

# 스마트 그리드를 위한 분산자원과 전력변환장치 기반 마이크로그리드 독립운전

허 세 완\*, 박 완 기°, 이 일 우\*

## Microgrid Island Operation Based on Power Conditioning System with Distributed Energy Resources for Smart Grid

Sewan Heo\*, Wan-Ki Park°, Ilwoo Lee\*

### 요 약

스마트 그리드를 구성하는 기본 단위 요소인 마이크로그리드(Microgrid)는 전력의 중앙 공급방식에서 벗어나 독립된 하나의 체계를 이룬다. 본 논문은 전력변환장치(Power Conditioning System)를 기반으로 마이크로그리드를 계통으로부터 전기적으로 독립시키고, 신재생 에너지원과 에너지 저장장치(Energy Storage System) 등의 분산자원(Distributed Energy Resource)을 활용하여 효과적으로 독립 상태를 유지하고 운영할 수 있는 방법을 제안한다. 계통의 위상검출과 동기화를 통해 계통에 연계하거나 독립 시에 부하에 미치는 영향을 최소화할 뿐만 아니라 계통의 정전 상황에서도 안정적으로 운영이 가능하다.

**Key Words** : Smart Grid, Microgrid, Power Conditioning, Distributed Energy, Energy Storage

### ABSTRACT

Microgrid as a unit component consisting a smart grid is an isolated system, which has a decentralized power supply system. This paper proposes an electrical isolation of the microgrid from the utility grid based on a power conditioning system, and also proposes an operation method maintaining the isolated state efficiently using diverse distributed energy resources such as renewable energy sources and energy storage system. The proposed system minimizes the influence of the grid connection on the internal load though a phase detection and synchroization to the utility grid and the microgrid can be stable even if the grid is failed.

### I. 서 론

기존의 중앙 공급식 전력시스템과 달리 현재는 자체적으로 전력을 생산하고 저장하며 관리하는 마이크로그리드를 중심으로 스마트 그리드가 지속적으로 발전하고 있다. 마이크로그리드는 작은 규모의 전력 시스템으로서, 신재생 에너지원과 에너지 저장장치 같은

분산전원과 부하 및 전력품질 향상 장치 등으로 구성된다<sup>1)</sup>. 신재생 에너지원은 점차 국가적인 주요한 에너지원이 되고 있으며 그에 따라 에너지 저장장치 또한 필수적인 요소가 되었다<sup>2,3)</sup>. 이러한 분산자원을 효과적으로 활용하는 것은 IT 기술을 기반으로 하는 모니터링과 제어 시스템을 통해 실시간으로 관리됨에 따라 가능해졌다. 태양광 발전과 에너지 저장장치를

※ 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20162120200360)

♦ First Author : IoT Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute, sewany@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : IoT Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute, wkpark@etri.re.kr, 정희원

\* IoT Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute, ilwoo@etri.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-02-039, Received February 13, 2017; Revised April 5, 2017; Accepted April 5, 2017

동시에 계통에 연계함으로써 필요한 전력을 최대한 공급하여 사용할 수 있으며<sup>[4]</sup>, 여러개의 다양한 센서를 활용하여 풍력발전의 상태를 상시 모니터링할 수도 있고<sup>[5]</sup>, 에너지 저장장치의 정보 인터페이스를 통해 스마트 홈에 적합하게 적용할 수도 있다<sup>[6]</sup>.

제어 및 모니터링 인프라를 기반으로 동작하는 마이크로그리드는 전기적으로 계통과 독립이 되거나 연계될 수 있는 특징이 있다. 이것은 에너지 저장장치에 저장된 에너지를 활용하는 전력변환장치를 통해 가능하다. 전력변환장치는 계통으로부터 전력을 받아 에너지 저장장치에 저장하거나 반대로 계통에 전력을 공급할 수 있을 뿐 아니라 계통으로부터 분리되어 독립적으로 부하에 전력을 공급할 수 있다<sup>[7-8]</sup>. 대표적으로 요구되는 사항은 다음과 같다. 신재생 에너지를 통해 에너지 사용 측면에서 최대한 자급해야 하며, 에너지 저장장치를 통해 장시간 독립이 가능해야 한다. 또한 필요시에 계통에 연계하거나 분리할 때 위상과 주파수를 파악하는 위상고정루프<sup>[9]</sup>를 활용하여 부하에 영향이 없도록 동작해야 한다<sup>[10]</sup>. 본 논문에서는 신재생 에너지원과 에너지 저장장치 및 전력변환장치를 이용하여 계통으로부터 독립 또는 연계할 수 있는 마이크로그리드 구조 및 구성요소의 설계를 제안한다. 제안하는 내용을 통해 마이크로그리드를 계통에 연계하는 시점을 조절하거나 계통에 미치는 영향을 줄이는 방향으로 운용할 수 있으며, 필요시에 독립운전을 통해 수요반응(DR)에 참여하거나 에너지 저장장치를 활용하여 마이크로그리드의 피크절감(Peak Shaving), 최적제어 등 다양한 방법으로 마이크로그리드를 운용하는 것이 가능해진다.

## II. 신재생 에너지원

### 2.1 태양광 발전

마이크로그리드를 독립적으로 운영할 수 있도록 에너지를 공급하는 장치로서 가장 친환경적인 것은 단연 신재생 에너지원이며, 신재생 에너지원 중에서 가장 대표적인 것은 태양광 발전이다. 태양광 발전은 출력전력이 출력전압과 전류의 조절에 의해 변화하는 특징으로 인해서 항상 최대전력지점추종(MPPT)을 통해서 가장 적절한 전압과 전류를 출력하도록 제어해야 한다. 그림 1은 Perturb & Observe (P&O) 알고리즘에 대한 흐름도이다.

P&O 알고리즘은 다음과 같은 방식으로 동작한다. 우선 태양광 발전의 출력 전압과 전류를 측정하여 현재 출력전력을 계산한다. 과거의 출력전력에 비해 현

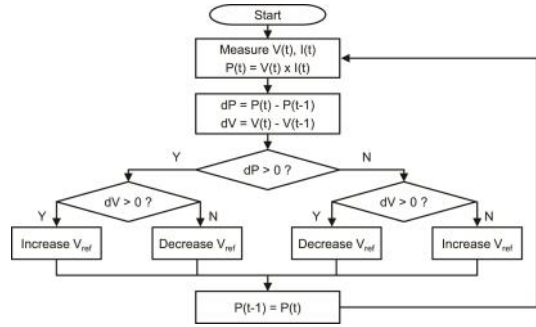


그림 1. 최대전력지점추종 알고리즘  
Fig. 1. Maximum power point tracking algorithm

재의 출력전력이 증가했는지 확인하고, 또한 전압의 크기도 증가했는지 확인한다. 만약 과거에 비해 현재 전력이 증가하였다면 이것은 바람직한 것이므로 전압의 변화를 따라 그대로 다음 전압의 크기를 결정한다. 하지만 만약 과거에 비해 현재의 전력이 감소하였다면 이것은 바람직하지 않은 것이므로 전압의 변화와 반대로 다음 전압의 크기를 결정한다. 이 과정을 반복하면 거의 최대의 전력을 출력하는 전압을 찾게 된다. 태양광 발전량은 태양광의 세기와 온도에 영향을 받기 때문에 시간의 흐름에 따라 발전량이 달라진다. 하지만 이 알고리즘을 적용하면, 태양광의 세기와 온도에 상관없이 현재 주어진 상황에서 가장 큰 전력을 생산할 수 있다.

### 2.2 계통연계형 인버터

태양광 발전을 통해 생산된 에너지가 마이크로그리드에 전달되기 위해서는 전력 전달을 위한 전력변환기가 필요하다. 태양광 발전에 따른 DC 전압을 AC 전압으로 바꾸어 주는 것을 인버터(Inverter)라고 하며, 인버터는 계통에 연결되어 직접 계통에 전력을 전달하는 계통연계형 인버터와 단독으로 전압을 생성하는 독립형 인버터로 구분할 수 있다. 그림 2는 마이크로그리드를 위한 계통연계형 인버터의 회로와 제어기 구조를 보여준다. 마이크로그리드는 3상으로 구성되어 있으므로 인버터는 그림 2(a)와 같이 6개의 스위치와 3개의 인덕터를 사용한 전력 회로로 구성되며, 태양광 발전의 DC 전압을 받아 계통에 AC 전류를 전달하는 역할을 한다.

그림 2(b)는 계통연계형 인버터의 제어기를 보여준다. 최대전력지점추종 알고리즘을 통해서 태양광 발전의 출력에 대한 기준전압  $v_{pv}^*$ 을 결정한다. 실제 전압  $v_{pv}$ 과 비교하여 차이가 커질수록 인버터의 출력전류가 커지도록 한다. 이때 가장 효과적으로 에러를 줄일 수

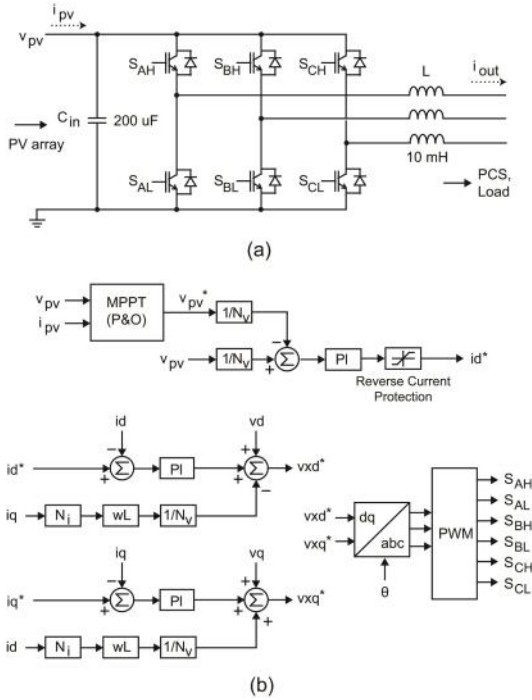


그림 2. 계통연계형 인버터: (a) 회로 (b) 제어기  
Fig. 2. Grid-connected inverter: (a) circuit and (b) controller

있는 비례적분(PI) 제어기를 사용한다. 또한 태양광 발전의 출력이 음이 되지 않도록 하기 위해 역 전류 방지도 추가하였다. 인버터의 출력 기준전류  $i_d^*$ 는 Clarke 변환과 Park 변환을 통해 계통의 위상에 대해  $dq$ -축변환을 한  $d$ 성분의 전류로서, 역률을 최대화 할 수 있도록 전압의 위상과 일치된 전류의 크기를 나타낸다. 역률의 최대화를 위해  $q$ 성분의 기준 전류  $i_q^*$ 는 0으로 설정하여, 센싱된 현재 전류인  $i_d$  및  $i_q$ 와 비교하여 제어한다. 이때도 역시 비례적분 제어기를 통해서 효과적으로 제어한다. 이 비례적분 제어기의 출력은 인버터 스위칭 전압의 증감을 의미하기 때문에, 스위칭 전압을 결정하기 위해서는 추가적으로 인덕터의 전압크기와 계통의 전압 크기를 더해줘야 한다. 따라서  $d$ 축 제어기에서는  $i_d$ 와  $-wL$ 을 곱한  $v_{Ld}$ 와 계통 전압  $v_d$ 를 더하게 되고, 동일한 방식으로  $q$ 축 제어기에서는  $i_d$ 와  $wL$ 을 곱한  $v_{Lq}$ 와 계통전압  $v_q$ 를 더하게 되어 최종적인 스위칭 기준전압  $v_{xd}^*$ 와  $v_{xq}^*$ 를 결정한다. 마지막으로 역 Clarke 변환과 역 Park 변환을 통해  $dq$ 축이 아닌  $abc$ 축에 대한 전압 신호를 생성하고, 이것을 펄스폭변조 (pulse width modulation)를 통해서 실제 스위치 제어신호를 생성한다. 이때  $N_i$ 와  $N_v$ 는 각각 전류 및 전압에 대해 단위크기(percent unit)를

적용하기 위한 기준값이다.

### 2.3 에너지 충전기

마이크로그리드에 태양광 발전을 적용하는 다른 한 가지 방법은 인버터가 아닌 컨버터를 사용하여 에너지 저장장치(ESS)에 직접 충전하는 방식이다. 이 방식을 사용하면 태양광으로부터 생성된 에너지를 바로 계통에 투입하지 않고 에너지 저장장치에 모아두었다가 원하는 시점에 계통에 투입하도록 시간대와 전력 크기를 변경할 수 있는 장점이 있어서, 마이크로그리드를 운영하는데 있어서 더 효과적이라고 할 수 있다. 하지만 인버터와 비교하여 계통에 전달되기 위해 전력변환이 이중으로 필요함에 따라 효율이 좀 더 낮은 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 태양광 발전기를 두가지 구성으로 나누어서, 한 구성에서는 바로 사용할 에너지를 인버터를 통해 부하에 직접 투입하도록 하고, 다른 하나의 구성에서는 에너지를 나중에 사용할 수 있도록 충전기를 통해 배터리에 저장하는 방식을 제안한다.

그림 3은 에너지 저장장치에 태양광 에너지를 충전하는 충전기의 회로와 제어기 구조를 보여준다. 에너지 저장장치 내부 배터리는 DC 전압 입력력을 가지므로 충전기는 그림 3(a)와 같이 2개의 스위치와 1개의 인덕터를 이용한 전력 회로로 구성되며, DC 전압을 받아 DC 전류를 전달하는 역할을 한다. 안정적인 전압 유지를 위해 입력력에 적절한 크기로 축전지(capacitor)를 가지며, LC 공진(resonance) 현상으로 제어의 불안정성을 줄이기 위한 저항  $R_d$ 가 사용되었다. 그림 3(b)는 배터리 충전기의 제어기를 보여준다.

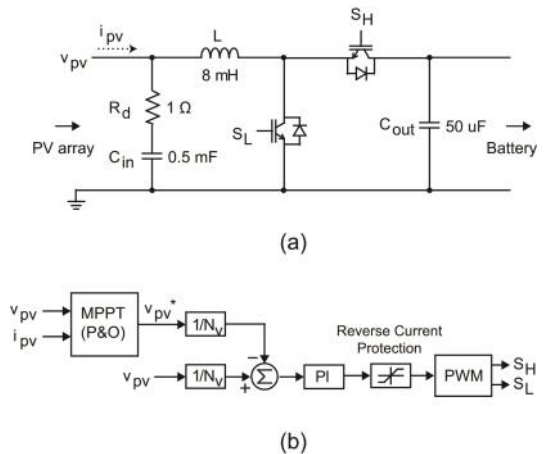


그림 3. 배터리 충전기: (a) 회로 (b) 제어기  
Fig. 3. Battery charger: (a) circuit and (b) controller

인버터와 동일하게 최대전력지점추종 알고리즘을 사용하며 이로 인해 생성된 기준전압  $v_{pv}^*$ 와 실제 전압  $v_{pv}$ 과 비교하여 비례적분 제어기를 통해 충전기 출력 전류의 크기를 조절한다.

### III. 계통 동기화

#### 3.1 계통 위상 검출

마이크로그리드의 계통과의 연계를 위한 첫 번째 단계로 계통의 위상 검출이 필요하다. 계통의 위상을 정확히 알아야만 계통에 안정적으로 연계할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 계통 위상 검출을 위해 잘 알려진 위상고정루프(PLL) 방식을 사용하였다. 일반적으로 위상고정루프는 일정하게 반복되는 신호에 대해 다른 신호를 동기시키기 위해 사용하는 것으로, 위상검출에는 계통전압 신호에 대해 임의의 위상에 대한 신호를 비교하여 동기가 맞는지 파악하는 형태로 사용한다.

그림 4는 계통의 위상검출을 위한 위상고정루프를 보여준다. 계통의 3상 전압  $v_{ga}$ ,  $v_{gb}$ ,  $v_{gc}$ 를 임의의 위상  $\theta$ 에 대해 Clarke 변환과 Park 변환을 통한  $dq$ -축변환을 수행하면,  $d$ 성분의 전압  $v_d$ 와  $q$ 성분의 전압  $v_q$ 를 얻을 수 있다. 임의의 위상  $\theta$ 가 만약 계통의 위상과 동일하다면  $v_d$ 는 계통전압의 진폭크기와 동일한 값을 가질 것이고,  $v_q$ 는 0의 값을 가질 것이다. 하지만 위상이 동일하지 않다면 그에 정도에 따라  $v_q$ 가 나타나게 된다. 즉,  $v_q$ 의 크기는 위상에 대한 오차로서, 비례적분 제어기를 통해서 조절해야 할 위상 속도의 값이 된다. 이것을 계통의 전압 기준 회전속도인  $\omega_{ref}$ 에 더하여 위상을 더 빠르거나 더 느리게 움직이게 된다. 만약 이 속도에  $2\pi$ 를 나누면 계통의 주파수  $f_{pll}$ 이 되고, 적분을 하면 위상  $\theta$ 가 된다. 이때 계통과의 연계동작에 필요하여 고정 정보신호를 추가적으로 생성하였다. 이 방식을 사용함에 따라 실제 위상고정루프가 유효한 값을 가지는지 아닌지를 판단할 수 있었으며, 이 고정

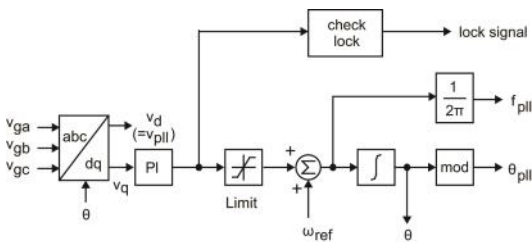


그림 4. 계통 위상 검출을 위한 위상고정루프  
Fig. 4. Phase-locked loop for grid phase detection

정보신호가 생성되어야만 안정적으로 계통에 연계할 수 있다.

#### 3.2 위상 동기화기

본 논문에서는 계통의 위상검출에 추가하여 위상 동기화기를 제안한다. 위상고정루프는 위상을 찾아줄 수 있으나, 만약 독립운전 동안 마이크로그리드의 위상과 계통의 위상이 다르다면 계통에 연계할 수 없다. 이것을 지정된 슬루율을 적용하여 원하는 속도에 맞추어 마이크로그리드의 위상을 서서히 조절함으로써 계통의 위상과 일치하게 만들 수 있다. 즉, 동기화기는 마이크로그리드의 전압위상을 결정하는 역할을 하는 동시에, 계통 연계를 위해서 위상을 조절하는 역할도 할 수 있다.

그림 5는 마이크로그리드의 위상동기에 필요한 동기화기를 나타내는 블록도이다. 동기화기의 동작방식은 다음과 같다. 만약 전력변환장치의 출력에 의해 마이크로그리드의 위상을 나타내는  $\theta_{pgs}$ 와 계통의 위상을 나타내는 위상고정루프 출력인  $\theta_{pll}$ 이 거의 유사하면 이것은 동기가 된 것으로 판단한다. 이 경우에는  $\theta_{pgs}$ 를  $\theta_{pll}$ 과 동일하게 설정함으로써, 계통의 위상을 그대로 따라서 마이크로그리드가 움직이게 된다. 하지만 만약 마이크로그리드가 계통으로부터 독립하여 동작하는 경우, 주파수가 거의 유사하더라도 시간이 지남에 따라 위상이 조금씩 달라진다. 이때 다시 계통에 연계하여 동작하기 위해서는 계통의 위상  $\theta_{pll}$ 을 조금씩 따라가며  $\theta_{pgs}$ 를 결정해야 한다. 마이크로그리드 내부에서 사용하는 위상인  $\theta_{mi}$ 를 계통의 주파수 수준에서 조금씩 증가시켜 유지하는데, 이때 슬루율  $S_{rate}$ 를 적용한 값만큼 추가로 위상을 더 증가시켜주면 위상이 계통의 위상보다 상대적으로 빠르게 움직인다. 이 과정이 반복되면 어느 순간에는 계통의 위상과 마이크로그리드의 위상차인  $\theta_{err}$ 가 작아지게 되는데, 어느 기준 이하로 작아지면 위상이 일치하는 것으로 간주하고 동기화 신호를 발생하게 된다. 이 동기화 신호는 동기가 유효하다는 것을 알려주는 동시에 전력변환장치를 통해서 마이크로그리드가 계통에 직접 연결되고,

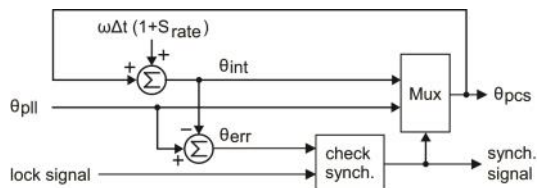


그림 5. 동기화기 블록도  
Fig. 5. Synchronizer block diagram

전력변환장치의 동작모드가 변경되도록 하는 역할을 한다.

일반적으로 마이크로그리드와 계통은 위상고정루프만 사용하여 위상을 검출함으로써 위상 동기화가 없이 연결된다. 하지만 이처럼 마이크로그리드가 독립인 상태에서는, 위상고정루프가 위상을 검출하는 역할이 아닌 위상을 결정하는 역할을 하게 되는데, 계통이 정전이 되어 전압이 불안정한 경우 위상고정루프에 의해 결정되는 마이크로그리드의 위상은 결국 불안정하다고 볼 수 있다. 본 논문에서 제안하는 동기화기는 계통이 정전되더라도 마이크로그리드의 위상을 안정적으로 유지시키는 동시에, 계통이 복전된 경우 안정된 속도로 마이크로그리드의 위상을 계통에 동기시킬 수 있는 장점을 가진다.

#### IV. 전력변환장치

마이크로그리드의 계통연계 및 독립을 직접적으로 제어하는 전력변환장치(PCS)는 그림 6과 같이 6개의 스위치와 3개의 인덕터와 축전지로 구성된 LC 필터 및 계통연계용 인덕터 및 차단기로 구성된다. 에너지 저장장치(ESS)로부터 DC의 전력을 받아서 계통으로 AC 전력을 전달하거나 반대로 계통에서 에너지 저장장치로 전력을 전달하여 양방향으로 동작한다. 또한 독립운전 시에는 출력단에 연결된 부하에 직접 AC 전력을 공급하기도 한다. 계통연계형 태양광 인버터와 유사한 구조를 가지지만, 출력에 연결된 부하에 직접 전력을 공급하고 계통과의 연계를 차단기를 통해 제어한다는 점에서 차이가 있다.

출력전압과 전류를 동시에 제어할 수 있으며 독립운전과 계통연계 운전을 부드럽게 전환할 수 있는, 본 논문에서 제안하는 전력변환장치 제어기는 그림 7과 같다. 제어기는 크게 두 부분으로 나누어, 전압을 유지할 수 있도록 기준전류를 결정하는 전압제어기와

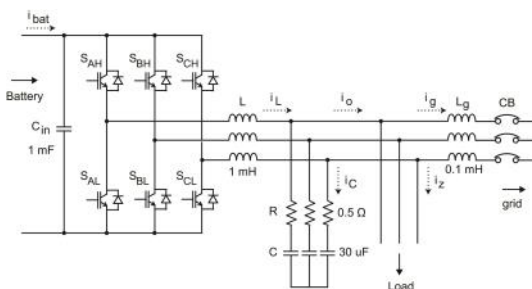


그림 6. 전력변환장치 회로  
Fig. 6. Circuit of power conditioning system

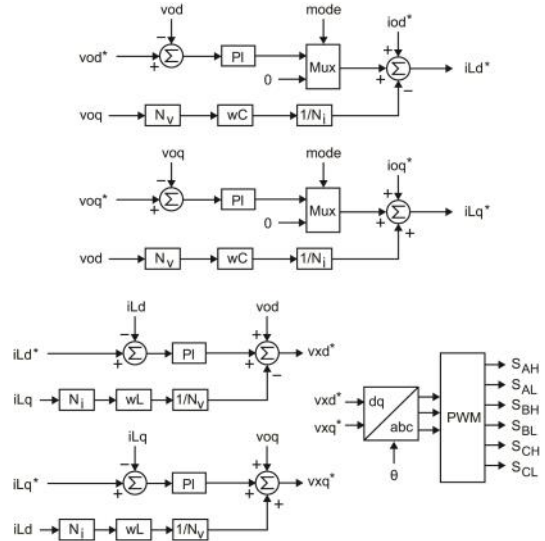


그림 7. 전력변환장치 제어기  
Fig. 7. Controller of power conditioning system

기준전류를 바탕으로 스위칭 기준전압을 결정하는 전류제어기로 구분된다.

제어기의 동작방식은 다음과 같다. 독립운전 시 출력 기준전압의  $d$  성분과  $q$  성분인  $v_{od}^*$ 와  $v_{oq}^*$ 에 대해 인버터의 출력전압을 제어하도록 비례적분 제어를 사용하여 출력전류의 증감량을 결정한다. 이 증감량은 독립운전 시에만 필요하며, 만약 계통연계 운전 시에는 전압은 계통에 의해 결정되므로 제어할 필요가 없기 때문에 이 값을 0으로 한다. 계통연계 시에 출력하고자 하는 기준 출력전류의  $d$  성분과  $q$  성분인  $i_{od}^*$ 와  $i_{oq}^*$ 에 대해 필요 증감량을 더하여 인덕터 기준 전류의  $d$  성분과  $q$  성분인  $i_{Ld}^*$ 와  $i_{Lq}^*$ 를 결정한다. 이때 중요한 것은 전력변환장치의 출력전압 안정성을 위해 사용하는 필터의 축전지에 의해 위상이 90도 차이가 나는  $i_c$  전류가 발생하게 된다. 이 전류의  $d$  성분은 출력전압의  $q$  성분에 의해 생기므로  $v_{oq}$ 와  $-wC$ 를 곱한  $i_{cd}$ 를  $i_{Ld}^*$  결정 시에 함께 더해 주어야 한다. 뿐만 아니라  $i_c$  전류의  $q$  성분은 출력전압의  $d$  성분에 의해 생기므로  $v_{od}$ 와  $wC$ 를 곱한  $i_{cq}$ 를  $i_{Lq}^*$  결정 시에 함께 더해 주어야 한다. 기준전류인  $i_{Ld}^*$ 와  $i_{Lq}^*$ 에 대해 인덕터의 전류를 제어하는 전류제어기는 앞에서 설명한 계통연계형 인버터의 전류제어기와 그 동작이 동일하다.

제안하는 이 제어기의 특징은 독립운전과 계통연계 운전 모두에 대해 제어가 가능한 것이다. 독립운전으로 동작하는 경우 출력전압을 제어하도록 제어기가 구성되며, 이때 계통연계 운전에 대한 출력 기준전류인  $i_{od}^*$ 와  $i_{oq}^*$ 는 그 값이 주어지더라도 비례적분 제어

기에 의해 자연스럽게 상쇄되어 그 역할을 하지 않게 된다. 또한 계통연계 운전으로 동작하는 경우 출력전압 제어가 없어지게 되고 출력 기준전류만 따르게 된다. 즉, 독립운전으로 동작하는 경우에는 부하에 일정한 전압을 공급하기 위해 전압제어 방식을 사용하며, 계통연계 운전으로 동작하는 경우에는 일정한 전류를 출력하기 위해 전류제어 방식을 사용한다.

일반적인 전력변환장치의 제어기는 전류제어 방식을 사용하며, 독립운전을 해야하는 경우 전류제어기가 아닌 별도의 전압제어기를 사용한다. 이 경우, 모드 전환에 따른 전력변환장치 출력의 변화가 심하여 전압과 전류가 비정상적으로 변화하는 과도구간이 생기게 된다. 본 논문에서 제안하는 제어기는 별도의 전압제어기가 아닌 전류제어기를 기반으로 전압제어와 전류제어가 모두 가능함에 따라, 모드 전환에 따른 출력 변화가 부드럽게 이어지는 장점이 있다. 따라서 마이크로그리드 내부의 부하에 지속적으로 안정적인 전력 공급이 가능하다.

전력변환장치를 활용하여 마이크로그리드의 계통연계와 독립운전을 결정하는 모드 제어기는 그림 8과 같다. 계통과의 연계를 위해서 위상고정루프(PLL)를 이용하여 계통의 위상과 주파수를 파악하고, 계통의 위상과 마이크로그리드의 위상이 동일할 수 있도록 동기화기를 통해서 전력변환장치의 위상을 조금씩 조절한다. 위상이 일치되었다는 정보 신호를 받게 되면, 전력변환장치 모드 제어기는 배터리의 충전상태(SOC)에 따라 계통연계로 동작할지 독립운전으로 동작할지 판단하게 되며, 그 결과에 따라 동작모드를 결정하여 출력 전류값과 함께 전력변환장치에 전달한다. 이때 갑작스러운 출력변화를 막기 위해 출력 기준전력에 저대역필터(low-pass filter)를 적용하였다.

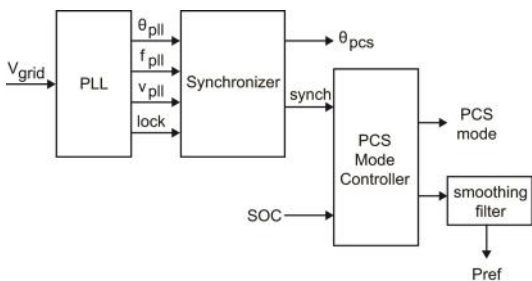


그림 8. 전력변환장치 모드 제어기  
Fig. 8. Mode controller of power conditioning system

## V. 마이크로그리드 독립운전

분산자원(distributed energy resource)을 활용하여 효과적으로 독립운전을 수행할 수 있는 마이크로그리드의 구성은 그림 9와 같다. 전력변환장치(PCS)가 계통과 변압기를 통해 직접적으로 연결이 되며, 부하는 전력변환장치를 통해서 계통 또는 에너지 저장장치(ESS)와 연결된다. 효율성을 위해 태양광 발전 장치는 두 개로 구성되어, 하나는 인버터를 통해 부하에 직접 연결되고 다른 하나는 충전기를 통해 에너지 저장장치에 직접 연결된다. 신재생 에너지의 생산량에 따라 독립운전의 시간이 결정된다.

배터리의 충전상태(SOC)를 기반으로 계통연계 운전과 독립운전을 결정하는 절차는 그림 10과 같다. 충전상태가 최저 기준치에 미치지 못하면 독립운전 상태를 유지하며, 만약 최저 기준치 이하가 되면 충전을 위해서 계통에 동기화하여 연결한 다음 계통연계 모드로 전환하여 충전을 시작한다. 충전은 최대 기준치까지 충전을 하게 되며 만약 충전상태가 최대 기준치 이상이 되면 충전을 멈추고, 최저 기준치가 될 때까

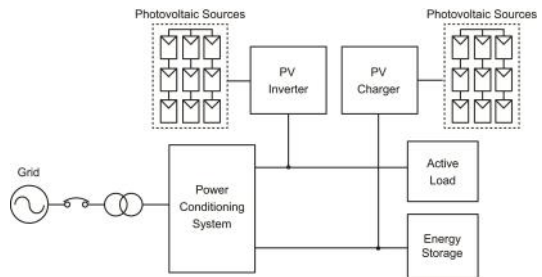


그림 9. 마이크로그리드 구성  
Fig. 9. Microgrid Architecture

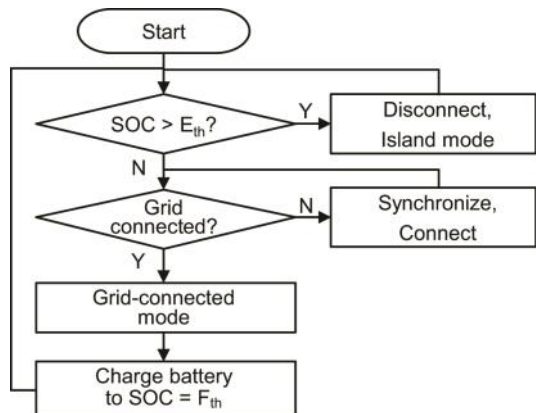


그림 10. 독립운전 흐름도  
Fig. 10. Flow chart of Island operation

지 다시 독립운전 상태를 유지한다. 이와 같은 절차를 통해서 자동으로 독립운전과 계통연계운전을 결정하여 마이크로그리드가 운영된다.

### VI. 모의 실험

전력변환장치를 기반으로 제안하는 마이크로그리드의 계통연계 및 독립운전을 PSIM 툴을 사용하여 모의실험 하였다. 계통은 3상 380 V<sub>rms</sub> 및 60 Hz로, 에너지 저장장치의 전압은 800 V로 설정하였다. 인버터를 이용하여 부하에 연결하는 태양광 발전기는 무부하 개방전압 1000 V 및 출력 5 kW를 가지며, 충전기를 이용하여 에너지 저장장치에 연결하는 태양광 발전기는 무부하 개방전압 400 V 및 출력 5 kW를 가지도록 결정하였다. 부하는 약 10 kW, 전력변환장치는 약 20 kW, 인버터 및 충전기는 약 10 kW 수준으로 설계하였다. 에너지 저장장치의 용량은 모의 실험의 시간 단축을 위해 4.63 Wh로 설정하였다. 이것은 SOC를 빠르게 변화시키기 위해 40 kWh 용량을 1/8640 배로 축소한 것으로, 편이상 10초의 모의실험을 통해 24시간의 모의실험 결과를 얻기 위한 임의의 수단이다.

그림 11은 최대전력지점추종에 따른 태양광 인버터의 동작을 모의 실험한 파형이다. 최대 5 kW를 출력할 수 있고 출력전압의 조절에 따라 출력전력이 달라진다. 최대전력지점추종 알고리즘의 동작에 따라 초기 보다 점점 출력 기준전압 크기가 작아지며 그에 따라 출력전력이 증가하는데, 0.2초 내에 거의 최대지점에 근접한 것을 볼 수 있다. 그에 따른 출력전류의 피

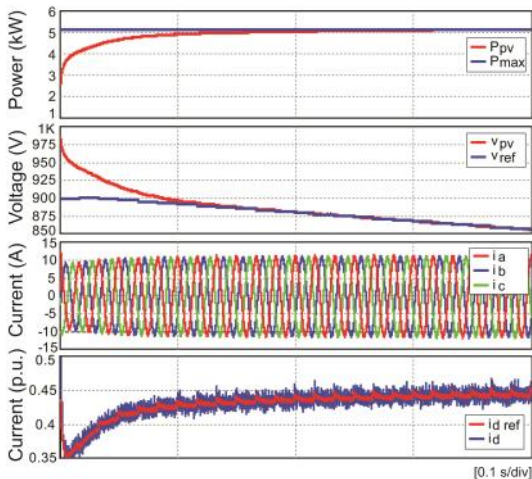


그림 11. 최대전력지점추종 동작 파형  
Fig. 11. Waveform of MPPT operation

크 크기는 조금씩 증가하는데, 출력전압을 제어하기 위해 제어기 내부의  $d$ 성분의 출력전류  $i_d$ 가 제어되기 때문이다. 에너지 충전기의 경우도 동일한 최대전력지점추종 알고리즘을 사용하기 때문에 전류가 직류인 것만 차이가 있고 나머지는 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 태양광 발전에 따른 전력을 마이크로그리드 내에서 사용이 가능하다는 것을 검증하였다.

에너지 저장장치의 충전상태(SOC)를 기반으로 계통연계와 독립운전을 전환하는 모의실험 결과를 그림 12에 나타내었다. 그림 12(a)는 독립운전에서 계통연계로 전환하는 순간으로서, 독립운전 중에 에너지 사용으로 인해 충전상태가 점점 하락하고, 최저 지점인 20%에 도달했을 때 전력변환장치의 계통연계로 모드 전환이 동시에 일어난다. 독립운전 중에는 계통으로부터 받는 전력이 0이고 전력변환장치의 모든 출력전력이 부하에 사용되는 것을 볼 수 있다. 하지만 계통연계 운전으로 전환되면서 부하에서 사용하는 일정한 전력과 전력변환장치가 충전하는 전력만큼 계통에서는 많은 전력이 들어온다. 그에 따라서 전력변환장치의 전류 위상이 정 반대가 되고 크기가 달라지는 것을

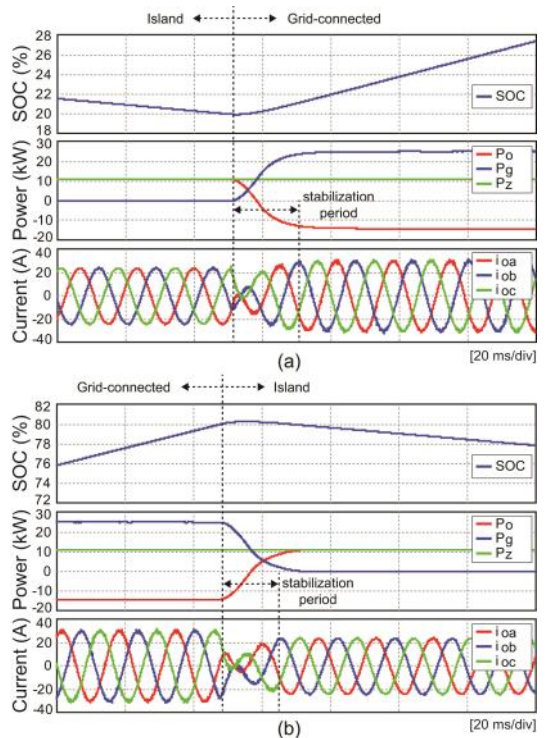


그림 12. 독립운전 파형: (a) 독립에서 계통연계 전환 (b) 계통연계에서 독립으로 전환  
Fig. 12. Waveform of island operation: (a) from island to grid-connection and (b) from grid-connection to island

확인할 수 있다. 충전에 의해 에너지 저장장치의 충전 상태는 다시 증가하게 된다. 이때 전력변환장치는 전압제어 방식에서 전류제어 방식으로 전환하게 되는데, 전환 시점에서 출력전류가 안정적으로 변화하며, 반대의 위상을 갖게 됨에도 불구하고 약 20 ms의 안정화 기간동안 서서히 전류가 변화하게 된다. 이것은 전압제어와 전류제어가 통합된 전력변환장치의 제어기와 출력을 서서히 변화시키는 필터에 의한 영향으로 분석할 수 있다.

반면 그림 12(b)는 계통연계에서 독립운전으로 전환하는 순간을 나타내는 것으로서, 계통연계 중에 에너지 충전으로 인해 충전상태가 점점 증가하고, 최대 지점인 80%에 도달했을 때 전력변환장치의 계통분리와 모드전환이 동시에 일어난다. 계통연계 상태는 그림 12(a)와 동일하지만 독립운전으로 전환되면서 다시 계통으로부터 받는 전력이 0이 되고 모든 출력전력이 부하에 사용되는 것을 볼 수 있다. 그에 따라 전력변환장치의 전류 위상이 다시 정 반대가 되고 크기가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이 경우에도 유사하게, 전력변환장치는 전류제어에서 전압제어 방식으로 전환하게 되고, 제안하는 전력변환기의 특징으로 인해 전환 시점과 약 20 ms의 안정화 기간동안 출력전류가 안정적으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 계통과 분리가 됨에도 불구하고 전압이 안정적으로 유지됨에 따라 출력전력의 변화가 부드럽게 이어지는 것을 확인할 수 있다. 에너지 사용으로 인해 에너지 저장장치의 충전 상태는 다시 감소하게 되며, 만약 충전상태가 20%로 하락하게 되면 이 과정이 다시 반복된다. 따라서 에너지 충전상태에 따른 마이크로그리드의 독립운전 및 계통연계운전의 동작을 모의실험을 통해 검증하였다.

## VII. 결 론

본 논문에서는 신재생 에너지원 및 에너지 저장장치와 같은 분산자원과 전력변환장치를 기반으로 하는 마이크로그리드의 독립운전에 대해 제안하였다. 신재생 에너지원인 태양광 발전기를 두 가지 방식으로 구분하여 계통연계 인버터와 에너지 충전기를 통해 각각 부하와 에너지 저장장치에 전력을 공급하였으며, 저장된 에너지를 사용하여 마이크로그리드를 에너지 충전상태에 따라 자동으로 계통연계 또는 독립으로 운전하였다. 마이크로그리드의 운전방식을 전환하는데 있어서, 위상고정루프와 위상 동기화기를 통해서 정확하게 계통의 위상을 파악하였고, 단일화된 제어를 통해서 전력변환장치 출력의 전압과 전류의 제어

를 빠르게 전환하여 부하의 전력공급에 영향을 주지 않도록 하였다.

## References

- [1] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jimenez-Estevez, and N. D. Hatziargyriou, "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, Jul. 2014.
- [2] M. A. Eltawil and Z. Zhao, "Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems-a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 112-129, 2010.
- [3] 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. Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3037-3048, Dec. 2010.
- [4] G. Lim, "A design of IT-convergence plant factory system using the renewable energy," *J. KICS*, vol. 40, no. 4, pp. 769-779, Apr. 2015.
- [5] D.-Y. Kim and Y.-C. Kim, "Implementation of small-scale wind turbine monitoring and control system based on wireless sensor network," *J. KICS*, vol. 40, no. 9, pp. 1808-1818, Sept. 2015.
- [6] S.-h. Lee, "Development of smart energy profile(SEP) for integrate energy storage system(ESS) at smart home," *J. KICS*, vol. 41, no. 6, pp. 678-680, Jun. 2016.
- [7] I. J. Balaguer, Q. Lei, S. Yang, U. Supatti, and F. Z. Peng, "Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 147-157, Jan. 2011.
- [8] Z. Liu, J. Liu, and Y. Zhao, "A unified control strategy for three-phase inverter in



distributed generation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1176-1191, Mar. 2014.

- [9] F. Liccardo, P. Marino, and G. Raimondo, “Robust and fast three-phase PLL tracking system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 221-231, Jan. 2011.
- [10] C.-L. Chen, Y. Wang, J.-S. Lai, Y.-S. Lee, and D. Martin, “Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 1, pp. 6-15, Jan. 2010.

**허 세 완 (Sewan Heo)**



2005년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 학사  
2007년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 석사  
2007년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원

<관심분야> 전자공학, 전기공학, 에너지 ICT 기술

**박 완 기 (Wan-Ki Park)**



1991년 2월 : 충남대학교 전자공학과 졸업  
1993년 2월 : 충남대학교 전자공학과 석사  
2006년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 박사  
1993년 3월~2000년 7월 : 국방과학연구소 연구원

2000년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원  
<관심분야> 스마트그리드, 에너지 인포메틱스

**이 일 우 (Ilwoo Lee)**



1992년 2월 : 경희대학교 컴퓨터공학과 졸업  
1994년 2월 : 경희대학교 컴퓨터공학과 석사  
2007년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사  
1994년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 스마트그리드, 에너지 인포메틱스