

OPAL-RT 기반의 Hardware-in-the-Loop Simulation (HILS) 시스템을 이용한 독립운전모드 마이크로그리드 시뮬레이션

Islanded Microgrid Simulation using Hardware-in-the Loop Simulation (HILS) System based on OPAL-RT

유형준* · 김학만†
(Hyeong-Jun Yoo · Hak-Man Kim)

Abstract - A microgrid is a small scale power system. The microgrid is operated in two operation modes, the grid-connected mode and the islanded mode. In the islanded mode, the frequency of a microgrid should be maintained constantly. For this, the balance between power supply and power demand during islanded mode should be met. In general, energy storage systems (ESSs) are used to solve power imbalance. In this paper, the frequency control effect of a Lithium-ion battery energy storage system (Li-ion BESS) has been tested on the hardware-in-the loop simulation (HILS) system environment.

Key Words : Microgrid, Energy storage system (ESS), Hardware-in-the-loop simulation (HILS) system, Frequency control

1. 서 론

오늘날 화석연료 사용에 따른 연료 고갈문제와 환경오염 문제가 대두되고 있는 가운데 풍력, 태양광 등 고갈되지 않으며 친환경적으로 전력생산이 가능한 신재생에너지원에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이러한 신재생에너지원 기반의 분산전원과 분산저장장치, 부하로 구성된 소규모 전력계통인 마이크로그리드에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2].

마이크로그리드는 전력계통과 연계되어 운전하는 계통연계운전모드와 계통과 분리되어 독립적으로 운전하는 독립운전모드로 구분 할 수 있다. 마이크로 그리드가 계통연계운전을 할 경우 전력 계통으로 전력 수수가 가능하여 수요량과 공급량의 불균형 문제를 해소할 수 있어 항시 고품질의 전력공급이 가능하다[3,4]. 반면에 전력계통과 분리되어 독립운전을 할 경우 분산전원에 의하여 부하로 전력공급은 가능하지만 신재생에너지 기반의 분산전원은 시간과 장소에 따라 출력량 변동이 발생하기 때문에 순시적으로 수요량과 공급량의 불균형이 발생하여 주파수 및 전압제어가 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 배터리, EDLC(electric double layer capacitor), SMES(superconducting magnetic energy storage) 등과 같은 에너지저장장치를 설치하여 필요에 따라 전기에너지를 충/방전함으로써 발전과 소비의 균형을 맞출 수 있어 고품질의 전력 공급이 가능하며 전력시스템을 유연

하게 운영할 수 있다[5,6].

한편 현장의 실제 시스템이나 플랜트에서 개발 기기를 테스트할 경우 공간, 시간, 비용 등 다양한 제약이 있어 최근 실시간 디지털 시뮬레이터에 시스템이나 플랜트를 실제와 동일한 조건으로 모델링하고, 성능을 검증하고자 하는 제어기 또는 시스템을 실제 하드웨어로 구성하여 테스트하는 기법인 HILS(hardware-in-the-loop simulation) 시스템이 점차 활용되고 있다[7,8]. 이는 실제 하드웨어로 구성된 제어기 또는 시스템이 실시간 디지털 시뮬레이터와 실시간으로 아날로그 및 디지털 신호를 주고 받으며 시뮬레이션하기 때문에 신뢰도가 높은 실험 결과를 얻을 수 있고, 경비와 시간을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다[7,8].

본 논문에서는 독립운전모드 마이크로그리드의 주파수를 제어하기 위하여 납 배터리에 비하여 높은 에너지 밀도와 긴 수명을 가지는 리튬이온 BESS(Li-ion battery energy storage system)를 이용하였다. 또한, 제한한 리튬이온 BESS의 제어 성능과 실제 마이크로그리드 적용 가능성을 검증하기 위하여 실시간 디지털 시뮬레이터인 OPAL-RT 기반의 HILS 시스템을 구성하고 산업현장에서 널리 적용되는 범용제어기인 NI사의 CompactRIO를 이용하여 제어기를 설계하여 독립운전모드 마이크로그리드의 주파수 제어성능 및 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. OPAL-RT 기반 HILS 시스템

2.1 OPAL-RT

그림 1과 같이 OPAL-RT는 개발자가 로직개발과 컴파일 등 시험이 실행되는 호스트 PC와 설계된 로직이 실제로 실행

* 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 21, 2013; Accepted : March 8, 2013

시간으로 실행되는 타겟 PC로 구성되어 있다.

호스트 PC는 타겟 PC와의 실시간 통신을 위하여 1Gbps 랜 카드(lan card)를 포함하고 있으며, Window 기반으로 동작하여 엔지니어는 손쉽게 모델링 및 컴파일을 할 수 있고, 컴파일된 모델은 타겟 PC로 다운로드된다.

타겟 PC는 12개의 3.3GHz processor core와 실시간 동작이 가능한 Redhat-OS가 설치되어 있으며, 실시간 로직 계산 및 디지털, 아날로그 입/출력을 위하여 FPGA(Filed programmable gate array) 보드와 디지털 입/출력, 아날로그 입/출력 카드가 포함되어 있다[9].

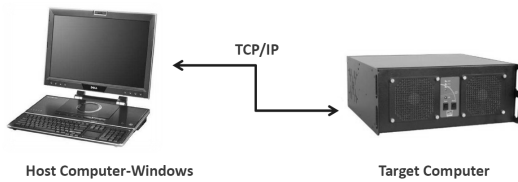


그림 1 OPAL-RT의 호스트PC와 타겟 PC
Fig. 1 Host PC and Target PC in OPAL-RT

이와 같이 호스트 PC와 타겟 PC로 구성된 OPAL-RT의 특징과 응용분야는 다음과 같다[9].

- 실시간 시뮬레이션 수행 중 파라미터 변경이 가능하기 때문에 튜닝이 용이하다.
- 상용의 여러 종류 I/O장치와 연계동작이 가능하다.
- 시뮬레이션의 연산속도(time step)는 최대 25μsec까지 가능하여 고주파를 이용하는 전력변환장치의 시뮬레이션이 가능하다. (본 논문에서는 25μsec로 시뮬레이션하였다.)
- MATLAB/SIMULINK에서 제공되는 다양한 수치해석 및 임베디드 시스템 설계 툴을 사용함으로써 정확하고 편리하게 시스템 개발이 가능하다.

2.2 HILS 시스템

자동차나 항공기와 같이 시험비용이 고가인 산업영역에서 제품을 개발하는데 있어 시뮬레이션을 통한 결과는 매우 이상적인 환경에서 이루어지기 때문에 신뢰도가 높지 않다. 그렇기 때문에 실제 환경에서 테스트를 해야 하지만 열악한 시험환경 및 고가의 시험비용 등의 제약이 따른다. 이러한 제약을 극복하기 위하여 고안된 방법이 HILS 시스템이다 [7,8].

HILS 시스템은 실시간 디지털 시뮬레이터에 플랜트를 실제와 동일하게 모델링한 후, 개발된 컨트롤러를 연계하여 테스트함으로써 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 그림 2와 같이 실시간 디지털 시뮬레이터인 OPAL-RT에 디젤발전기, 태양광/풍력 하이브리드 발전 시스템, 리튬이온 BESS, 부하로 구성된 마이크로그리드를 모델링하였고, 산업현장에 널리 적용되는 범용 제어기인 NI사의 CompactRIO에 리튬이온 BESS 제어기를 설계하여 HILS 시스템을 구성하였다.

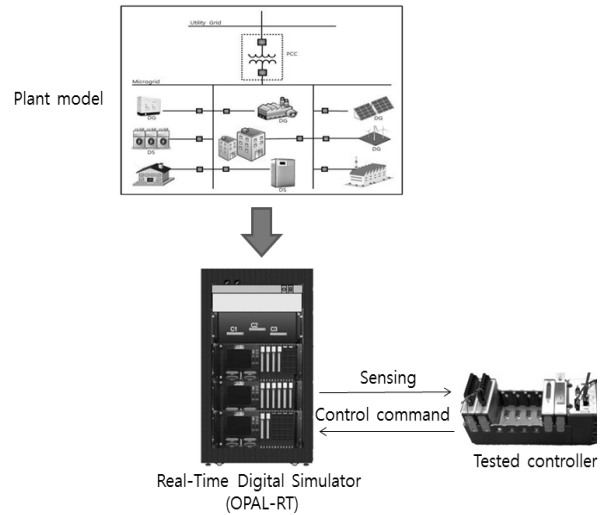
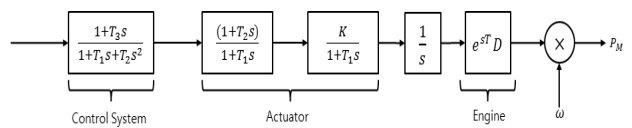


그림 2 HILS 시스템
Fig. 2 HILS system

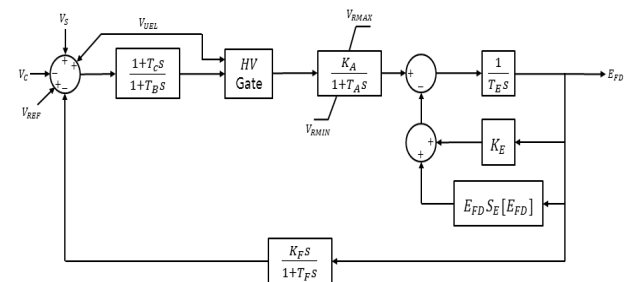
3. 마이크로그리드 모델링

3.1 디젤 발전기

본 논문에서는 동기발전기, 조속기, 여자기로 구성된 200kW급 디젤 발전기를 모델링하였다. 조속기는 그림 3(a)와 같이 Woodward 타입의 디젤 엔진 조속기를 이용하였고, 여자기는 그림 3(b)와 같이 IEEE type DC1A를 사용하였다.



(a) Diesel engine governor system



(b) IEEE type DC1A block diagram

그림 3 디젤발전기의 제어시스템
Fig. 3 Control system of diesel generator

3.2 PV/Wind Hybrid 발전시스템

태양광 발전시스템의 출력전류는 식 (1)과 같이 일사량과 표면온도에 따른 함수로 표현할 수 있다[10].

$$I = I_{SC} - I_{OS} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

여기서, I : 부하전류 [A]
 I_{SC} : 단락전류 [A]
 I_{OS} : 포화전류 [A]
 q : 전하량 [C]
 R_s : 직렬기생저항 [Ω]
 R_{sh} : 병렬기생저항 [Ω]
 k : 볼트만 상수 [J/K]
 T : PN접합 온도 [K]
 V : 태양전지전압 [V]
 n : 접합상수

풍력발전시스템의 출력전력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[10].

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

여기서, C_p : 출력계수
 ρ : 공기밀도 [kg/m^3]
 A : 면적 [m^2]

식 (2)에서 C_p 는 바람에너지가 기계적 에너지로 변환될 때 변환효율을 의미하며, 이는 블레이드 개수와 형태에 따라 달라진다. 일반적으로 C_p 는 Betz's의 법칙에 의하여 0.593이라는 최대치를 얻을 수 있지만 실제 변환효율은 최대치의 약 80% 정도로 알려져 있다[10].

본 논문에서는 태양광 발전시스템과 풍력발전시스템을 결합한 하이브리드 발전시스템을 그림 4와 같이 실제 하이브리드 발전시스템의 출력발전량 데이터를 이용한 전류등가 모델을 이용하여 모델링하였다.

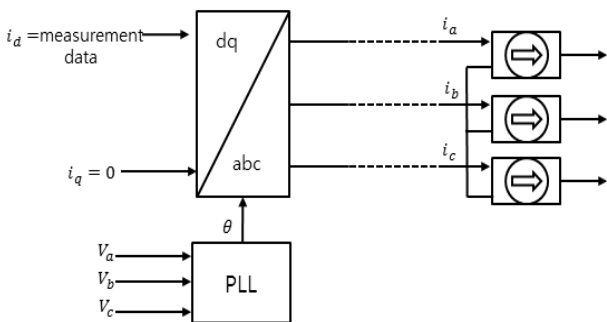


그림 4 전류등가 모델
 Fig. 4 Current equivalent model

3.3 리튬이온 BESS

3.3.1 배터리 모델

그림 5의 리튬이온 배터리는 가변전원과 고정저항을 이용한 비선형 모델이며 식 (4)에 의하여 가변전원에 입력된다[11].

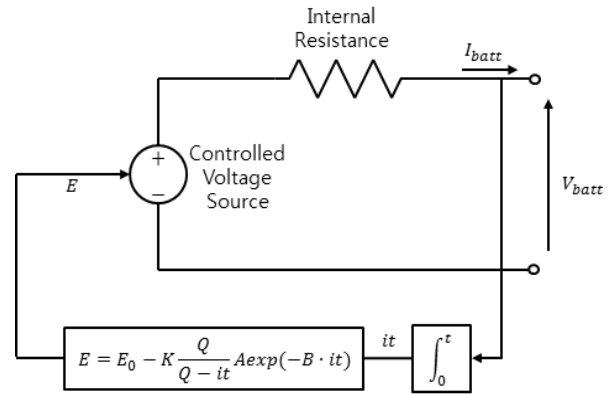


그림 5 배터리 모델
 Fig. 5 Battery model

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (4)$$

여기서, $\int idt$: 배터리 충전전류(Ah)
 A : 지수함수에서의 크기(V)
 B : 지수함수에서의 역 시상수(Ah)⁻¹
 V_{batt} : 배터리 전압(V)
 R : 내부 저항(Ω)
 i : 배터리 전류(A)

3.3.2 3상 전압형 컨버터

그림 6은 AC↔DC 양방향으로 전력변환이 가능한 IGBT (insulated gate bipolar transistor) 기반의 3상 전압형 컨버터를 나타낸 것으로 각 상의 전압과 전류는 식 (5)와 같다 [12].

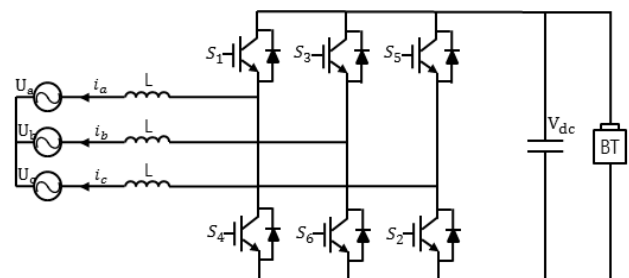


그림 6 3상 전압형 컨버터
 Fig. 6 3-phase voltage source converter

$$\begin{aligned} U_a &= E_m \cos(\omega t) & i_a &= I_m \cos(\omega t + \psi) \\ U_b &= E_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & i_b &= I_m \cos(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c &= E_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & i_c &= I_m \cos(\omega t + \psi + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, E_m : 상전압 크기
 I_m : 전류의 크기

3상 전압형 컨버터를 제어함에 있어서 sinusoidal PWM (pulse width modulation)를 사용하였고, 캐리어 신호는 1kHz의 주파수를 가지는 삼각파를 이용하였다.

또한, 제어의 선형성 확보와 제어의 간략화를 위하여 dq 변환을 이용한 전류제어법을 사용하였다. 이를 위하여 3상의 전압방정식을 PLL(phase lock loop)을 통하여 얻은 위상정보를 이용하여 식 (6)과 같은 dq-frame에서의 전압방정식으로 변환한다[12].

$$v_{dq} = v^s e^{-j\theta} \quad (v^s = v_\alpha + jv_\beta) \quad (6)$$

$$u^s = Ri^s + L \frac{di^s}{dt} + u_s^s$$

$$u_{dq} = Ri_{dq} + L \frac{di_{dq}}{dt} + jL\omega i_{dq} + u_{sdq}$$

여기서, θ : 위상

식 (6)을 이용하여 그림 7과 같은 decoupling 제어가 가능한 전압형 컨버터의 전력 제어기를 설계할 수 있고, 이를 이용하여 리튬이온 BESS는 유/무효전력을 독립적으로 제어가 가능하게 된다[12].

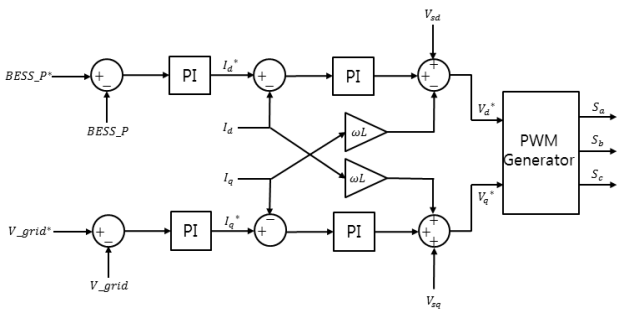


그림 7 제어기 구성도
Fig. 7 Structure of controller

3.4 마이크로그리드 모델

본 논문에서는 그림 8과 같이 디젤발전기, 태양광/풍력 하이브리드 발전시스템, 리튬이온 BESS, 부하로 구성된 마이크로그리드를 모델링하였고, 각각의 용량은 표 1과 같다. 이때, 마이크로그리드와 전력계통이 연결되어 있는 지점을 PCC(point of common coupling)라고 하며, 마이크로그리드는 STS(static switch)에 의하여 전력계통에 고장 발생 시 순간적으로 개방되어 독립운전모드로 전환할 수 있다.

표 1 마이크로그리드 구성요소 용량

Table 1 Capacity of component

Component	diesel generator	PV/Wind hybrid	리튬이온 BESS
Capacity (kW)	200	200	100

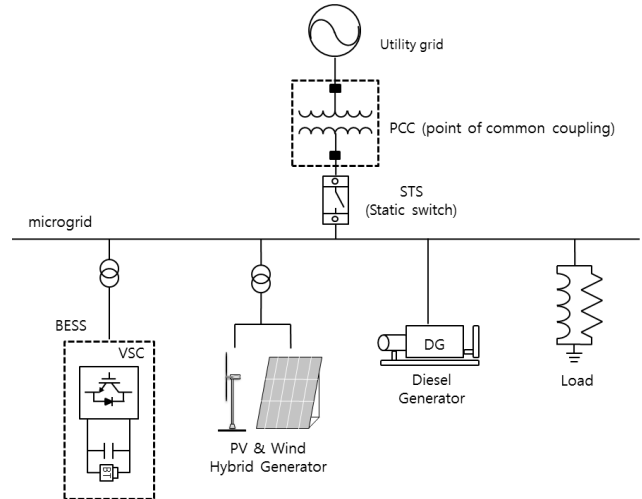


그림 8 마이크로그리드
Fig. 8 Microgrid

4. HILS 기반의 실시간 제어 테스트

본 논문에서는 실시간 디지털 시뮬레이터에 그림 8과 같은 테스트 마이크로그리드를 모델링하고, CompactRIO를 이용하여 에너지저장장치의 상위제어기를 설계하여 HILS 시스템을 구축하였다.

4.1 테스트 마이크로그리드

MATLAB/SIMULINK 기반의 실시간 디지털 시뮬레이터에 모델링된 마이크로그리드는 그림 9와 같다.

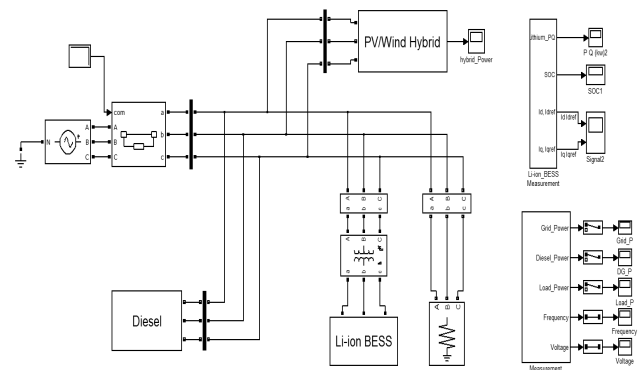


그림 9 OPAL-RT에서의 마이크로그리드 모델
Fig. 9 Microgrid model by using OPAL-RT

4.2 CompactRIO 및 OPAL-RT 기반의 HILS 시스템

4.2.1 리튬이온 BESS 제어기

본 논문에서 리튬이온 BESS는 마이크로그리드가 계통연계 모드로 운전할 경우 초기 설정값으로 정출력 운전을 하며, 독립운전모드로 전환될 경우 마이크로그리드의 주파수를 제어하게 된다.

CompactRIO에서는 항상 STS의 동작을 감지하며, STS가 개방될 때, 리튬이온 BESS의 운전모드가 바뀌게 된다. 이때, OPAL-RT에 모델링 된 마이크로그리드는 25 μ sec로 시뮬레이션이 이루어지며, CompactRIO는 1ms로 입/출력한다.

4.2.2 OPAL-RT기반의 HILS 시스템

그림 10은 본 논문에서 구축된 HILS 시스템을 나타낸 것이다.

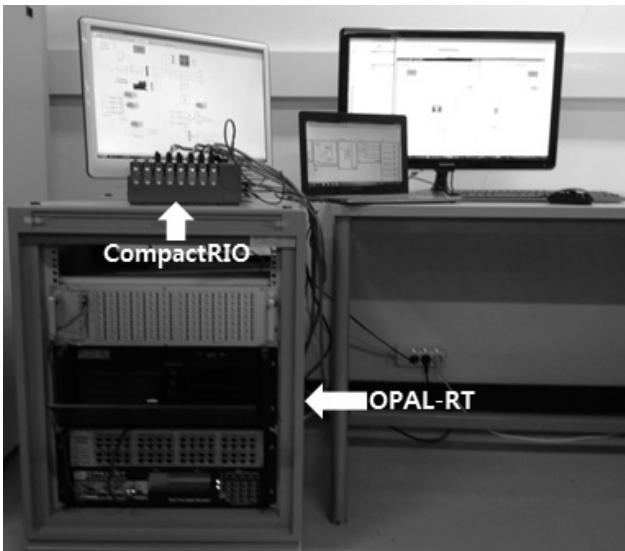


그림 10 구축된 HILS system
Fig. 10 Constructed HILS system

4.3 제어기의 성능 테스트

본 논문에서는 두 가지 case로 테스트를 수행하였다. case 1은 마이크로그리드내의 발전량이 부하량보다 적은 경우이며, case 2는 마이크로그리드내의 발전량이 부하량보다 많을 경우이다. 이 때, 각각의 case에서 구성요소들의 출력과 주파수를 살펴보았다.

case 1에서는 발전량이 부하량보다 적은 상태로 계통연계 운전모드일 경우에는 전력계통으로부터 부족전력을 수전하며, 5초에 STS가 동작하여 마이크로그리드는 독립운전모드로 전환된다. 그림 11은 마이크로그리드 내의 디젤발전기, PV/Wind hybrid 발전시스템, 리튬이온 BESS의 출력량을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 계통연계운전모드일 경우에는 전력계통으로부터 부족전력인 약 20kW를 수전받지만 5초에 독립운전모드로 전환 시, 전력계통으로부터 전력을 수전받을 수 없어 부족전력 현상이 발생하여 순간적으로 주파수는 떨어지게 되며 리튬이온 BESS는 주파수제어를 위하여 일정량을 출력하는 정출력 제어에서 주파수제어로 변경되면서 약 2.5초내에 주파수가 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 그림 12를 통하여 확인할 수 있다.

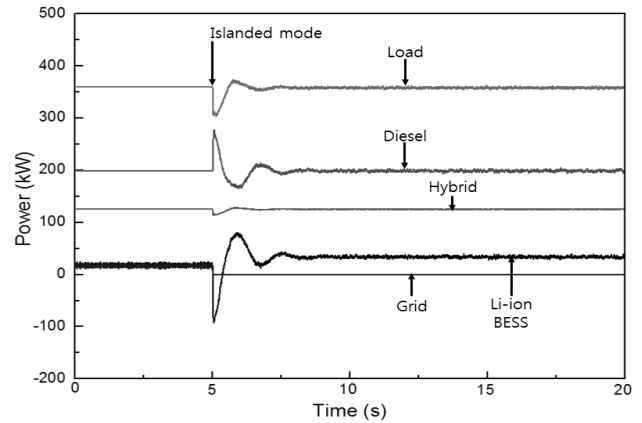


그림 11 구성요소들의 출력(case 1)
Fig. 11 Output power of components(case 1)

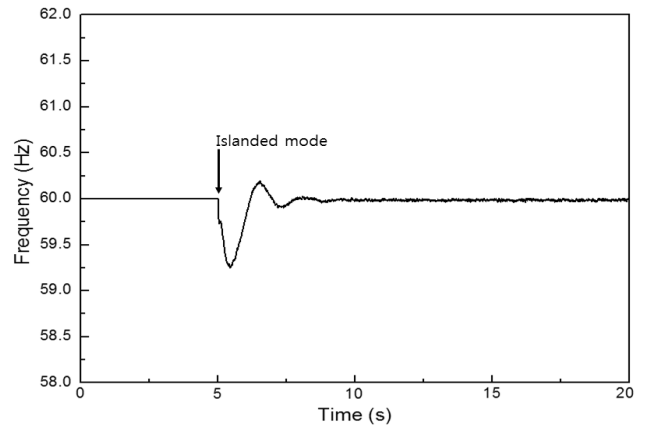


그림 12 주파수(case 1)
Fig. 12 Frequency(case 1)

case 2에서는 발전량이 부하량보다 많은 상태로 계통연계 운전 모드일 경우에는 전력계통으로 잉여전력을 수전하며, 5초에 STS가 동작하여 마이크로그리드는 독립운전모드로 전환된다. 그림 13은 마이크로그리드 내의 디젤발전기, PV/wind hybrid 발전시스템, 리튬이온 BESS의 출력량을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 계통연계운전모드일 경우에는 전력계통으로 잉여전력인 약 20kW를 송전하지만 5초에 독립운전모드로 전환 시, 전력계통으로 전력을 송전할 수 없어 잉여전력이 발생하여 순간적으로 주파수는 상승하게 되며 리튬이온 BESS는 주파수 제어를 위하여 일정량을 충전하는 정출력 제어에서 주파수제어로 변경되면서 약 2.5초내에 주파수가 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

리튬이온 BESS의 제어기를 CompactRIO에 설계하고 OPAL-RT 기반의 HILS 시스템 환경에서 독립운전모드 마이크로그리드의 시뮬레이션을 수행하였다. 수행 결과 마이크로그리드 내에서 부족전력/잉여전력 발생 시 주파수는 약 2.5초내에 리튬이온 BESS에 의하여 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

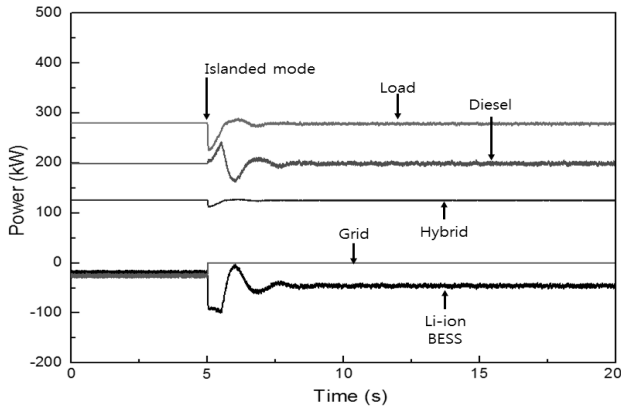


그림 13 구성요소들의 출력 (case 2)
 Fig. 13 Output power of components(case 2)

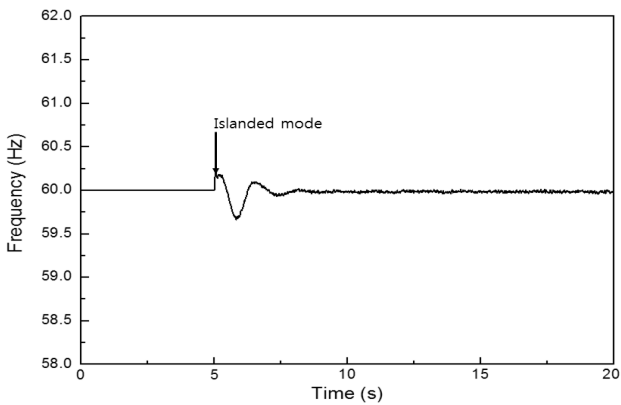


그림 14 주파수(case 2)
 Fig. 14 Frequency(case 2)

5. 결 론

본 논문에서는 독립운전모드 마이크로그리드의 주파수를 제어하기 위하여 리튬이온 BESS를 이용하였고, 이를 검증하기 위하여 OPAL-RT 기반의 HILS 시스템을 구축하였다. 독립운전모드 주파수제어를 위한 리튬이온 BESS 제어를 산업현장에서 널리 이용되는 NI사 CompactRIO로 설계하고 제어성능을 확인하였다. 검증결과 독립운전모드 마이크로그리드 내에서 부족전력/잉여전력이 발생하는 두 가지 case 모두 독립운전모드로 전환 시 약 2.5초내에 주파수가 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

HILS 시스템을 이용할 경우 마이크로그리드내의 다양한 제어기들을 실제환경과 근접하게 테스트할 수 있으므로 마이크로그리드 연구에 많은 활용이 기대된다. 추후 다 기종의 ESS들이 도입될 때, 주파수 제어를 위한 효율적인 상위제어 전략 수립에 관한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

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

References

[1] H.-M. Kim, T. Kinoshita, Y. Lim, and T.-H. Kim, "A Bankruptcy Problem Approach to Load-shedding in Multiagent-based Microgrid Operation," *Sensors*, Vol. 10, Issue 10, pp. 8888-8898, Oct. 2010.

[2] N. D. Hatziargyriou, H. Asano, H. R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrid," *IEEE Trans. on Power Energy*, Vol. 5, pp. 78-94, July/Aug. 2007.

[3] H.-M. Kim, T. Kinoshita, and M.-C. Shin, "A Multiagent System for Autonomous Operation of Islanded Microgrids based on a Power Market Environment," *Energies*, Vol. 3, Issue 12, pp. 1972-1990, Dec. 2010.

[4] J.-Y. Kim, H.-M. Kim, S.-K. Kim, J.-H. Jeon, and H.-K. Choi, "Designing Fuzzy PID Controller of Energy Storage System for Microgrid Islanded Operation," *Energies*, Vol. 4, Issue 9, pp. 1443-1460, April 2011.

[5] 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.

[6] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, "Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor with Dynamic Energy Management in Microgrid Application," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, pp. 923-930, March 2011.

[7] 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.

[8] B. Lu, X. Wu, H. Figueroa, and A. Monti, "A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 2, pp. 919-931, April 2007.

[9] OPAL-RT, OPAL-RT Manual & Tutorial, 2011.

[10] G. M. Master, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley and Sons, 2004.

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

[12] A. Yazdani, and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power System*, John Wiley and Sons, 2010.

저 자 소 개



유 형 준 (劉 亨 準)

1987년 10월 10일생. 2012년 국립인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2012년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

E-mail : hjyoo@incheon.ac.kr



김 학 만 (金 學 萬)

1966년 2월 11일생. 1998년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사), 2011년 일본 Tohoku(東北)대학교 정보과학연구과 졸업(공학박사), 1996년 10월 ~ 2008년 2월 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 국립인천대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 032-835-8769

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr