

슈퍼커패시터의 최적 충방전을 위한 양방향 하프브리지 컨버터의 제어

이종학, 최우진
송실대학교 전기공학부

Control of Bidirectional Half-Bridge Converter for Optimal Charge/Discharge of the Supercapacitor

Jong-Hak Lee, Woojin Choi

Department of Electrical Engineering, Soongsil University

ABSTRACT

연료전지와 같은 신재생에너지원은 부하변동에 강인하게 대처하기 어려운 특성을 지니고 있어 단독으로 사용될 경우 전력 품질 문제를 야기 할 수 있으며, 따라서 이를 보상하기 위한 보조 에너지 저장장치의 사용이 요구된다. 슈퍼커패시터는 전력밀도가 높고 사이클 수명이 긴 특성을 지니고 있어, 주 에너지원의 느린 응답특성을 보상하는 데에 유용하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 슈퍼커패시터의 최적 충방전을 위한 양방향 하프브리지 컨버터의 설계 및 제어에 관해 기술한다. 최적 충방전 전류의 값을 결정하기 위해 EIS 실험을 통해 슈퍼커패시터 모듈의 임피던스 특성을 분석하였고, 충전 전류별 충전 효율이 달라지는 원인을 분석하였으며, 위상제어에 의한 하프브리지 컨버터의 충방전 제어방법에 관해 제시한다.

1. 서론

슈퍼커패시터는 높은 전력밀도로 인하여 배터리나 연료전지를 이용하는 시스템의 전력 품질을 향상시킬 수 있으며, 친환경 소재로 구성되어 있어 환경 문제를 일으키지 않고, 긴 사이클 수명과 안정성 때문에 차세대 에너지 저장장치로서 각광을 받고 있다. 슈퍼커패시터의 다양한 성능 지표 중 충방전 특성은 효율과 관련된 매우 중요한 요소이며, 이를 최적으로 선정하는 것은 시스템 효율에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러나 이러한 슈퍼커패시터의 충방전 효율은 충방전 전류의 크기에 따라 변화하나 최적의 충방전에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통해 슈퍼커패시터의 최적 충전전류 값을 구하고 EIS 실험 데이터로부터 그 원인을 분석하였다. 또한, 500W급 하프브리지 양방향 컨버터를 설계하고 위상제어에 의한 고효율 충방전 제어기법을 제시한다.

2. 본론

2.1 슈퍼커패시터 모듈 선정 및 EIS 실험

본 논문에서 사용된 슈퍼커패시터는 LS Ultracapacitor (350F, 2.8V)로 14개의 셀을 직렬 연결하여 구성하였고, 정격 정전용량 및 정격전압은 25F, 40V이다. 사용 전압범위는 20V(SOC 50%)~40V(SOC 100%)로 하였으며, 500W 전력을 30초 동안 공급할 수 있다. 그림 1에는 EIS 실험을 통해 SOC 100%에서 추출된 슈퍼커패시터 모듈의 나이퀴스트 임피던스

선도를 나타내었다. 그림 1로부터 슈퍼커패시터의 저항 손실을 계산하기 위한 직렬저항(R_s)과 전극저항(R_e)의 값을 구할 수 있다^[1].

2.2 충방전 효율

슈퍼커패시터 모듈의 충방전 효율을 파악하기 실험을 진행하였다. 충방전 전류는 1A~7A로 변화시키면서 실험을 실시하여 각각의 효율을 계산하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 충전 전류가 5A일 때 가장 효율이 높으며, 방전 전류는 낮으면 낮을수록 효율이 좋음을 알 수 있다. 그림 3에는 각 전류별 슈퍼커패시터 모듈의 충방전 에너지 손실을 나타내었다. 슈퍼커패시터 모듈의 전체 손실은 저항 손실만으로 설명하기 어려우며, 전체 손실 중 저항 손실을 제외한 부분은 슈퍼커패시터의 내부에서 이온의 확산에 의해 나타나는 손실로 설명될 수 있다^[1]. 그림 3의 (A)와 같이 전류가 증가하면 저항에 의해 소모되는 에너지도 선형적으로 증가한다. 그림 3의 (B)에서 보듯이 이온의 확산에 의한 손실은 전류가 5A일 때 가장 낮은 것을 확인 할 수 있다. 따라서 충전시 충전전류가 5A일 경우의 효율이 가장 높음을 알 수 있다. 저항에 의한 손실은 식(1)과 같으며 전체 손실은 식(2)로 나타낼 수 있다.

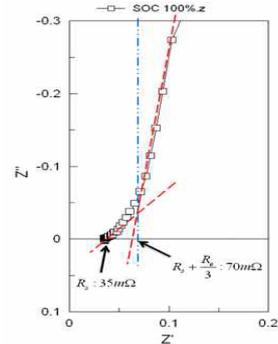


그림 1 슈퍼커패시터 모듈의 나이퀴스트 임피던스 선도
Fig. 1 Impedance Nyquist Plot of the Supercapacitor Module

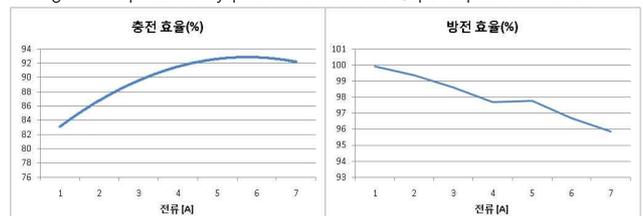


그림 2 충방전 전류별 충방전 효율
Fig. 2 Charge/Discharge Efficiency by Current Amplitude
Charge/Discharge Current

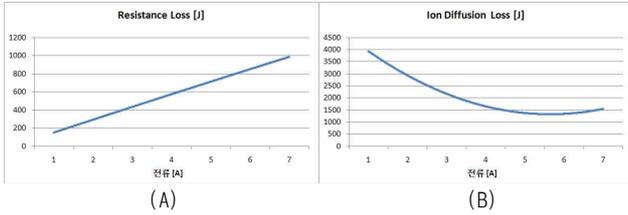


그림 3 슈퍼커패시터 모듈의 충전 에너지 손실 분석
(A) 저항 손실, (B) 이온 확산 손실

Fig. 3 Charge/Discharge Energy Loss Analysis of the Supercapacitor Module (A) Resistance Loss (B) Ion Diffusion Loss

$$Loss_{resistance} \approx I^2 \times (R_s + R_e/3) \quad (1)$$

$$Loss_{total} = Loss_{resistance} + Loss_{Ion\ Diffusion} \quad (2)$$

2.3 양방향 전력수수 실험

연료전지의 동특성 보상을 500W급 양방향 컨버터를 설계하고 시뮬레이션을 실시하였다. 그림 4는 양방향 전력 수수 실험을 위한 양방향 컨버터의 회로도이며, [2] 토폴로지는 양방향 하프 브리지 컨버터이다. 일반적인 더블 풀브리지 방식에 비해 스위치 수가 적으며, 1차측과 2차측의 위상 제어시 자연적인 ZVS 상태가 만들어지게 되어 효율면에서 장점을 지니고 있다. 출력은 400V로 설정하였고, 슈퍼커패시터 모듈 측은 20V~40V로 하였다. 1차측과 2차측은 하프브리지 방식에 스위치 간 위상차를 주는 위상제어 방식을 이용하였다. 그림 5는 컨버터 모드에 따른 제어 블록도이며, 각 모드별 폐회로 전달함수는 식(3),(4)로 나타낼 수 있다.

$$\text{승압모드: } T_v(s) = G_{vc} \times 1/V_m \times G_{vd} \times H_v \quad (3)$$

$$\text{강압모드: } T_i(s) = G_{ic} \times 1/V_m \times G_{id} \times H_i \quad (4)$$

슈퍼커패시터 모듈의 전압에 따른 출력 전력의 변화는 그림 6과 같다. 위상을 변화하면 90도까지는 출력전력이 증가하다가 90도 이후에서는 감소하게 되며, 입력전압에 따라 전력의 프로파일이 달라진다. 따라서 실제 제어에 이용되는 위상범위는 20~60도이고, 슈퍼커패시터 모듈의 전압이 변함에 따라 위상을 제어하여 충전시 전류 및 전압을 제어한다.

그림 7은 슈퍼커패시터 모듈의 충전 모드시(승압모드) 슈퍼커패시터 모듈의 전압과 DC-link(출력)단 전압을 나타낸 것이다. 전압제어를 통해 출력측인 DC-link(출력)단이 400V로 제어됨을 확인할 수 있으며, 슈퍼커패시터 모듈의 전압이 40V부터 17.5V까지 제어가 되어 사용 전압 범위에서 만족스러운 제어 성능을 보임을 확인할 수 있다. 그림 8은 슈퍼커패시터 모듈의 충전 모드시(강압모드) 슈퍼커패시터 모듈의 전압과 전류이다. 최적 충전 전류인 5A로 전류 제어가 되며, 이때 슈퍼커패시터의 전압은 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다.

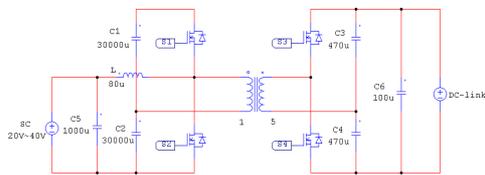


그림 4 양방향 컨버터
Fig. 4 Bidirectional Converter

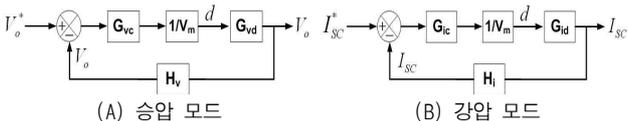


그림 5 컨버터 모드별 제어 블록도
Fig. 5 Control Block Diagram for each Mode of Converter

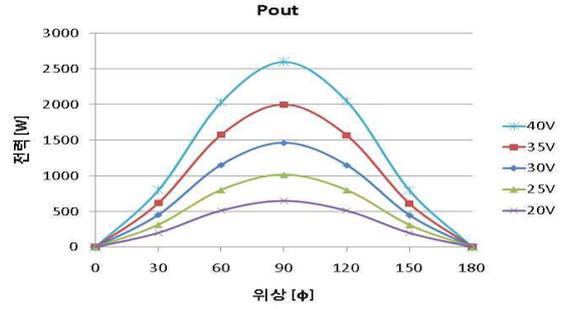


그림 6 슈퍼커패시터 모듈의 전압별 출력 전력(승압 모드)
Fig. 6 Output Voltage at each Voltage of Supercapacitor Module (Boost Mode)

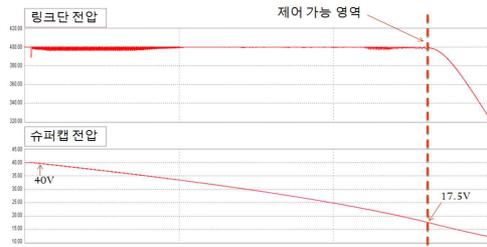


그림 7 승압 모드 시뮬레이션
Fig. 7 Boost Mode Simulation

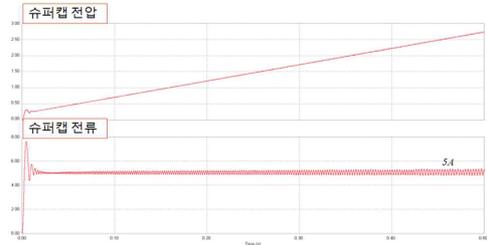


그림 8 강압 모드 시뮬레이션
Fig. 8 Buck Mode Simulation

3. 결론

본 논문에서는 충전 실험에 의해 슈퍼커패시터의 최적 충전 전류값을 찾아내고, EIS 실험 결과로부터 도출된 슈퍼커패시터 모듈의 임피던스를 이용하여 손실의 원인을 분석하였다. 또한, 양방향 하프브리지 컨버터를 설계하고 전류 및 전압 모드로 제어하여 만족스러운 충전 기능을 수행함을 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 추후 실험을 통해 시뮬레이션 결과를 검증할 계획이다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (20101020300260) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] 김상현, 이교범, 최세완, 최우진, "자연방전을 고려한 개선된 슈퍼커패시터의 동특성 모델 개발", 전력전자학회, Vol. 14, No. 3, pp. 177-260, 2009.
- [2] Fang Z. Peng, Hui Li, Gui-Jia Su and Jack S. Lawler, "A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 1, 2004.