의 PSIM 회로도
Fig. 6. PSIM Circuit of Proposed DC-DC Converter

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameter

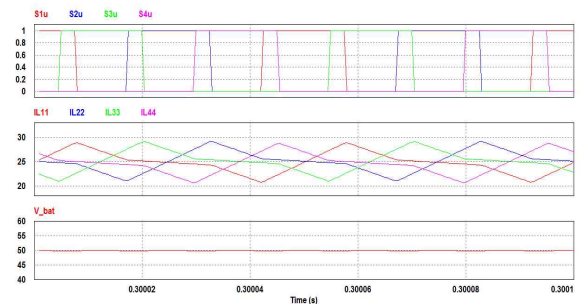
파라미터	값	파라미터	값
V _{bat}	50V	V _{link}	160V
전압이득	3.2	fs	20kHz
L	200uH	C	200uF
R _{bat}	0.5Ω	R _{link}	5.12Ω

그림 7과 그림 8은 결합계수가 0일 때와 최적의 결합계수 0.35일 때 Buck모드(충전), Boost모드(방전) 시 시뮬레이션 응답파형을 나타내며, K=0인 경우보다 0.35일 때 약 0.5A 정도의 전류리플이 감소하는 것을 확인하였다.

그림 9와 그림 10은 Buck모드, Boost모드 시 스위칭 파형 및 전압제어 응답파형을 나타내고 있다. Buck 모드 및 Boost 모드에서도 전압이 양호하게 추종하고 있으며 인터리브 방식에 따라 L에 걸리는 전류도 약 25A로 1/4배 축소됨을 알 수 있다.

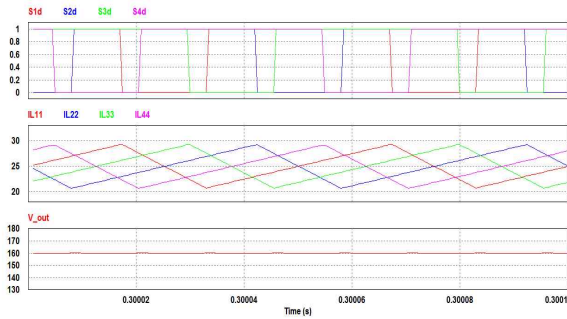


(a) k=0일 때 Buck 모드

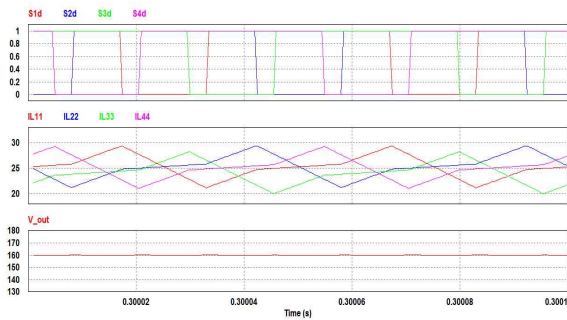


(b) k=0.35일 때 Buck 모드

그림 7. Buck모드 시뮬레이션 파형
Fig. 7. Buck Mode Simulation Waveform



(a) $k=0$ 일 때 Boost 모드



(b) $k=0.35$ 일 때 Boost 모드

그림 8. Boost모드 시뮬레이션 파형
Fig. 8. Boost Mode Simulation Waveform

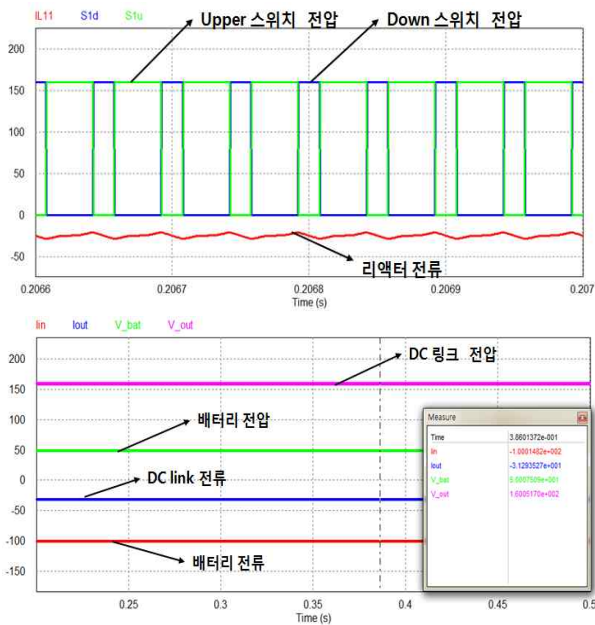


그림 9. Buck모드 스위칭전압 및 전압제어 파형
Fig. 9. Buck Mode Switching Voltage and Control Waveform

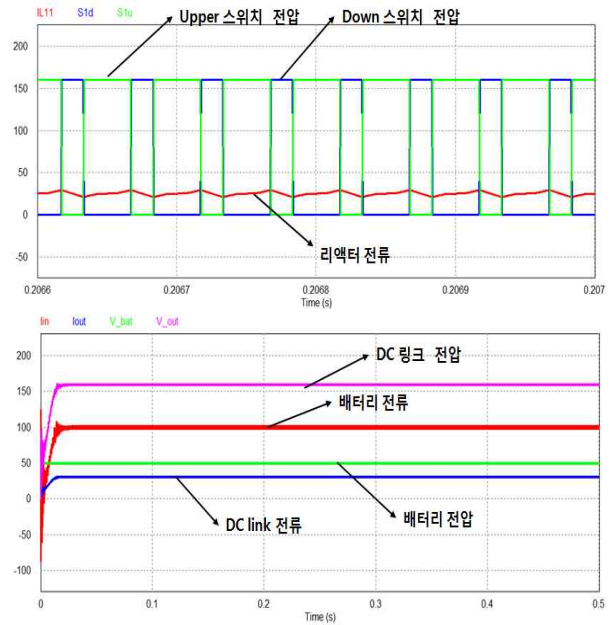


그림 10. Boost모드 스위칭전압 및 전압제어 파형
Fig. 10. Boost Mode Switching Voltage and Control Waveform

5. 실험 및 결과

그림 11은 본 논문에서 제안하는 인터리브드 양방향 DC/DC 컨버터의 실험 구성도를 나타낸다. 입력부 전원소스와 컨버터 스택, 부하 및 계측기로 구성하였다. 실험에 사용된 파라미터는 시뮬레이션 파라미터와 동일하게 구성하였으며 스위칭 전압, 리액터 전류, 출력 전압, 전류 및 컨버터 효율을 측정하였다.

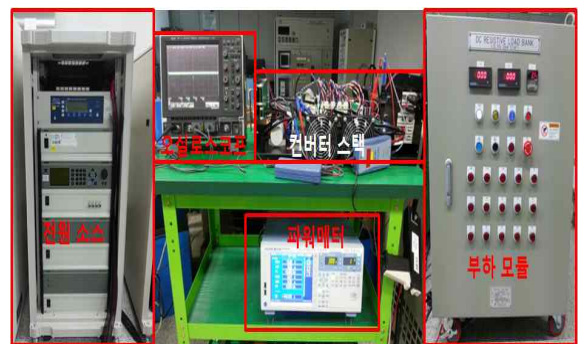
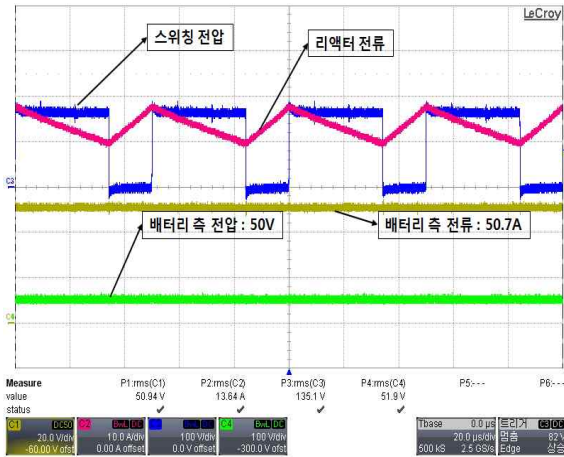
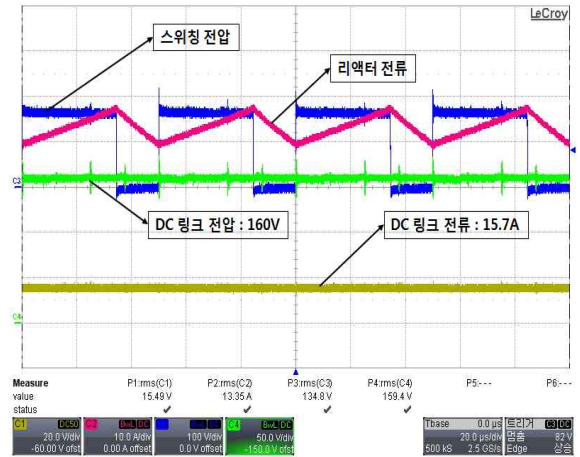


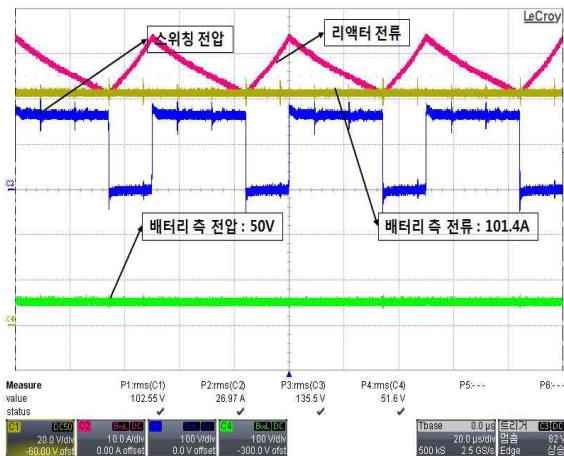
그림 11. 제안한 양방향 DC/DC 컨버터 실험구성도
Fig. 11. Bidirectional DC/DC Converter Experiment Configuration



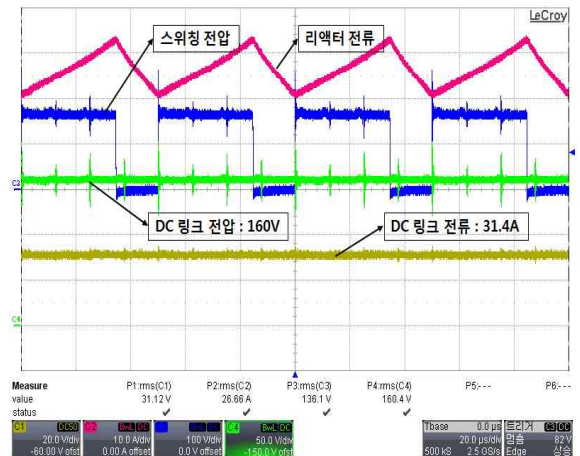
(a) 50% 부하시



(a) 50% 부하시



(b) 100% 부하시



(b) 100% 부하시

그림 12. Buck 모드 시 전압, 전류 응답파형
Fig. 12. Voltage/Current Waveform with Buck Mode

그림 13. Boost 모드 시 전압, 전류 응답파형
Fig. 13. Voltage/Current Waveform with Boost Mode

그림 12와 13은 제시한 인터리브 양방향 DC-DC 컨버터의 Buck 모드와 Boost 모드 시 응답파형을 나타낸다. 그림 12 (a)는 50% 부하 시 Buck 모드 시 스위칭 전압과 출력 전압 및 전류를 나타내고 있으며 그림 12 (b)은 100% 부하 시의 응답파형을 나타낸다.

50V(RFB정격전압) 전압 제어 시 양호하게 추종함을 알 수 있다. 그림 13은 같은 조건에서 Boost 모드 시에 대한 50% 부하와 100% 부하에 대한 응답파형을 나타내며 160V로 제어 시 마찬가지로 양호한 응답파형을 나타내고 있다.

그림 14와 15는 제시한 인터리브 양방향 DC-DC 컨버터의 Buck 모드와 Boost 모드 시 효율을 나타낸다. 비절연형 컨버터 토폴로지에서 전압이득이 3.2배 일 경우 최대효율이 97% 이상 나타남을 알 수 있다.

여기서 U_{dc1} 은 입력전압, U_{dc2} 는 출력전압, I_{dc1} 과 I_{dc2} 는 입력전류 및 출력전류, P1과 P2는 입력전력과 출력전력을 나타낸다.

그림 16은 본 논문에서 제시한 인터리브 컨버터의 부하별 효율 분석 데이터를 나타내고 있다. 부하별 최대 효율은 97%이상을 나타냈으며 정격 부하에서



(a) 50% 부하 효율



(b) 100% 부하 효율

그림 14. Buck 모드 시 효율 데이터
Fig. 14. Efficiency Data with Buck Mode



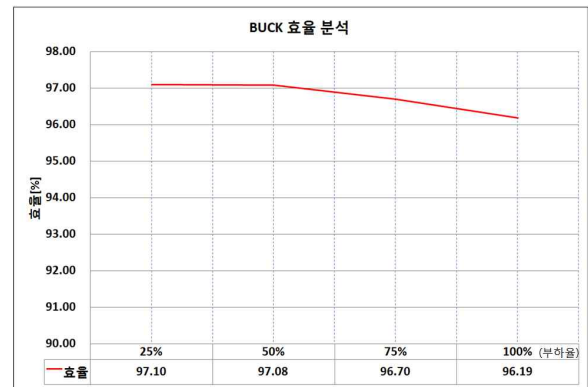
(a) 50% 부하 효율



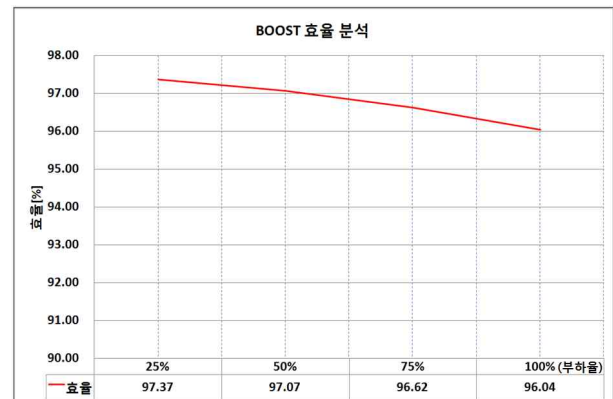
(b) 100% 부하 효율

그림 15. Boost 모드 시 효율 데이터
Fig. 15. Efficiency Data with Boost Mode

Buck 모드 및 Boost 모드에서 평균 96% 이상으로 고 효율화를 실현할 수 있었다.



(a) Buck 모드 효율분석



(b) Boost 효율 분석

그림 16. 제시한 DC/DC 컨버터 효율분석
Fig. 16. Efficiency Analysis of Proposed DC/DC Converter

6. 결 론

본 논문에서는 레독스 흐름전지를 이용한 에너지저장장치의 시스템 안정성과 효율을 고려한 Multi Phase Shift 방식의 인터리브 양방향 DC/DC 컨버터를 제안하였다.

제시한 컨버터 토폴로지는 이차전지 즉, 레독스 흐름전지의 충·방전 제어를 위해 충전 시 인버터의 DC link 전압을 배터리의 저전압으로 변환하는 Buck 모드와 배터리의 저전압을 DC link의 고전압으로 변환하는 Boost 모드로 동작하여 양방향 전력수수가 가능

하도록 구성하였다.

또한 제시한 컨버터는 4 leg에서 각각 90° 위상 지연 제어를 수행하였으며 이로서 리액터에 걸리는 전류를 낮출 수 있어 시스템의 크기를 소형화할 수 있었다. 특히 90° 위상지연 인터리브 방식을 이용하여 종래의 컨버터에 비해 4배의 스위칭 주파수 효과를 얻을 수 있어 충·방전 시 전류 리플을 1/4배로 줄일 수 있었고 배터리에 대한 스트레스를 줄일 수 있었다.

이를 바탕으로 비 절연형 토폴로지 구조로서 입출력 전압 이득이 3배 이상일 경우에도 평균효율이 96%로 높게 나타나고 있어 매우 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 이로서 제시한 Multi Phase Shift 방식의 인터리브 양방향 DC/DC 컨버터 토폴로지의 고효율화에 대한 타당성을 검증하였다.

본 연구는 전자정보디바이스 산업융합원천기술개발 사업의 일환(10041942)으로 수행되었음.

References

[1] K. Huang, X. Li, S. Liu, N. Tan, and L. Chen, "Research progress of vanadium redox flow battery for energy storage in China" *Renewable Energy*, 33, 186, 2008.

[2] H. S. Choi, J. C. Ryu, G. J. Hwang, . J., 21(2), 107, 2011.

[3] Chang Sooljin, "Battery for Large Scale Energy Storage", *KIC News*, 13, 2, 2010.

[4] M. S. Kazacos, D. Kasherman, D. R. Hong and M. Kazacos, "Characteristic and Performance of 1kW · UNSW Vanadium Redox Battery", *J. Power Sources*, 35, 399, 1991.

[5] S. J. Choi, J. H. Jeong, Y. C. Shin, M. S. Lee, D. H. Chu, C. H. Kim, and K. P. Park, "haracteristics of Poly(aryleneether sulfone) Membrane for Vanadium Redox Flow Battery," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, 51, 671-676, 2013.

[6] Sumitomo Electric Industries Ltd., Power system solution with vanadium redox-flow battery (V-RFB), Presentation paper, 2010.

[7] Prifti, H., Parasuraman, A., Winardi, S., Lim, T. M. and Skyllas-Kazacos, M., "embranes for Redox Flow Battery Applications," *Membranes*, 2, 275-306, 2012.

[8] Chen, D., Hickner, M. A., Agar, E. and Kumbur, E. C., "elective Anion Exchange Membranes for High Coulombic Efficiency Vanadium Redox Flow Batteries," *Electrochem. Com.*, 26, 37-40, 2013.

[9] H. S. Choi, J. C. Kim C. H. Ryu, G. J. Hwang, "Research review of the all vanadium redox-flow battery for large

scale power storage", *Member J.*, Vol. 21, No. 2, pp. 107-117, 2011.

[10] I. Y. Jang, O. H. Kweon, K. E. Kim, G. J. Hwang, S. B. Moon and A. S. Kang, "Covalently cross-linked sulfonated poly(ether ketone) tungstophosphoric acid composite membranes for water electrolysis application", *J. Power Source*, 181, 127, 2008.

[11] Y. Lyu, H. Lin. "Control of Bidirectional DC/AC Converter for Redox Flow Battery Energy Storage System" in *Proc. IEEE ECCE*, pp. 2120-2127, 2012.

[12] T. Zhou and B. Francois, "Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 95-104, 2011.

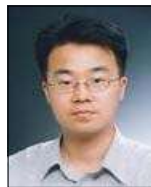
[13] M. Ahmadi, K. Shenai. "New, Efficient, Low-Stress Buck/Boost Bidirectional DC-DC Converter", in *Proc. IEEE Energy Tech*, pp. 1-6, 2012.

◆ 저자소개 ◆



최정식(崔正植)

1980년 2월 9일생. 2005년 순천대 전기 제어공학과 졸업. 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011년 1월~현재 전자부품연구원 에너지변환 연구센터 선임연구원.



박병철(朴丙哲)

1973년 6월 15일생. 1996년 건국대 전기 공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003~2012년 LS산전 전력 연구소 책임연구원. 2012년~현재 전자 부품연구원 에너지변환연구센터 책임 연구원.



정동화(鄭東和)

1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 현대중전기(주)기술연구소 책임연구원. 1989년~현재 순천대 전기 제어공학과 교수.



오승열(吳承烈)

1975년 5월 16일생. 2004년 전남대 대학원 전공학과 졸업(석사). 2013년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2005~2006년 네오앤비 PM. 2007년~현재 전자부품 연구원 에너지변환연구센터 책임연구원.