

## 부하변동에 따른 HESS 하프 브리지 컨버터의 출력특성 개선에 관한 연구

하용호<sup>1</sup> · 정태욱<sup>2</sup> · 황선환<sup>†</sup> · 김진수<sup>3</sup> · 박종원<sup>4</sup>

(Received August 20, 2019 ; Revised October 25, 2019 ; Accepted November 20, 2019)

### A study on improvement of output characteristics of HESS half-bridge converter for load variations

Yong-Ho Ha<sup>1</sup> · Tae-Uk Jung<sup>2</sup> · Seon-Hwan Hwang<sup>†</sup> · Jin-Soo Kim<sup>3</sup> · Jong-Won Park<sup>4</sup>

**요약:** 본 논문에서는 슈퍼 커패시터를 갖는 하이브리드 에너지저장시스템(HESS, Hybrid Energy Storage System)의 하프 브리지 컨버터를 이용한 출력측 부하변동에 따른 운전 특성을 개선하기 위한 제어기법을 제안한다. 일반적으로 리튬이온 배터리 기반의 에너지저장시스템의 출력측 전력제어를 위해서는 부하와 연동된 직류단의 전력정보가 필요하고 이를 위해 전압과 전류 정보가 반드시 필요하다. 하지만, 리튬이온 배터리 기반의 에너지저장시스템은 출력측 전력제어 시 출력측 부하가 변동하게 되면 리튬이온 배터리의 느린 응답성으로 인해 실제전력과 지령전력과의 오차를 발생한다. 이러한 운전특성을 개선하기 위해서 슈퍼 커패시터를 갖는 에너지저장시스템을 출력측 직류단에 병렬로 연결하여 부하 변동에 따른 응답성을 개선하고자 한다. 본 논문에서는 전류 제어 지령에 저역통과필터를 적용하여 슈퍼 커패시터의 초기 충전 시 발생하는 돌입전류를 제한하고 부하에 따른 출력특성 개선하기 위한 기법을 제안하고 실험을 통해 타당성과 유효성을 검증하였다.

**주제어:** 슈퍼 커패시터, 하이브리드 에너지저장시스템, 전력제어, 하프 브리지 컨버터

**Abstract:** This paper proposes a control algorithm to improve the power control operation characteristics according to the load variation using the HESS (Hybrid Energy Storage System) half-bridge converter with super-capacitor. Generally, in order to control the power of the output side of an energy storage system based on a lithium-ion battery, the information of the voltage and current of the DC-link is required. However, the energy storage system based on the lithium-ion battery causes the error between the actual power and the command power due to the slow response of the lithium-ion battery when the output side load is changed. As a result, an energy storage system including a super-capacitor is connected in parallel to the DC-link to improve the responsiveness to the load. In this paper, a low-pass filter is applied to the current control command to limit the inrush current generated during initial charging of the super-capacitor and to improve the output characteristics according to the load. And the validity and effectiveness of the proposed algorithm are verified through the experiments.

**Keywords:** Super-capacitor, Hybrid energy storage system, Power control, Half-bridge converter

## 1. 서론

최근 에너지저장시스템, 신재생에너지 및 분산전원 시스템에 적용되는 전력변환장치의 경우 전력품질 및 부하에 따른 응답성 등의 향상을 위한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 분산전원을 이용한 발전시스템은 불규칙한 발전 및 전력수요에 효율적으로 대응하기 위해서 에너

지저장시스템의 필요성이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 그 결과 에너지저장시스템에서는 에너지밀도가 높고 효율이 좋은 리튬이온 배터리가 주목을 받고 있다. 이러한 특징으로 인해 다양한 용량에 대한 대응이 용이하고 친환경 특성이 있어 가정 및 산업용으로 보급이 확대되고 있다 [1]. 하지만, 단위 용량당 가격이 높고 폭발 위험 등이 존재

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6978-5235>): Professor, Department of Electrical Engineering, Kyungnam University, 7 Kyungnamdaehak-ro, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51767, Korea. E-mail: seonhwan@kyungnam.ac.kr, Tel: 055-249-2744

1 Research Engineer, Open Innovation Center Researcher, Destin Power, E-mail: yongho.ha@destinpower.com, Tel: 031-778-5900

2 Professor, Department of Electrical Engineering, Kyungnam University, E-mail: tujung@kyungnam.ac.kr, Tel: 055-249-2628

3 Senior Research Engineer, R&D 3th Team, GMB Korea Corp., E-mail: jskim@gmb.co.kr, Tel: 055-263-2131

4 Team Leader, R&D 3th Team, GMB Korea Corp., E-mail: jwpark@gmb.co.kr, Tel: 055-263-2131

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하며, 출력단의 부하 급변 시 리튬이온 배터리의 느린 응답성으로 인해 에너지저장시스템을 통한 전력품질 제어 시 문제를 야기할 수 있다.

에너지저장장치의 응답성에 따른 실제 전력과 지령 전력의 오차로 인한 전력 및 전류 제어기의 동작 특성 저하와 더불어 출력 안정화에 영향을 줄 수 있다. 또한, 본 연구의 에너지저장시스템은 병렬로 구성된 슈퍼커패시터를 가지고 있고 이의 초기 동작 시 과도한 돌입전류로 인해 스위칭 소자 소손 및 과전류 현상이 발생할 수 있다. 이러한 출력 안정화 및 돌입 전류 제한을 위해 저역통과필터를 갖는 전력 제어기를 구성하고 실제 전력과 지령 전력과의 오차에 기반한 제어기를 설계하여 리튬이온 배터리의 응답성을 개선함과 동시에 실제 전력과 지령 전력의 전력 차를 슈퍼커패시터의 충/방전 동작에 의해 감소시킬 수 있다[2][3].

Figure 1은 리튬이온 배터리와 슈퍼커패시터를 갖는 하이브리드 에너지저장시스템을 보여주고 있다[4]. 에너지저장장치는 양방향전력변환장치와 리튬이온 배터리 및 슈퍼커패시터로 구성되어 있고, 개별 에너지저장장치의 출력은 직류단을 기준으로 병렬 연결되어 있다. 이를 통해서 리튬이온 배터리와 출력측 전력의 안정적인 협조 운전을 위해 슈퍼커패시터의 전력을 충/방전 제어함으로써 전체적인 에너지저장시스템의 성능을 개선할 수 있다.

본 논문에서는 리튬이온 배터리와 슈퍼커패시터의 협조 운전을 위해 출력측 전력을 측정 비교하여 제어할 수 있는 전력 제어기를 구성하고 이의 출력측 전류 지령에 저역통과필터를 적용하여 슈퍼커패시터의 전류 제어 특성을 개선하는 기법을 제안하고자 한다.

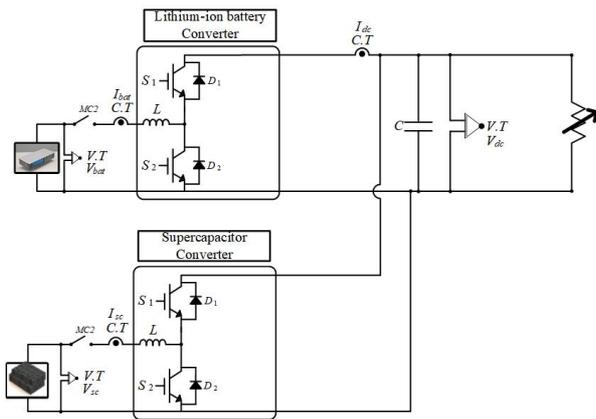


Figure 1: Schematic of HESS half-bridge converter

## 2. HESS 하프 브리지 컨버터의 해석

### 2.1 HESS 하프 브리지 컨버터의 동작 모드

본 논문에서 제안하는 HESS 하프 브리지 컨버터의 출력단 전력 특성 개선을 위해서 Figure 1과 같이 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다[4]-[6]. 기본적인 구성 및 파라미터는 Table 1에 기술하였고 부하변동 시 전력 오차의 영향

Table 1: Specifications of HESS half-bridge converter

Items	Specification
Lithium-ion battery	201[V], 15.6[AH]
Super-capacitor	300[V], 3[F]
DC link capacitor	1650[uF], 900[V]
Reactor of battery	15[mH]
Reactor of super-capacitor	10[mH]
Switching frequency	10[kHz]
IPM[PM75CLA120]	1200[V], 75[A]
Sampling period	100[us]

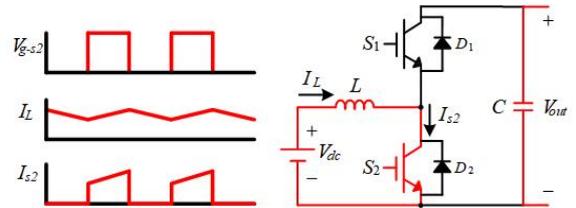


Figure 2: Boost mode 1 of HESS half-bridge converter

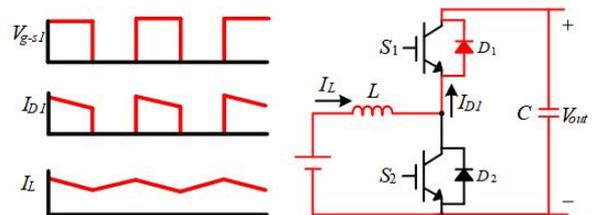


Figure 3: Boost mode 2 of HESS half-bridge converter

을 살펴보기 위한 부하변동 실험을 수행하였다.

Figure 2는 HESS 하프 브리지 컨버터 부스트 모드 1의 동작 특성을 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 S2가 턴-온 되었을 때는 하단 스위치 S2를 통해 전류 흐름이 발생되고 리액터 전류는 증가하게 되며 리액터에는 에너지가 저장된다. 입력전류가 스위치 S2를 통해 흐르게 되면 리액터의 전류와 입력전류는 같으며, 이는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 출력측 직류단의 커패시터에 저장되어 있던 에너지는 부하에 전달되며 커패시터의 전압은 감소하게 된다.

$$I_{s2} = I_L = \frac{1}{L} \int_0^{DT} V_L dt + I_L(0) = \frac{V_{IN}}{L} DT + i_L(0) \quad (1)$$

Figure 3은 S2가 OFF되었을 때의 전류의 흐름을 나타내고 있으며, 스위치가 턴-오프 되면 리액터의 전류는 감소하게 되고 다이오드 D1를 통해 전류가 흐르게 된다. 그 결과, 커패시터는 충전되고 부하측에는 에너지를 전달된다. 리액터에 흐르는 전류는 다이오드 D1에 흐르는 전류 크기와 같다. 부스트 모드 2에서는 승압되는 전압은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{out} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (2)$$

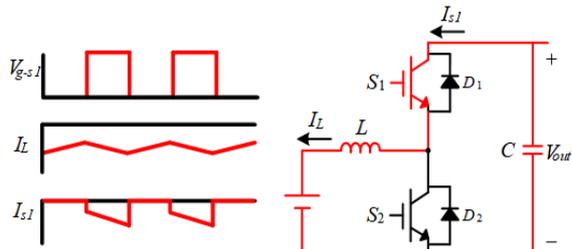


Figure 4: Buck mode 1 of HESS half-bridge converter

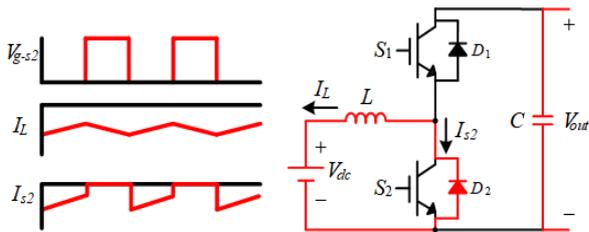


Figure 5: Buck mode 2 of HESS half-bridge converter

Figure 4는 벡 모드 1에서 S1이 턴-온 되었을 때의 전류 흐름을 나타낸다. S1이 턴-온되면 입력 전압이 회로에 연결되며 부하에 전압이 인가된다. 이로 인해 리액터에 흐르는 전류는 스위치에 흐르는 전류와 같고 식 (3)과 같이 정의된다.

$$I_{S2} = I_L = \frac{1}{L} \int_0^{DT} V_L dt + I_L(t) = \frac{V_{out} - V_{IN}}{L} DT + I_L(0) \quad (3)$$

Figure 4와 Figure 5는 HESS 하프 브리지 컨버터의 벡 동작을 설명하고 있다. Figure 4에서 알 수 있듯이 HESS 하프 브리지 컨버터는 벡 동작 시 S1이 턴-온되면 직류단 전압이 입력 전압원과 연결이 되며 S1이 턴-오프 되면 리액터는 전류원으로 동작하게 된다. 이 때 전류는 스위치 S2의 다이오드를 통하여 흐르고 벡 동작에 대한 입력과 출력의 관계는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$V_{IN} = DV_{out} \quad (4)$$

HESS 하프 브리지 컨버터의 리액터 선정 값은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 리액터 값이 클수록 전류리플은 감소하지만 리액터 소자의 크기와 무게가 증가함으로 적절한 리액터의 값을 구하여 설계하여야 한다.

$$L_{min} = \frac{V_{IN} \times (V_{out} - V_{IN})}{\Delta I_L \times f_s \times V_{out}} \quad (5)$$

여기서,  $\Delta I_L$ 는 전류리플,  $V_{IN}$ 는 입력전압,  $V_{out}$ 는 출력전압,  $f_s$ 는 스위칭 주파수를 각각 나타낸다.

또한, 직류단 커패시터를 설계함에 있어 적절한 방법은 낮은 ESR을 갖는 커패시터를 사용하여 출력단에서 리플과 손실을 최소화하는 것이며 식 (6)과 같은 방법으로 커패시터의 용량을 선정한다.

$$C_{min} = \frac{I_{out} \times D}{f_s \times \Delta V_{out}} \quad (6)$$

여기서, D는 듀티비,  $I_{out}$ 은 출력전류,  $f_s$ 는 스위칭 주파수,  $\Delta V_{out}$ 는 출력전압의 맥동을 나타낸다.

## 2.2 제안한 HESS 하프 브리지 컨버터의 전력 제어 알고리즘

Figure 6은 리튬이온 배터리와 슈퍼커패시터를 포함한 BESS의 전체 전력 제어 흐름도를 나타내고 있다. 전력변환 장치의 출력측 전압과 전류를 측정한 후 실제 전력을 연산하고 이를 전력 제어기에 반영한 후 전류 지령을 생성한다. 이후 실제 전력과 지령 전류를 비교하여 전력 차를 슈퍼커패시터용 하프 브리지 컨버터를 이용하여 전력 차에 해당되는 전력을 제공하도록 운전한다.

Figure 7은 리튬이온 배터리를 제어하기 위한 전력 제어기와 전류 제어기를 보여주고 있다.

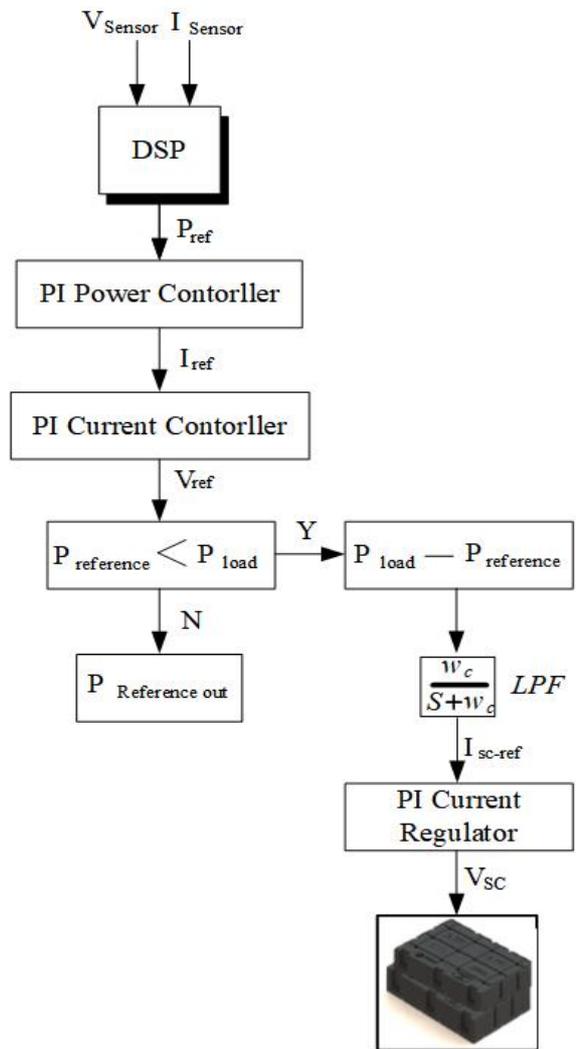


Figure 6: Flowchart of HESS half-bridge converter

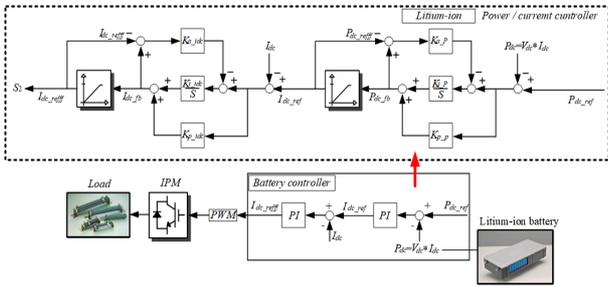


Figure 7: Power control block diagram of Li-ion battery

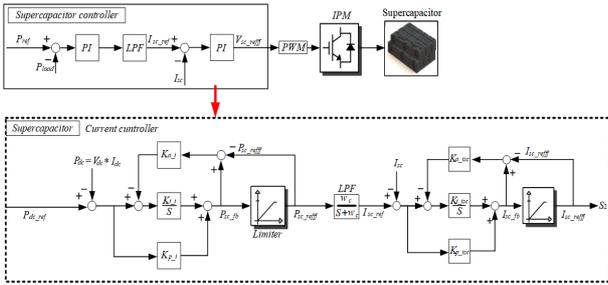


Figure 8: Power control block diagram of super-capacitor

식 (7)은 PI 전력 제어기의 전달함수를 나타낸다[7].

$$G_{II}(s) = K_{p-p} + \frac{K_{i-p}}{s} = \frac{K_{p-p}(s + \frac{K_{i-p}}{K_{p-p}})}{s} \quad (7)$$

Figure 8은 슈퍼커패시터 제어 알고리즘을 나타내며 부하 변동에 대한 출력측 직류단의 실제 전력인  $P_{dc}$ 와 지령 전력  $P_{dc\_ref}$ 만큼의 차이를 PI 전력 제어기를 통하여 보상하여 주고 PI 전력 제어기 출력인 전류 지령에 저역통과필터를 적용하여 슈퍼커패시터 충전 또는 방전 시 발생하는 돌입 전류를 제한시켜주도록 설계를 하였다.

### 3. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 HESS 하프 브리지 컨버터의 출력 특성 개선을 위한 알고리즘을 검증하기 위해 Figure 9와 같이 시스템을 구성하여 실험을 수행하였으며, 기본구성 및 시스템 파라미터는 표 1에 기술하였다. 전력 제어 시 부하 변동에 대한 전력 불안정 현상을 살펴보기 위하여 200[W] 및 300[W] 전력을 인가하여 실험을 수행하였다.

Figure 10은 부하변동에 따른 전력변동 실험에 대한 결과로 200[W] 및 300[W] 지령에 대한 부하변동 결과이다. 전력 제어를 수행하고 있는 동안 부하를 변동하였을 경우, 그림 10에서 볼 수 있듯이 실제 전력이 지령 전력을 바로 추종하지 않고 일정한 전력 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 실험을 총 3회 반복하여 실제 전력이 지령 전력을 추종하는데 걸리는 시간을 정리하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. Table 2에서 알 수 있듯이 200[W] 지령 전력의 경우, 0.846[s] 이고 300[W] 지령 전력에서는 0.646[s]의

평균 지연 시간이 나타나는 것을 확인하였다.

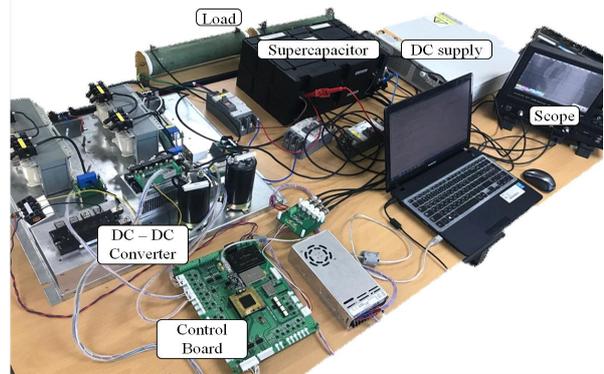


Figure 9: Experimental setup of HESS

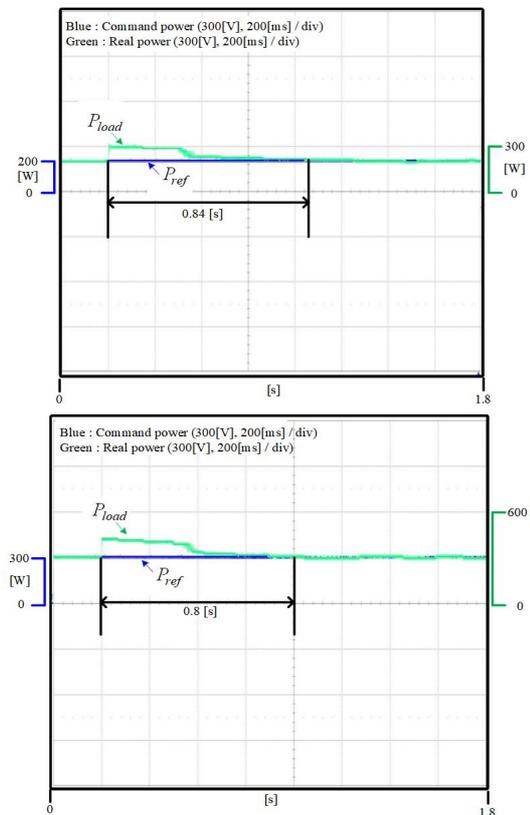


Figure 10: Output instability of power control of load variation(200[W], 300[W])

Table 2: Power control of load variation

	200[W]		300[W]	
	Real power	Time	Real power	Time
1	Real power	300[W]	Real power	400[W]
	Time	0.84[s]	Time	0.68[s]
2	Real power	300[W]	Real power	400[W]
	Time	0.88[s]	Time	0.64[s]
3	Real power	300[W]	Real power	400[W]
	Time	0.82[s]	Time	0.62[s]
Average	Real power	300[W]	Real power	400[W]
	Time	0.846[s]	Time	0.646[s]

Figure 11은 200[W] 지령 전력 조건에서 부하변동에 의한 직류단 전압과 직류단 전류를 보여주고 있다. 부하 변동시 지령 전력을 추종하기 위해서 직류단 전압과 전류가 변동됨을 확인할 수 있고 추종 시간이 약 0.9[s] 동안 나타낸다.

따라서 이를 저감하기 위해 제안된 알고리즘을 적용한 결과, Figure 12와 같이 출력단의 부하 변동에 따른 전력 오차를 추종하는 시간을 감소시킬 수 있다.

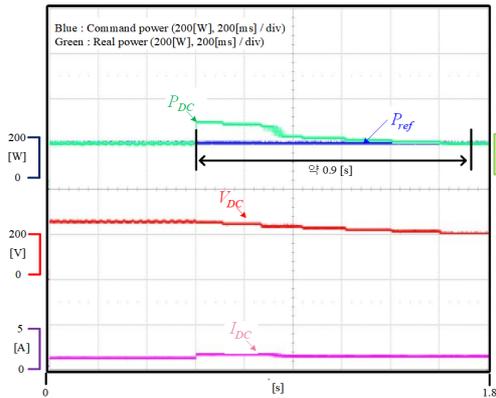


Figure 11: Waveform of output instability of power control(200[W])

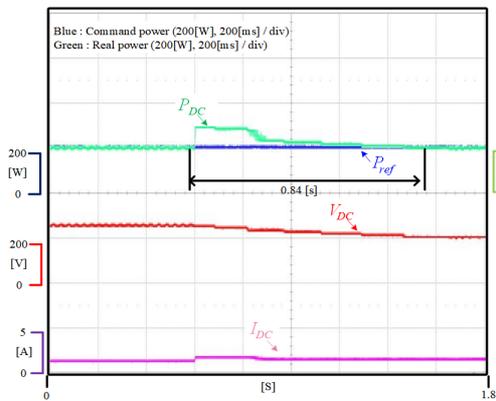


Figure 12: Power control after using proposed algorithm(200[W])

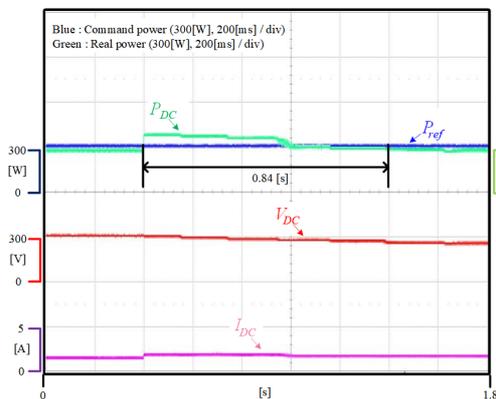


Figure 13: Output instability of power control(300[W])

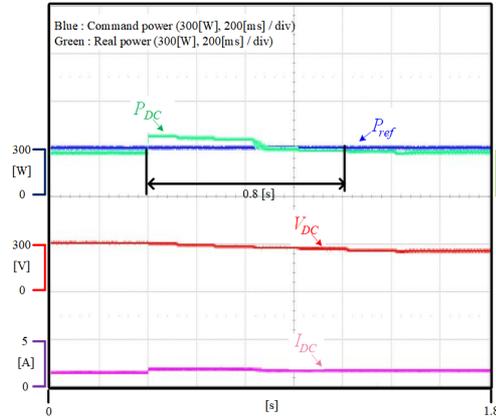


Figure 14: Power control after using proposed algorithm(300[W])

Figure 13과 Figure 14는 제안한 각각 알고리즘의 적용 후에 대한 지령 전력 300[W] 기준 시 부하변동 실험으로 출력단 부하의 전력, 전압 및 전류파형을 나타낸다. 그림 13으로부터 부하변동에 의해 출력단의 전력이 최대 약 400[W] 변동하였고 이후 지령 전력에 도달하는 시간은 약 0.84[s] 동안 나타났다.

이러한 부하변동의 영향을 저감하기 위해서 제안된 알고리즘을 사용한 결과, 출력단의 부하변동에 따른 지령 전력과 실제 전력의 오차가 감소하는 것을 Figure 14의 실험을 통해 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 BESS 하프 브리지 컨버터의 리튬이온 배터리로 구성된 에너지저장시스템의 부하변동에 따른 출력특성 개선을 위해 하프 브리지 컨버터를 갖는 슈퍼커패시터 에너지저장장치를 병렬로 구성하여 출력 전력을 안정화하는 알고리즘을 제안하였다. 슈퍼커패시터 대비 리튬이온 배터리의 부하 변동에 따른 느린 응답성은 순시적인 부하의 변동에 전력을 제어함에 있어 제한적인 특징을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 슈퍼커패시터를 이용한 하이브리드 에너지저장시스템이 적용하여 전체 시스템의 응답성을 향상시키고자 한다. 하지만 슈퍼커패시터 충/방전 동작 시 돌입전류에 대한 문제로 인하여 슈퍼커패시터 용량에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 저역통과필터를 적용한 슈퍼커패시터 기반의 HESS 출력특성 개선에 관한 알고리즘을 제안하였다. 리튬이온 배터리의 응답성에 따른 전력 오차를 보상하기 위한 슈퍼커패시터의 충/방전제어를 발생하는 돌입 전류를 저감하여 출력특성 개선할 수 있다. 또한, 부하변동시 발생하는 입/출력 전력 오차에 대하여 슈퍼커패시터의 충/방전 동작을 통해 출력단의 전압을 안정적으로 제어할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “국가혁신클러스터 R&D” (과제번호 P0006906 연료전지 시스템 및 열관리 부품 개발·제작기술)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

## Author Contributions

Conceptualization, Y. H. Ha and S. H. Hwang; Methodology, Y. H. Ha; Software, Y. H. Ha; Validation, Y. H. Ha and S. H. Hwang; Formal Analysis, Y. H. Ha; Investigation, Y. H. Ha; Resources, Y. H. Ha; Data Curation, Y. H. Ha; Writing–Original Draft Preparation, Y. H. Ha; Writing–Review & Editing, S. H. Hwang; Visualization, Y. H. Ha; Supervision, S. H. Hwang; Project Administration, S. H. Hwang; Funding Acquisition, S. H. Hwang;

## References

- [1] J. Y. Yun, G. R. Yu, K. S. Kook, D. H. Rho, and B. H. Chang, “SOC-based control strategy of battery energy storage system for power system frequency regulation,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 5, pp. 622-628, 2014 (in Korean).
- [2] W. S. Cho, B. G. Han, H. J. Jeong, S. W. Choi, D. K. Yang, M. K. Kim, and S. J. Oh, “Development of ultra-capacitor charger with wide voltage range using hybrid SiC,” *Proceedings of Power Electronics Conference*, pp. 115-116, 2017 (in Korean).
- [3] S. J. Kim, M. H. Kwon, S. W. Choi, D. O. Hwang, D. J. Lee, and S. M. Park, “Controller design for hybrid ESS using dual core DSP TMS320F28337D,” *Proceedings of Power Electronics Conference*, pp. 159-160, 2015 (in Korean).
- [4] S. M. Kim, E. C. Lee, Y. S. Oh, and K. S. Ahn, “Design of bidirectional PWM converter for 15 charging-discharging,” *Proceedings of Power Electronics Conference*, pp. 483-484, 2011 (in Korean).
- [5] J. S. Park, W. G. Shin, S. Y. Cho, D. H. Seo, and S. H. Cho, “DC-DC converter design for battery charge,” *Proceedings of the Korean Society of Automotive Engineers*, p. 1012, 2015 (in Korean).
- [6] T. Y. Lee, B. G. Cho, Y. H. Cho, C. O. Hong, H. S. Lee, and K. Y. Cho, “Design of a 2kW bidirectional synchronous DC-DC converter for battery energy storage system,” *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 312-323, 2017 (in Korean).

- [7] D. W. Chung, “Development of regenerative energy storage system for an electric vehicle using super-capacitors,” *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 3, pp. 544-551, 2011 (in Korean).