

# Hot-Swap 전력변환시스템에서 전류센서 옵셋오차의 영향 분석

노준호, 이광운\*  
목포해양대학교

## Analysis on the effect of current sensor offset error in Hot-Swap power conversion system

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

### ABSTRACT

본 논문에서는 직렬형 Hot-Swap ESS(Energy Storage System)를 구성하는 전력 변환 시스템에서 전류 센서의 옵셋 오차가 제어 성능에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 양방향 DC-DC 컨버터와 DC-AC 인버터에서 전류 센서 옵셋 오차의 영향에 대해 분석하고, 컴퓨터 모의 실험을 진행하여 그 특성을 파악하였다.

### 1. 서론

배터리 모듈을 사용하는 ESS(Energy Storage System)에서 시스템 내부의 특정 배터리 모듈에 대한 수리 및 교체가 필요할 때 전체 시스템을 정지시키지 않고 해당되는 배터리 모듈만을 교체할 수 있는 기능을 Hot-Swap 기능이라고 한다.<sup>[1]</sup> Hot-Swap 가능한 ESS에서는 특정 배터리 모듈이 제거 또는 추가될 때 전력변환시스템의 적절한 제어를 통해 전류 및 전압 응답에 오버 슈트가 발생하는 것을 억제할 수 있어야 한다. 따라서 Hot-Swap 가능한 ESS에서는 각각의 전력변환 모듈에 다수의 전류 및 전압 검출 센서가 필요하며, 전류 및 전압 검출 센서의 오차는 시스템의 제어 성능에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 전력변환회로에서 전류 검출을 위해서는 일반적으로 홀-효과를 이용하는 전류 센서를 사용하며, 저비용으로 전류 검출을 하고자 하는 경우 셉트 저항을 이용한다. 홀 효과를 이용하는 전류 센서는 주변 온도에 따라 출력 값에 옵셋(offset)이 변동하는 특성이 있다. 셉트 저항을 이용하는 경우 전류를 복원하기 위한 별도의 노력이 필요하고, 전류를 검출할 수 없는 영역이 존재한다. 또한 셉트 저항의 양단 전압을 증폭하는 회로가 필요한데, 온도 변화에 따라 증폭 회로의 옵셋이 변동하게 된다.<sup>[2],[3]</sup>

Hot-Swap 가능한 ESS의 전력변환시스템은 전력 용량에 따라서 대 용량은 병렬 형으로, 중소 용량은 직렬 형으로 구성된다. 그림 1은 Hot-Swap 가능한 직렬 형 ESS의 전력변환시스템 구성을 보여준다. 그림 1에 나타난 바와 같이 배터리 모듈의 양방향 전력 제어를 위해 양방향 DC/DC 컨버터가 사용되고, 계통과의 전력 교환을 위해 DC/AC 컨버터가 사용된다. 양방향 DC/DC 컨버터는 배터리 모듈의 전류 검출 및 제어를 위해 전류 센서가 사용되고, DC/AC 컨버터에서는 계통 전류 검출 및 제어를 위해 전류 센서가 사용된다.

본 논문에서는 Hot-Swap 가능한 ESS용 전력변환시스템에서 각각의 전류 센서 옵셋 오차가 미치는 영향에 대해 이론적으로 분석하고, PSIM 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 통해 분석이 적절하게 이루어졌는지 확인하고자 한다.

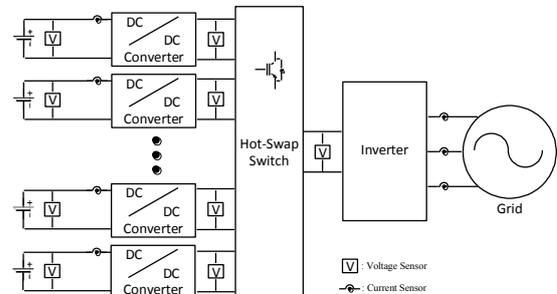


그림 1. Hot-Swap 가능한 직렬형 모듈라 ESS의 구성

Fig. 1. Configuration of series type modular ESS supporting Hot-Swap

### 2. 전류 센서 옵셋 오차의 영향

#### 2.1 DC-DC 컨버터에서 옵셋 오차의 영향

그림 1의 직렬형 Hot-Swap ESS에서 양방향 DC-DC 컨버터 모듈의 입출력 전류는 모두 동일한 값을 가지게 된다. 따라서 양방향 DC-DC 컨버터의 전류 센서에 옵셋 오차가 존재하는 경우 전류 제어 모드에서 컨버터의 출력 전압은 옵셋 오차의 영향을 받게 된다. 전류 센서의 옵셋 오차를  $i_{offset}$ , 컨버터의 입출력 전압 및 전류를 각각  $v_{in}, v_{out}, i_{in}, i_{out}$  이라고 할 때 컨버터의 손실을 무시하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$v_{in}(i_{in} - i_{offset}) = v_{out} i_{out} \quad (1)$$

그림 2는 표 1을 이용하여 3대의 양방향 DC-DC 컨버터 모듈이 직렬로 연결되어 있을 때 1대의 DC-DC 컨버터 전류 센서에 옵셋 오차가 존재하는 경우에 대해 모의실험을 진행한 결과이다. 그림 2로부터 전류 센서에 옵셋 오차가 존재하는 경우에 식(1)의 관계가 성립함을 확인할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Simulation parameters

DC-DC Converter		DC-AC Inverter	
Rated Voltage of Battery Module	20 [V]	DC-Link Voltage	180 [V]
Discharging Current of Battery Module	1 [A]	PWM Frequency	10 [kHz]
Inductor	10 [mH]	DC-Link Capacitor (DC/DC)	470 [uF]
Capacitor	470 [uF]	DC-Link Capacitor (Inverter)	470 [uF]
Bandwidth of Current Controller	2512 [rad/s]	Bandwidth of Current Controller	2512 [rad/s]

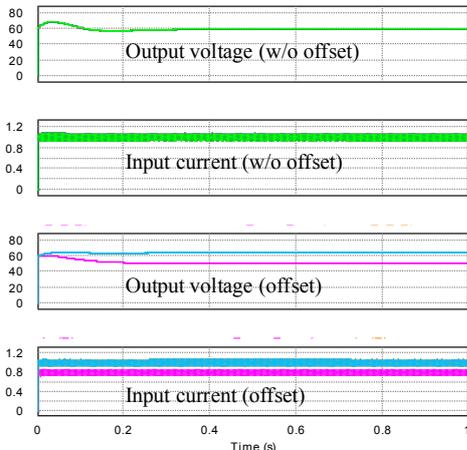


그림 2. DC-DC 컨버터에서 전류 오프셋 오차의 영향  
Fig. 2. Effect of current offset error in DC-DC converter

### 2.2 DC-AC 인버터에서 오프셋 오차의 영향

전류 벡터 제어를 수행하는 경우 전류 오프셋이 존재할 때 동기 좌표에서의 측정 전류에 대한 표현식은 다음과 같다. [3]

$$i_{dm} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \{i_d^*\} + \frac{s}{s + \omega_{cc}} \{\Delta i_{d\_off}\} - \frac{\omega_e s}{s^2 + (\omega_{cc} + R/L)s + (\omega_{cc} R/L)} \{\Delta i_{q\_off}\} \quad (2)$$

$$i_{qm} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \{i_q^*\} + \frac{s}{s + \omega_{cc}} \{\Delta i_{q\_off}\} + \frac{\omega_e s}{s^2 + (\omega_{cc} + R/L)s + (\omega_{cc} R/L)} \{\Delta i_{d\_off}\} \quad (3)$$

위에서  $\omega_{cc}$  는 전류제어기 대역폭,  $\omega_e$  는 계통 각주파수, RL은 계통 임피던스,  $\Delta i_{d\_off}$  와  $\Delta i_{q\_off}$  는 D,Q축에서의 오프셋 성분,  $i_d^*, i_q^*$  는 D,Q축에서의 전류 지령이다.

그림 3은 표 1의 파라미터를 이용하여 전류 오프셋 조건에서 DC-AC 인버터에 대해 시뮬레이션을 진행한 결과이다. 그림 3에서 A/D 컨버터의 분해능을 고려할 때 DC-Link에서의 전압 맥동보다는 D,Q축 전류에서의 맥동을 이용하는 것이 전류 오프셋 오차 보정에 유리함을 알 수 있다.

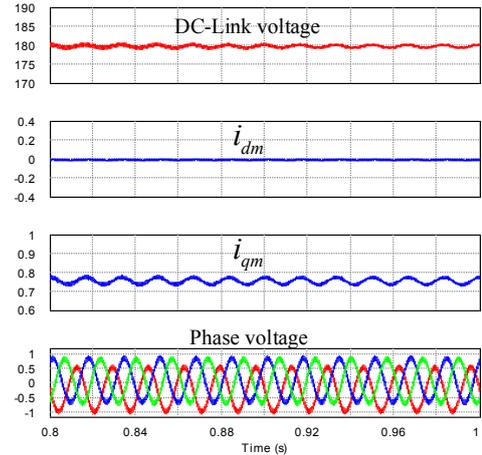


그림 3. DC-AC 인버터에서 전류 오프셋 오차의 영향  
Fig. 3. Effect of current offset error in DC-AC inverter

### 3. 결론

본 논문에서는 직렬형 Hot-Swap ESS에서 전류 센서 오프셋 오차의 영향에 대해 분석을 진행하였다. 양방향 DC-DC 컨버터의 경우 전류 오프셋 오차는 전류 제어 모드에서 출력 단 전압의 차이로 나타남을 확인하였다. 따라서 양방향 DC-DC 컨버터를 전류 제어 모드로 동작하고, 입력 전력과 출력 전력의 관계를 이용하면 전류 오프셋 오차를 보정할 수 있다. DC-AC 인버터에서 전류 센서의 오프셋 오차는 전원 주파수와 동일한 주파수의 맥동을 상 전류 및 인버터 DC-Link 전압에 발생시킨다. DC-Link에서의 전압 맥동의 경우 커패시터 용량에 따라 그 크기가 작게 나타날 수 있어 측정 전류의 맥동을 이용하여 전류 오프셋 오차를 보정하는 것이 유리함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 향후 본 연구 결과를 이용하여 직렬형 Hot-Swap ESS에서의 전류센서 오프셋 오차 보정 방식을 제안할 계획이다.

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

### 참고 문헌

- [1] Mukherjee, Nilanjan, D. Strickland, and M. A. Varnosfaderani, "Adaptive control of hybrid battery energy storage systems under capacity fade", EPE Journal, Vol. 25, No. 4, pp. 25-33, July 2017
- [2] Q. N. Trinh, P. Wang, Y. Tang, L. H. Koh and F. H. Choo, "Compensation of DC Offset and Scaling Errors in Voltage and Current Measurements of Three-Phase AC/DC Converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 6, pp. 5401-5414, June 2018.
- [3] K. Lee and S. Kim, "Dynamic Performance Improvement of Current Offset Error Compensator in Current Vector-Controlled SPMSM Drives," in IEEE Transactions on Industrial Electronics. doi: 10.1109/TIE.2018.2877162