

마이크로그리드용 2기의 TMS320F28335 기반 BESS 제어기 구현 및 Hardware-in-the-Loop Simulation 시스템을 이용한 제어 성능 테스트

Implementation of Two TMS320F28335 based BESS Controllers for Microgrid and Control Performance Test in the Hardware-in-the-Loop Simulation System

김 남 대* · 유 형 준* · 김 학 만†
(Nam-Dae Kim · Hyeong-Jun Yoo · Hak-Man Kim)

Abstract - A microgrid as a small scale power system is operated by the grid-connected mode and islanded mode. It is anticipated that the battery energy storage system (BESS) is able to be applied to the microgrid for stable power control, such as tie-line and smoothing control in the grid-connected mode and voltage and frequency control in the islanded mode. In this paper, a digital signal processor (DSP), Two BESS controllers based on TMS320F28335 of a microgrid are implemented and are tested to show control performance in the hardware-in-the loop simulation (HILS) system.

Key Words : Microgrid, Battery energy storage system (BESS), DSP based BESS controller, Hardware-in-the-loop simulation (HILS) system

1. 서 론

최근 지능형 전력망과 함께 신재생에너지원이 포함된 분산전원, 분산저장장치, 디젤발전기, 무하로 구성된 소규모 전력시스템인 마이크로그리드에 대한 관심이 고조되고 있다[1].

마이크로그리드의 운전모드는 계통과 연계되어 운전하는 계통연계모드와 계통과 분리되어 운전하는 독립운전모드로 나눌 수 있다. 계통연계모드에서 마이크로그리드는 순시적으로 발생하는 잉여/부족 전력을 전력계통으로부터 수수할 수 있어 일정 주파수와 전압이 유지될 수 있기 때문에 상대적으로 기상 조건에 따른 신재생에너지의 출력 변동을 완화시키는 smoothing 제어와 연계지점에서의 Tie-Line 제어 기능 등이 요구된다. 반면에 계통과 분리되어 운전하는 독립운전모드에서는 순시적으로 공급량과 수요량의 균형을 유지시키기 위한 주파수 및 전압 제어가 요구된다[2-4]. 또한, 상기 제어에 활용되는 BESS(battery energy storage system)는 수명, 충/방전 특성 등이 우수한 리튬이온 배터리가 많이 사용되고 있다[5-7].

한편, HILS(hardware-in-the-loop simulation) 시스템은 실시간 디지털 시뮬레이터와 개발 대상 하드웨어 시스템으로 구성되는데, 실시간 디지털 시뮬레이터는 상세하게 모델링된 플랜트의 emulator로 사용되어 개발 대상 하드웨어와 입/출력 신호를 교환하면서 실제 플랜트 환경과 거의 유사

한 환경을 제공하여 개발 대상 하드웨어의 설계와 테스트에 적용되는 시뮬레이션 시스템으로, 전력분야에서는 제어기, 보호시스템 등에 HILS 시스템이 많이 적용되고 있다[8-10].

본 논문에서는 마이크로그리드 계통연계운전모드에서 풍력발전기의 smoothing 제어, 정출력 제어와 Tie-Line 제어를 하고, 독립운전모드에서 주파수와 전압을 제어하기 위하여 2 기의 BESS를 고려하였다. 즉, 1기의 BESS(BESS A)는 smoothing 제어와 정출력 제어를 담당하도록 제어기를 설계하였고, 다른 1기의 BESS(BESS B)는 Tie-Line 제어를 수행하도록 제어기를 구성하였으며, 공통적으로 주파수와 전압 제어가 가능하도록 설계하였다. 그리고 2기의 BESS 제어기들은 TMS320F28335 기반의 DSP 보드에 설계하고 구현하였다. 또한, 마이크로그리드는 실시간 디지털 시뮬레이터인 eMEGAsim real-time digital simulator(RTDS)에 모델링하고 TMS320F28335 기반의 BESS 제어기들과 연동시키는 HILS 시스템을 구축하고 그 성능을 테스트하였다.

2. BESS

2.1 3상 전압형 컨버터(voltage sourced converter)

3상 전압형 컨버터는 그림 1과 같이 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 소자를 이용한 모델을 사용하였고, 정현파 PWM(pulse width modulation) 방법을 이용하여 제어하였다. 이때 각 상의 전압과 전류는 식 (1)과 같다[11].

$$\begin{aligned} U_a &= E_m \cos(\omega t) & i_a &= I_m \cos(\omega t + \theta) \\ U_b &= E_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & i_b &= I_m \cos(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c &= E_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & i_c &= I_m \cos(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

* Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Incheon National Univ., Korea

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

Received : February 18, 2014; Accepted : March 4, 2014

여기서, E_m : 상전압의 크기
 I_m : 상전류의 크기

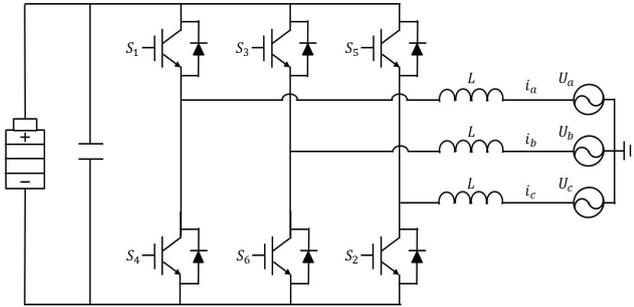


그림 1 3상 전압형 컨버터 모델
 Fig. 1 3-Phase VSC model

2.2 리튬이온 배터리

본 논문에서는 그림 2와 같이 가변전원과 고정저항으로 리튬이온 배터리를 모델링하였고, 충/방전에 의한 가변전원은 식 (2)에 의하여 구할 수 있다[12].

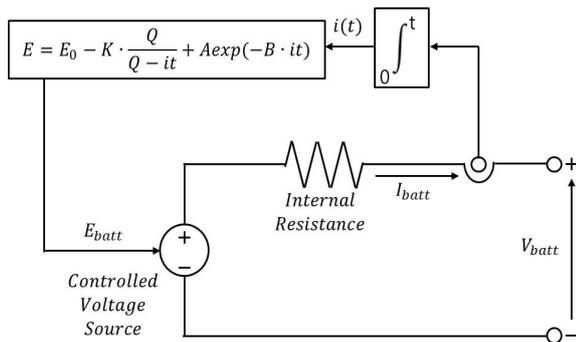


그림 2 리튬이온 배터리 모델
 Fig. 2 Li-ion battery model

$$E_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - i(t)} + A \exp(-B \cdot i(t)) \quad (2)$$

여기서, E_{batt} : 배터리 전압 [V]
 E_0 : 정전압 [V]
 K : 분극 상수 [Ah^{-1}]
 Q : 최대 배터리 용량 [Ah]
 $i(t)$: 배터리 출력 전류량 [Ah]
 A : 지수함수에서의 전압크기 [V]
 B : 지수함수에서의 역 시상수 [Ah^{-1}]

2.3 BESS 제어기

전압형 컨버터와 계통은 그림 3과 같은 등가회로로 나타낼 수 있고, 등가회로의 전압방정식은 고정좌표계인 $\alpha\beta$ 변환을 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 회전좌표계인 dq 변환을 이용하여 정리하면 식 (4)와 같으며, dq 변환 과정에서 coupling 되는 부분을 상쇄시키면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

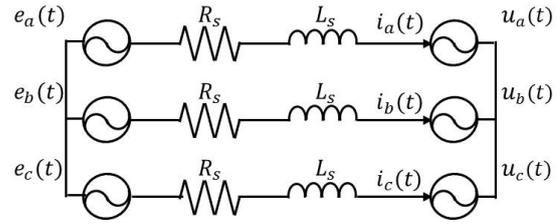


그림 3 전압형 컨버터와 계통의 등가회로
 Fig. 3 Equivalent circuit of VSC and utility grid

$$u^{(\alpha\beta)}(t) - R_s i^{(\alpha\beta)}(t) - L_s \frac{d}{dt} i^{(\alpha\beta)}(t) - e^{(\alpha\beta)}(t) = 0 \quad (3)$$

$$u_d(t) - R_s i_d(t) - L_s \frac{d}{dt} i_d + j\omega_s L_s i_q(t) - e_d(t) = 0 \quad (4)$$

$$u_q(t) - R_s i_q(t) - L_s \frac{d}{dt} i_q - j\omega_s L_s i_d(t) - e_q(t) = 0$$

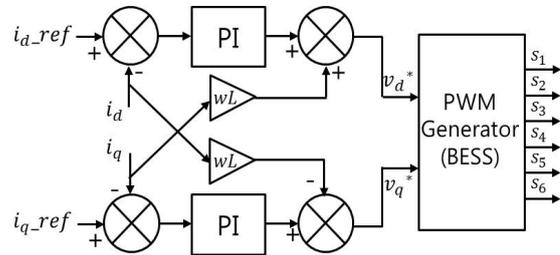


그림 4 전류제어기 블록도
 Fig. 4 Block diagram of current controller of VSC

본 논문에서 설계한 그림 5의 BESS A 제어기는 STS(static switch) signal에 따라 계통연계운전모드와 독립운전모드로 구분하여 동작한다. 계통연계운전모드의 경우, smoothing 제어와 정출력 운전을 동시에 수행하며 독립운전모드일 경우, 제어기는 주파수 제어로 전환된다.

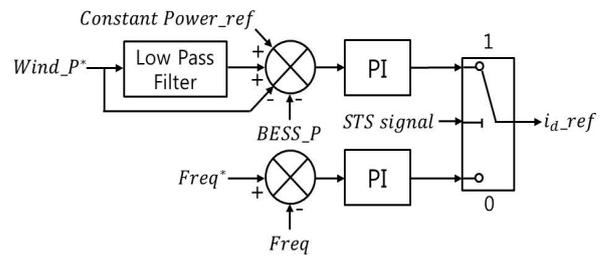


그림 5 BESS A smoothing 제어기 블록도
 Fig. 5 Block diagram of BESS A smoothing controller

그림 6의 BESS B 제어기는 STS signal에 따라 계통연계운전모드에서 Tie-Line 제어를 하며, 독립운전모드에서는 주파수 제어 모드로 동작하도록 설계하였다.

본 논문에서 설계한 BESS A와 B는 계통연계운전모드일 경우 별도의 무효전력 제어를 하지 않으며 독립운전모드로 전환될 경우, 마이크로그리드의 전압 제어를 수행한다.

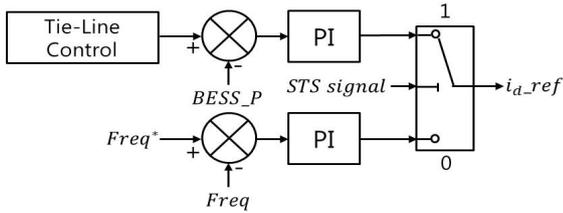


그림 6 BESS B tie-line 제어기 블록도
 Fig. 6 Block diagram of BESS B tie-line controller

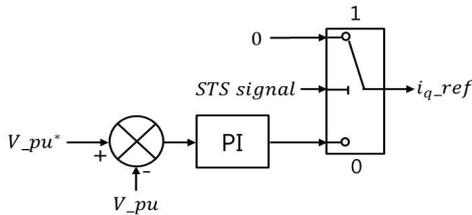


그림 7 BESS A와 B 전압 제어기 블록도
 Fig. 7 Block diagram of controllers of BESSs A and B

3. 마이크로그리드

3.1 마이크로그리드 구성

본 논문에서 마이크로그리드는 그림 8과 같이 디젤발전기, 풍력 발전기, 2 개의 BESS A와 B, 부하로 구성하였고, 구성요소별 용량은 표 1과 같이 산정하였다.

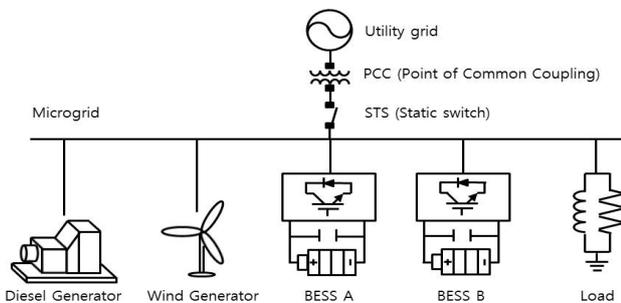


그림 8 마이크로그리드의 구성
 Fig. 8 Composition of microgrid

표 1 마이크로그리드 구성요소 용량
 Table 1 Capacity of microgrid components

구성요소	Diesel Generator	Wind Generator	BESS A	BESS B	Load
용량	160kW	150kW	150kW/Ah	150kW/Ah	250kW

3.2 풍력발전기

본 논문에서 사용된 풍력 발전기는 그림 9와 같은 실제 풍력발전기의 출력 데이터를 이용한 전류등가모델로 그림 10과 같이 설계하였다[13].

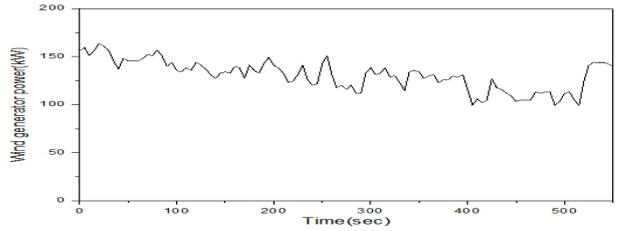


그림 9 풍력발전기의 출력 데이터
 Fig. 9 Output data of Wind generator

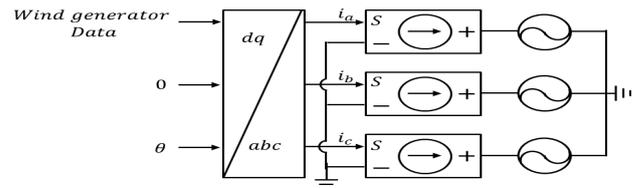


그림 10 풍력발전기의 전류등가모델
 Fig. 10 Equivalent current model of wind generator

3.3 디젤발전기 및 부하

본 논문에서는 동기발전기와 디젤엔진 조속기, IEEE type DC1A 여자기를 이용하여 160kW급 디젤발전기를 모델링하였으며[14], 250kW의 정임피던스 부하를 사용하였다.

4. TMS320F28335 기반 BESS 제어기 테스트

4.1 HILS 시스템 구현

본 논문에서는 HILS 시스템 적용을 위하여 실시간 디지털 시뮬레이터인 eMEGAsim RTDS를 이용하였다. eMEGAsim RTDS는 host PC와 target PC로 구성되어 있으며, target PC는 최대 25μsec 속도로 연산이 가능하고, DSP(digital signal processor)나 Compact-RIO 등과 같은 범용 I/O장치와 연계가 가능하다. 또한 MATLAB/ SIMULINK 기반의 RT-LAB으로 모델링하기 때문에 MATLAB/SIMULINK에서 제공하는 다양한 Toolbox 이용이 가능하여 시스템 개발이 용이하다[15].

또한, BESS 제어기는 32bit 정수 및 소수 연산(floating point unit)이 가능하며, 최대 150MHz의 고속 연산이 가능한 TMS320F28335 DSP 보드로 구현하였다[16].

그림 11은 적용된 eMEGAsim RTDS와 BESS 제어기 사이의 신호 입출력을 나타낸 것으로 그림과 같이 Tie-Line 제어기는 3상 전압(v_{abc}) 및 전류(i_{abc}), 연계지점에서의 유효 전력(Grid_p), 주파수(freq)와 마이크로그리드의 운전모드를 나타내는 STS signal(STS)을 BESS 제어기의 입력으로 사용하고, smoothing 제어기는 3상 전압(v_{abc}) 및 전류(i_{abc}), 풍력발전기의 유효전력(Wind_p), 주파수(freq)와 마이크로그리드의 운전모드를 나타내는 STS signal(STS)을 BESS 제어기의 입력으로 사용하고, 제어기는 공통적으로 3상 PWM 신호(s_a, s_b, s_c)를 eMEGAsim RTDS에 모델링된 BESS A와 B의 IGBT 게이트로 보낸다. 그림 12는 연구실에서 구축된 HILS 시스템을 나타낸 것이다.

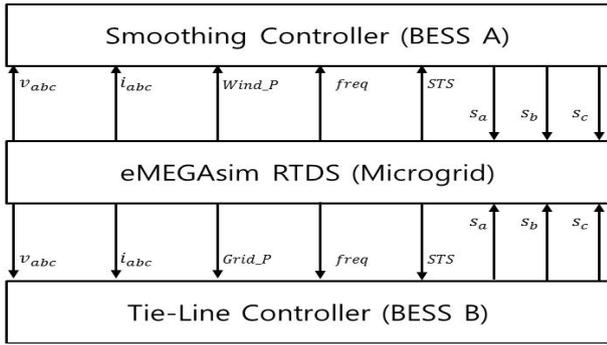


그림 11 HILS 시스템의 입출력 신호
Fig. 11 Input and output signals of HILS system

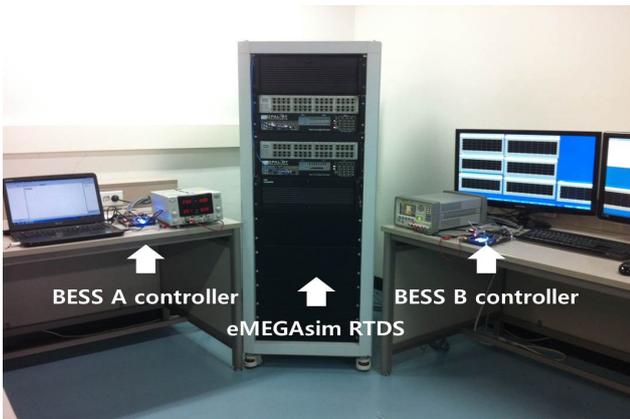


그림 12 실험실에서 구현된 HILS 시스템
Fig. 12 Implemented HILS system at the laboratory

4.2 테스트 시나리오

마이크로그리드 계통연계운전모드에서 BESS A와 B는 표 2와 같이 50kW의 정출력 제어를 포함하는 smoothing 제어와 80kW의 Tie-Line 제어를 각각 수행하며, 독립운전 모드에서는 모두 주파수와 전압을 제어한다. 테스트는 500초간 진행되며 마이크로그리드는 350초에 계통연계운전모드에서 독립운전모드로 전환된다.

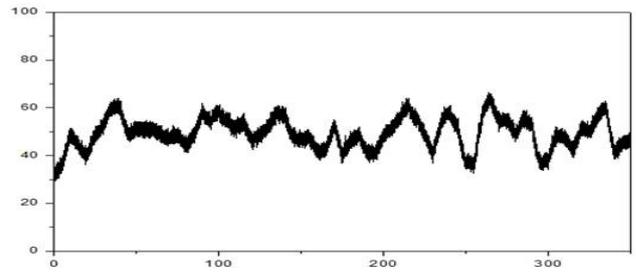
표 2 테스트 시나리오

Table 2 Test scenario

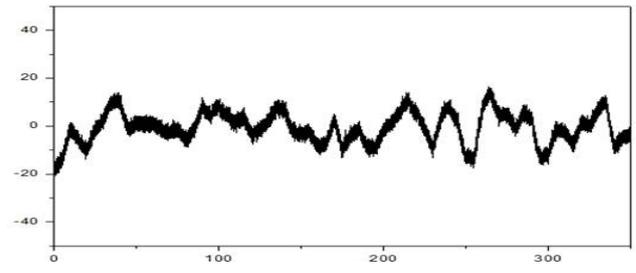
	계통연계운전모드	독립운전모드
BESS A	정출력 제어 및 풍력 smoothing 제어	주파수 및 전압 제어
BESS B	Tie-Line 제어	

4.3 테스트 결과

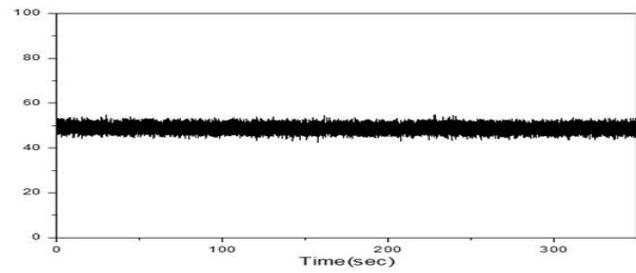
그림 13(a)에 나타난 BESS A의 출력은 풍력 smoothing 제어를 위한 출력(b)와 50kW의 정출력(c)를 구분하여 나타낼 수 있다. 따라서 그림 14와 같이 BESS A의 유무에 따른 풍력발전기의 출력 변동을 비교하였을 때, 그림 13(b)의 smoothing 출력이 적용되어 풍력발전의 출력 변동이 완화된 것을 확인할 수 있다.



(a) BESS A 출력



(b) smoothing 출력



(c) 정출력

그림 13 정출력을 포함하는 BESS A 출력(Grid-connected)
Fig. 13 Output of BESS A including power control

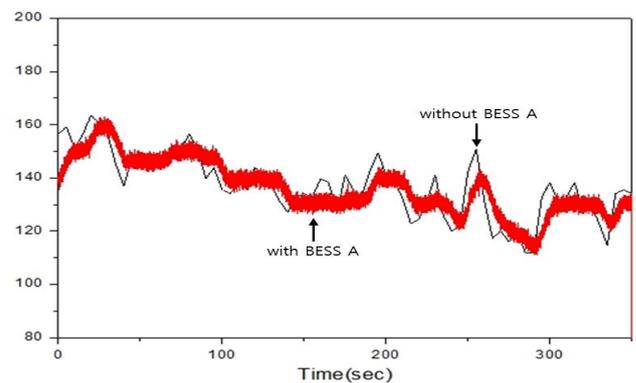


그림 14 풍력발전량과 Smoothing 출력 비교(Grid-connected)
Fig. 14 Comparison of wind power and smoothing power

Tie-Line 제어가 적용된 BESS B의 유무에 따라 연계지점에서의 출력을 비교한 결과는 그림 15와 같다. BESS B가 Tie-Line 제어를 할 경우, 연계지점에서 안정적으로 80kW를 출력하는 반면, BESS B가 Tie-Line 제어를 하지 않을 경우, 마이크로그리드 내의 풍력발전기의 출력 변동에 따라

연계지점에서의 전력 출력량이 변동되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 BESS B의 Tie-Line제어가 원활하게 이루어짐을 확인할 수 있다.

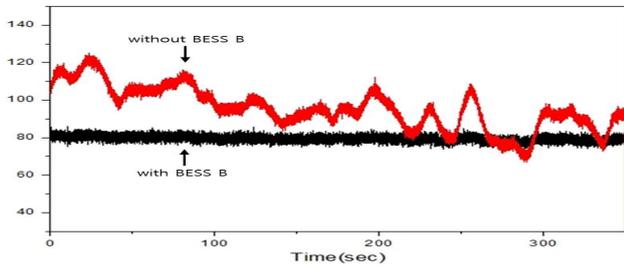


그림 15 연계지점에서의 출력 비교(Grid-connected)
 Fig. 15 Comparison with output power in connection point

그림 16에서 풍력발전기, 디젤발전기, 부하, BESS A와 B의 유효성분 출력과 연계지점에서의 출력량을 확인할 수 있다. BESS A와 B는 계통연계모드에서 50kW의 정출력을 포함한 Smoothing 제어 및 Tie-Line 제어에 의한 출력을 하고, 독립운전모드로 전환 되는 순간 마이크로그리드 내의 주파수를 유지하기 위한 제어를 하여, 마이크로그리드의 주파수는 그림 17과 같이 60Hz로 원활하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

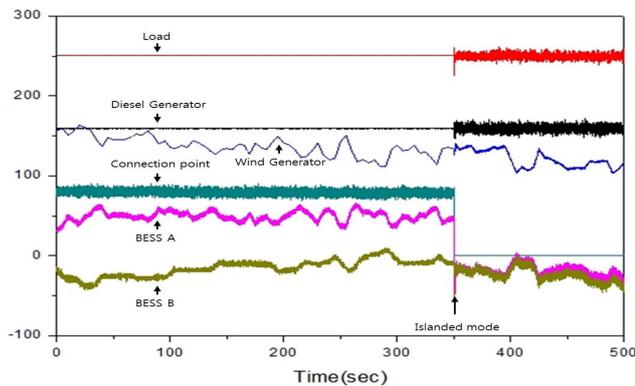


그림 16 유효전력 출력
 Fig. 16 Active power output

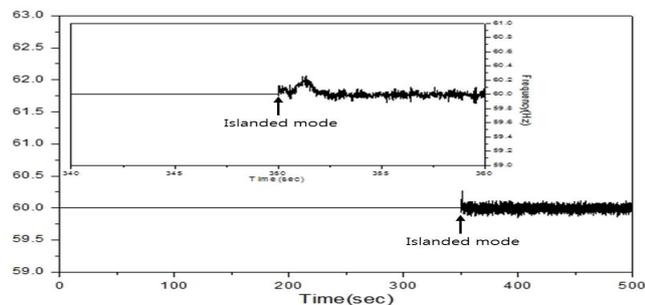


그림 17 마이크로그리드 주파수
 Fig. 17 Microgrid frequency

그림 18에서 디젤발전기, 부하, BESS A와 B의 무효성분 출력과 연계지점에서의 출력량을 확인할 수 있다. BESS A와 B는 계통연계모드에서 별도의 무효전력 제어를 하지 않으며, 독립운전모드로 전환 되는 순간 마이크로그리드 내의 전압을 유지하기 위한 제어를 하여, 마이크로그리드의 전압은 그림 19와 같이 전압이 2% 범위에서 1.0 p.u로 원활하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.

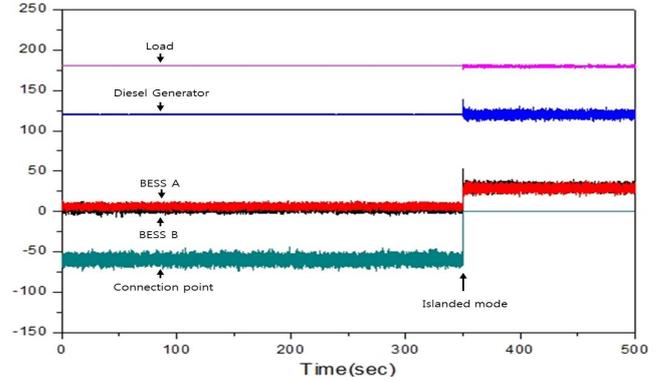


그림 18 무효전력 출력
 Fig. 18 Reactive power output

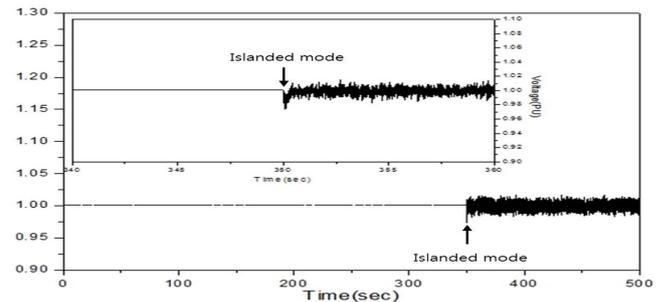


그림 19 마이크로그리드 전압
 Fig. 19 Microgrid voltage

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드의 계통연계운전모드에서 정출력 제어를 포함하는 풍력발전기의 smoothing 제어 및 연계지점에서 안정적인 출력을 제어하기 위한 Tie-Line 제어와 독립운전모드에서의 주파수와 전압 제어에 적용되는 BESS 제어기를 설계하였다. 이를 TMS320F28335 기반의 DSP 보드로 구현하고, eMEGAsim RTDS를 이용한 HILS 시스템을 구축하여 BESS 제어기를 테스트하였다.

제어기 테스트 결과를 통하여 BESS 제어기는 계통연계 모드에서 정출력 및 풍력발전기의 출력 변동을 완하시키고, 연계지점에서 안정적으로 Tie-Line 제어를 하는 것을 확인하였다. 또한, 독립운전모드로 전환시 BESS A와 B가 마이크로그리드의 전력 공급의 균형을 맞춰 주파수를 원활하게 제어하는 것을 확인하였다.

추후, 다양한 종류의 ESS를 모델링하고 ESS 제어기를 TMS320F28335 기반으로 구현하여 HILS 시스템에서 제어기들의 성능을 테스트할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1011306).

References

[1] H.-M. Kim, Y. Lim, and T. Kinoshita, "An Intelligent Multiagent System for Autonomous Microgrid Operation," *Energies*, vol. 5, issue 9, pp. 3347-3362, Sept. 2012.

[2] F. Katiraei and M. R. Iravani, "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1821-1831, Nov. 2006.

[3] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May 2006.

[4] J.-Y. Kim, J.-H. Jeon, S.-K. Kim, C. Cho, J.-H. Park, H.-M. Kim, and K.-Y. Nam, "Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3037-3048, Dec. 2010.

[5] T. Sercan, E. Mesut, Q. Alex, Huang, and B. Subhashish, "Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching," *IEEE Trans. on Energy Convers.*, vol. 24, no. 3, pp. 725-732, Sept. 2009.

[6] W. R. Lachs and D. Sutanto, "Application of batteryenergy storage in power systems," in *Proc. IEEE PEDS*, pp. 700-705, Feb. 1995.

[7] T. Ise, M. Kita, and A. Taguchi, "A Hybrid Energy Storage with a SMES and Secondary Battery," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1915-1918, 2005.

[8] J.-H. Jeon, J.-Y. Kim, H.-M. Kim, S.-K. Kim, C. Cho, J.-M. Kim, J.-B. Ann, and K.-Y. Nam, "Development of Hardware-in-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 2919-2929, Dec. 2010.

[9] P. Rorsyth, T. Maguire, and R. Kuffel, "Real-Time Digital Simulation for Control and Protection System Testing", in *Proc. IEEE PESC*, pp. 329-335, June 2004.

[10] D. Christian, A. Simon, and B. Jean, "Hardware-In-the-Loop Simulation of Power Drives with RT-LAB," in *Proc. IEEE PEDS*, pp. 1646-1651, 2005.

[11] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced*

Converters in Power System, John Wiley and Sons, 2010.

[12] O. Ttrmblay, L. A. Dessaint, and A. I. Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," in *Proc. IEEE VPPC*, pp. 284-289, Sept. 2007.

[13] P. K. Ray, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "Dynamic Modeling and Control of Renewable Energy based Hybrid System for Large Band Wind Speed Variation," in *Proc. IEEE PES*, pp. 1-6, 2010.

[14] H.-J. Yoo, H.-M. Kim, and C.-H. Song, "A Coordinated Frequency Control of Lead-acid BESS and Li-ion BESS during Islanded Microgrid Operation," in *Proc. IEEE VPPC*, pp. 1453-1456, Oct. 2012.

[15] OPAL-RT, *OPAL-RT Manual & Tutorial*, 2011.

[16] Syncworks, *Delfino Hardware Manual*, 2007.

저 자 소 개



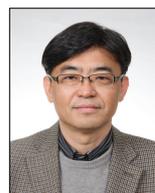
김 남 대 (金南大)

2013년 국립인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 032-835-4206
E-mail : namdae88@incheon.ac.kr



유 형 준 (劉亨準)

2012년 국립인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 032-835-4206
E-mail : hjyoo@incheon.ac.kr



김 학 만 (金學萬)

1998년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사), 2011년 일본 Tohoku (東北)대학교 정보과학연구과 졸업(박사), 1996년 10월 ~ 2008년 2월 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 국립인천대학교 공과대학 전기공학과 교수.
Tel : 032-835-8769
E-mail : hmkim@incheon.ac.kr