

핫스왑 기능을 가지는 에너지저장시스템용 모듈라 PCS 개발

안강순¹, 이상택², 오용승^{1*}

¹한양대학교 전자전기 제어계측공학과, ²전자부품연구원 자동차전장연구센터

Development of the Modular PCS for ESS with Hot-swap Function

Kang-Soon Ahn¹, Sang-Taek Lee², Yong-Seung Oh^{1*}

¹Division of Electronic, Electrical, Control & Instrumentation Engineering, Hanyang University

²Division of Automotive Electronics Center, Korea Electronics Technology Institute

요 약 에너지저장시스템(Energy Storage System)은 생산된 전력을 필요한 시기에 선택적으로 저장하고 사용함으로써 에너지 효율을 극대화 시키는 시스템이다. 따라서 언제든지 에너지를 충전하거나 공급할 수 있는 상태를 유지하여야 하며, 고장이나 유지보수 시에도 비운영 시간을 최소화하여야 한다. 하지만 현재 대용량 에너지저장시스템은 구조적 문제로 유지보수 시 반드시 운영을 정지하여야 한다. 본 논문에서는 대용량 에너지저장시스템용 모듈라(Modular)를 병렬 구성하여 1MW급 에너지저장시스템용 PCS를 제작하고, 시스템에서 동작 상태를 유지하면서 시스템을 구성하는 요소들의 교체, 변경, 수리가 가능한 핫스왑(Hot Swap) 기술을 실험을 통해 검증하였다.

주제어 : 융합, 핫스왑, 모듈라, 모듈라 PCS, 에너지저장시스템

Abstract Energy Storage System(ESS) is a system that maximizes energy efficiency by selectively storing and using the generated power when needed. Therefore, energy must be able to be charged or supplied at any time, and non-operating time should be minimized even in the case of failure or maintenance. However, current large-capacity energy storage systems must be shut down during maintenance due to structural problems. In this paper, we propose a PCS for 1MW ESS by configuring modular for large capacity ESS in parallel and verified of the hot swap technology that can replace, change, and repair the components that make up the system while keeping the system operating.

Key Words : Convergence, Hot-swap, Modular, Pluggable Connector, Energy Storage System

1. 서론

에너지저장시스템은 생산된 전기에너지를 배터리에 저장하였다가 전기에너지 공급이 필요할 때 저장된 에너지를 활용하여 계통 혹은 부하에 공급하는 시스템으로 전력저장장치, 전력변환장치, 운영시스템으로 구성된다.

에너지저장시스템을 활용하면 잉여전력을 저장하였다가 필요 시 사용할 수 있는 효율적 전력 활용이 가능하기 때문에 안정적인 전력공급이 중요시 되는 병원, 데이터 센터, 반도체 산업 등에서 무정전 전력공급시스템(UPS) 기능을 통합하여 운용하기도 한다. 따라서 안정적인 운영과 신뢰성은 에너지저장시스템에서 중요한 요소이고 에

*This work was partly supported by Institute for Information & communications Technology Promotion(IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2015-0-00266) and Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea. government(MOTIE) (No.20162010104490).

*Corresponding Author : Yong-Seung Oh(dreamsail@hanyang.ac.kr)

Received Feuary 1, 2018

Revised March 5, 2018

Accepted March 20, 2018

Published March 28, 2018

너지저장시스템의 고장이나 유지보수 시에도 비운영 시간을 최소화하여야 할 필요성이 있다. 그러나 기존 에너지저장시스템은 고장이 발생하거나 유지보수 시에는 반드시 시스템의 운영을 중지하여야 하는 구조적인 어려움이 있다. 이를 보완하기 위해 시스템을 이중화하기도 하지만 대용량 시스템으로 갈수록 비용의 증가와 어려움은 더욱 크게 발생된다.

일부 수 kVA 내외의 소용량 무정전 전력공급시스템에서는 전력변환장치와 배터리를 수백 VA급으로 모듈화함으로써 비정지 운영 및 핫스왑 기술을 구현하기도 하였으나, 단위 모듈에 배터리가 포함되어 있고 단위 모듈의 용량이 작아 MW급의 대용량 시스템을 구성하기는 어려운 실정이다. 또한 대부분의 에너지저장시스템용 PCS는 집중화 방식(Central Type)으로 전력변환기가 구성되어 구조적인 한계도 지니고 있다[1-8].

따라서 대용량 에너지저장시스템에서도 비운영 시간을 최소화 하고 유지보수 시 동작 상태를 유지하면서 시스템을 구성하는 요소들의 교체, 변경, 수리가 가능한 핫스왑(Hot-swap) 기술에 대한 개발이 필요하다[9-12].

에너지저장시스템에 핫스왑 기술을 적용하기 위해서는 구성 요소들을 단위 기준으로 모듈화 하여 시스템을 병렬 모듈화하고 각 주요 요소들의 구조가 교체 및 탈부착에 용이하며 이런 구조의 시스템을 적합한 운영알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 MW급 대용량 에너지저장시스템 구성에 적합한 250[kW]급 단위 모듈라 PCS (Power Conditioning System)를 설계 제작하여 안정적인 동작 상태를 확인하고 단위 모듈라로 병렬 구성된 1MW급 에너지저장시스템을 제작하여 시스템 운영 중 단위 모듈라의 교체, 변경, 수리가 가능한 핫스왑 기술을 적용하고 이의 유용함을 검증하였다.

2. 핫스왑이 가능한 모듈라 PCS

2.1 이전 시스템 구성

에너지저장시스템용 모듈라 PCS는 그림 1과 같이 전력변환기의 구성 방법에 따라 하나의 집중화 방식(Central Type)과 다수개가 결합된 병렬화 방식(Parallel Type)으로 나누어지는데 일반적으로 시스템 운영 중 고장이 발생할 경우 반드시 시스템의 운영을 중지하여야 유지보수가 가능하다. 일부 병렬화 방식 구조에서는 고

장 부위만을 제거한 뒤 재 운영을 할 수 있기도 하지만 운영 신뢰성이 요구되는 곳에서는 시스템을 이중화 하는 등의 추가 설비를 구성하게 된다.

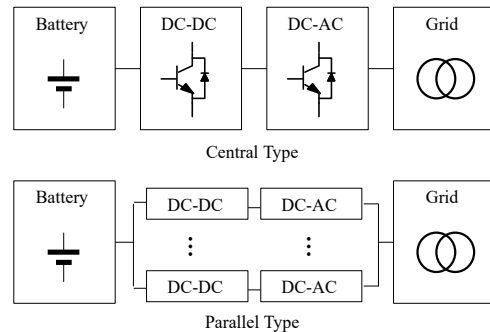


Fig. 1. Configuration of Power Converter for ESS

2.2 제안 시스템의 구성

핫스왑 운영을 위한 단위 모듈라는 효율을 높이고 크기와 무게를 감소시키기 위해 그림 2와 같이 3레벨 MNPC (Mixed Voltage Neutral Point Clamped)로 설계하였다. 1MW 에너지저장시스템용 PCS를 위해 단위 모듈라의 용량은 250kW설계하였고, 단위 모듈라 4개를 병렬 연결하여 그림 3과 같이 1MW 에너지저장시스템용 PCS가 구성된다. 각 모듈라 PCS의 계통 출력은 하나로 연결되고 입력은 배터리와 연결되는 있는데 각 입력을 개별로 구성할 수 있어 배터리 외에 태양광, 연료전지 등

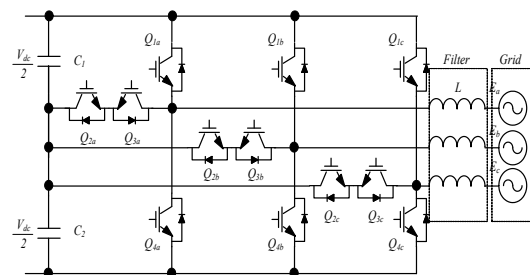


Fig. 2. Topology of modular PCS

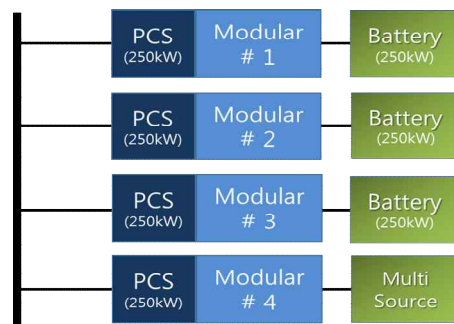


Fig. 3. Configuration of 1MW PCS for ESS

다양한 입력을 받을 수 있고 모듈라 별로 차단과 결합을 용이하게 하도록 입력과 출력에 차단기를 두었다.

Table 1. Specification of 1MW PCS

Input Voltage	650 ~ 1000V
Input Current	1,586A
Line Voltage	1,000kW
Line Voltage	380Vrms(-12% ~ 10%)
Line Frequency	60[Hz](59.3 ~ 60.5Hz)
Line Current	1,723Arms
Power Factor	> 0.95
THD(AC Current)	< 5% Total, < 3% Individual
Efficiency (DC-AC)	> 98%

2.3 누설전류 감소를 위한 MVPWM 기법

PCS의 누설전류를 감소 또는 제거하기 위해 PCS의 공통모드전압(Common Mode Voltage)의 변동을 최대한 감소 또는 제거하는 것으로 MVPWM(Medium Vector Pulse Width Modulation)을 사용하였다. 이는 3레벨 MNPC 인버터에서 동일한 공통모드 전압을 갖는 7개의 공간 벡터만을 사용하여 출력전압을 합성하는 PWM 방식이다. 그림 4는 중성점을 통해 흐르는 누설전류를 나타내기 위해 그림 2를 등가적으로 표현하였다. 누설전류의 크기는 식 (1), 식 (2)와 같다[13-15].

$$i_{\leq akage} = \frac{3}{Z_f + 3Z_{\leq akage}} v_{CM} \quad (1)$$

$$v_{CM} = \frac{v_{AN} + v_{BN} + v_{CN}}{3} \quad (2)$$

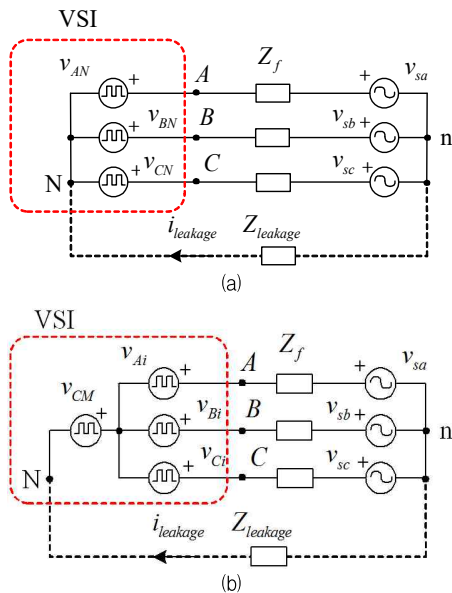


Fig. 4. Equivalent circuit for analyzing the leakage current

선간전압을 공통모드전압으로 표현하면 식 (3), 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{AN} \\ v_{BN} \\ v_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 & 1/3 \\ 1 & -1/3 & 1/3 \\ 1 & -1/3 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{CM} \\ v_{CM} \\ v_{CM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} v_{AN} = v_{CM} + \frac{2}{3}v_{AB} + \frac{1}{3}v_{BC} = v_{CM} + v_{Ai} \\ v_{BN} = v_{CM} - \frac{1}{3}v_{AB} + \frac{1}{3}v_{BC} = v_{CM} + v_{Bi} \\ v_{CN} = v_{CM} - \frac{1}{3}v_{AB} - \frac{2}{3}v_{BC} = v_{CM} + v_{Ci} \end{cases} \quad (4)$$

누설전류를 저감 또는 제어하기 위해서는 vCM을 일정하게 제어하는 것이 좋는데 가장 좋은 것은 vCM 값이 0이 되는 것이다. 3레벨 인버터의 공간벡터로 MVPWM에 사용되는 벡터를 그림 5에 나타내었다. 사용되는 벡터는 V7[PON], V8[OPN], V9[NPO], V10[NO], V11[ONP], V12[PNO]와 영벡터 V0[OOO]로 모두 7개이다. 이 7개의 공간벡터만 사용하게 되면 이론적으로는 누설전류는 0이 된다[13].

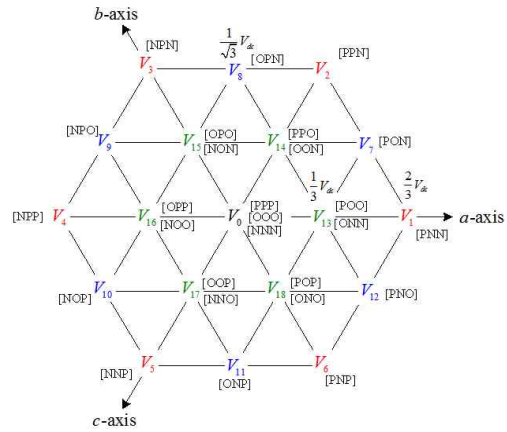


Fig. 5. Space vector diagram of 3 level inverter

2.4 250kW 파워스택 및 1MW PCS 제작

모듈라 PCS의 구성요소는 계통으로부터 MCCB, MC, 인덕터, 퓨즈, IGBT, 커패시터 등으로 구성된다. 이 중 불량 및 유지보수가 가장 많이 발생하는 것은 전력용반도체인 IGBT인데, 전력용반도체인 IGBT를 포함하여 히트싱크, 커패시터 등을 모아 그림 6과 같이 파워스택을 구성 및 설계하였다. 제작된 파워스택은 그림 7에서 보여준다. 핫스왑을 위해 용이한 탈부착이 가능하도록 플러그 커넥터(Pluggable connector)를 사용하였다.

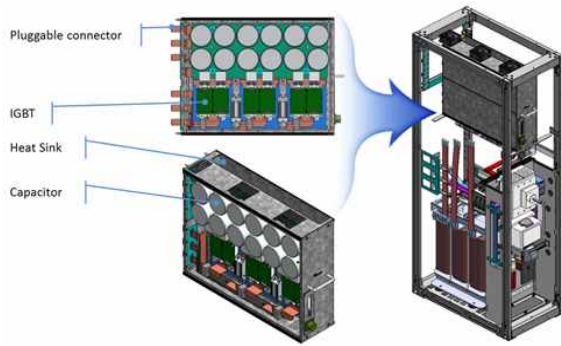


Fig. 6. Power stack of modular PCS



Fig. 7. Power stack of modular

제작된 1MW PCS 시스템은 그림 8와 같다. 좌측으로부터 계통이 연결되는 AC 접속반이 있고 모듈라 PCS가 병렬로 4개가 연결된다. 오른쪽으로는 배터리와 연결되는 DC 접속반이 있다.



Fig. 8. 1MW PCS for ESS

2.5 핫스왑 운영

핫스왑 동작을 위해서는 각 모듈라의 동작상태를 확인하고 각 모듈라의 상태정보에 따라 이상 유무를 관리할 수 있는 PMS(Power Management System)가 필요하다.

다. PMS는 모듈라의 이상상태가 발생하며 해당 모듈라를 전기적으로 차단하여 분리하고, 교체 및 유지보수의 필요성을 사용자에게 안내한다. PMS의 동작 시퀀스는 그림 9에 나타내었고, 모듈라의 개수만큼 해당 시퀀스를 병렬 수행하게 된다.

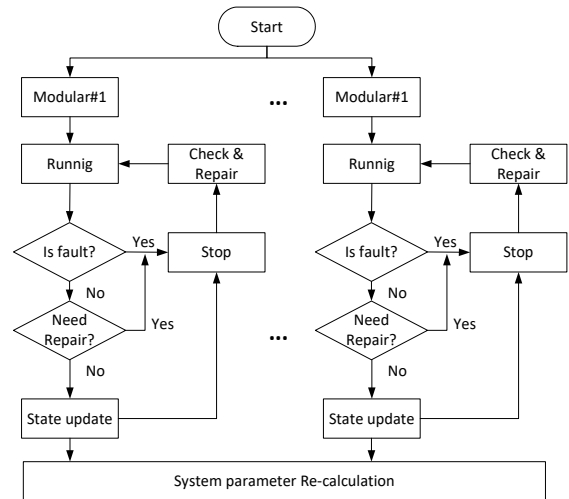


Fig. 9. Sequence of modular fault check for hot-swap

유지보수 발생으로 모듈라의 교체 시 출력 감소가 발생 될 수 있다. 이를 최소화하기 위해 동작중인 모듈라는 과부하율 내에서 부하분담을 실시한다. 제작된 1MW PCS의 경우 4개 모듈라가 병렬 동작 중 1개 모듈라가 유지보수 될 경우, 만일 동작 중인 3개의 모듈라가 각각 약 83kW의 용량을 추가로 출력하면 사용자는 유지보수 기간 동안 1MW의 출력을 계속 유지할 수 있다. 그러나 이러한 과부하의 설계는 결국 시스템 비용을 상승시키기 때문에 적절한 과부하 설계가 필요하다. 제작된 모듈라는 과부하율이 110%로 설계 되어있어 1개 모듈라의 유지보수 동안 정격 250kW출력을 275kW로 동작 시키게 된다. 따라서 유지보수 기간 동안 출력은 정격 1MW의 75%가 아닌 82.5%로 출력이 가능하다.

3. 실험결과

모듈라용 파워스택의 성능평가를 위한 시험환경을 그림 10과 같이 구성하였다. 입력전압 750V에서 출력에는 인덕터를 연결한 뒤 과부하 110%을 고려한 420Arms가 흐르도록 부하전류를 제어하였다. 파워스택의 출력전류 파형은 그림 11에 나타내었다.

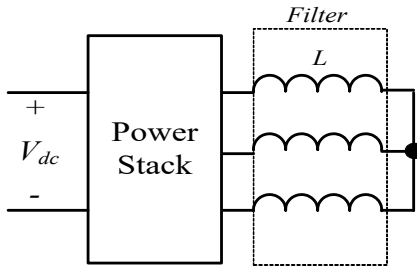


Fig. 10. L load test of power stack

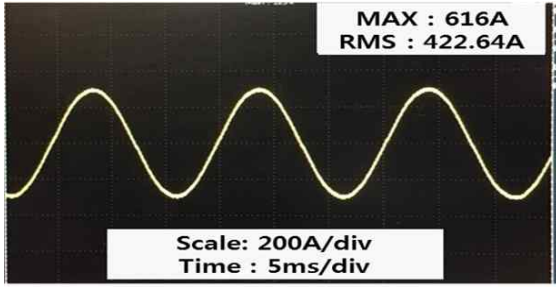


Fig. 11. L load current of power stack

그림 12은 제작된 1MW PCS의 방전 시 실험 파형 들을 나타내었다. 계통전압은 353Vrms이고, 모듈라의 출력 전류는 403Arms, 1MW PCS의 출력전류는 1,614Arms로 측정되었다.

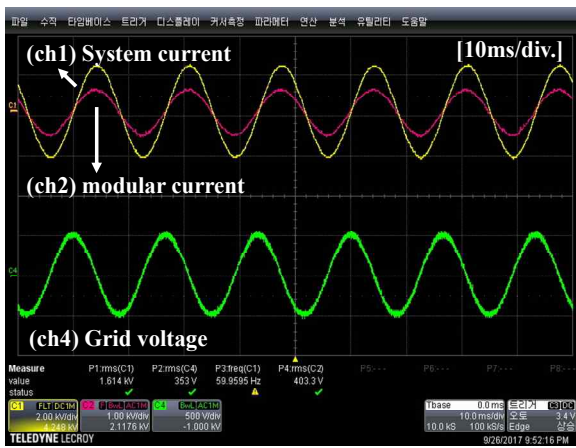


Fig. 12. Experimental waveforms

1MW PCS의 시스템의 효율은 배터리 방전모드 시 98.16%로 측정되었다. 측정 시 계통전압은 363Vrms, 배터리 전압은 756V이고 배터리 입력 용량은 1.0194MW, 계통 출력용량은 1.0007MW로 계측되었다. 그림 13은 전력분석기의 효율측정 화면으로 전력분석기 내 계통전압은 상전압으로 표기되었다.

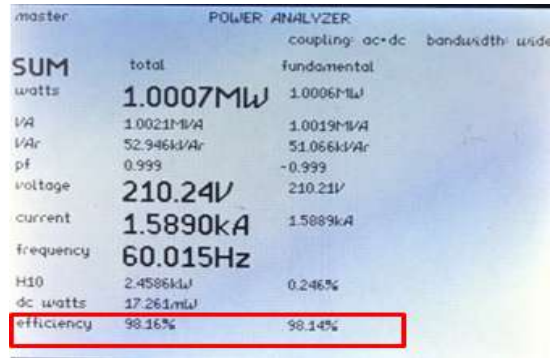


Fig. 13. Efficiency at discharging mode

1MW PCS의 계통 출력 전류의 THD(Total Harmonic Distortion)는 그림 14와 같이 R, S, T 각 상별로 0.790%, 0.802%, 0.830%로 측정 되었고 각 상의 차수별 고조파 값은 그림 15에 나타내었다.

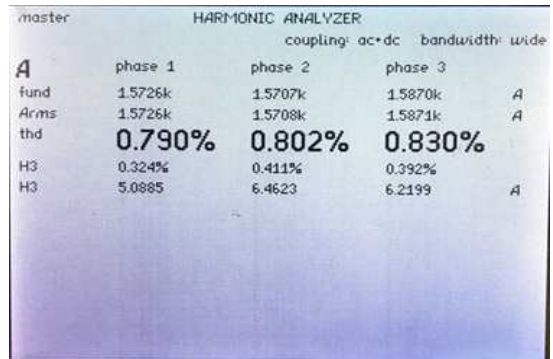


Fig. 14. THD(Total Harmonic Distortion)

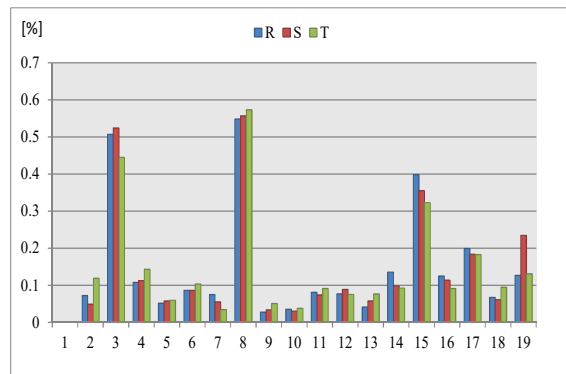


Fig. 15. Harmonics of current

햇스왑 동작 시 PMS에 의한 모듈라 1번의 고장검지 후 유지보수 동안 3개 모듈라의 과부하 동작이 이루어짐을 그림 16에 나타내었다. 실험파형에서 유지보수 발생 시 출력이 75%로 감소되는 시간과 유지보수 후 출력이 107.5%로 동작되는 시간은 PMS의 동작을 보여주기 위

한 것으로 실제 동작에서는 사용자가 인식할 수 없도록 짧은 시간에 동작 전환이 가능하다.

핫스왑 동작 시 정상상태 방전 출력 전류는 1MW 용량에서 1,519Arms로 모듈라 1번 정지 후 출력 전류는 75%인 1,140Arms로 감소하였고, 과부하 동작에 의해 남은 3개 모듈라의 출력이 110%로 증가하여 출력 전류는 1,254Arms로 증가하였다가 유지보수 후 정상상태 값으로 복귀됨을 확인할 수 있다.

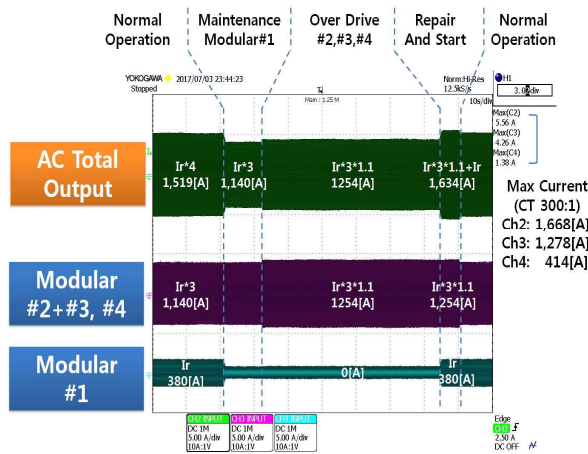


Fig. 16. Hot-swap operation

4. 결론

본 논문에서는 대용량 에너지저장시스템에서 유지보수 시 시스템을 정지하지 않고 동작 상태를 유지하면서 시스템을 구성하는 요소들의 교체, 변경, 수리가 가능하도록 핫스왑 기술을 적용한 단위 모듈라 및 구성요소를 개발하고, 단위 모듈라의 병렬구성을 통해 1MW 에너지 저장시스템용 PCS를 제작하였으며 시스템의 기본동작 및 핫스왑 동작이 안정적으로 이루어짐을 확인하였다. 본 논문의 결과로 대용량 에너지시스템용 PCS의 유지보수 및 운영 신뢰성 향상 시킬 수 있다. 향후에는 이중 배터리의 SOC, SOH를 고려한 운전특성 및 모듈라별 과부하 동작에 따른 과도특성에 대한 연구를 수행하고 이를 ICT 융합시스템을 고려하여 최적 운영함으로써 개발 시스템의 신뢰도 향상에 대해 연구할 예정이다.

REFERENCES

- [1] J. S. Choi, K. C. Jeong, D. S. Cha, J. H. Kang & S. Y. Oh. (2017). *Conference of The Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineers*, 118-118.
- [2] S. Y. Park, H. J. Jeong, M. H. Kwon, S. H. Jung, S. W. Choi & Y. G. Song. (2015). *Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, 417-418.
- [3] D. Y. Jung, J. H. Kim, S. C. Choi, S. W. Lee, H. M. Han & C. Y. Won, (2013). *Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 62(1), 63-69.
- [4] Y. H. Kwon & S. K. Jang, (2015). *Conference of The Institute of Electronics and Information Engineers*, 1247-1250.
- [5] S. H. Jung, J. H. Kim, A. J. Jung, S. H. Yang, S. Y. Park, S. W. Choi, B. K. Kang, C. W. Lee, A. N. Yoo & H. J. Kim, (2014). *Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, 65-66.
- [6] N. E. Heo, D. S. In, B. K. Kwon, M. J. Lee, Y. H. Kwon & J. S. Hong, (2014). *Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, 95-96.
- [7] Y. W. Kim & C. H. Lee, (2013). *Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, 184-185.
- [8] E. S. Kim. (2015). *Journal of The Korean Institute of Power Electronics*, 20(2), 31-35.
- [9] M. H. Heo, T. W. Lee, S. H. Lee & S. J. (2011). *Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, 304-305.
- [10] J. H. Ahn, W. Y. Sung, C. Y. Oh, B. K. Lee & Y. S. Kim, (2016). *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 163-168. DOI: 10.1109/APEC.2016.7467868
- [11] J. J. Park, J. J. Lee & B. H. Kwon, (2005). *Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 237-239.
- [12] Y. Y. Yoon, H. S. Kim & J. K. Jeong, (2011). *Conference of The Korean Institute of Power Electronics*, 502-503.
- [13] K. S. Ahn, N. S. Choi, E. C. Lee & H. J. Kim, (2016). *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 11(2), 393-404.
- [14] Z. Ozukan & A. M. Hava, (2015). *Journal of Power Electronics*, 15(1) 256-267.
- [15] H. J. Kim, H. D. Lee & S. K. Sul (2001). *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(6), 1840-1845. DOI: 10.1109/28.968199

안 강 순(Ahn, Kang Soon) [정회원]



- 1997년 2월 : 한양대학교 일반대학원 전기공학과(공학석사)
- 2012년 3월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정 수료
- 2013년 8월 ~ 현재 : (주)윌링스 대표이사

- 관심분야 : 신재생, 전력전자
- E-Mail : ks@willings.co.kr

이 상 택(Lee, Sang Taek) [정회원]



- 2001년 2월 : 한양대학교 일반대학원 전기공학과(공학석사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과(공학박사)
- 2009년 8월 ~ 현재 : 전자부품연구원 자동차전장연구센터장

- 관심분야 : 자동차, 전장, 전력전자
- E-Mail : stlee@keti.re.kr

오 용 승(Oh, Yong Seung) [정회원]



- 2003년 2월 : 한양대학교 일반대학원 전기공학과(공학석사)
- 2010년 3월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정 수료
- 2013년 8월 ~ 현재 : (주)윌링스 수석연구원

- 관심분야 : 신재생, 전력전자
- E-Mail : dreamsail@hanyang.ac.kr