

Implementation of Microgrid using Energy Storage System

이 계 병* · 손 광 명* · 장 길 수**
(Kyebyung Lee · Kwang M. Son · Gilsoo Jang)

Abstract - This paper deals with implementation of the laboratory-scale microgrid using energy storage system. Also, this paper develops a simulation model of the microgrid with same parameters on the laboratory-scale microgrid using PSCAD/EMTDC. The experimental results show good agreement with the simulation results. This shows the validity of the simulation model. A valve regulated lead acid (VRLA) battery is used to store energy. Energy storage system with fast response is able to maintain power quality of sensitive load within the microgrid.

Key Words : Microgrid, Smart grid, Energy storage system, Valve regulated lead acid (VRLA)

1. 서 론

마이크로그리드는 수용가의 신뢰도와 전력 품질 향상을 위해 소개되었다[1]. 마이크로그리드는 여러 가지 형태의 신재생에너지 또는 에너지 저장장치를 채용한 마이크로 전원과 수용가들로 구성되고, 단독 운전(islanded operation)이 가능한 소규모 배전망으로 정의될 수 있다[1][2].

최근 우리나라에서는 '저탄소 녹색성장'의 일환으로 스마트그리드(smart grid)를 추진하고 있다. 스마트그리드는 기존 전력망에 IT기술이 접목되어 소비자 또는 이들의 단체인 수용가가 참여할 수 있는 전력망을 형성하게 될 것이다. 앞으로 수용가가 단순 전력소비 형태에서 신재생에너지의 발전과 수요관리(demand response) 형태로 전환될 것이다. 이러한 수용가가 통합 관리되어 전력망 운영자와 연결되기 위해서 마이크로그리드(microgrid)와 같은 운영 방식이 요구된다. 마이크로그리드는 스마트그리드에서 하나의 셀 또는 노드의 역할을 하게 될 것이며 계층적 마이크로그리드 시스템은 스마트그리드의 형태를 보일 것으로 전망된다. 마이크로그리드가 단독으로 운전될 때, 전력 수급 균형을 만족시키고 기준 주파수 및 전압을 제공하기 위해서 에너지 저장장치가 요구된다. 에너지 저장장치 및 부하 절체(load-shedding) 방법을 이용한 마이크로그리드의 단독 운전 제어 전략과 함께 마이크로그리드 내 여러 가지 형태의 마이크로 전원 동특성 해석을 위한 시뮬레이션이 수행되었다[2]. 신재생에너지 등의 전력을 채용한 마이크로 전원이 기준 주파수 및 전압

을 제공하기 위해서 DC-link에 전지가 채용된 것이 가정되었다[1-4].

단독으로 운전되는 마이크로그리드는 상위 계통이 정상상태로 회복되었을 때, 상위계통에 재접속되어야 한다. 상위계통에 재접속되기 위해서 마이크로그리드 내 마이크로 전원들의 출력 전압을 제어하여 상위 계통과 재접속하는 RTDS(Real Time Digital Simulation)를 이용한 시뮬레이션이 수행되었다[3]. 마이크로 전원들의 출력 전압 제어 없이 상위 계통과의 주파수 차에 의한 재접속 또한 연구되었다[4]. 그러나, 전압 크기 불일치에 의해 재접속시 많은 과도상태를 보였다.

본 논문에서는 납축전지를 에너지 저장장치로 채용한 마이크로 전원을 이용하여 마이크로그리드 운영을 PSCAD/EMTDC[5] 기반의 시뮬레이션과 실험실 규모의 실험으로 제공한다. 본 논문에서 제공하는 마이크로 전원은 마이크로그리드가 상위 계통에 연결되어 운전될 때, 유효 및 무효전력을 제어하고, 상위 계통이 정전되었을 때, 마이크로그리드를 단독 운전으로 전환하여 마이크로그리드 내 부하에게 계속해서 전력을 공급한다. 마이크로 전원이 납축전지를 충전하고 있는 중 단독 운전이 발생되었을 때에도 마이크로 전원은 즉시 마이크로그리드 내 부하에게 전력을 공급할 수 있다. 단독 운전 중 상위 계통이 정상상태로 회복되면, 마이크로 전원은 상위 계통과 전압을 동기화한 후 마이크로그리드를 상위 계통과 재접속한다.

실험 장치와 동일한 파라미터 기반의 시뮬레이션 모델이 실험과 유사한 결과를 보임을 확인하였다. 실험에서 이용된 납축전지는 수초의 시뮬레이션에서 이용된 직렬저항과 전압원의 간단한 납축전지 모델만큼이나 빠른 응답을 보였다.

본 논문에서 개발된 마이크로 전원의 PSCAD/EMTDC[5] 기반 사용자 정의 모델은 프로그램 언어만 변환되어 실험용 DSP(Digital Signal Processor) 등에서 그대로 이용될 수 있다.

† 교신저자, 정회원 : 동의대 공대 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : kmson@deu.ac.kr

* 정 회 원 : 고려대 공대 전자전기공학과 박사과정

** 시니어회원 : 고려대 공대 전자전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 10월 7일

최종완료 : 2009년 12월 30일

2. 마이크로그리드와 에너지 저장장치

마이크로그리드는 상위 계통에서 발생하는 이벤트에 대해 서 마이크로그리드 내 전력 품질을 유지하기 위해 단독 운전으로 전환될 수 있다. 단독 운전으로 전환시 마이크로그리드는 부하가 요구하는 전력을 즉시 공급할 수 있어야 한다 [1][2]. 따라서 마이크로그리드 내 마이크로 전원 중 하나 이상은 마이크로그리드 내 전력 수급 균형을 위하여 에너지 저장장치를 채용하여야 한다.

마이크로그리드가 단독으로 운전되는 경우, 마이크로그리드의 기준 주파수 및 전압이 제공되어야 한다[1][2]. 기준 주파수 및 전압을 제공하는 마이크로 전원은 제공된 기준 주파수 및 전압에 대해 부하에서 요구하는 전력을 즉시 제공할 수 있어야 한다. 따라서, 늦은 응답 특성을 가지는 신재생에너지 등을 가진 마이크로 전원은 에너지 저장장치를 채용해야 기준 주파수 및 전압을 제공할 수 있다.

에너지 저장장치를 가진 마이크로그리드가 계통과 연계되어 운전될 때, 마이크로그리드 내 부하의 잦은 변동에 대한 안정화 및 최대 전력 감소가 가능하다. 또한, 상위 계통으로부터 수요관리가 가능하고, 전압 품질 문제를 개선할 수 있다.

3. 마이크로 전원의 제어시스템

그림 1은 두 개의 전압원 V_1, V_2 가 선로 임피던스 Z 를 통해 연결된 것을 나타낸다. 마이크로그리드가 실제 적용될 배전선로의 경우, 저압선로가 주가 될 것이며 배전선로는 대부분 $R > X$ 이다. 전압제어 전압원형 인버터를 고려한다면, KVL 문제를 해결하고 전력 제어를 원활히 하기 위해서 출력 측에 계통 연계 인덕터가 요구된다. 따라서, 두 개의 전압원 사이 선로 임피던스는 $R < X$ 가 될 것이다. 따라서, 그림 1에서 선로 임피던스를 $Z \approx jX$ 로 가정할 수 있고, 두 개의 전압원 사이에서 흐르는 유효 및 무효전력은 식 (1), (2)와 같이 된다[6].

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_1^2}{X} - \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta_{12} \quad (2)$$

여기서, P, Q 는 각각 두 개의 전압원 사이에서 흐르는 유효 및 무효전력이고, V_1, V_2, δ_{12} 는 각각 전압의 크기와 각 전압의 위상차이고, X 는 선로의 인덕턴스 성분이다.

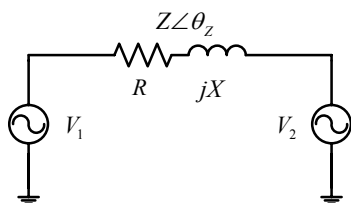


그림 1 선로를 통해 연결된 전압원
Fig. 1 Voltage source interconnected through a line

식 (1)과 (2)는 각 전압의 위상차인 δ_{12} 에 의해 비선형으로 표현된다. 그러나, 실제의 경우 $\delta_{12} < 10^\circ$ 로 대부분 운전되기 때문에, $\sin \delta_{12} \approx \delta_{12}, \cos \delta_{12} \approx 1$ 로 가정할 수 있고, 이로부터 식 (1)과 (2)는 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

$$P \approx \frac{V_1 V_2}{X} \delta_{12} \quad (3)$$

$$Q \approx \frac{V_1}{X} (V_1 - V_2) \quad (4)$$

마이크로 전원의 유효전력은 식 (3)에서와 같이 각 전압의 위상차인 δ_{12} 에 의해 제어될 수 있다. PI 제어기를 이용한 마이크로 전원의 유효전력 제어기는 식 (5)와 같이 표현된다. 마이크로그리드가 단독으로 운전될 때는 부하에서 요구하는 유효전력을 제공해야 한다. 따라서 단독 운전시 식 (5)에서 2번째 항은 이용되지 않는다. 그림 2는 마이크로 전원의 유효전력 제어기를 나타낸 것이다.

$$\delta_v^* = \frac{\omega_0}{s} + \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (P^* - P) \quad (5)$$

여기서, δ_v^* 는 인버터의 PWM으로 입력되는 마이크로 전원의 출력전압 위상 지령치이고, ω_0 는 정격 주파수이다.

마이크로그리드가 단독 운전 중 상위 계통과 재접속되기 위해서는 각 전압의 위상 및 크기의 재동기화가 요구된다. 그림 2에서 “Re-synchronization controllers”는 전압의 위상을 재동기화하기 위해 추가되고 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta \delta_0 = \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) (\delta_e - \delta_v) \quad (6)$$

여기서 δ_e 는 상위 계통 전압의 위상이고, δ_v 는 마이크로 전원의 출력전압 위상이다.

마이크로 전원의 무효전력은 식 (4)에서와 같이 각 전압의 크기차에 의해 제어될 수 있다. PI 제어기를 이용한 마이크로 전원의 무효전력 제어기는 식 (7)과 같이 표현된다. 유효전력 제어기와 같은 방법으로 무효전력 제어기에서도 단독 운전 및 재동기화 제어가 동일하게 적용된다. 재동기화

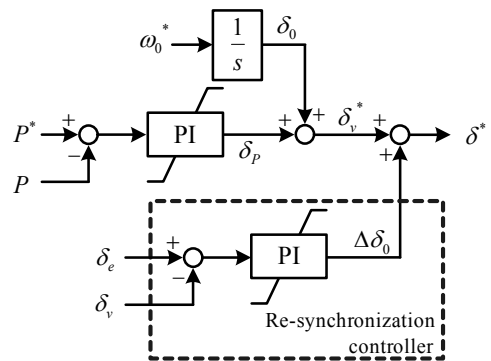


그림 2 유효전력 및 전압 위상 재동기화 제어기
Fig. 2 Controller of real power and phase angle re-synchronization

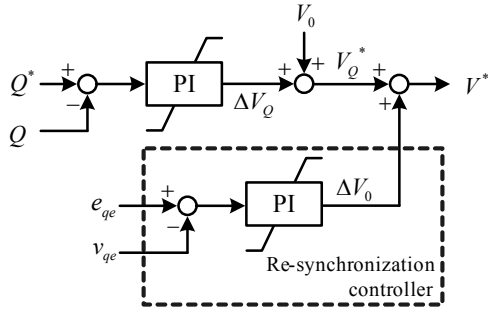


그림 3 무효전력 및 전압 크기 재동기화 제어기
 Fig. 3 Controller of reactive power and voltage magnitude re-synchronization

제어기는 식 (8)과 같이 표현된다. 그림 3은 마이크로 전원의 무효전력 제어기를 나타낸 것이다.

$$V_Q^* = V_0 + \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) (Q^* - Q) \quad (7)$$

여기서, V_Q^* 는 인버터로 입력되는 출력전압의 크기 지령치, V_0 는 정격전압이다.

$$\Delta V_0 = \left(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) (e_{qe} - v_{qe}) \quad (8)$$

여기서 e_{qe} 는 상위 계통의 전압 크기이고, v_{qe} 는 마이크로 전원의 전압 크기이다.

그림 4에 그림 2와 3의 제어기를 포함하는 마이크로 전원의 전체 제어시스템을 나타내었다. 그림 4에서 전압의 위상 및 크기를 계산하기 위한 PLL (Phase-Locked Loop)은 본 논문에서 생략되었다. 본 논문에서 이용된 PLL은 잘 알려져 있는 동기 PLL로서, 이의 상세 모델은 [7]에서 제공된다. 그림 4에서 VSI의 PWM 방식은 잘 알려진 SV-PWM 방식이 이용되고, [8]에서 상세 모델이 제공된다. 그림 4에서 전력을 계산하는 “P & Q Calc.” 블록은 식 (9)와 (10)과 같다.

$$P = 3/2(v_{qe}i_{qe} + v_{de}i_{de}) \quad (9)$$

$$Q = 3/2(v_{qe}i_{de} - v_{de}i_{qe}) \quad (10)$$

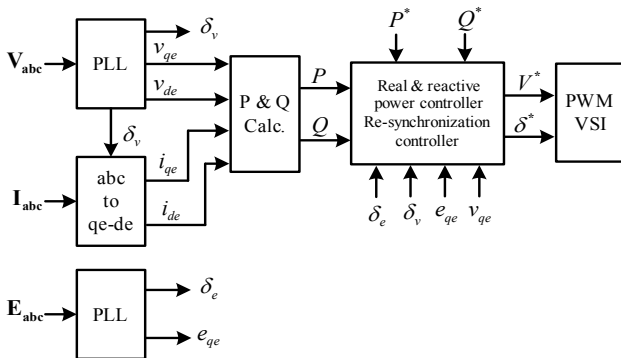


그림 4 마이크로 전원의 전체 제어시스템
 Fig. 4 Overall controller of microsource

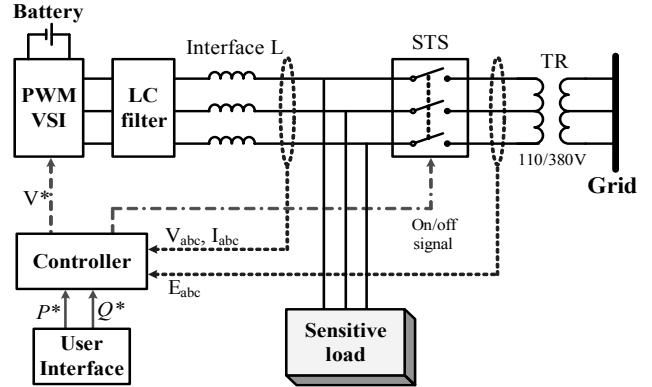


그림 5 마이크로그리드 테스트 시스템
 Fig. 5 Test system of microgrid

4. 테스트 시스템

에너지 저장장치를 채용한 마이크로 전원을 이용하여 마이크로그리드를 구현하기 위해서 PSCAD/EMTDC[5]를 이용한 시뮬레이션과 실험실 규모의 실험이 수행되었다. 마이크로그리드의 테스트 시스템은 그림 5에 나타낸 것과 같이 구성되고, 이의 파라미터는 표 1과 같다. 특별히 실험에서와 같은 결과를 시뮬레이션에서 기대하기 위해, 실험의 테스트 시스템에서 구축된 구성요소들의 파라미터를 측정하여 시뮬레이션 모델에 그대로 적하였다. 마이크로 전원은 PnP(plug

표 1 테스트 시스템의 파라미터

Table 1 Parameters of test system

Parameter	Symbol	Value	
System base	S_B^{ϕ}	1.0[kVA]	
	E_B	110.0[V]	
Nominal frequency	ω_0	60[Hz]	
Nominal voltage magnitude	V_0	89.8146[V]	
Transformer	rating	3.0[kVA]	
	X_l	0.1[p.u.]	
Sensitive load	Resistance	40.0[Ω]	
	ESL	0.2[mH]	
LC-filter inductor	Inductance	L_f	0.1[mH]
	ESR	R_{L_f}	10.0[mΩ]
LC-filter capacitor	Capacitance	C_f	50.0[μF]
	ESR	R_{C_f}	20.0[mΩ]
Interface L	Inductance	L_u	8.0[mH]
	ESR	R_{L_u}	0.5[Ω]
Switching frequency	f_{sw}	10.0[kHz]	
DC-link capacitor	C_{dc}	720.0[μF]	
DC-link voltage	V_{dc}	189-239.4[V]	
Integral gain of re-synchronization controller	Phase angle	K_{i_1}	10.0
	Voltage magnitude	K_{i_1}	5.0
Integral gain of P PI controller	K_{i_1}	10.0	
Integral gain of Q PI controller	K_{i_1}	5.0	

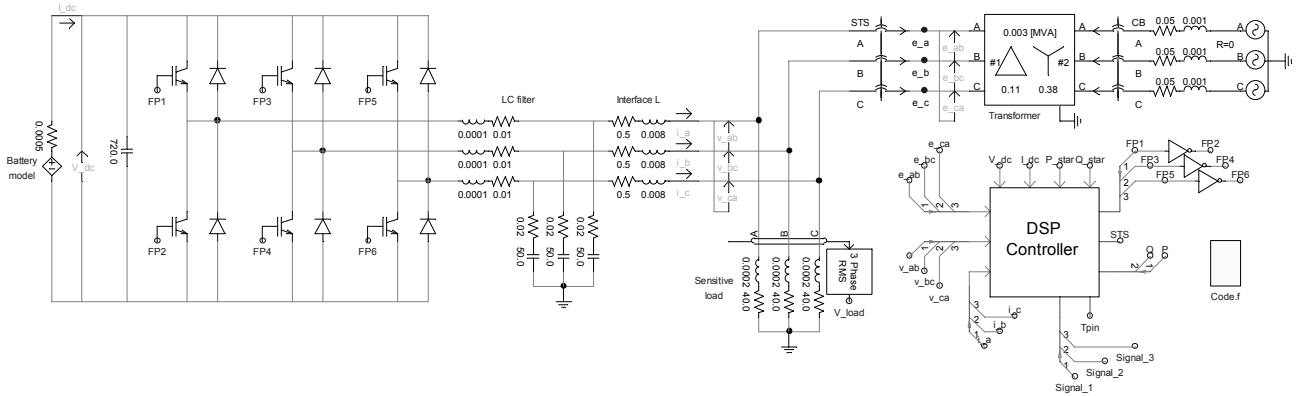


그림 6 마이크로그리드 테스트 시스템의 PSCAD/EMTDC 기반 시뮬레이션 모델
 Fig. 6 Simulation model based on PSCAD/EMTDC of microgrid test system

and play)를 지원할 수 있어야 한다[4]. 마이크로 전원의 제어기 파라미터는 PnP(plug and play) 방식을 고려하여, 직관적으로 선정할 수 있는 값이 이용되었고, PI 제어기의 비례 이득은 0.0으로 설정되었다.

마이크로 전원의 에너지 저장장치는 납축전지가 이용된다. 납축전지의 정격용량은 60[Ah]이고, 개방전압이 13.3[V]이고, 방전종지 전압이 10.5[V]이다. 이러한 납축전지를 18개 직렬로 구성하여 인버터의 DC-link에 연결된다. 시뮬레이션 모델에서 납축전지는 간단히 직렬저항과 DC 전압원으로 구성된다. 빠른 특성을 가진 에너지 저장장치는 이와 같은 납축전지의 모델만으로도 수초 동안의 시스템 해석에 아무런 문제가 없다[1][2][4]. [9], [10]에서 제공된 납축전지 모델과 같이 여러 가지 형태의 납축전지 모델이 제안되었다. 그러나, 제안된 많은 납축전지 모델들은 긴 시간 동특성 모델로써, 수 분 이상의 시정수를 가지고, 납축전지의 용량 및 SOC(state of charge)가 고려되는 경우 요구된다. 또한 납축전지의 단자전압의 변동 특성은 SV-PWM의 선형제어 영역에서 무시될 수 있다.

그림 6은 PSCAD/EMTDC[5]에서 개발된 마이크로그리드 테스트 시스템의 시뮬레이션 모델을 나타낸 것이다. 그림 6에서 마이크로 전원의 제어 시스템은 PSCAD/EMTDC[5]에서 제공하는 사용자 정의 모델(UDC: user-defined component)[5]을 이용하여 'DSP Controller'와 같이 개발되었다. UDC로 개발된 제어 시스템의 코드는 실험을 위해 프로그램 언어만 변환함으로써 DSP에서 그대로 이용될 수 있다. 마이크로 전원 제어시스템의 실험 모델은 TMS320F2812가 이용되었다.

5. 시뮬레이션 결과

에너지 저장장치를 채용한 마이크로 전원으로 구현된 마이크로그리드의 시뮬레이션이 실험에 앞서 여기서 먼저 제공된다. 시뮬레이션 타임시스템은 5.0[us]이다.

그림 7과 8은 마이크로그리드가 상위 계통과 연계되어 운전될 때, 마이크로 전원의 출력을 제어한 것이다. 그림 7은 1.0초에 유효전력을 $P^* = 1.0$ [p.u.]로 증가시키고, 1.5초에 무효전력을 $Q^* = 0.5$ [p.u.]로 증가시킨 것을 보여준다. 그림 8은

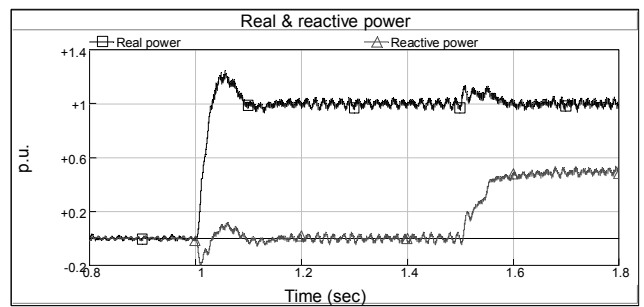


그림 7 유효 및 무효전력 출력 증가
 Fig. 7 Increase of real and reactive power

마이크로 전원이 에너지 저장장치에 에너지를 저장하기 위해 1.0초에 유효전력을 $P^* = -1.0$ [p.u.]로 흡수하는 것을 보여준다.

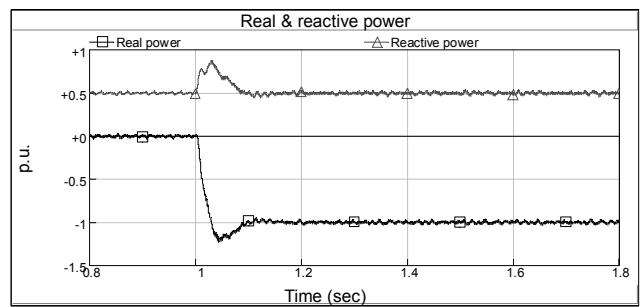


그림 8 에너지를 저장하기 위한 유효전력 흡수
 Fig. 8 Absorbing real power to store energy

그림 9와 10은 마이크로그리드의 운전 모드가 전환될 때, 마이크로 전원의 유효 및 무효전력을 나타낸 것이다. 그림 9에서 2.5초에 계통 연계 운전에서 단독 운전으로 전환되는 것을 보여주고, 3.0초에 마이크로그리드가 상위 계통과 재접속되는 것을 보여준다. 그림 9에서 2.8초에 유효전력이 조금 감소된 것을 관찰할 수 있다. 이것은 상위 계통의 전압이 마

이크로그리드 전압보다 낮게 운전되는 경우 재동기화 제어에 의해 전압이 감소되어 나타나는 결과이다. 그림 8에서 마이크로 전원은 단독 운전 전환 후 마이크로그리드 내 중요한 부하들의 소비 전력인 $P = 0.3$ [p.u.], $Q = 0.01$ [p.u.]를 계속해서 제공한다. 그림 9에서 재접속시 순간적인 무효전력의 감소는 유효전력의 증가에 의한 전압 강하에 기인된다.

그림 10은 마이크로 전원이 에너지를 흡수하고 있는 중단독 운전 모드로 전환되는 것을 보여준다. 이러한 경우에서도 그림 9에서와 마찬가지로 마이크로그리드 내 중요한 부하들이 요구하는 전력을 마이크로 전원이 계속해서 공급하고 있음을 확인할 수 있다.

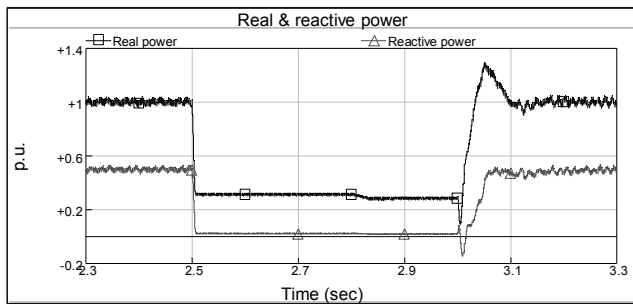


그림 9 마이크로그리드 운전 모드 전환시 마이크로 전원의 유효 및 무효전력

Fig. 9 Real and reactive power according to transition of operation mode of microgrid

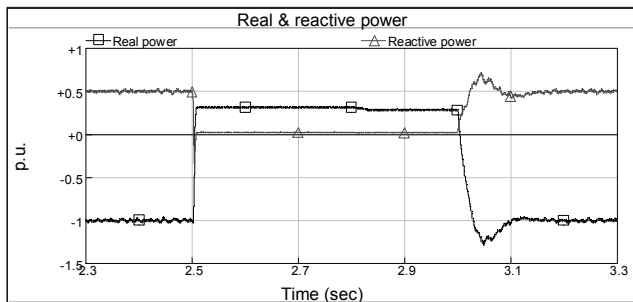


그림 10 유효전력이 흡수되고 있을 때 마이크로그리드의 운전 모드 전환

Fig. 10 Transition of microgrid operation when real power is absorbed

6. 실험 결과

여기서는 이전에 제공된 시뮬레이션에 이어 실험실 규모의 마이크로 전원에 의한 마이크로그리드의 실험 결과가 제공된다. 다음에 제공되는 실험 결과 중, 유효 및 무효전력은 DSP 내부에서 연산된 결과이고, 전압 및 전류는 직접 측정된 것이다.

그림 11, 12, 13은 마이크로그리드가 상위 계통과 연계되어 운전될 때, 마이크로 전원의 출력을 제어한 실험 결과이다. 그림 13은 마이크로 전원이 에너지 저장장치에 에너지를 저장하기 위해 유효전력을 흡수하는 것을 나타낸다.

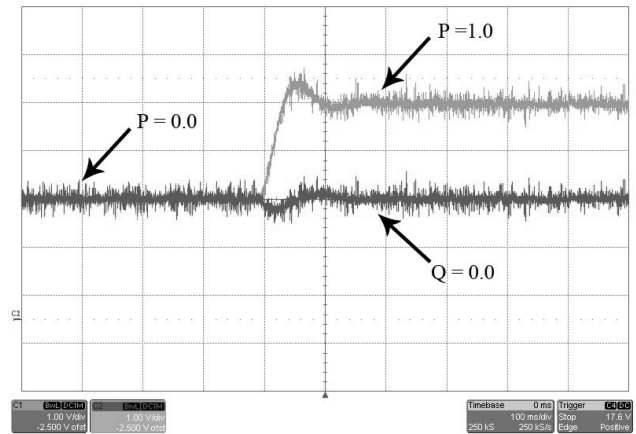


그림 11 유효전력 출력 증가
Fig. 11 Increase of real power
([0.5p.u./div], [100ms/div])

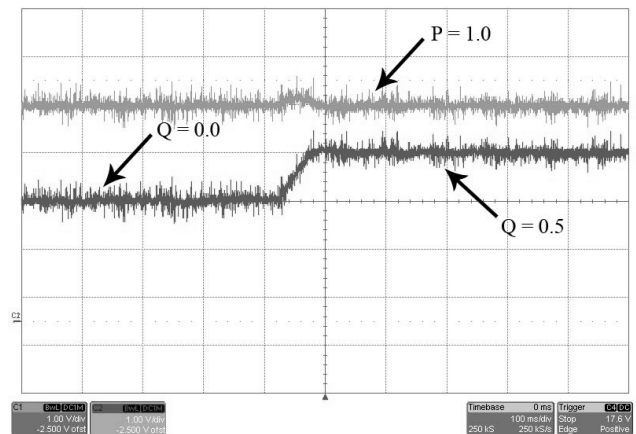


그림 12 무효전력 출력 증가
Fig. 12 Increase of reactive power
([0.5p.u./div], [100ms/div])

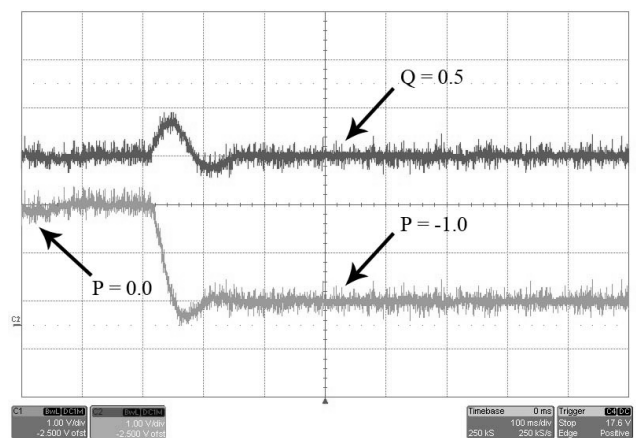


그림 13 에너지를 저장하기 위한 유효전력 흡수
Fig. 13 Absorbing real power to store energy
([0.5p.u./div], [100ms/div])

그림 14와 15는 마이크로그리드의 운전 모드가 전환될 때, 마이크로 전원의 유효 및 무효전력을 나타낸 것이다. 그림 16은 마이크로그리드가 상위 계통과 재접속 될 때, 마이크로 전원의 전압 및 전류와 부하 전압을 나타낸 것이다. 그림 17은 마이크로 전원이 에너지를 흡수하고 있는 중 단독 운전 모드로 전환되는 것을 보여준다.

그림 18은 단독 운전 중인 마이크로그리드를 상위 계통과 재접속하기 위해 마이크로 전원이 마이크로그리드의 전압과 상위 계통의 전압을 재동기화 시키는 것을 보여준다. 그림 18에서 마이크로그리드의 전압이 재동기화가 시작되고 12주기 정도에서 상위 계통과 동기화가 완료됨을 관찰할 수 있다.

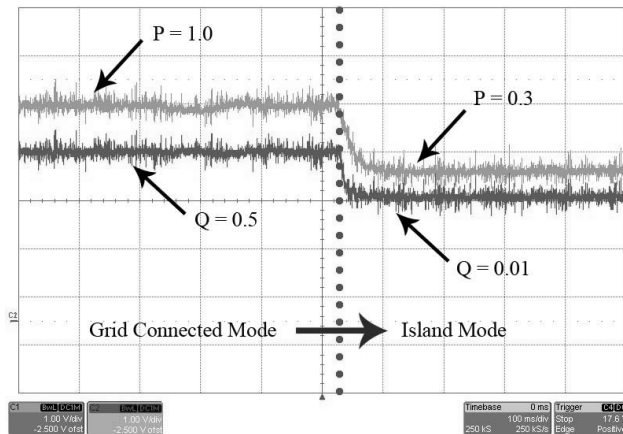


그림 14 계통 연계 운전에서 단독 운전으로 전환시 마이크로 전원의 유효 및 무효전력
 Fig. 14 Real and reactive power of microsource when microgrid is transferred from grid-connected to islanded operation ([0.5p.u./div], [100ms/div])

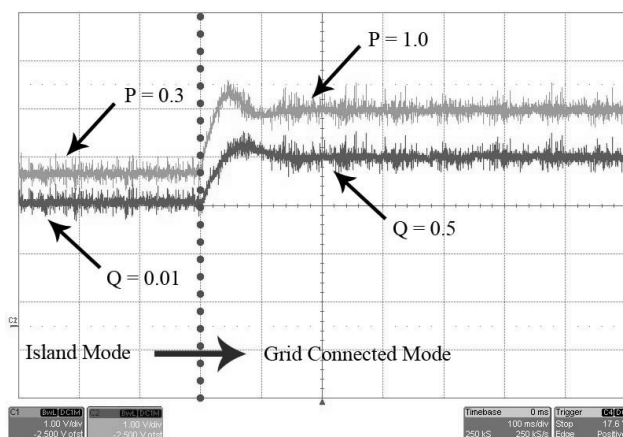


그림 15 단독 운전에서 계통 연계 운전으로 전환시 마이크로 전원의 유효 및 무효전력
 Fig. 15 Real and reactive power of microsource when microgrid is transferred from islanded to grid-connected operation ([0.5p.u./div], [100ms/div])

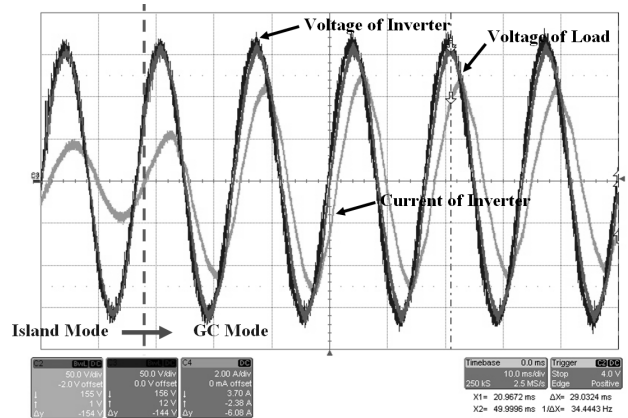


그림 16 단독 운전에서 계통 연계 운전으로 전환시 마이크로 전원의 전압 및 전류와 부하 전압
 Fig. 16 Voltage and current of microsource and voltage of load when microgrid is transferred from islanded to grid-connected operation ([50V/div], [2A/div], [10ms/div])

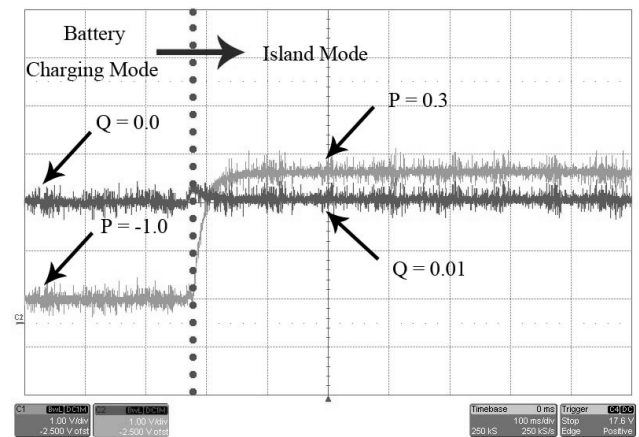


그림 17 유효전력이 흡수되고 있을 때 마이크로그리드의 운전 모드 전환
 Fig. 17 Transition of microgrid operation when real power is absorbed ([0.5p.u./div], [100ms/div])

7. 결론

본 논문에서는 에너지 저장장치를 이용하여 마이크로그리드 운영을 PSCAD/EMTDC 기반의 시뮬레이션과 실험실 규모의 실험으로 구현하였다. 계통 연계시 유효 및 무효전력을 제어하는 마이크로 전원은 상위 계통에서 정전 발생시 마이크로그리드를 단독 운전으로 전환하고, 상위 계통이 정상상태로 회복되면 상위 계통과 마이크로그리드의 전압을 재동기화 하여 상위 계통과 재접속한다.

실험 장치와 동일한 파라미터 기반의 시뮬레이션 모델은 실험과 유사한 결과를 보였다. 본 논문의 결과는 간단히 직렬저항과 전압원의 납축전지 모델만으로 짧은 시간에 대한 마이크로 전원의 특성을 해석하는 것이 충분하다는 것을 보여준다.

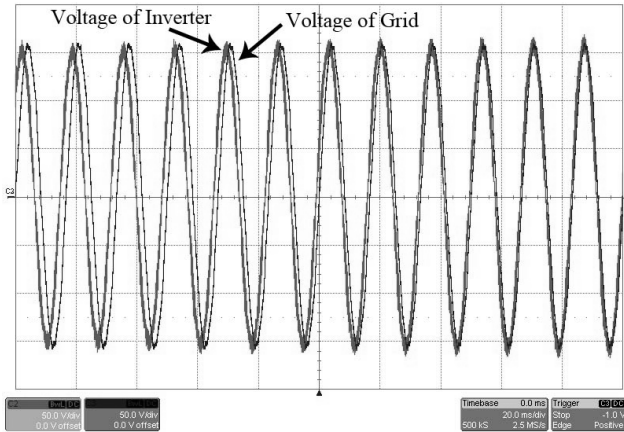


그림 18 재동기화시 마이크로 전원과 상위 계통의 전압
Fig. 18 Voltage of microsource and upstream network during re-synchronization ([50V/div], [20ms/div])

감사의 글

본 논문은 2009 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음. (과제번호 : 2009AA160)

참 고 문 헌

[1] R. H. Lasseter and P. Piagi, "Providing Premium Power through Distributed Resources", Proc. of the 33rd Hawaii International Conf. on System Sciences, pp. 1437-1445, Jan. 4-7 2000.

[2] J. A. Pecas Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, May 2006.

[3] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "Design, Analysis, and Real-Time Testing of a Controller for Multibus Microgrid System", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 1195-1204, Sep. 2004.

[4] R. H. Lasseter and P. Piagi, "Control and Design of MicroGrid Components", PSERC Final Project Report, Jan. 2006. [Online] Available at <http://certs.lbl.gov/pdf/microgrid-control.pdf>

[5] PSCAD/EMTDC, Power Systems Simulation Software Manual: Manitoba HVDC Research Center.

[6] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, Power System Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, pp. 103-107, 2000.

[7] S.-J. Lee, J.-K. Kang, and S.-K. Sul, "A New Phase Detecting Method for Power Conversion Systems Considering Distorted Conditions in Power System",

Proc. Industry Applications Conf., 34th IAS Annu. Meeting, Vol. 4, pp. 2167-2172. 1999.

[8] H. W. Van Der Broeck, H.-C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 24, No. 1, pp. 142-150, Jan./Feb. 1988.

[9] Z. M. Salameh, M. A. Casacca, and W. A. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", IEEE Trans. Energy Conversions, Vol. 7, No. 1, pp. 93-97, Mar. 1992.

[10] M. Ceraolo. "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1184-1190, Nov. 2000.

저 자 소 개



이 계 병 (李桂秉)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 고려대학교 대학원 전자전기공학과 박사과정.
 E-mail : kyebyung@korea.ac.kr



손 광 명 (孫光明)

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~현재 동의대학교 전기공학과 교수.
 Tel : 051-890-1671
 E-mail : kmson@deu.ac.kr



장 길 수 (張吉洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Iowa 주립대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(공학). 2000년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수.
 Tel : 02-3290-3246
 E-mail : gjang@korea.ac.kr