

MW급 PCS 성능검증용 배터리 모의장치 개발

이종학¹, 인동석[†], 허남억¹, 박영민¹, 박기원¹, 권병기¹

Development of Battery Simulator for Performance Verification of MW-class PCS

Jong-Hak Lee¹, Dong-Seok In[†], Nam-Eok Heo¹, Young-Min Park¹,
Ki-Won Park¹ and Byung-Ki Kwon¹

Abstract

An energy storage system (ESS) is applied to increase the energy efficiency of large plants or buildings that consume much energy, to improve the power quality of power systems, and to stabilize renewable energy source such as photovoltaic or wind turbine. The ESS is composed of a power conditioning system (PCS) and an energy storage. The battery is used as the energy storage. The battery is needed to design and verify a hardware and control system of PCS. Usually, a battery simulator is used instead of a battery, which is costly and hard to manage. In this paper, the development of the battery simulator for performance verification of the MW-class PCS is described. The battery simulator simulates the charging and discharging characteristics of batteries to design and verify the hardware and control system of PCS.

Key words: Battery simulator, ESS(Energy Storage System), PCS(Power Conditioning System), PCU(Power Conversion Unit)

1. 서 론

ESS(Energy Storage System, 에너지 저장 시스템)는 전력변환장치(PCU, Power Conversion Unit)와 연계하여 배터리에 에너지를 저장하고, 필요시 에너지를 공급해주는 시스템이다^[1-4]. ESS는 기본적인 에너지 저장 및 공급 기능을 이용해 부하 평준화, 피크 부하 저감, 출력 안정화, 전력품질 관리 등의 다양한 기능을 제공할 수 있다. ESS용 PCS(Power Conditioning System) 및 제어기의 설계 및 검증을 위해선 배터리를 전력변환장치에 연계하여 검증해야 한다. 하지만 배터리의 경우 고가에 관리가 어렵기 때문에 일반적으로 DC 전원 모의장치나 PCS를 이용한 배터리 모의장치를 이용한다^[5-8]. 따라서 본 논문에서는 ESS용 전력변환장치 및 제어기의 설계와 현실적인 검증이 가능하도록 실제 배터리 모의기

능을 추가한 PCS 성능검증용 배터리 모의장치를 개발하였다.

또한, 근래 한전 FR(Frequency Regulation, 주파수조정)용 ESS나 풍력발전과 같은 신재생에너지 출력안정화용 ESS 등과 같은 분야에서 MW급 ESS를 적용 중이며, 이와 관련하여 한전구매규격 (GS-6140-0003, General Technical Specifications of KEPCO), SGSF (SGSF-04-2012-07, Smart Grid Standard Forum) 등과 같은 규격에 기반한 전력변환장치의 검증을 요구하고 있다^[9]. 본 논문에서는 상기 규격에 대한 MW급 PCS 성능검증을 위한 시험설비를 구축하였으며, 해당 시험설비는 개발한 2MW급 PCS의 개발검증 외에도 '15년 한전 FR용 ESS 공급사업 관련 2MW급 PCS 인정시험 및 FAT(Factory Acceptance Test) 검수시험에 활용하였다. 또한 시험 진행시 안정성을 확보하기 위해서 2MW급 PCS를 2대로 구성 및 활용하였다.

2. 배터리 모의장치

본 논문에서는 '15년 한전 FR용 ESS 공급사업 관련 2MW급 PCS 인정시험 및 FAT 검수시험 시 시험 중인 배터리 모의장치 1대에 고장이 발생하는 경우 다른 배

Paper number: TKPE-2016-21-2-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: dsin00@poscoict.com

Control System Research Department, POSCO ICT

Tel: +82-31-723-4496 Fax: +82-31-723-3806

¹ Control System Research Department, POSCO ICT

Manuscript received Jan. 12, 2016; revised Feb. 11, 2016;

accepted Feb. 26, 2016

— 본 논문은 2015년 추계학술대회 우수추천논문임

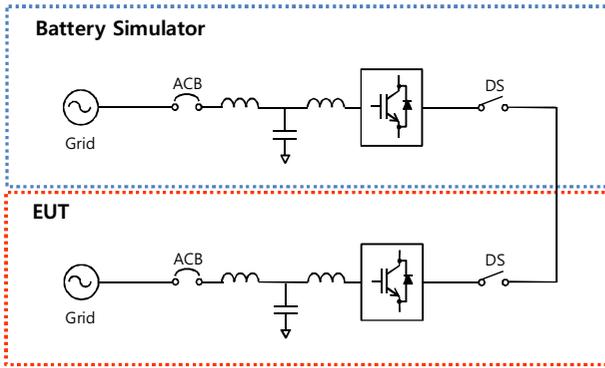


Fig. 1. Simulation circuit for battery simulator.

터리 모의장치로 대체하여 안정성을 확보하고, DC 전압의 범위를 갖는 EUT(Equipment Under Test, 시험대상장치)의 성능시험을 수행하기 위해 배터리 모의장치를 2대로 구성하였다. 저 전압은 배터리 모의장치 #1로 고 전압은 배터리 모의장치 #2로 EUT를 성능시험 할 수 있다.

2.1 배터리 모의장치 제어

ESS 운전방식으로는 계통 연계형(Grid Connected Type) 운전과 독립형(Grid Independent Type) 운전으로 분류할 수 있으며, 배터리 모의장치는 계통 연계 운전 모드를 사용하였다. 배터리 모의장치는 EUT에서 요구하는 DC 전원 공급을 목적으로 하기 때문에 DC 전압제어(DC Voltage Control) 기능을 사용하였다.

배터리 모의장치 제어 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 회로도는 배터리 모의장치와 EUT를 그림 1과 같이 구성한 것으로, 시뮬레이션은 다음과 같은 조건으로 진행하였다.

배터리 모의장치와 EUT의 용량은 2MW로 설정하였고 배터리 모의장치의 DC 전압 범위는 750V ~ 1100V, DC 전압 기준값은 900V로 설정하였다. EUT의 출력전류 기준값은 0PU(Per Unit)를 기준으로 0.1PU씩 증가하고 (+)와 (-)값으로 교번(+0.1PU <=> -0.1PU, +0.2PU <=> -0.2PU ... +1PU <=> -1PU)하여 배터리 모의장치의 DC 전압 변동량을 확인하였다.

배터리 모의장치의 기본 제어 구성은 그림 2와 같다.

(V_{dc}^{ref} : DC Voltage Reference, V_{dc} : DC Voltage, i_o^{ref} : Output Current Reference, i_o : Output Current, v_c : Capacitor Voltage, v_{inv}^{ref} : Inverter Voltage Reference) 배터리 모의장치와 EUT는 서로 별개의 제어 구성을 갖는다. 그림 3은 배터리 모의장치의 기본 제어 구성에 대한 시뮬레이션 결과이다. EUT의 출력전류 기준값을 +0.1PU와 -0.1PU로 교번 출력한 결과, DC 전압이 기준값 900V보다 최대 102V(11%) 변화한 것을 확인할 수 있다. DC 전압 제어기의 대역폭은 전류 제어기의 대역

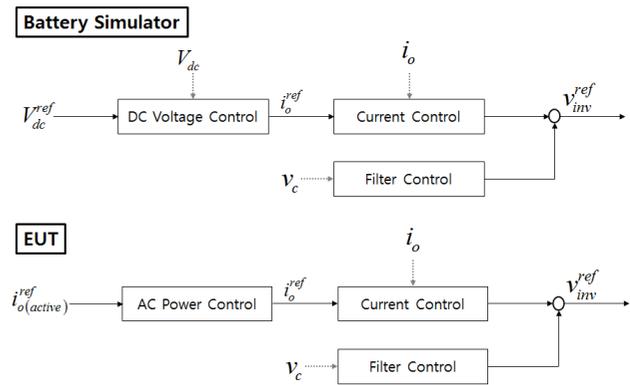


Fig. 2. Block diagram of basic control system.

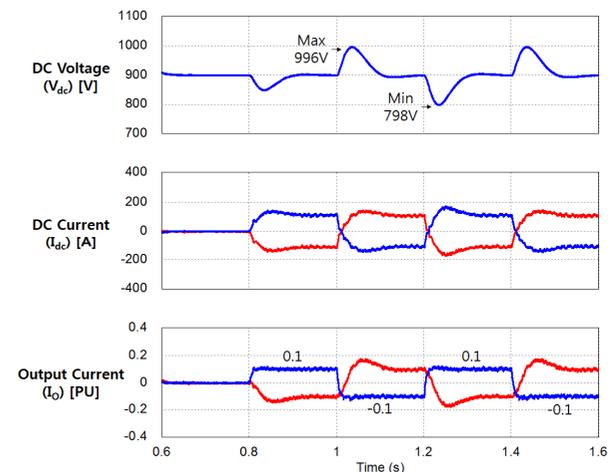


Fig. 3. Simulation waveform of basic control system. (Blue : Battery Simulator, Red : EUT)

폭 500rad/s의 1/10 수준인 50rad/s의 대역폭으로 설계하였다. 이로 인해 EUT의 전류 제어보다 배터리 모의장치의 DC 전압 제어 속도가 느려 DC 전압변동이 크게 발생한다.

그림 4는 배터리 모의장치의 이상적인 제어 구성도이다. 기본 제어 구성의 배터리 모의장치와 달리 이상적인 제어 구성을 포함한 배터리 모의장치는 EUT의 전류 기준값을 지연없이 입력받아 사용한다. EUT의 전류 기준값을 직접 입력받아 전향보상(Feed Forward)하여 DC 전압제어 속도가 느린 문제점을 해결할 수 있다. 이상적인 제어 구성도의 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다. EUT를 +0.1PU와 -0.1PU로 교번 시 DC 전압이 기준값보다 1V(0.1%) 변화한 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 EUT와 배터리 모의장치에 출력 전류 기준값을 동시에 명령한 동작이라 DC 전압의 변동이 거의 없다.

하지만 이상적인 배터리 모의장치의 제어 구성을 실제 구현하기가 어렵다. 배터리 모의장치와 EUT로 동시에 기준값을 명령하기 위한 통신이나 추가 장치 형태의 불필요한 상위 시스템이 존재해야 한다. 또한, 제조사나

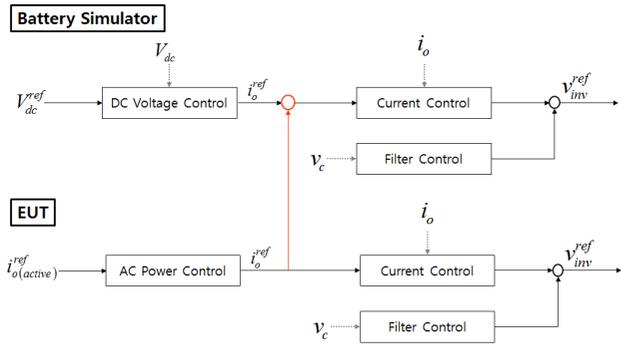


Fig. 4. Block diagram of ideal control system.

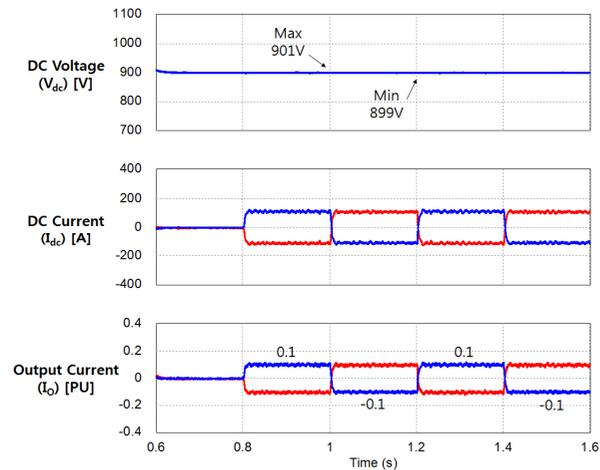


Fig. 5. Simulation waveform of ideal control system. (Blue : Battery Simulator, Red : EUT)

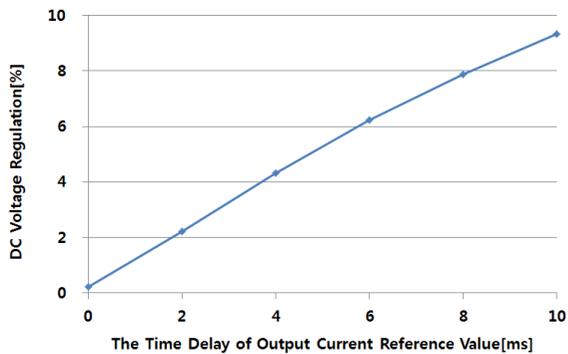


Fig. 6. DC voltage regulation depending on the time delay of output current reference value.

제품 타입에 따라 매번 바뀌는 EUT에 프로그램을 추가로 구현해야하는 번거로움이 있으며 이를 구현하더라도 지연을 없앨 수 없다. 기준값(0.2PU Step 변동) 명령 지연에 따른 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같으며, 지연이 발생할수록 DC 전압 변동 크기는 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 현실적으로 어떠한 EUT를 연결하여 시험하더라도 추가 구현이나 구성이 없도록 하였으며, EUT의 출력 전류를 센싱하여 전향보상하는

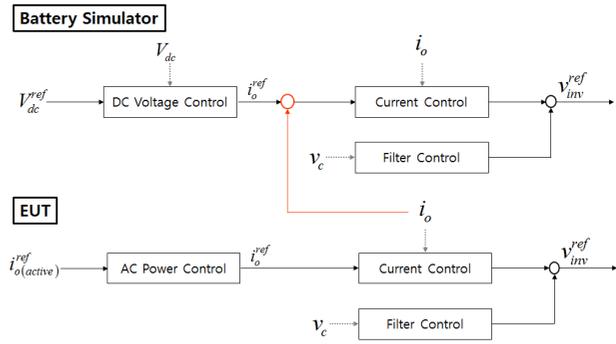


Fig. 7. Block diagram of improved control system.

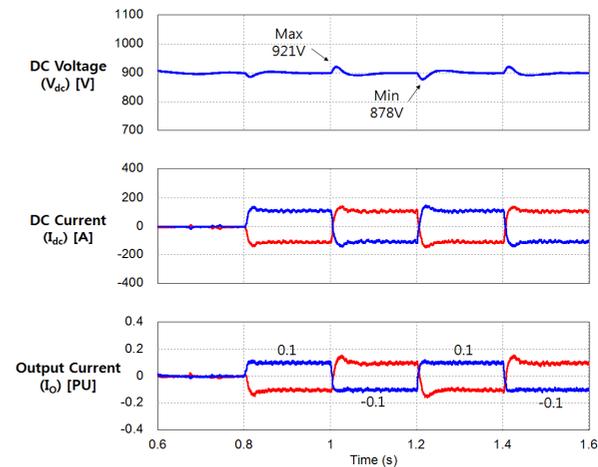


Fig. 8. Simulation waveform of improved control system. (Blue : Battery Simulator, Red : EUT)

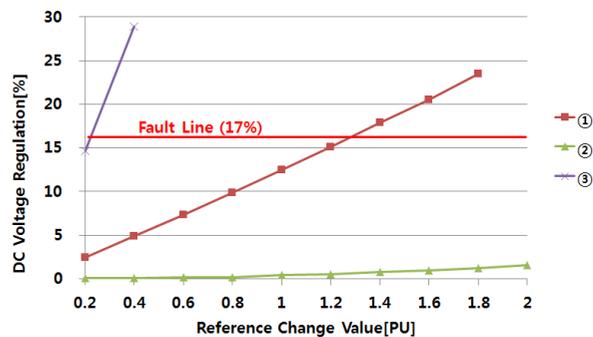


Fig. 9. Comparison of simulation results depending on control system types. (①Improved ②Ideal ③Basic)

방식으로 그림 7과 같이 구성하였다.

그림 8은 본 논문에서 사용한 개선된 제어 구성의 시뮬레이션 결과이다. 이전의 제어 구성과 똑같은 조건으로 시험 시 DC 전압이 기준값 대비 21V(2%)변화함을 확인하였다.

그림 9는 제어 구성에 따른 시뮬레이션을 비교한 결과이다. 기본 제어 구성은 기준값 변동량이 0.2PU가 넘을 경우 Fault Line(750V이하, 1100V이상)을 초과하고

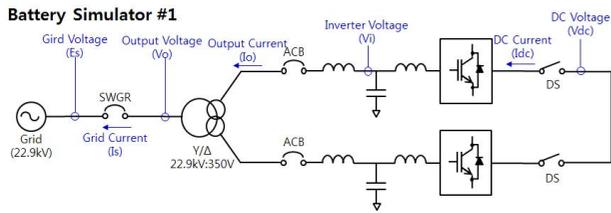


Fig. 10. Circuit diagram of battery simulator #1.

TABLE I
SPECIFICATIONS OF BATTERY SIMULATOR #1

Items	Specification	Unit
Rated Power	2	MW
Rated Voltage	350	V
Rated Current	3,300	A
DC Voltage	600 ~ 900	V

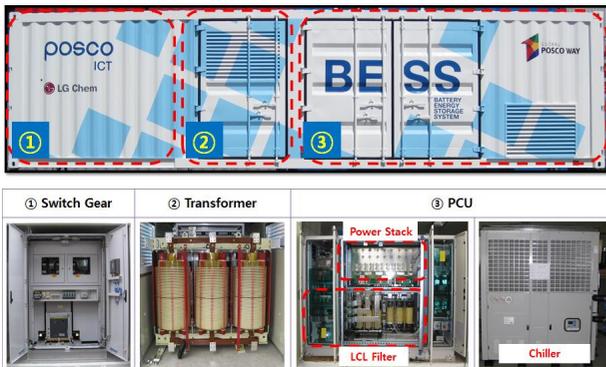


Fig. 11. System constitution of battery simulator #1.

이상적인 제어 구성의 경우 2PU를 변동하더라도 약 2% 정도 변화함을 보인다. 본 논문에서 사용한 개선된 방법의 경우는 기준값을 Step으로 1PU 변동 시 약 9%정도 변화하였으며, EUT를 검증시 충전이나 방전의 기준값을 정격(1PU)으로 Step 변동이 가능하다.

2.2 배터리 모의장치 #1

2.2.1 시스템 구성

배터리 모의장치 #1의 구성은 그림 10과 같다. 계통과 변압기를 통해 1MW급 전력변환장치 2대가 각각 연결한 구성으로 1MW급 전력변환장치는 ACB(Air Circuit Breaker), LCL(Reactor-Capacitor-Reactor) Filter, Power Stack, DS(Disconnect Switch) 순으로 구성되어 있다.

배터리 모의장치 #1의 시스템 구성은 그림 11과 같으며, 기본 사양은 표 1과 같다.

2.2.2 동작 시험

배터리 모의장치 #1의 동작 시험 과정은 그림 12와

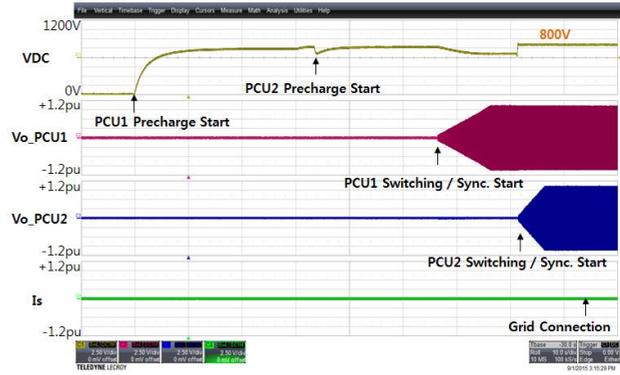


Fig. 12. Operating waveform of battery simulator #1.

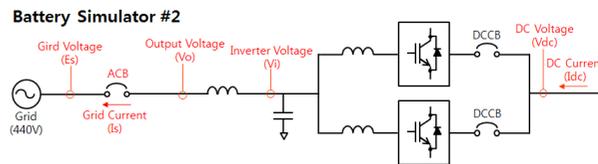


Fig. 13. Circuit diagram of battery simulator #2.

TABLE II
SPECIFICATIONS OF BATTERY SIMULATOR #2

Items	Specification	Unit
Rated Power	2	MW
Rated Voltage	440	V
Rated Current	2,625	A
DC Voltage	750 ~ 1,100	V

같으며, 배터리 모의장치의 기본 동작 시퀀스는 다음과 같다. DC Capacitor를 충전하는 초기충전 단계, 계통과 연계하기 위한 스위칭 및 동기화 단계, 동기화 완료 후 계통 연계하는 단계, 계통 연계 후 EUT에 DC 전원을 공급하기 위해 DC 전압을 유지하는 DC 전압제어 단계로 되어 있다. 배터리 모의장치 #1은 2대의 전력변환장치가 순차적으로 동작하기 때문에 초기 충전부터 가압의 시점이 다르게 동작한다. 계통연계하고 DC 전압을 기준값(800V-임의 설정)으로 유지한 상태에서 EUT의 검증이 가능하다.

2.3 배터리 모의장치 #2

2.3.1 시스템 구성

배터리 모의장치 #2의 구성은 그림 13과 같다. 1MW급 전력변환장치 2대가 계통측 Filter Reactor와 Capacitor를 공유하도록 구성하였다.

배터리 모의장치 #2의 시스템 구성은 그림 14와 같으며, 기본 사양은 표 2와 같다.



Fig. 14. System constitution of battery simulator #2.

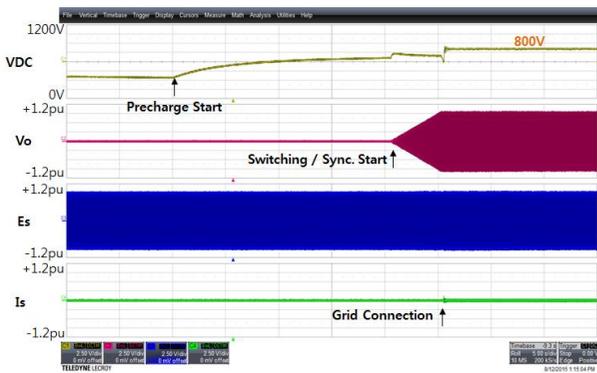


Fig. 15. Operating waveform of battery simulator #2.

2.3.2 동작 시험

배터리 모의장치 #2의 동작 시험 파형은 그림 15와 같다. 기본 동작 시퀀스는 배터리 모의장치 #1과 동일하며, 배터리 모의장치 #2는 내부 전력변환장치 2대가 동시에 동작한다. 배터리 모의장치 #1과 마찬가지로 계통 연계 후 DC 전압을 기준값(800V-임의 설정)으로 유지한 상태에서 EUT의 검증이 가능하다.

2.4 배터리 특성을 고려한 배터리 모의장치

본 논문에서는 ESS에서 일반적으로 사용하는 배터리의 전압 곡선을 고려한 배터리 모의장치를 개발하였다. 적용된 배터리 종류는 ESS에서 일반적으로 사용하는 Li-ion 배터리와 NaNi 배터리로 선택하였으며, SOC (State of Charge)별 배터리 전압 곡선은 그림 16과 같다. 사용자가 배터리의 최소/최대 전압값을 선정하여 배터리의 사용 가능한 전압범위를 설정할 수 있도록 하였다. 이 전압 곡선을 토대로 Look-up Table 생성 후, 시험 시 DC 전류를 측정하고 측정된 전류는 전류적산법

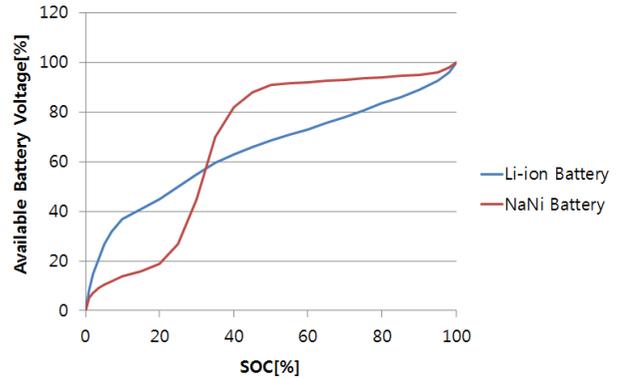


Fig. 16. Voltage characteristic depending on battery type.

TABLE III
BATTERY SPECIFICATIONS

Parameter	Value	Unit
Voltage Range	750 ~ 850	V
SOC Range	0 ~ 100	%
Battery Capacity	40	Ah
Battery Type	Li-ion, NaNi	-

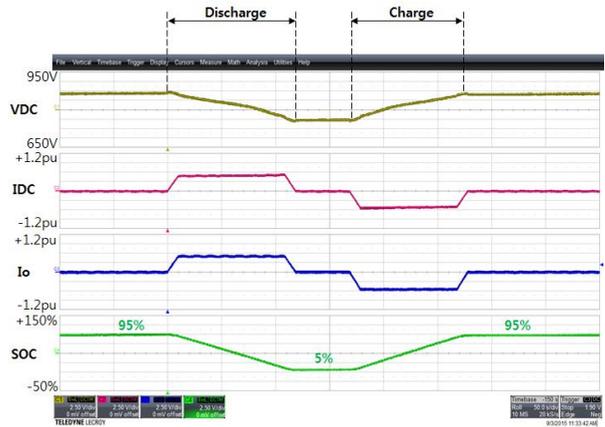


Fig. 17. Output waveform of battery simulator(Li-ion).

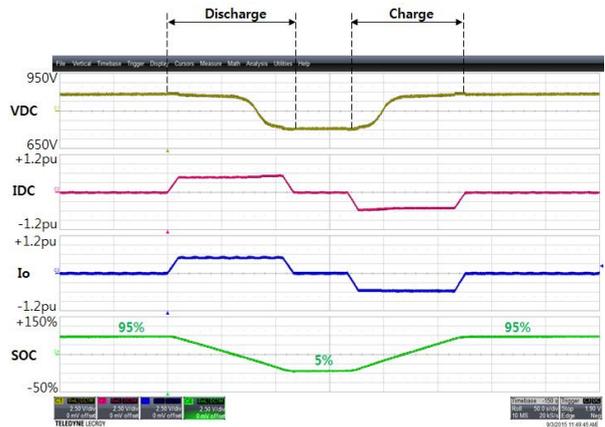


Fig. 18. Output waveform of battery simulator(NaNi).

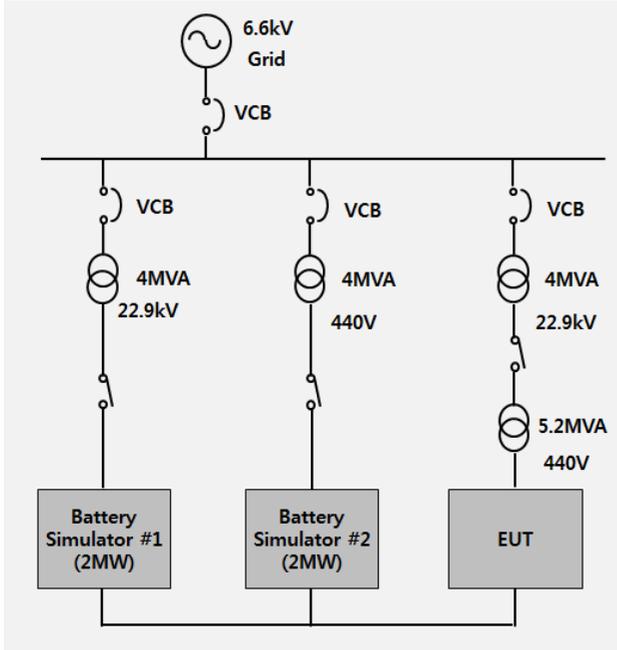


Fig. 19. Configuration of PCS performance verification system.

을 이용하여 용량에 맞는 SOC를 생성한다. 생성된 SOC에 해당하는 전압을 출력하는 방법이며, 배터리 전압 범위, SOC 범위 및 배터리 용량을 시험조건에 맞게 설정하여 원하는 시험을 진행할 수 있도록 구현하였다.

2.4.1 배터리 전압특성을 고려한 모의시험

시험 진행 조건은 다음과 같다. 배터리 모의장치 #1을 배터리 모의장치 동작하도록 하였으며, 배터리 모의장치 #2는 EUT로 동작하도록 하였다. 배터리 모의장치 #1이 배터리 전압 특성을 고려한 DC 전압제어를 수행하는 상태에서 배터리 모의장치 #2(EUT)는 정전력(Constant Power, CP)모드로 0.5PU(1MW) 충방전을 하였다. 배터리 종류는 Li-ion 배터리와 NaNi 배터리 2 가지로 시험을 진행하였으며, 전압 범위는 배터리 모의장치 2대를 만족하는 전압인 750V(SOC 0%) ~ 850V(SOC 100%)로 하였다. 배터리 용량은 시험 시간(약 100s)을 감안하여 40Ah로 설정하였으며, 배터리 용량을 변경하여 시간을 조절할 수 있다. 모의시험을 위한 배터리 사양은 표 3과 같다.

그림 17은 Li-ion 배터리, 그림18은 NaNi 배터리를 모의한 시험 파형이다. 충방전 전류 크기에 따라 그림 16과 같은 배터리 전압 특성을 출력함을 확인하였다.

3. PCS 성능검증 시스템

본 논문에서 개발한 PCS 성능검증 시스템은 EUT를 성능시험하기 위해 앞서 소개한 2MW급 배터리 모의장치 2대와 성능평가 시스템 그리고 계통 설비와 같은 기

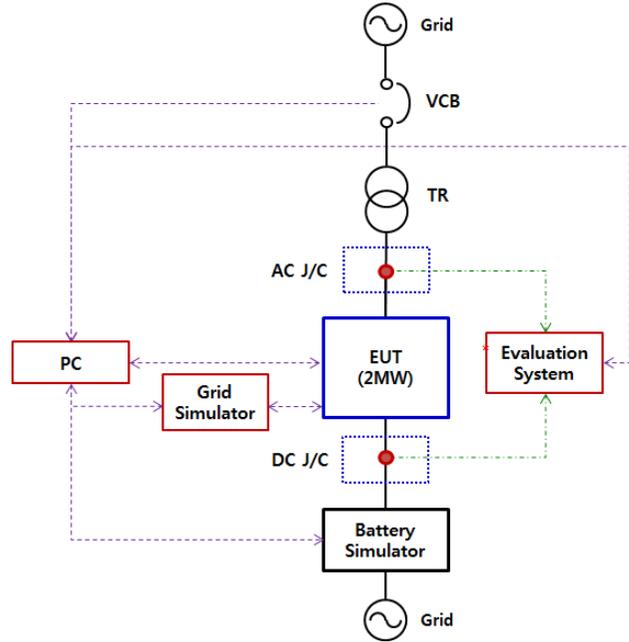


Fig. 20. Configuration of performance evaluation system.

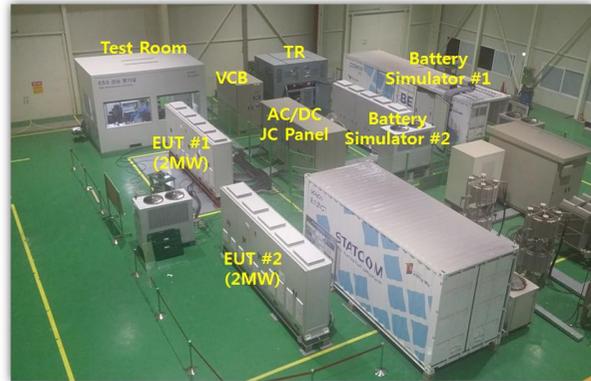


Fig. 21. PCS performance verification system in ESS test center of POSCO ICT.

타 설비로 구성되어 있으며 그 구성은 그림 19와 같다.

2MW급 배터리 모의장치 2대는 시험대상의 EUT와 DC 단을 공유하며, AC 단은 계통과 연결하여 임의의 DC 전원을 생성하여 EUT에 공급하여 시험하기 위한 구성이다.

3.1 성능 평가시스템

MW급 PCS 성능 평가를 위한 시스템 구성은 그림 20과 같다. EUT 기준 DC단은 배터리 모의장치와 DC Junction(J/C) Panel에서 연결하며, AC단은 승압용 변압기(440V/22.9kV)와 AC Junction Panel에서 연결 가능하도록 구성하였다. AC 및 DC Junction Panel에서 EUT의 전압과 전류를 계측하고 계측한 신호는 성능 평가시스템으로 입력된다. 성능 평가시스템은 입력된 전압 및 전류로 EUT의 동작특성, 효율, 전력품질 등을 측정 및

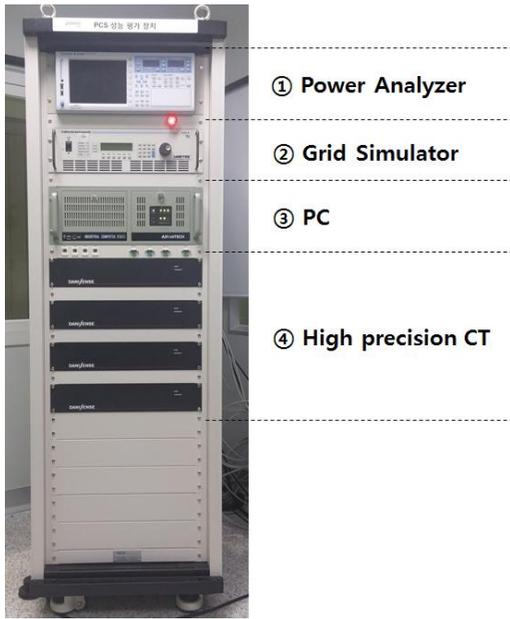


Fig. 22. PCS performance evaluation system of 19 inch rack type.



Fig. 23. Facilities for grid connection, EUT connection, load test.

평가한다. EUT 및 배터리 모의장치, 성능 평가시스템의 제어와 관리는 사용자 PC에서 가능하도록 구성하였다. 그림 21은 개발한 PCS 성능검증 시스템을 구축한 모습이다.

PCS 성능 평가시스템은 성능평가실 내(Test Room)에 19 inch Rack 형태로 그림 22와 같이 구성하였다. 상기 Rack은 EUT의 전력품질을 계측 및 평가할 수 있는 ① 전력분석장치, EUT의 계측부에 연결하여 계통전원을 모의할 수 있는 ②계통 모의장치, EUT 및 배터리 모의장치를 제어/관리하는 ③사용자용 PC, 정밀한 전류 측정을 위한 ④고정밀 CT로 구성되어 있다. 고정밀 CT(Current Transformer)는 0.01% 이하의 정밀도(Accuracy)를 갖는다.

PCS 성능검증 시스템을 구성하기 위한 기타 설비는 4MVA급 계통연계설비(Transformer-TR, Vacuum Circuit Breaker-VCB, DS), 부하장치(4MVar급 Reactor

TABLE IV
TEST ITEMS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF KEPCO

Test Item	
General	Visual Inspection Test
Electrical	Insulation Resistance Test
	Dielectric Voltage Withstand Test
Safety Test	Abnormal Voltage Test
	Abnormal Frequency Test
	Input Inrush Current Test
	Output Over Current Test
External Fault Test	Load Rejection Test
	Leakage Current Test
	Temperature Rise Test
Performance Test	Efficiency Test
	AC Output
	Power Factor Test
	AC Output Current Distortion Test

/ Capacitor, 2MW급 Resistor), EUT 연계용 AC/DC Junction Panel 등이 있으며, 그 모습은 그림 23과 같다.

본 논문에서 기술한 PCS 성능검증 시스템은 개발한 2MW급 PCS의 개발검증 외에도 '15년 한전 FR용 ESS 공급사업 관련 2MW급 PCS 인정시험 및 FAT 검수시험에 활용하고 있으며, 한전구매규격(GS-6140-0003)기준 활용 가능한 시험 항목은 표 4와 같다.

4. 결 론

본 논문은 대용량 에너지 저장 시스템용 전력변환장치 및 제어기의 설계 검증이 가능한 MW급 PCS 성능검증 시스템에 대해 기술하였다. MW급 PCS 성능검증 시스템을 이용하여 '15년 한전 FR용 ESS 공급사업 관련 2MW급 PCS 인정시험 및 FAT 검수시험에 활용하였다. 본 논문의 시스템을 적용할 경우 MW급 전력변환장치 관련 시험 시에 ESS 관련 다양한 운영 알고리즘 적용이 가능하며, DC 전원이 배터리가 아닌 연료 전지, 태양광, 풍력과 같은 특성도 출력할 수 있어 PCS 성능검증용 배터리 모의장치를 사용하는 모든 시스템에 사용이 용이하다. 추후 배터리 모의장치와 연계하여 PCS 성능검증에 활용할 수 있는 MW급 계통 모의장치도 개발할 계획이다.

References

- [1] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 12, pp. 3881-3895, Dec. 2010.
- [2] K. C. Divya and J. Ostergaard, "Battery energy storage technology for power system - An overview," *Electric Power Systems Research*, pp. 511-520, Apr. 2009.
- [3] S. H. Kim, T. H. Kim, Y. H. Kim, D. S. In, B. K. Kwon, and C. H. Choi, "A development of 2MVA battery energy storage system," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 174-181, Apr. 2012.
- [4] J. S. Hong, H. S. Chai, B. W. Kang, T. H. Kim, and J. C. Kim, "Application of energy storage system for industrial customer," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 64, No. 7, pp. 992-998, Jun. 2015.
- [5] K. H. Han, T. K. Lee, and C. M. Jung, "Development of battery emulation system using power conversion unit," *The Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 2708-2713, Nov. 2012.
- [6] D. R. Seo and J. Lyou, "Battery simulator design for battery management system development," *The Institute of Electronics Engineers of Korea*, pp. 996-999, Nov. 2011.
- [7] J. H. Kim, S. C. Choi, M. H. Shin, Y. C. Jung, and C. Y. Won, "A high voltage battery simulator using z-source converter with a wide output voltage range," *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2103.
- [8] I. S. Kim, "Study on the controller design method for battery energy storage system using linearized battery model," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 530-537, Dec. 2014.
- [9] "General Performance requirements of PCS(Power Conditioning System) for energy storage systems, SGSF-04-2012-07" www.sgstandard.org.

**이종학(李鐘鶴)**

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년~현재 광운대 전기과 박사과정. 2011년~현재 (주)포스코ICT 제어시스템연구그룹 선임연구원.

**인동석(印東石)**

1981년 12월 11일생. 2007년 수원대 정보통신공학과 졸업. 2009년 동 대학원 정보통신공학과 졸업(석사). 2010년~현재 (주)포스코ICT 제어시스템연구그룹 선임연구원.

**허남억(許南憶)**

1980년 4월 14일생. 2005년 강원대 전기전자공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(석사). 2011년~2016년 (주)포스코ICT 재직.

**박영민(朴暎民)**

1984년 2월 6일생. 2010년 세명대 전기공학과 졸업. 2012년 인하대 학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 (주)포스코ICT 제어시스템연구그룹 선임연구원.

**박기원(朴基遠)**

1967년 6월 4일생. 1992년 광운대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~현재 (주)포스코ICT 제어시스템연구그룹 팀리더.

**권병기(權炳基)**

1970년 12월 5일생. 1993년 광운대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 (주)포스코ICT R&D 센터 제어시스템연구그룹장.