

# 마이크로그리드의 제어 및 해석 기술 동향

손 광 명\*, 이 계 병\*\*

(\*동의대 전기공학과 교수, \*\*고려대 전자전기공학과 박사과정)

## 1. 서론

전 세계적으로 에너지 위기와 환경 문제가 전기에너지 시스템의 효율화와 신재생에너지 등의 도입을 요구하고 있는 실정에서, 이에 대한 해결책으로 스마트그리드(smartgrid)와 마이크로그리드(microgrid)가 제시되고 있다.

스마트그리드는 기존 전력망에 IT기술이 접목되어 수용가가 직접 참여할 수 있는 전력망을 형성하게 되어, 스마트그리드 기반의 수용가는 단순 전력 소비 형태에서 신재생에너지 등의 발전과 수요관리 형태로 전환 될 것이다. 이와 같이 수용가가 통합 관리되고 전력망 운영자와 연결되어 원활히 운전되기 위해서는 마이크로그리드 기반의 운전 방식이 요구된다. 마이크로그리드는 스마트그리드에서 하나의 셀 또는 노드의 역할을 하게 될 것이며, 계층적인 마이크로그리드는 스마트그리드를 구현하게 될 것이다.

마이크로그리드는 수용가의 신뢰도와 전력 품질의 향상을 위해 미국의 CERTS(the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)에 의해 소개되었다. 마이크로그리드는 여러 가지 형태의 신재생에너지 또는 마이크로전원을 채용한 마이크로전원과 수용가들로 구성되고 단독 운전이 가능한 소규모 배전망으로 정의 된다.

마이크로그리드의 연구를 주도하고 있는 해외 그룹은 미국 위스콘신 주립대의 CERTS와 유럽 연합인 EU 마이크로그리

드로 구분된다. CERTS에서는 드롭 제어 방식을 채용한 마이크로전원들의 병렬 운전에 기초한 마이크로그리드의 연구결과를 제시하였다. CERTS의 마이크로그리드에서는 모든 마이크로전원이 동일한 형태를 가지며 에너지 저장장치를 채용하고 있다. 유럽연합인 EU 마이크로그리드에서는 신재생에너지들의 동특성을 반영하고 부하절체 및 주파수 회복 등을 이용한 마이크로그리드의 단독 운전 전환과 제어 전략에 관한 연구가 수행되었다.

본고에서는 마이크로그리드의 운전 방식과 이를 위해 요구되는 조건들을 설명하고, 마이크로그리드를 형성하는 여러 가지 형태의 마이크로전원들이 채택할 수 있는 제어 기술을 마이크로전원의 특성에 따라 구분하여 설명하며, 마이크로그리드의 해석을 위한 PSCAD/EMTDC 기반의 시뮬레이션에 관하여 소개한다.

## 2. 마이크로그리드의 운전방식 및 요건

본 장에서는 마이크로그리드의 가능한 운전 방식과 마이크로그리드의 운전을 위해서 요구되는 조건들을 설명한다.

### 2.1 마이크로그리드의 운전방식

마이크로그리드는 하나 이상의 마이크로전원들로 구성되어 상위 전력계통과 연계되어 운전하는 전원 시스템으로 볼 수

있다. 그러나, 상위 전력계통에서 사고 등의 이벤트가 발생했을 때, 마이크로그리드가 전력 품질을 유지하기 위해서 상위 전력계통과 물리적으로 분리하여 운전하는 단독 운전(islanded operation)을 할 수 있는 것이 기존의 전원 시스템과 다른 점이다. 이러한 마이크로그리드의 단독 운전 능력은 상위 전력계통에 연계되어 운전될 때에도 상위 전력계통과 독립적으로 운전할 수 있게 해주어, 마이크로그리드는 독립된 전원 시스템으로 운전이 가능하다.

마이크로그리드의 계통연계 운전에서는 에너지 요금과 전력계통의 혼잡에 따른 상위 전력계통의 수요관리에 대응하고 침투부하 절감 및 실시간 전기 요금 대응하여 에너지 비용을 절감할 수 있다. 또한 신재생에너지의 불규칙한 출력 평준화와 무효전력 공급을 통한 마이크로그리드의 전압 품질을 향상시킬 수 있다.

상위 전력계통의 사고 등의 이벤트에 따른 마이크로그리드의 단독 운전에서는 무정전의 지속적인 전력공급이 가능하고, 상위 전력계통이 회복되면 상위 전력계통과 재동기화를 수행하여 상위 전력계통과 다시 재접속될 수 있다.

### 2.2 마이크로그리드의 요건

마이크로그리드가 단독 운전 및 계통 연계 독립 운전이 가능하기 위해서는 정격의 기준 주파수 및 전압을 제공하여 전력망을 형성할 수 있는 마이크로그리드 내의 하나 이상 필요하다.

정격의 기준 주파수 및 전압을 제공하는 것은 정격의 기준 주파수 및 전압에서 부하가 요구하는 전력을 모두 제공할 수 있는 능력을 의미한다. 따라서, 정격의 기준 주파수 및 전압을 제공하는 마이크로그리드는 빠른 응답의 출력 제어가 가능해야 한다. 이러한 마이크로그리드는 마이크로그리드가 단독 운전으로 전환할 때, 상위 전력계통으로부터 공급 받던 전력을 충당하여 마이크로그리드의 원활한 단독 운전 전환을 도와줄 뿐만 아니라 단독 운전시 마이크로그리드 내의 과도적 전력 수급 균형을 해결해준다.

정격의 기준 주파수 및 전압을 제공할 수 있는 마이크로그리드의 전력원은 배터리 또는 플라이휠 등의 에너지 저장장치가 될 수 있다. 저장된 에너지의 유한용량을 고려하여, 단독 운전시 정상상태 전력 수급 균형은 마이크로그리드의 통합 제어 장치 등의 관리를 통하여 비교적 응답 속도가 느린 마이크로그리드의 출력을 제어하거나 중요하지 않은 부하들의 절체가 필요하다.

## 3. 마이크로그리드의 제어

본 장에서는 마이크로그리드 내에서 중요한 역할을 하는 마이크로그리드의 제어 기법에 관하여 설명한다. 마이크로그리드는

전력원의 특성에 따라 분류되고 이에 적절한 제어기법이 설명된다.

### 3.1 전원장치의 제어 방식

전력계통에 연계되어 운전할 수 있는 전원장치의 제어방식은 grid-following 제어 방식과, grid-forming 제어 방식으로 분류될 수 있다.

Grid-following 제어 방식은 상위 전력계통 없이 전력계통을 형성할 수 없는 제어 방식을 의미한다. 이 제어 방식은 상위 전력계통의 정격 기준 주파수 및 전압에 상대적인 주파수와 전압을 출력하여 정격 기준 주파수 및 전압이 형성되는데 전혀 관여하지 않으면서 원하는 유효 및 무효전력을 제어하는 제어 방식이다. 이 제어 방식을 채택한 전원장치는 상위 전력계통의 사고 등의 이벤트에 의해 분리되어 단독 운전이 불가능하기 때문에 단독운전 방지 기능이 요구된다. 이 제어 방식은 대부분 PI 제어 기반의 내부 전류 제어와 외부 유효 및 무효전력 제어기로 구성되는 것이 일반적이다.

Grid-forming 제어 방식은 상위 전력계통에 상관없이 전력계통을 독립적으로 형성할 수 있는 제어 방식을 의미한다. 이 제어 방식은 전원장치의 출력 한계와 주파수 및 전압 품질을 고려한 기준 주파수 및 전압을 제공하여 전력 계통 전체의 정격 기준 주파수 및 전압이 형성되는데 관여하면서 유효 및 무효전력을 제어하는 제어 방식이다. 이 제어 방식은 마이크로그리드의 단독 운전을 가능하게 해주는 제어 방식으로 이 제어 방식을 채택하는 전원장치는 빠른 응답의 전력원을 채택하여야 할 것이다. 이 제어 방식은 주파수 및 전압 드롭 개념의 제어 방식을 기반으로 유효 및 무효전력을 제어하는 것이 일반적이다. 드롭 개념의 제어 방식은 마이크로그리드들 사이에서 전력 공급을 적절히 분배시켜주고, 마이크로그리드의 안정도 향상에 기여한다.

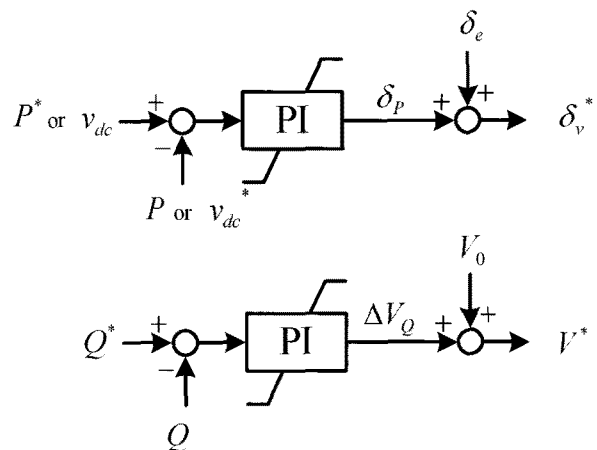


그림 1 Grid-following 제어기

### 3.2 마이크로전원의 분류와 제어기법

마이크로그리드 내에서 전력을 공급하는 마이크로전원들은 이들이 채용한 전력원에 따라 구분될 수 있다. 마이크로전원의 분류는 채용된 전력원이 급전 가능(dispatchable)한지와 즉시 응답 가능함에 따라 결정된다.

첫 번째 마이크로전원은 마이크로전원이 채용한 전력원이 급전 가능하고 즉시 응답 가능한 마이크로전원이다. 이 경우 마이크로전원의 전력원으로 에너지 저장장치가 채용되어야 한다. 만약, 전력원으로 태양광 전지와 병렬로 충분한 용량의 에너지 저장장치가 채용된다면, 에너지 저장장치의 급전 능력과 응답속도에 따라 마이크로전원은 급전 및 즉시 응답 가능한 마이크로전원에 포함된다. 즉, 어떠한 전력원들을 채용하든지 에너지 저장장치만 존재한다면, 이 분류에 포함된다.

급전 및 즉시 응답 가능한 마이크로전원은 전력계통을 형성할 수 있으므로 grid-forming 제어 방식을 채택할 수 있고, 마이크로그리드의 단독 운전 및 계통 연계 독립 운전을 가능하게 한다.

급전 및 즉시 응답 가능한 마이크로전원의 제어구조는 그림 3과 같다. 그림 3에서 전압원형 인버터는 DC 링크 전압의 크기를 전혀 고려하지 않고, 정격의 기준 주파수 및 전압을 제공하면서 요구되는 유효 및 무효전력을 공급한다.

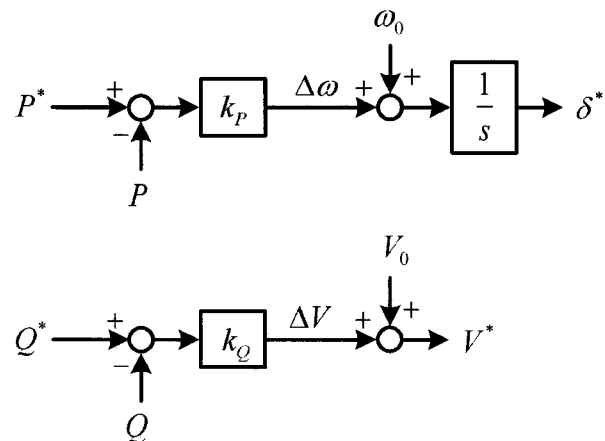


그림 2 드롭 제어를 이용한 grid-forming 제어기

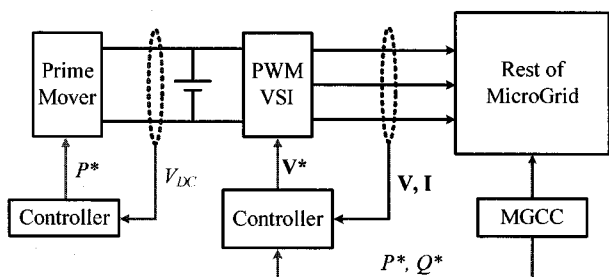


그림 3 급전 및 즉시 응답 가능한 마이크로전원의 제어구조

두 번째 마이크로전원은 마이크로전원이 채용한 전력원이 급전은 가능하지만, 즉시 응답이 불가능한 마이크로전원이다. 이 경우 마이크로전원의 전력원으로 비교적 응답 특성이 느린 연료전지와 마이크로터빈 등이 될 수 있으며, 에너지 저장장치가 포함되지 않은 경우이다.

전력계통 내에 부하 변동 등에서 과도적 전력 수급 균형 문제는 기존 동기 발전기의 큰 관성에 의해 해결 가능하고, 정상상태 전력 수급 균형 문제는 동기 발전기의 급전 제어로 해결 가능하다. 그러나, 인버터 기반의 마이크로전원은 관성이 전혀 없으므로 과도적 전력 수급 균형 문제는 즉시 응답 불가능할 경우 해결할 수 없다. 따라서, 해당 마이크로전원은 grid-following control 방식을 채택하여 상위 전력계통의 정격 기준 주파수 및 전압에 상대적인 주파수와 전압을 출력하여 요구되는 유효 및 무효전력을 공급한다.

급전 가능한 마이크로전원의 제어구조는 그림 4와 같다. 그림 4에서 요구되는 유효전력은 마이크로전원이 채용한 전력원으로 지령되며, 전압원형 인버터는 DC 링크 전압의 크기를 제어하여 요구되는 유효 및 무효전력을 공급한다.

세 번째 마이크로전원은 마이크로전원이 채용한 전력원이 급전 및 즉시 응답이 불가능한 마이크로전원이다. 이 경우 마이크로전원의 전력원으로 간헐적인 출력 특성을 나타내는 태양광 전지와 풍력터빈 등이 될 수 있으며, 에너지 저장장치가 포함되지 않은 경우이다.

급전 불가능한 마이크로전원은 전력계통을 형성할 수 없으

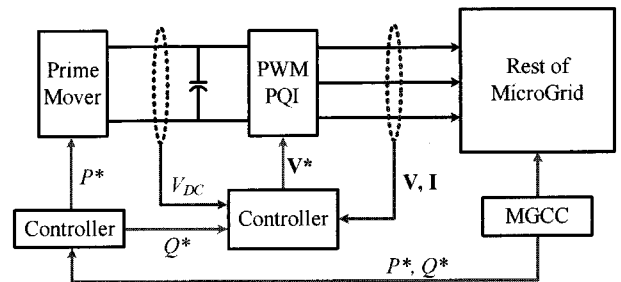


그림 4 급전 가능한 마이크로전원의 제어구조

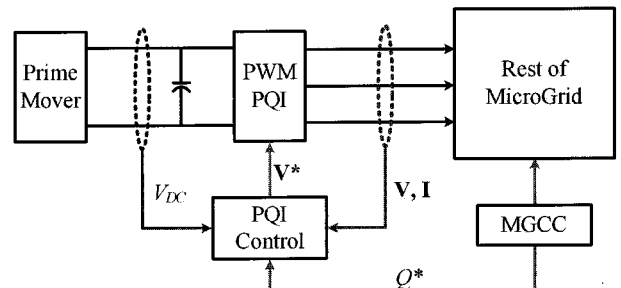


그림 5 급전 불가능한 마이크로전원의 제어구조

므로 grid-following 제어 방식을 채택하여 상위 전력계통의 정격 기준 주파수 및 전압에 상대적인 주파수와 전압을 출력하여 발생하는 유효 및 무효전력만을 공급한다.

급전 불가능한 마이크로전원의 제어구조는 그림 5와 같다. 그림 5에서 발생하는 유효전력은 마이크로전원의 DC 링크 전압을 상승시키고, 전압원형 인버터는 DC 링크 전압의 크기를 제어하여 발생하는 유효전력을 공급한다. 전압원형 인버터의 DC 링크 전압이 충분히 높다면, 인버터의 출력 전압의 선형 제어 영역이 넓어지게 되므로 요구되는 무효전력을 공급할 수 있다.

### 3.4 CERTS와 EU의 마이크로전원 제어 방식

마이크로그리드의 연구를 주도하고 있는 해외 그룹의 마이크로전원의 제어 방식은 다음과 같다.

CERTS의 마이크로전원들은 peer to peer 형태와 plug and play 방식을 기본으로 모든 마이크로전원들이 동등하고 동일한 형태를 가지며, 모든 마이크로전원들이 DC 링크에 배터리를 채용하여 grid-forming 제어 방식을 채택하는 것이 특

징이다.

EU의 마이크로전원들은 하나의 마스터 마이크로전원이 grid-forming 제어 방식을 채택하고, 나머지 마이크로전원들이 grid-following 제어 방식을 채택하는 SMO(single master operation) 형태와 다수의 마스터 마이크로전원으로 운전되는 MMO(multi master operation) 방식을 채택하고 있다.

## 4. 마이크로그리드의 해석 기술

마이크로그리드는 소규모 전력계통을 포함하고 상위 전력계통의 사고 등의 이벤트가 모의되어야 하기 때문에 실험을 수행하는 것이 쉽지 않다. 이에 따라서, 본 장에서는 마이크로그리드의 실제 조건을 잘 반영할 수 있는 시뮬레이션 프로그램으로 PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드 시스템의 해석에 관하여 소개한다.

### 4.1 PSCAD/EMTDC의 모델링 범위

PSCAD/EMTDC는 EMTP(electro-magnetic transient

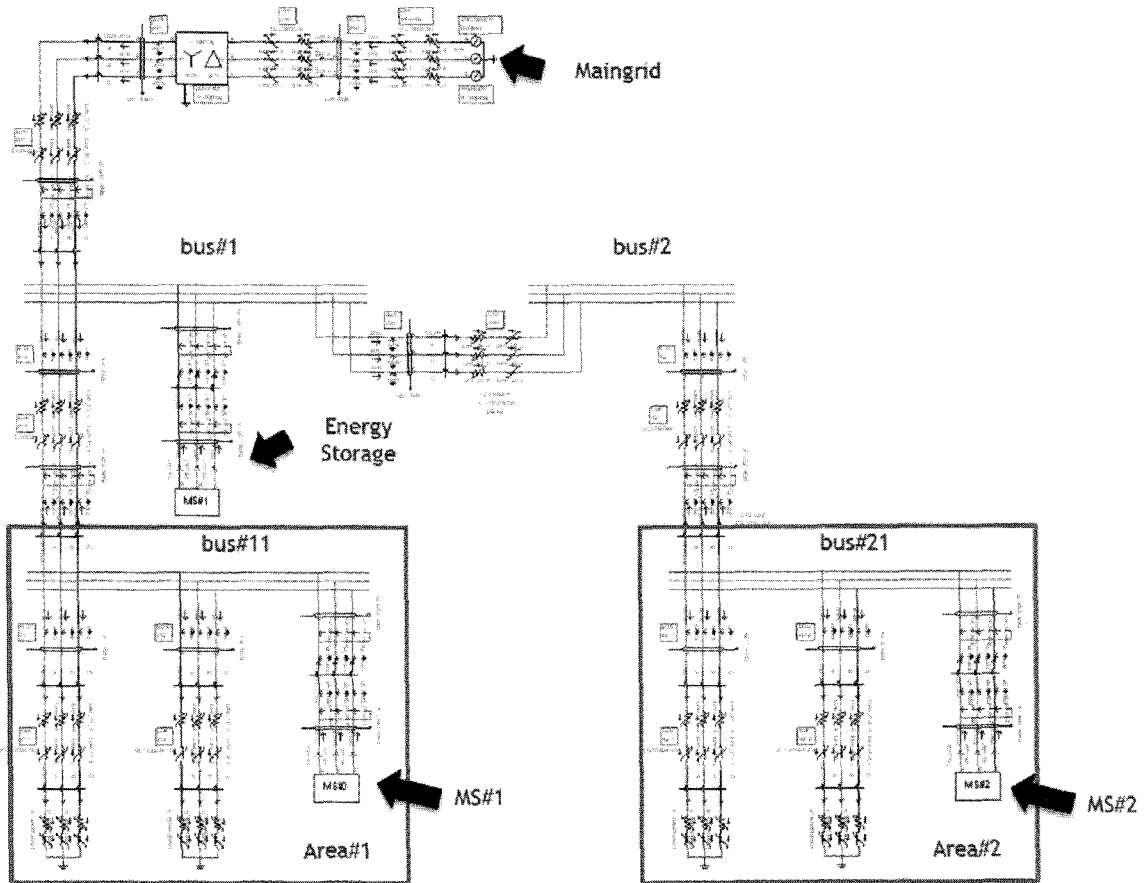


그림 6 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델

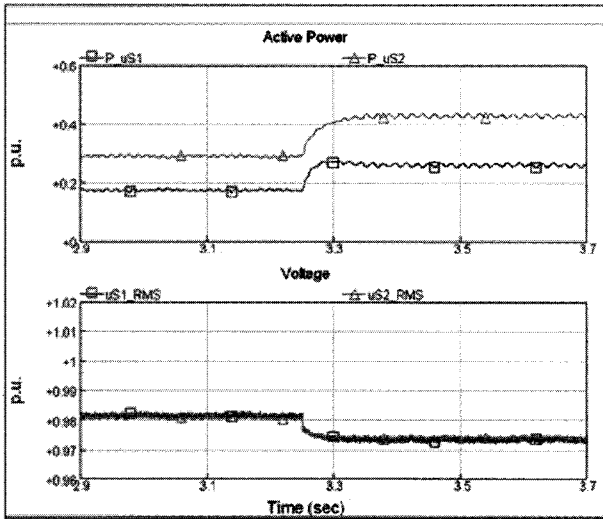


그림 7 부하 증가시 마이크로전원의 출력

program) 기반의 전력계통 과도현상 해석 프로그램으로, 반도체 스위치 모델을 제공하여 인버터 기반의 마이크로전원의 모델링이 가능하다. 또한, Fortran, C, Matlab 코드를 지원하는 사용자 정의 모델(UDC: user-defined component)을 이용하면, 마이크로전원의 제어시스템의 코드는 마이크로전원의 제어장치로 이용되는 DSP 등의 C 코드로 그대로 이용될 수 있다.

마이크로그리드 내에 분산전원이 3~4개만 존재하여도 마이크로그리드 모델의 회로망 노드 수는 200개 가까이 될 것이다. 이러한 규모의 마이크로그리드를 스위칭 레벨에서 모델링하고 해석하는 것에 PSCAD/EMTDC가 적합할 것이다.

PSCAD/EMTDC를 이용한 인버터의 스위칭 레벨 모델은 수 마이크로초의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 타임스텝을 요구한다. 따라서, 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 고려하여 수 초 정도의 시뮬레이션을 수행하는 것이 적합할 것이다. 이러한 이유로 수초 이상의 시뮬레이션을 요구하는 늦은 응답 특성의 신재생에너지 시뮬레이션에 어려움이 있다. 그러나, 마이크로전원을 신재생에너지의 동특성을 고려한 이상전압원으로 모델링한다면, 수십 초의 시뮬레이션도 가능하다.

4.2 모델링 및 해석 사례

그림 6은 3개의 마이크로전원으로 구성된 마이크로그리드의 PSCAD/EMTDC 모델을 나타낸 것이다. 그림 6에서 마이크로그리드는 STS(static transfer switch), 변압기, 계통의 선로 모델을 통해 상위 전력계통과 연결되고, 마이크로그리드와 상위 전력계통의 연결점인 PCC에 계통연계 독립 제어 방식을 채택한 마이크로전원이 위치된다. 그림 6의 마이크

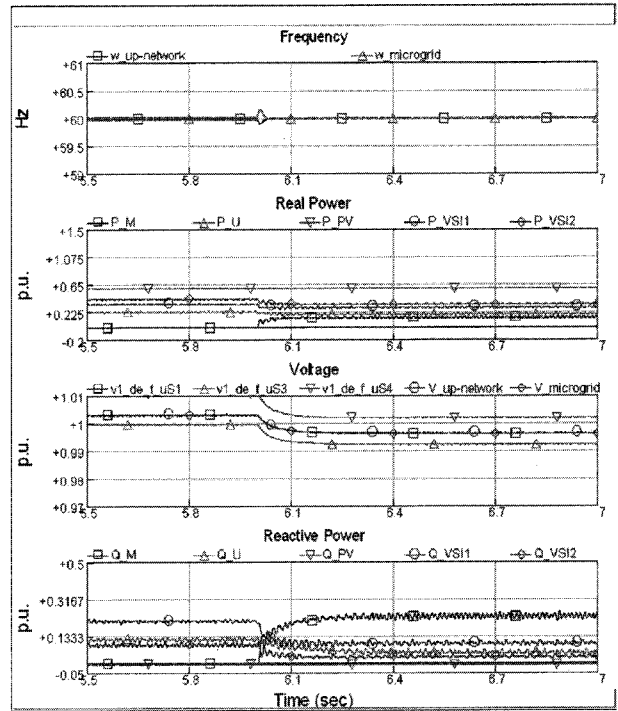


그림 8 재접속 시 마이크로그리드의 출력 변동

로그리드 모델은 2개의 지역으로 구분되어 구성되며 각 지역마다 마이크로전원이 하나씩 존재한다. 각 마이크로전원은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 페이지모듈로 표현되며, 페이지 모듈 내에는 신재생에너지, 배터리 등의 전력원, 인버터, 마이크로전원의 제어장치로 구성된다.

그림 7은 마이크로그리드가 단독으로 운전되는 중 마이크로그리드 내의 부하 변동에 응답하는 스위칭 레벨 마이크로전원의 출력을 나타낸 것이다. 그림 7의 각 마이크로전원들은 드롭 제어 기반의 grid-forming 제어 방식을 채택한 모델로서, 마이크로그리드 내에서 요구하는 전력을 즉시 분담하여 공급하는 것을 보여준다.

그림 8은 4개의 스위칭 레벨 마이크로전원으로 구성된 마이크로그리드가 단독으로 운전되는 중 상위 전력계통과 재접속하는 것을 보여준다. 4개의 마이크로전원 중 3개는 드롭 제어 기반의 grid-forming 제어 방식을 채택한 모델로서 모두 지리적 위치가 다르다. 나머지 1개의 마이크로전원은 태양광 전지를 채용한 마이크로전원으로 grid-following 제어 방식을 채택한 모델이다. 그림 8에서 재접속시, 상위 전력계통으로부터 공급되는 전력이 증가되면서 상위 전력계통 주파수는 순간 강하를 보이며, 반대로 마이크로그리드의 주파수는 순간 상승을 보인다. 태양광 전지를 채용한 마이크로전원은 일사량과 온도가 일정하게 가정되어 일정한 유효 및 무효전력을 공급하고 있다.

## 5. 결론

본고에서는 다수의 신재생에너지와 에너지 저장장치를 수용하여 다양한 서비스를 소비자에게 제공할 수 있는 차세대 전력망인 마이크로그리드에 관하여 소개하였다.

마이크로그리드의 가능한 운전방식과 이를 위해 요구되는 조건들을 설명하였고, 마이크로그리드에서 중요한 역할을 하는 마이크로전원들을 전력원의 특성에 따라 분류하여 각 마이크로전원에 적합한 제어기법에 관하여 설명하였다. 비선형의 마이크로그리드 시스템을 해석하기 위해 PSCAD/EMTDC에서 마이크로그리드의 모델링 범위를 소개하고, PSCAD/EMTDC로 모델링한 마이크로그리드의 사례를 나타내었다.

## 참고문헌

- [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] 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.
- [3] 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.
- [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] 손광명, 이계병, 홍준희, "PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델 개발", 대한전기학회 논문지, 56권, 3호, pp. 457-464, 2007년 3월.
- [6] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas "Microgrids Management", IEEE power & energy magazine, Vol. 6, No. 3, pp. 54-65, May/June 2008.
- [7] 이계병, 손광명, 장길수, "에너지 저장장치를 이용한 마이크로그리드 구현", 대한전기학회논문지, 59권, 2호, pp. 248-254, 2010년 2월.
- [8] PSCAD/EMTDC, Power Systems Simulation Software Manual: Manitoba HVDC Research Center.

## 〈 필 자 소 개 〉



### 손광명(孫光明)

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 동의대 전기공학과 교수.



### 이계병(李桂秉)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대 공과대학 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 고려대 대학원 전자전기공학과 박사과정.