

# 직렬형 Hot-Swap ESS에서 고장에 의한 과도 응답 분석

노준호, 이광운  
목포해양대학교

## Analysis of Transient Response by Fault in Series Connected Hot-Swap ESS

Jun-Ho Noh, Kwang-Woon Lee  
Mokpo National Maritime University

### ABSTRACT

본 논문에서는 직렬형 Hot-Swap ESS(Energy Storage System)에서 하나의 DC-DC 컨버터 모듈이 순간적으로 추가 또는 제거되는 고장 상황에서의 과도 응답에 대해 이론적 분석을 진행하였고, 컴퓨터 모의실험을 통해 분석 결과의 유효성을 검증하였다.

### 1. 서론

ESS(Energy Storage System)는 전력 생산 시에는 배터리에 전력을 저장하고, 계통에 전력을 공급할 시에는 배터리를 통하여 일정한 전력을 공급함으로써 전력 공급의 안전성을 확보할 수 있는 이유로 최근 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

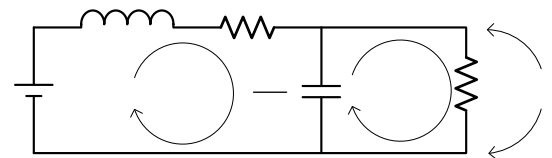
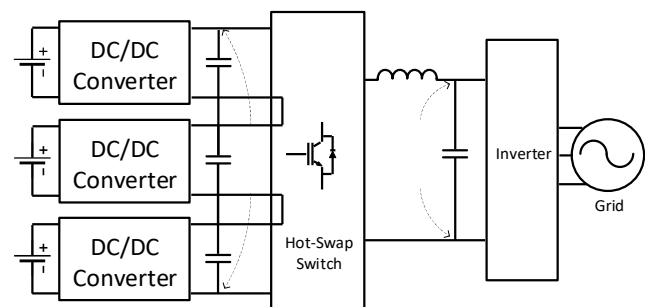
ESS에서 시스템 내부의 DC-DC 컨버터 모듈에 대한 수리 및 교체가 필요할 때 전체 시스템을 정지하지 않고 해당하는 DC-DC 컨버터 모듈만을 교체할 수 있는 기능을 Hot-Swap 기능이라고 한다.

직렬형 Hot-Swap ESS에서는 하나의 DC-DC 컨버터 모듈이 추가 또는 제거되는 고장 상황에서 직렬로 연결된 DC-DC 컨버터의 출력 전압에 순간적으로 변동이 발생하여 인버터 DC-Link와 인덕터에 과전압 및 과전류를 발생하게 된다. 이러한 과전압 및 과전류의 발생은 ESS의 운전을 중단시키는 주요한 원인 중 하나이다. 따라서 본 논문에서는 직렬형 Hot-Swap ESS에서 고장에 의한 과도 응답을 이론적으로 분석하고, 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 통해 분석이 적절하게 이루어졌는지 확인하고자 한다.

### 2. 직렬형 Hot-Swap ESS에서 고장에 의한 과도 응답 분석 및 개선

#### 2.1 등가회로 모델을 이용한 과도 응답 분석

Hot-Swap 가능한 직렬형 모듈라 ESS의 구성은 그림 1과 같다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 배터리 모듈의 양방향 전력 제어를 위해 양방향 DC-DC 컨버터가 사용되고, 계통과 전력 교환을 위해 DC-AC 인버터가 사용된다. 직렬형 모듈라 ESS에 사용되는 DC-DC 컨버터의 등가회로는 그림 2와 같다. 그림 2에서 DC-DC 컨버터의 출력 전압을 입력으로, 계통 연계 인버터의 DC-Link 전압을 출력으로 볼 때 L-C 표준 2차



시스템의 형태로 볼 수 있다. 그림 2의 등가 회로에서 모듈라 DC-DC 컨버터의 출력 전압을 입력으로, 계통 연계 인버터의 DC-Link 전압을 출력으로 볼 때 전달함수는 식 (1)과 같고, 인덕터 전류를 입력으로 계통 연계 인버터의 DC-Link 전압을 출력으로 볼 때 전달함수는 식 (2)와 같다.

아래의 수식에서  $V_{out}$ 는 모듈라 DC-DC 컨버터의 출력 전압,  $V_{in}$ 는 계통 연계 인버터의 DC-Link 전압,  $I_L$ 는 인덕터 전류,  $\omega$ 는 DC-DC 컨버터와 인버터 사이에 연결되는 인덕터의 인덕턴스와 등가 회로 저항,  $\omega_c$ 는 계통 연계 인버터의 DC-Link 캐패시턴스,  $\omega_{in}$ 는 계통 연계 인버터의 부하를 의미한다.  $\omega_{in} < \omega_c$ 는 비감쇠 고유 주파수,  $\omega_{in} > \omega_c$ 는 감쇠비를 의미하며,  $\omega_{in} < \omega_c$ 가 1보다 작은 경우 부족계동 응답을 보인다.

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{1 + s \left( \frac{L}{R} + \frac{1}{\omega_c^2} \right) + s^2 \frac{L}{\omega_c^2}} \quad (1)$$

$$\text{---} \quad \text{P} \quad \text{P} \quad (2)$$

$$\text{P} \quad (3)$$

$$\text{P} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 통해 직렬형 Hot-Swap ESS의 고장 상황에서 시스템의 파라미터에 따라 오버슈트가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

## 2.2 시뮬레이션을 통한 전압 및 전류 응답 분석

그림 3은 그림 2의 모듈라 DC-DC 컨버터 모듈의 등가회로에서  $L$  값은 1mH,  $C$  값은 1100uF,  $r$  값은 0.1Ω인 파라미터를 적용하여 DC-DC 컨버터 모듈이 순간적으로 추가되는 경우를 가정하기 위해  $V_{in}$ 가 700V에서 900V로 순간적으로 변동할 시에 부하 저항  $R_L$ 의 값에 변화에 따른 전류 및 전압 응답을 보여주며, 주어진 시뮬레이션 조건에서 전류 및 전압 응답은 부족 제동의 특성을 갖는 것을 보여준다.

그림 3에서 나타난 시뮬레이션 결과를 바탕으로 부족 제동 시스템에서 입력 전압의 순간적인 변동은 전압 및 전류에 큰 맥동을 발생시키는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 직렬형 Hot-Swap 모듈라 DC-DC 컨버터에서 하나의 모듈이 순간적으로 추가 또는 제거될 때 직렬로 연결된 DC-DC 컨버터의 출력 전압에 순간적인 변동이 발생하여 인버터 DC-Link와 인덕터에 과전압과 과전류가 발생하게 된다. 이러한 과도 상태에서 과전류 및 과전압은 전력변환 회로에 손상을 초래하며, 적절한 제어를 통해 과전류 및 과전압을 억제할 필요가 있다.

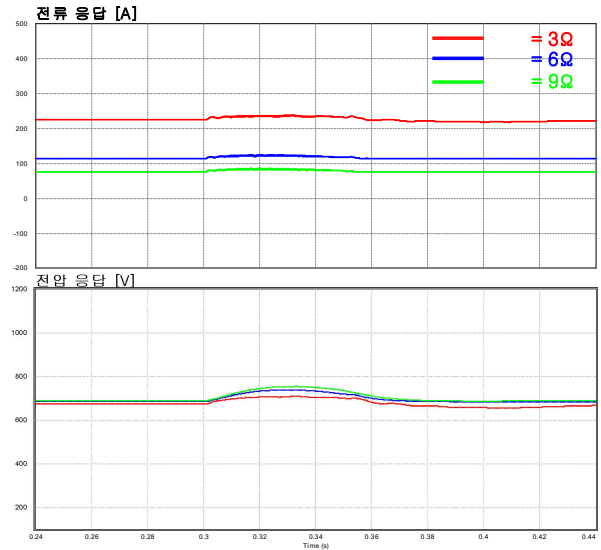
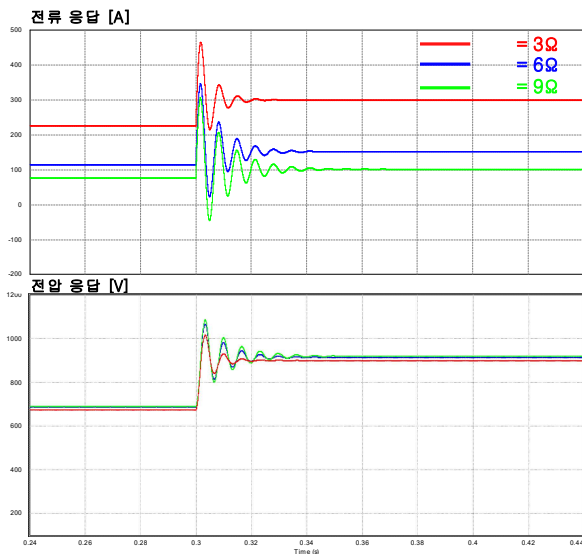


그림 4. 제안하는 방식을 적용한 경우의 전류 및 전압 응답  
Fig. 4. Current and voltage response when applying the proposed method

그림 4는 DC-DC 컨버터 모듈이 순간적으로 추가되는 경우 모듈라 DC-DC 컨버터 출력 전압의 순간적인 변동을 피하기 위해서 정상적인 DC-DC 컨버터 모듈에 연결되는 Hot-Swap 스위치의 PWM 시비율을 Ramp 신호 형태로 감소하도록, 고장 상황에서 순간적으로 추가되는 DC-DC 컨버터 모듈에 연결되는 Hot-Swap 스위치의 PWM 시비율을 Ramp 신호 형태로 증가하도록 제어할 시에 전류 및 전압 응답을 보여준다.<sup>[2]</sup> 0.3초에서 0.35초 사이에 고장 상황이 발생하여 제안하는 제어방식이 적용된 구간으로 그림 3과 비교할 때 과전압 및 과전류가 발생하지 않음을 알 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 직렬형 Hot-Swap ESS에서 고장에 의한 과도 응답에 대해 이론적인 분석을 진행하고, 부족 제동 시스템에서의 입력 전압의 순간적인 변동은 전압 및 전류에 큰 맥동을 발생시키는 문제점을 확인하였다. 따라서 이러한 문제점들을 개선할 수 있는 제어 방식을 제시하였고, 시뮬레이션을 통해 적절한 제어를 사용하여 과전압 및 과전류를 억제할 수 있음을 확인하였다.

이 본 연구는 산업통산자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20162010104490)

## 참고 문헌

- [1] 윤용범, "에너지저장장치(ESS)의 전력계통 적용", 전기의 세계, Vol. 63, No. 10, pp. 20-25, 2014.
- [2] Dae-Seak Cha & Jung-Sik Choi & Seung-Yeol Oh & Hyun-Jin Ahn & Young-Cheol Lim, 2018. "Hot-Swappable Modular Converter System Control for Heterogeneous Batteries and ESS," Energies, MDPI, Open Access Journal, vol. 11(2), pages 1-19, February.