The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 11, pp. 1584~1589, 2012
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.11.1584

마이크로그리드에서의 데드 밴드와 회복 제어를 적용한 배터리 에너지저장시스템 주파수 제어

Frequency Control of Battery Energy Storage System with a Deadband and Restoration Control in Microgrid

이 학 주* · 최 진 영** · 최 종 찬*** · 원 동 준† · 채 우 규* · 박 중 성§
(Hak-Ju Lee · Jin-Young Choi · Jong-Chan Choi · Dong-Jun Won · Woo-Kyu Chae · Jung-Sung Park)

Abstract - The grid-interconnected microgrid can be able to operate with and without the utility microgrid to supply electricity. when the microgrid operates in grid-connected mode, the frequency of the microgrid synchronizes with the system frequency. In this case, the frequency of the microgrid has small variation which is able to change the output of distributed generation with a droop controller. Thus, the small variation of frequency can make the distributed generation generate unnecessary electricity consistently. In this paper, we propose a frequency droop control with a dead band so as to prevent the distributed generations from generating unnecessary output while in grid-interconnected mode. In addition , a distributed generation can have a restoration control to restore the frequency changed by a droop control as a rated frequency. Also, we state the problem of restoration control with a dead band, and propose its solution when the microgrid operates in stand alone mode. We simulate the proposed droop control using PSCAD/EMTDC to verify the validity of the control.

Key Words : Microgrid, BESS, Frequency control, Voltage control, Deadband control

1. 서 론

최근 에너지저장장치의 수요가 증가하면서 분산전원의 역할을 대신하여 비상용 전원, 주파수 제어, 전압 제어 등의 용도로 활용하려는 연구가 진행 중이다. 특히, 전력품질 향상을 위해 기존의 전력망과 연계 혹은 독립 운전이 가능한 소규모 전력망인 마이크로그리드에서 제어 전원으로써 배터리 에너지저장장치(BESS)의 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-3]. BESS의 제어 방법에는 기존의 화력 발전의 드룹 제어를 응용하여 충·방전을 제어하는 방법이 연구되었지만, 에너지 용량이 제한적인 에너지저장장치에 기존의 드룹 제어 방식을 적용하는 데는 한계가 있다.

참고문헌 [3]의 경우, CERTS의 마이크로그리드 실증사이트에서 BESS의 충전 상태(SOC, state of charge)를 고려하여 드룹 제어를 통한 BESS의 유·무효 전력 제어를 제안하였다. 그러나 이 논문에서는 독립운전 시 BESS를 통한 수급균형 알고리즘은 잘 나타내고 있지만, 계통 연계 시 미소한 주파수 및 전압 변동에 대해 드룹 제어로 인한 지속적인 출력 변동은 고려되지 않았다. 이는 BESS의 에너지 용량을 고려하였을 때, 지속적인 에너지 손실뿐만 아니라 독립운전으로 변환 시 BESS가 원활한 전력을 충·방전 할 수 없는 문제가 발생할 수가 있다.

본 논문에서 제안한 BESS의 출력 제어는 주파수-유효전력 드룹 제어를 활용하였으며, 에너지 용량을 고려하여 계통 연계 시 미소한 주파수 변동에 대해 지속적인 출력을 방지하기 위한 데드밴드 제어를 추가하였다. 또한, 마이크로그리드의 독립 운전 시 전력품질 향상을 위해 드룹 제어로 인해 변동된 주파수를 상용주파수로 회복시켜주는 주파수 회복 제어를 수행할 수 있다. 주파수 회복 제어 수행 시 데드벤드로 인한 문제점을 제시하고 해결방안을 제안하였다.

본 논문에서는 BESS의 에너지 용량을 고려해서 주파수 제어에 참여하는 알고리즘을 제시하였다. 그리고 제안한 제어 알고리즘을 풍력, 태양광, 마이크로가스 터빈 등 환경 친화적인 소규모 분산발전시스템의 상업화 및 보급 확대를 하기 위한 목적으로 전력연구원에서 진행 중인 과제의 마이크로그리드 실증사이트에 적용할 계획이다.

* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
** 정 회 원 : 인하대 IT공대 전기공학부 박사과정
*** 준 회 원 : 인하대 IT공대 전기공학부 석사과정
§ 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원 연구원
† 교신저자, 정회원 : 인하대 IT공대 전기공학부 교수
E-mail : djwon@inha.ac.kr
접수일자 : 2012년 8월 25일
최종완료 : 2012년 10월 16일

2. 본 론

2.1 실증사이트 구성 요소

현재 전력연구원에 설치되고 있는 마이크로그리드 실증사이트는 제어 목적에 따라 그림 1과 같이 두 구역으로 구성되어 있다[4]. 본 논문에서는 계통 사고 시, 드룹 제어를 통해 독립운전으로 운영 가능한 Zone B를 대상으로 주 제어 분산전원인 BESS(Battery Energy Storage System)의 출력 제어 방안을 제안한다. 마이크로그리드 실증사이트 Zone B

의 구성원 및 용량, 제어 방법은 다음 표 1과 같다. BESS는 독립운전 시 마이크로그리드 내 수급균형을 담당하며, 원활한 독립운전으로 변환이 가능하도록 운영된다. 슈퍼캐패시터는 BESS의 급작스런 출력 변동을 완화해주고 전력품질을 향상시켜주는 역할을 수행한다. 원래 마이크로가스터빈과 디젤발전기는 출력 제어가 가능하지만 실증사이트에서는 통신을 통한 상위 EMS에서 지령한 출력값으로만 출력할 수 있게 설정되어 있다.

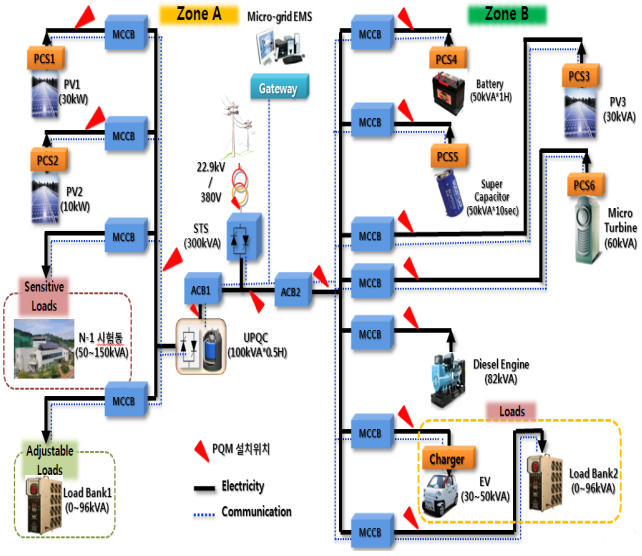


그림 1 마이크로그리드 실증사이트 구성도

Fig. 1 (a) System Layout of the Microgrid Demonstration Site in KEPCO

표 1 Zone B 내부 분산전원 구성원

Table 1 System Layout of the Distributed Generations in the Zone B

분산전원	선로임피던스 (ACB2 ~ Unit)	용량	제어 방법
BESS	0.00476[Ohm] 2.496[uH]	50kVA 50kWh	드룹 제어 / 회복 제어
Super-capacitor	0.00476[Ohm] 2.496[uH]	50kVA 500kWs	드룹 제어
PV	0.138[Ohm] 56.432[uH]	30kW	MPPT 제어
Diesel Engine	0.00476[Ohm] 2.496[uH]	82kVA	일정 출력 제어
Micro Gas Turbine	0.10948[Ohm] 56.432[uH]	60kVA	일정 출력 제어

2.2 드룹제어

2.2.1 드룹제어

주파수 드룹 제어는 BESS의 출력을 제어하는 방법으로써 그 출력량은 주파수 지령값과 측정된 주파수의 차(Δf)로 미리 설정된 드룹 제어 계수(Rf)에 의해 출력 지령값이 결정된다. 출력 지령값(Pref)은 인버터 제어기의 입력 신호로 들어가 제어를 거쳐 인버터 스위칭 소자의 스위칭 신호를 제어한다.

$$R_f = \frac{\triangle f(p.u)}{\triangle P(p.u)} \times 100\% \tag{1}$$

$$P_{ref} = P_{ref0} + P_{ref}^{droop}, \quad P_{ref}^{droop} = \frac{1}{R_f}(f_{ref0} - f) \tag{2}$$

2.2.2 데드 밴드와 드룹 제어

마이크로그리드의 계통 연계 시 마이크로그리드 내부의 주파수는 계통의 영향을 받는다. 이 때 미세한 주파수 변동은 드룹 제어에 의해 BESS의 출력을 지속적으로 변동시키고 에너지 손실을 유발시킨다. 이를 방지하기 위해 계통의 현실성을 고려하여 그림 2와 같이 드룹 제어의 불감대 영역이 필요하다. 2009년 고시된 전력계통 신뢰도 및 전력품질 유지기준에 따르면 평상시 주파수 유지 범위는 ±0.2Hz로 규정되어 있으며, 현실성을 고려하여 주파수 불감대는 60.03~59.97Hz와 같이 설정하였다. 그림 2는 독립운정 시, 드룹 제어를 통해 주파수 변동에 따른 BESS의 출력 지령값 변동을 나타낸다. 부하의 증가로 주파수가 떨어지면, BESS의 출력 지령값은 미리 설정된 드룹 계수에 의해 수급 균형을 맞춘다(A점->B점).

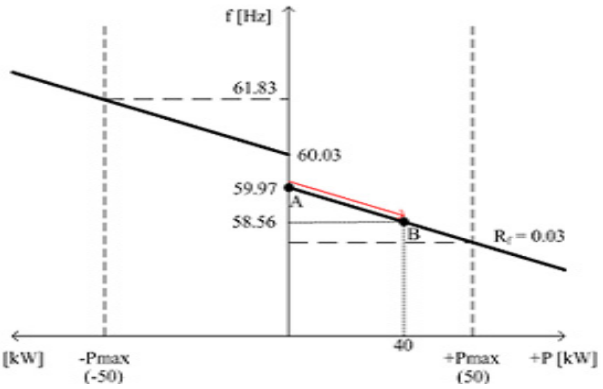


그림 2 데드 밴드를 추가한 주파수 드룹 제어

Fig. 2 f-P Droop Control with a deadband

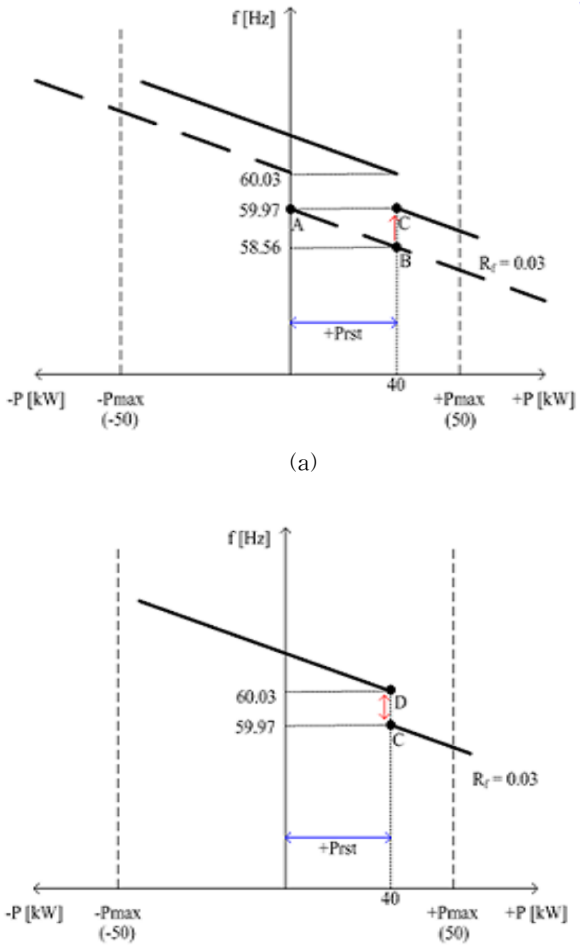
2.3 회복제어

그림 3(a)에서는 주파수 회복 제어를 통해 드룹 제어에 의해 변동된 주파수을 처음 설정된 값으로 회복시켜주는 것을 보여주고 있다(B점->C점). 회복 제어 지령값(P_{ref}^{rst})은 적분기 제어를 통해 드룹 지령값(P_{ref}^{droop})으로 수렴하고, 드룹 지령값을 0으로 변동시켜줌으로써 처음 설정된 주파수로 회복 시켜준다.

$$P_{ref} = P_{ref0} + P_{ref}^{droop} + P_{ref}^{rst}, \quad P_{ref}^{rst} = \frac{1}{T_i}\int (f_{ref0} - f)df \tag{3}$$

드룹 제어를 통해 협조 제어를 수행하는 분산전원들 중 슈퍼캐패시터와 같이 에너지 용량이 작은 전원이 있을 경우, 에너지 용량이 크거나 연료 공급이 가능한 분산전원이 주파

수 회복 제어를 수행함으로써 에너지 용량이 작은 전원의 지속적인 충·방전을 방지 할 수 있다. 하지만, 계통 연계 시 회복 제어기가 있을 경우, BESS를 통해 주파수를 제어할 수 없기 때문에 적분기를 통한 출력 지령값은 발산하게 되어 BESS의 출력이 불안정해진다. 계통 연계 시 안정적인 운영을 위해서는 회복 제어기의 불감대 영역이 필요하다.



(a)

(b)

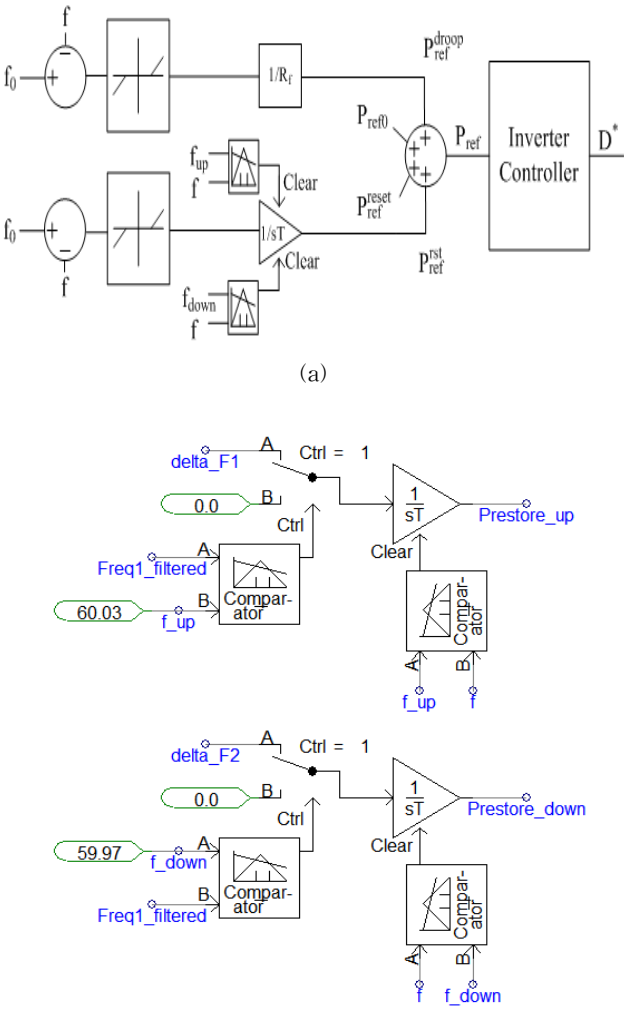
그림 3 (a) 데드 밴드를 추가한 주파수 회복 제어 (b) 데드 밴드를 추가한 주파수 회복 제어의 불안정성

Fig. 3 (a) f-P restoration Control with a deadband (b) instability of f-P restoration control with a deadband

2.3.1 데드밴드 제어로 인한 문제점 및 해결 방안

데드밴드 제어 설정 시 주파수 회복 제어를 통해 불감대 영역으로 BESS의 출력점이 수렴할 경우, 그림 3(b)와 같이 출력점이 C점과 D점을 주기적으로 변동하는 현상이 발생한다. 이는 마이크로그리드의 전력품질을 악화시킬 수 있다. 안정적인 마이크로그리드 운영을 위해서는 이러한 불안정한 상태를 개선하기 위한 제어가 필요하다.

본 논문에서는 주파수 회복 제어를 통해 출력점이 불감대 영역으로 회복될 시 회복 제어기의 적분값을 0으로 리셋하고, 이전에 쌓여있던 적분값(P_{ref}^{reset})을 출력 지령값에 더해주는 제어를 추가함으로써 불안정한 상태를 개선하였다. 그림 4는 제안하는 BESS의 출력 제어기로써, 데드 밴드 제어를 추가한 드룹 제어기와 리셋 기능을 추가한 주파수 회복 제어기로 구성되어 있다.



(a)

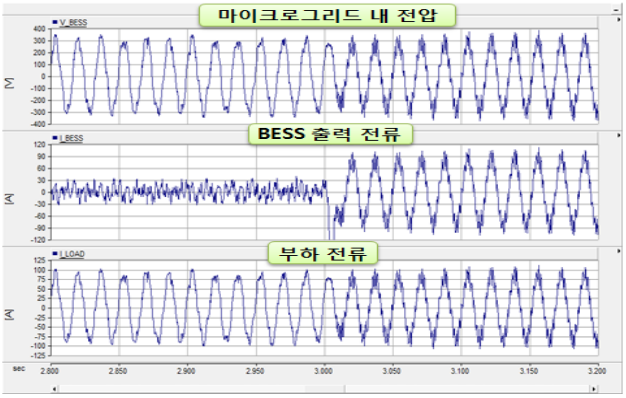
(b)

그림 4 f-P 드룹 및 회복 제어에 데드 밴드를 추가한 인버터 출력 지령값 제어 (a) 블록도 (b) PSCAD 회복 제어기

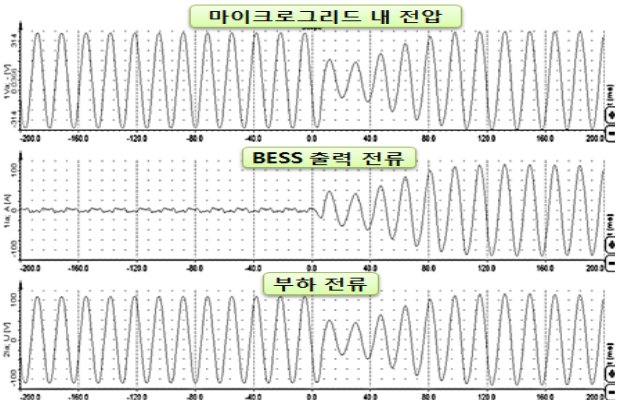
Fig. 4 Inverter reference controller with the deadband of f-P droop and restoration control (a) Block diagram (b) PSCAD restoration controller

2.3 모의결과

전력시스템 해석을 위하여 소프트웨어 PSCAD/EMTDC를 사용하였으며, 표 1에 따라 선간 380V의 저압마이크로그리드 계통도를 구성하였다. 주제어 전원으로는 50kW, 50kWh의 리튬이온을 모델링하였다[6]. 상용주파수(fref0)=60Hz, 상용교류전압(vref0)=380V(선간RMS전압), 주계통 전압원 주파수=59.98Hz, 상위 μ-EMS 유효전력 지령값(Pref0)=0, P-f 드룹 제어 계수=0.03, P-f 회복 제어 적분기 계수=0.0025, 주파수 불감대(60.03~59.97Hz)와 같이 설정하였다.



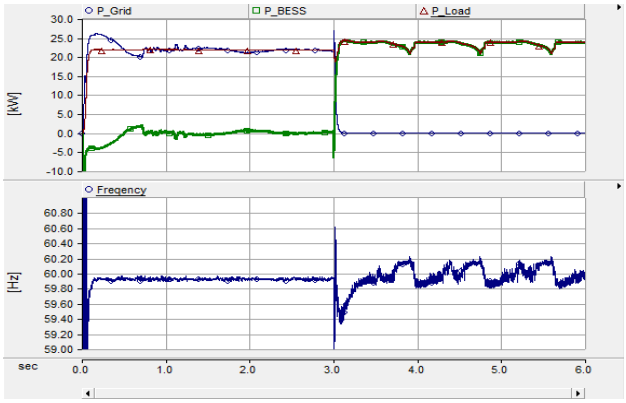
(a)



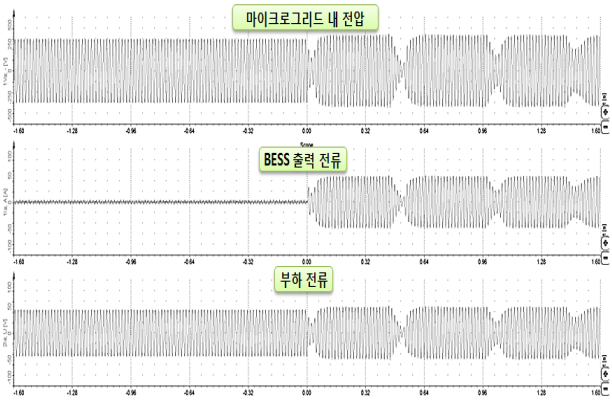
(b)

그림 5 독립운전으로 변환 시 데드 밴드를 추가한 f-P / v-Q 드룹 제어에 의한 BESS의 출력 변동: (a) PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과, (b) 실증 테스트

Fig. 5 The power control of BESS by f-P / v-Q droop control with deadband control during disconnecting from the main grid: (a) PSCAD/EMTDC simulation results, (b) Test results of microgrid demonstration site in KEPCO



(a)



(b)

그림 6 독립운전 시, 데드 밴드를 추가한 f-P 회복 제어에 의한 BESS의 불안정성 실증 테스트

Fig. 6 Test results of instability of BESS by f-P restoration control with the deadband in the microgrid demonstration site

2.3.1 데드밴드를 추가한 드룹 제어 모의결과

그림 5는 회복 제어기 없이 불감대 영역을 추가한 드룹제어만으로 BESS을 제어할 경우를 나타내고 있다. 시뮬레이션의 경우 계통 연계 상태에서 3초에 계통이 분리되어 독립운전하는 상황을 모의 하였다. 계통연계 시 계통 주파수 및 전압이 상용주파수 및 상용전압이 아닐 경우에도 BESS의 출력이 μ-EMS에서 지령한 값(0kW)으로 유지되는 것을 알 수 있다. 전력연구원 내 마이크로그리드 실증 사이트 테스트의 경우 측정된 주파수는 평균 59.92Hz였으며, 측전 전압은 평균 378V였다. 계통 연계 시 계통에서 들어오는 전력은 42kW, BESS의 출력은 0kW이며, 독립운전으로 변환 시 드룹제어를 통해 BESS의 유효전력을 자동으로 증가시켜줌으로써 전력수급 밸런스를 유지하고 안정적인 마이크로그리드 운영을 할 수 있게 한다.

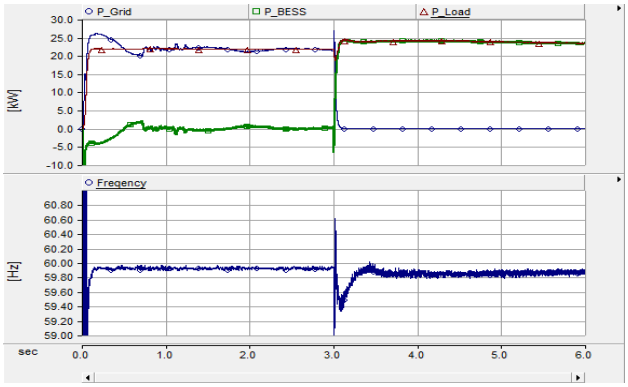
2.3.2 회복제어 시 문제점

그림 6은 드룹 제어 뿐만 아니라 불감대 영역을 추가한 회복 제어기를 함께 수행할 경우, 실증 테스트를 통한 BESS의 출력 변동을 나타낸다. 계통 연계 시 계통에서 들어오는 전력은 21kW, BESS의 출력은 0kW이며, 독립운전으로 변환 후 주파수 및 전압이 불감대 영역으로 회복하게 되면 출력이 주기적으로 변동하는 것을 살펴 볼 수 있다.

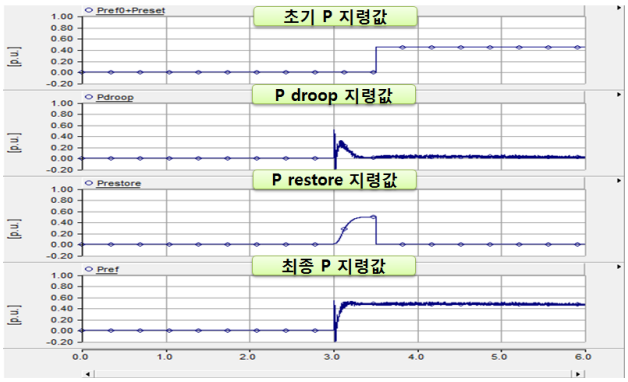
2.3.3 드룹/회복제어

그림 8은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 본 논문에서 제안한 제어기를 통해 불감대 영역으로 회복할 경우 출력이 주기적으로 변동되는 현상을 개선하고, 독립운전으로의 원활한 변환이 가능한 것을 증명하였다.

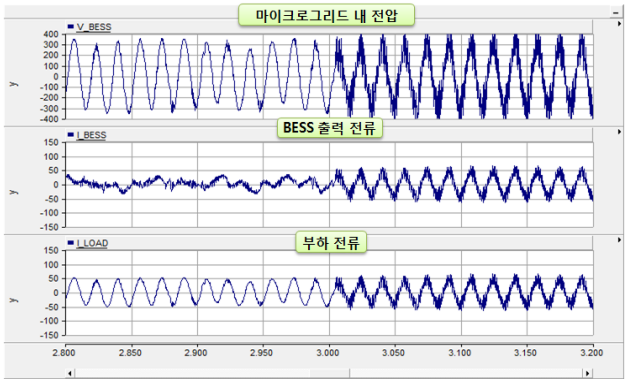
독립 운전으로 전환 후 주파수 회복 시 불감대 영역에 들어오게 되면 그 때까지 쌓인 적분기 지령값을 초기 유효전력 지령값에 더해주고 적분기 지령값은 초기화 함으로써 출력의 주기적인 변동 현상 개선을 그림 7에서와 같이 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 7 제안한 인버터 출력 지령값 제어기를 이용한 BESS의 출력 제어 시뮬레이션 결과: (a) 마이크로그리드 내 유효 전력 및 주파수 제어, (b) 출력 지령값 제어, (c) BESS 출력 전압 및 전류와 부하 전류

Fig. 7 PSCAD/EMTDC simulation results of the power control of BESS by using the proposed inverter reference controller: (a) The controls of active power and frequency within the microgrid, (b) Power reference control of BESS, (c) Output current and voltage of BESS and load current

3. 결 론

본 논문을 통해 마이크로그리드 실증사이트에 설치되는 분산전원들의 제어 특성을 고려하여 상위 EMS의 지령 없이도 사고 시, 원활한 독립운전으로의 변환이 가능토록 BESS의 주파수 제어 알고리즘을 제시하였다. 계통 연계 시, 기존 드룹 제어는 계통의 주파수 및 전압의 미소한 변동에 따라 BESS의 지속적인 충·방전 현상이 발생한다. 하지만 제안하는 드룹 제어는 일정 범위 데드 밴드를 가지고 미소 변동에 반응하지 않게 되고 따라서 기존 드룹 제어의 의도하지 않은 충·방전 현상을 방지할 수 있다. 또한, 독립 운전으로 변환 시, 드룹 제어를 통해 원활한 독립운전으로의 변환이 가능하며, 드룹 제어로 변동된 주파수를 주파수 회복 제어를 통해 상용주파수로 회복시켜줌으로써 부하에 양질의 전력 공급이 가능하다는 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 논문에서는 상위 EMS에서 BESS의 충전 상태를 일정 범위로 유지시키면서, 분산전원들의 경제적인 출력 지령값을 구하는 알고리즘은 제안하지 않았지만, 향후 실증사이트 내 분산전원들 간의 경제급전 알고리즘을 개발하여 실증사이트에 적용할 계획이다. 상위 EMS와의 협조제어를 통해 BESS가 독립운전 시 수급균형을 담당할 뿐만 아니라, 계통 연계 시 전기가격에 따라 피크절감, 부하평활화 등의 기능을 담당하여 활용도를 향상 시키도록 적용할 생각이다. 그래서 최종적으로 마이크로그리드의 안정적인 운영뿐만 아니라, 경제적인 운영도 가능한 제어 알고리즘을 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. 2010010400501)

참 고 문 헌

[1] Mears, D. Gotschall, H. EPRI-DOE, "Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications", Electric Power Research Institute Report #1001834, December 2003.

[2] E. Barklund and T.C. Green, "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability Constrained Droop Control of Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2346-2352, Sept. 2008.

[3] M.J. Erickson and R.H. Lasserter, "Integration of Battery Energy Storage Element in a CERTS Microgrid", Energy Conversion Congress and Exposition, vol., no., pp. 2570-2577, Sept. 2010.

[4] Dae Geun Jin, Won Jun Choi, Dong Jun Won, Hak Ju Lee, Woo Kyu Chae, Jung Sung Park, 'Protection Coordination Strategy of Microgrid Demnstration Site', The Transactions of the Korea Institute of

Electrical Engineers, Vol.61, No.7, pp.966-973, 2012. 6.
[5] Min Chen and Gabriel A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, June. 2006.

저 자 소 개

이 학 주 (李 鶴 周)
1966년 12월 5일생
1989년 충남대학교 전기공학과 졸업
1991년 동 대학원 전기공학 석사 졸업
2004년 동 대학원 전기공학 박사 졸업
1995년 ~ 현재 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5982
Fax : 042-865-5944
E-mail : juree@kepco.co.kr

최 진 영 (崔 珍 永)
1983년 12월 8일생
2010년 인하대 공대 전자전기공학 졸업
2012년 동 대학원 전기공학 석사 졸업
2012년 ~ 현재 동 대학원 전기공학 박사과정
E-mail : jy128308@gmail.com

최 종 찬 (崔 鍾 瀷)
1985년 11월 14일생
2012년 인하대 공대 전자전기공학 졸업
2012년 ~ 현재 동 대학원 전기공학 석사과정
E-mail : whitenpc@gmail.com

원 동 준 (元 東 俊)
1975년 1월 1일생
1998년 서울대 공대 전자전기공학 졸업
2000년 동 대학원 전기공학 석사 졸업
2004년 동 대학원 전기공학 박사 졸업
2006년 ~ 현재 인하대 전기공학부 조교수
Tel : 032-860-7404
E-mail : djwon@inha.ac.kr

채 우 규 (蔡 又 圭)
1977년 4월 22일생
2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업
2007년 충북대학교 전기공학 석사 졸업
2004년 ~ 현재 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5986, Fax : 042-865-5944
E-mail : wkchae@kepco.co.kr

박 중 성 (朴 重 城)
1978년 4월 17일생
2004년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업
2006년 홍익대학교 전기공학 석사 졸업
2006~2010년 효성 중공업연구소 선임연구원
2010년 ~ 현재 한전 전력연구원 연구원
Tel : 042-865-5953
Fax : 042-865-5944
E-mail : jindulpa@kepco.co.kr