

# 독립운전 모드의 마이크로그리드에서 EDLC와 BESS의 주파수 협조제어전략 설계

## Design of Coordinated Frequency Control Strategy applied to EDLC and BESSs for Microgrid in the Islanded Mode

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

**Abstract** - Since a microgrid has renewable energy sources, imbalance between power supply and power demand occurs in the islanded mode. In order to solve the imbalance, several energy storage systems (ESSs) such as battery energy storage system (BESS), EDLC (electric double layer capacitor), flywheel, and SMES (superconducting magnetic energy storage) are generally used. Especially, their electrical characteristics are different. For efficient use of them, a coordinated control scheme is required. In this paper, a coordinated control scheme for using a Lead-acid BESS, a Lithium BESS, and a EDLC is designed to efficient frequency control for a microgrid in the islanded mode. The coordinated frequency control strategy is designed based on their electrical characteristics. The feasibility of the proposed coordinated frequency control strategy is verified through the simulation.

**Key Words** : Microgrid, Electric double layer capacitor (EDLC), Battery energy storage systems (BESSs), Frequency control

### 1. 서론

최근 기후 변화 문제와 관련하여 신재생에너지원의 사용이 점차 증가될 것으로 예상되며, 특히 발전소, 송전소 등의 설비 신설 및 증설이 제한되고 있다. 또한, 스마트그리드의 적용에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이런 배경에서 신재생에너지원을 주 에너지원으로 이용하는 소규모 전력시스템인 마이크로그리드에 대한 관심과 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4].

마이크로그리드는 전력계통과 연계하여 운전하는 계통연계운전모드와 계통과 분리되어 독립적으로 운전이 가능한 독립운전모드로 운전이 가능하다[5-7]. 계통연계형 마이크로그리드는 순시적으로 발생하는 잉여/부족전력을 전력계통으로부터 전력을 수수할 수 있지만 독립운전 마이크로그리드는 전력계통과 분리되어도 분산전원에 의하여 부하로 전력 공급은 가능하지만 신재생에너지원 기반의 분산전원의 간헐적 출력 특성에 의하여 순시적으로 수요량과 공급량의 균형을 유지하는데 어려움이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 BESS(battery energy storage system), EDLC (electric double layer capacitor), flywheel, SMES (superconducting magnetic energy storage) 등 전력저장장

를 이용하여 전력 공급과 수요의 상태에 따라 순시적으로 전기에너지를 충/방전함으로써 발전량과 부하량의 균형을 맞추는 주파수 제어에 활용하고 있다[8-11].

이러한 전력저장장치 적용을 위해서 고려해야 할 중요한 요소는 에너지 및 전력 밀도라고 할 수 있다. 그러나 전력저장장치들은 전기적 특성에 따라서 에너지 밀도와 전력 밀도가 trade off 관계를 보인다[12]. 즉, 에너지 밀도가 높은 전력저장장치는 전력 밀도가 상대적으로 낮으며, 반대로 전력 밀도가 높은 전력저장장치는 상대적으로 에너지 밀도가 낮은 특징이 있다. 본 논문에서 다루는 BESS는 상대적으로 EDLC보다 에너지 밀도가 높으며, 전력 밀도는 낮다. EDLC는 역의 관계가 있다. 따라서 이러한 각각의 전력저장장치의 전기적 특성을 고려한 협조제어전략이 요구된다.

본 논문에서는 독립운전모드에 있는 마이크로그리드의 원활한 주파수를 제어를 위하여 납축전지 기반 BESS(이하 Lead-acid BESS), 리튬이온 BESS(이하 Li-ion BESS), EDLC의 특성을 반영한 주파수 협조제어전략을 설계하고자 한다. 그리고 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 마이크로그리드를 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 설계된 주파수 협조제어전략의 타당성을 검증하였다.

### 2. 마이크로그리드 구성 및 모델링

본 논문에 이용되는 마이크로그리드는 그림 1과 같이 디젤발전기, 풍력발전기, BESS 2기, EDLC, 부하로 구성하였다.

디젤발전기는 여자기, 디젤엔진 조속기, 동기기로 구성되어 있으며, 조속기는 디젤엔진 조속기를 적용하였고, 여자기는 IEEA DC1A 모델을 적용하였다.

\* 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 : April 23, 2014; Accepted : May 12, 2014

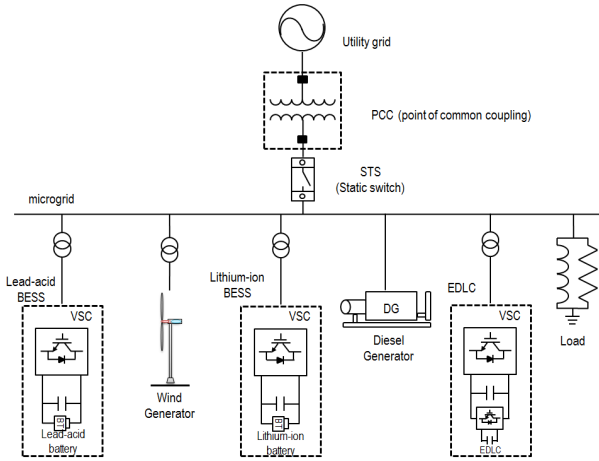


그림 1 마이크로그리드  
Fig. 1 Microgrid

풍력발전기는 실측된 출력전력 데이터를 저장하여 사용하는 형태로 구성하였다. 이는 그림 2와 같이 dq/abc변환을 이용하여 전류원에 직접 입력하는 모델을 이용하였다.

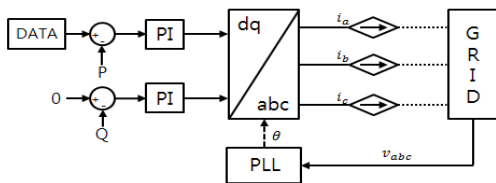


그림 2 풍력 발전기 모델  
Fig. 2 Wind system simplified model

배터리는 그림 3과 같이 내부 고정저항과 가변전압원으로 이루어진 등가모델을 사용하였고, 가변전압원은 식 (1)과 같이 Li-ion 배터리와 Lead-acid 배터리로 구분하여 나타낼 수 있다[13].

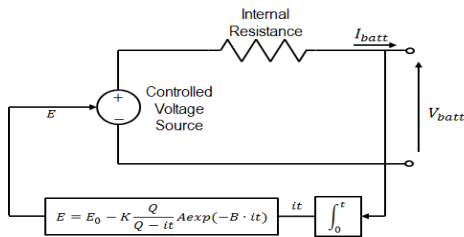


그림 3 배터리 모델  
Fig. 3 Battery model

$$E_{Li-ion} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (1)$$

$$E_{Lead-acid} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} + \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{\text{Exp}(s)}{\text{Sel}(s)} \cdot 0 \right)$$

여기서,  $\int it$  : 충전전류 [Ah],

$E_0$  : 초기 고정 전압 [V],

- $K$  : 분극 저항 [Ohms,]
- $Q$  : 최대 용량 [Ah],
- $A$  : 전압크기[V],
- $B$  : 역시상수 [Ah]<sup>-1</sup>,
- $V_{batt}$  : 배터리 전압[V],
- $R$  : 내부저항[Ω],
- $i$  : 배터리 전류[A]

BESS 모델은 그림 4와 같이 그림 3의 배터리와 DC 링크, IGBT(insulated gate bipolar transistor) 브릿지, L필터로 구성된 전압형 컨버터로 구성되며, d-q변환과 PWM (pulse width modulation)을 통하여 제어가 수행된다[14,15].

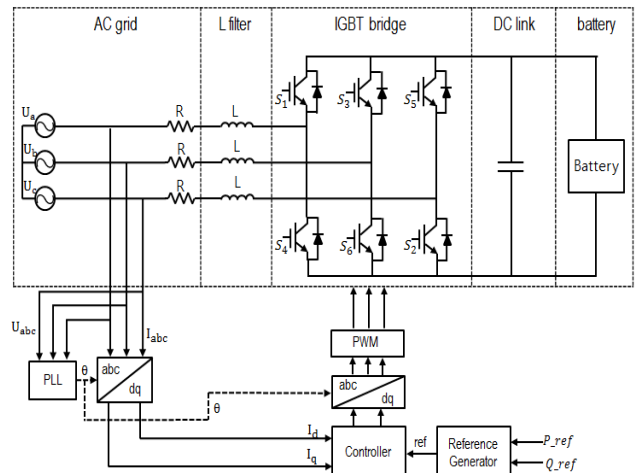


그림 4 BESS의 블록도  
Fig. 4 Block diagram of BESS

EDLC는 BESS와 동일한 전압형 컨버터 모델을 이용하였으며 전압형 컨버터의 DC 링크와 EDLC를 연결하기 위하여 하프 브릿지 양방향 DC-DC 컨버터를 모델링하였다. 이 때, 그림 5의 양방향 DC-DC 컨버터는 Buck/Boost동작을 통하여 DC 링크의 직류전압을 제어한다[16,17].

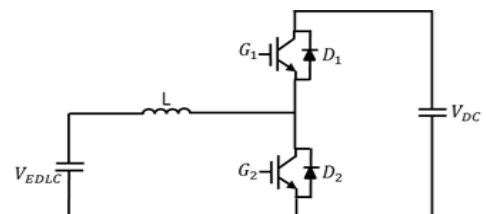
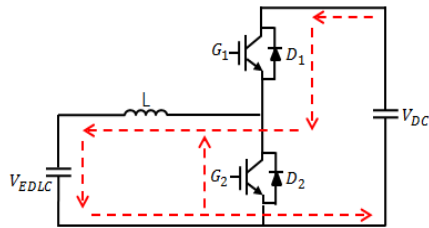


그림 5 양방향 DC-DC converter  
Fig. 5 Bi-directional DC-DC converter

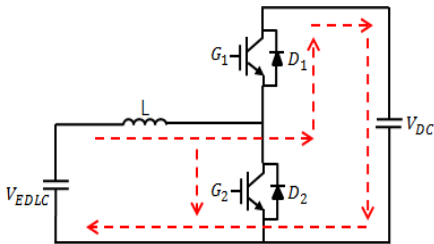
EDLC가 충전모드일 경우는 그림 6의 (a)와 같이  $G_1$ 과 다이오드  $D_2$ 가 동작되며 Buck 컨버터로 동작되며 DC 링크의 에너지가 EDLC로 전달된다. 즉, EDLC는 충전모드로 동작하게 된다. 이때, 입/출력 관계식은 식 (2)와 같다[16,17].

$$V_{DC} = D \cdot V_{EDLC} \quad (2)$$

여기서,  $V_{DC}$  : DC링크 전압  
 $V_{EDLC}$  : EDLC의 전압  
 $D$  : 듀티비



(a) Charge mode(buck mode)



(b) Discharge mode(boost mode)

그림 6 양방향 DC-DC converter 동작원리  
 Fig. 6 Operation mode of bi-directional DC-DC converter

또한, 양방향 DC-DC컨버터는 충전모드에서 방전모드로 전환되는 과정에서 과도현상이 발생한다. 즉, 컨버터가 충전 모드에서 방전모드로 시그널이 입력되면 스위치  $G_1$ 이 off되고, 스위치  $G_2$ 가 on이 되지만 충전전류가 0이 될 때까지 다이오드  $D_2$ 만 동작하게 된다. 이후, 충전전류가 0이 되면  $G_2$ 가 on이 된 상태이므로 전류는 방전 전류가 흐를 때까지 on상태를 유지하게 되며 이때, 충전모드에서 방전모드로 전환될 때의 과도시간은 식 (3)과 같다[16,17].

$$\Delta t = \frac{L}{V_{EDLC}}(I_{buck} + I_{boost}) \quad (3)$$

여기서,  $I_{buck}$  : 충전전류 [A]  
 $I_{boost}$  : 방전전류 [A]

EDLC가 방전모드일 경우는 그림 6(b)와 같이  $G_2$ 와 다이오드  $D_1$ 이 동작되어 boost 컨버터로 동작되며 EDLC에 저장되어 있는 에너지가 DC 링크로 전달된다. 이때, 입/출력 관계는 식 (4)와 같다.

$$V_{DC} = \frac{V_{EDLC}}{1-D} \quad (4)$$

또한, 방전모드에서 충전모드로 전환 시 식 (5)와 같은 과도시간이 발생하게 된다.

$$\Delta t = \frac{L}{V_{DC} - V_{EDLC}}(I_{buck} + I_{boost}) \quad (5)$$

위의 식 (3), (5)를 통하여 방전모드에서 충전모드로 전환되는 시간보다 충전모드에서 방전모드로 전환되는 시간이 더 길다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 양방향 DC-DC 컨버터를 설계할 때, 전류가 항상 연속모드로 동작할 수 있도록 L을 산정해야 한다. L 값 산정에서는 충전/방전 모드일 때, 각각 식 (6), (7)을 만족하도록 설계하였다[16,17].

$$L \geq \frac{D}{2fI_{buck}}(V_{DC} - V_{EDLC}) \quad (6)$$

$$L \geq \frac{D(1-D)}{2fI_{boost}} V_{DC} \quad (7)$$

여기서,  $L$  : 인덕턴스 [H]  
 $f$  : 스위칭 주파수 [Hz]

그림 7은 상기 방법으로 모델링된 EDLC 시스템의 블록도를 나타낸 것이다.

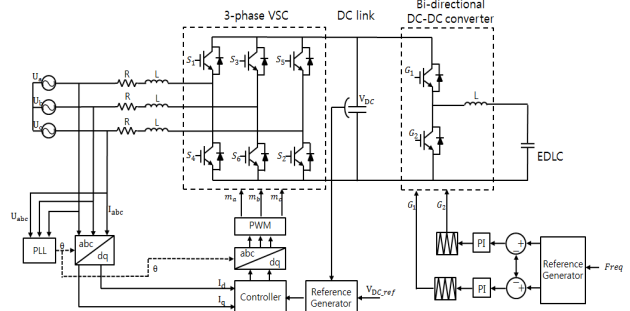


그림 7 EDLC 시스템 블록도  
 Fig. 7 Block diagram of EDLC system

### 3. 주파수 협조제어전략

본 논문에서는 제안되는 주파수 협조제어전략은 각각의 전력저장장치의 특성을 반영한 것으로 기본적으로는 그림 8과 같이 frequency following control과 droop control로 구분하여 수행하도록 하였다. EDLC는 충/방전 횟수에 제한이 적고 높은 전력밀도를 갖는 특성을 가지고 있어 60.2Hz - 59.8Hz 사이에서 frequency following control을 수행하도록 설계하였으며, Lead-acid BESS와 Li-ion BESS는 충/방전 횟수의 제한과 높은 에너지밀도를 갖는 특성을 가지고 있어 60.2Hz보다 크거나 59.8Hz보다 작은 구간에서 droop control을 수행하도록 설계하였다.

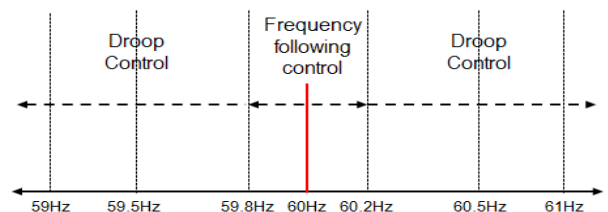


그림 8 주파수 협조제어전략  
 Fig. 8 Coordination frequency control strategy

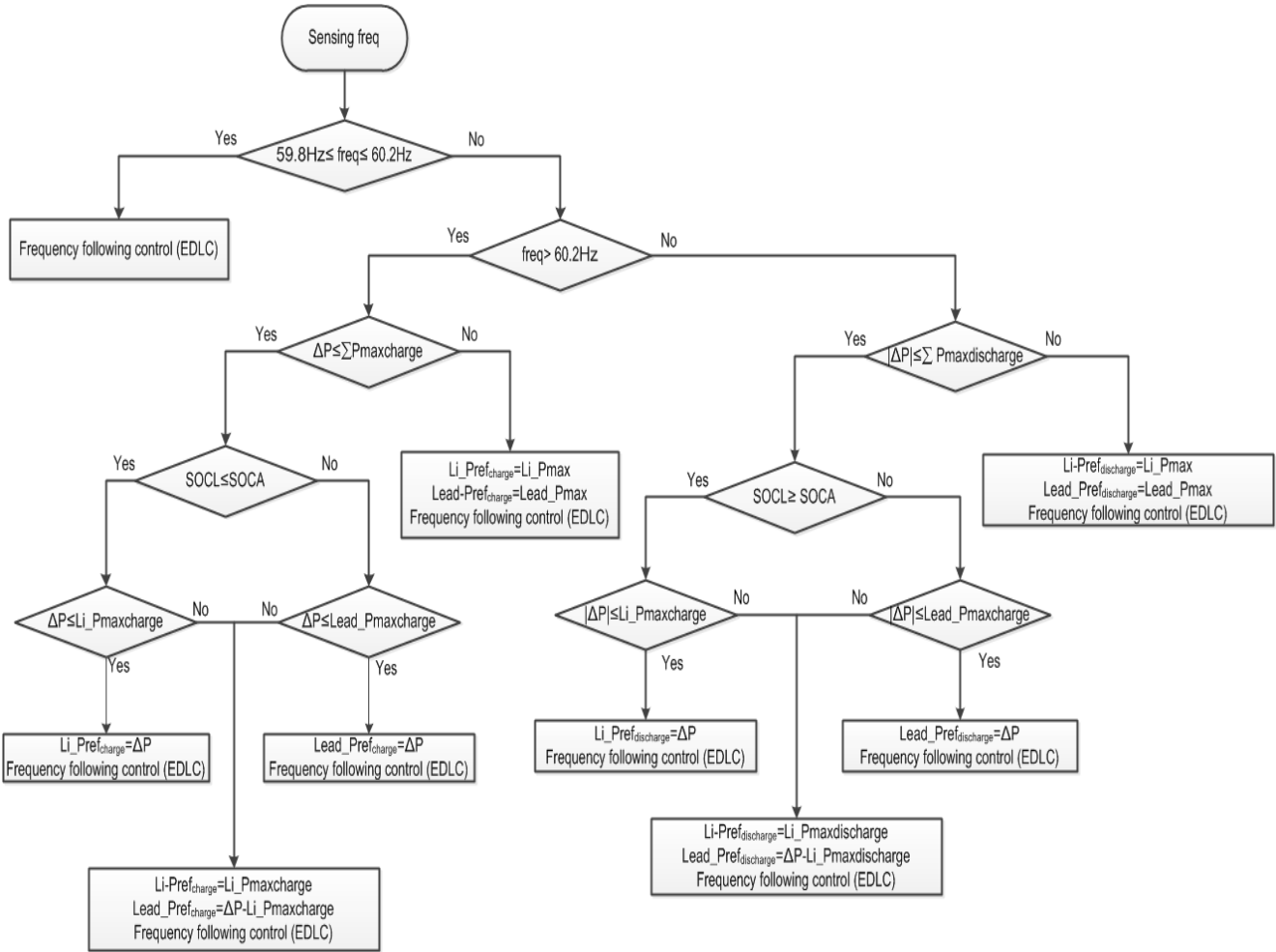


그림 9 주파수 협조제어전략 순서도  
 Fig. 9 Flow chart of coordinated frequency control strategy

전력저장장치들은 계통연계 운전모드에서는 각각의 초기 지령치에 따라 유효전력을 출력하게 되고, 독립운전모드로 전환 시 그림 9와 같이 본 논문에서 제안하는 주파수 협조 제어전략에 따라 운전을 수행하도록 하였다.

독립운전모드의 마이크로그리드의 주파수가 60.2Hz - 59.8Hz 사이인 경우에는 frequency following control 범위 이므로 EDLC에 의한 충/방전으로 주파수제어가 수행되며, Li-ion BESS와 Lead-acid BESS는 운전이 정지된다. 그리고 이 범위를 벗어나는 경우는 아래와 같이 Li-ion BESS와 Lead-acid BESS에 의한 droop control이 수행되도록 설계 하였다.

3.1 배터리 충전모드

그림 9에 나타난 주파수가 60.2Hz보다 높을 경우 전력저장장치는 충전운전을 하게 된다. 이때, 총 발전량과 총 부하량의 차는 식 (8)과 같이 정의한다.

$$\Delta P = \sum P_{gen} - \sum P_{load} \tag{8}$$

여기서,  $\sum P_{gen}$  : 총 발전량  
 $\sum P_{load}$  : 총 부하량

$\Delta P \leq \sum P_{maxcharge}$  일 경우, 2기 BESS의 SOC(state of charge)를 비교하고,  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 충전량보다 적을 경우, 상대적으로 많은 SOC를 갖는 BESS를 선택하여 충전한다. 즉, 1기의 BESS만 운전하고 나머지 BESS는 운전을 정지한다. 이는 BESS의 전기적 특성상 적은 SOC 상태를 오래 유지하거나 잦은 충/방전은 BESS의 수명단축에 큰 영향을 미치는 것을 반영한 것이다. 반면에  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 충전량보다 많을 경우, Li-ion BESS는 최대 출력량을 충전하고 나머지는 Lead-acid에 의하여 충전된다. 이는 방전모드에서 SOC가 많은 BESS부터 방전을 하게 되는데 Li-ion BESS가 Lead-acid BESS보다 충/방전 횟수에 따른 수명에 대한 내구성 더 좋은 특성을 반영한 것이다.

$\Delta P \geq \sum P_{maxcharge}$  일 경우, 2기의 BESS들은 모두 최대 출력치를 충전하며, 필요 시 추가적인 발전기 운전정지가 요구된다. 다음은 그림 9에 표기된 그 외 기호들에 대해서 설명한 것이다.

- $\sum P_{maxcharge}$  : BESS의 최대 충전량의 합
- $Li\_P_{maxcharge}$  : Li-ion BESS 최대 충전량
- $Lead\_P_{maxcharge}$  : Lead-acid BESS 최대 충전량
- $SOCA$  : Lead-acid BESS의 SOC
- $SOCL$  : Li-ion BESS의 SOC
- $freq$  : 마이크로그리드 주파수

### 3.2 배터리 방전모드

그림 9에 나타낸 주파수가 59.8Hz보다 낮은 경우 전력저장장치는 방전을 하게 된다.

$\Delta P \leq \sum P_{maxdischarge}$  일 경우, 2기 BESS의 SOC를 비교하고  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 방전량보다 적을 경우, 상대적으로 많은 SOC를 갖는 BESS를 선택하여 방전한다. 이는 deep discharge가 BESS의 수명단축에 큰 영향을 미친다는 특성을 반영한 것이다. 반면에  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 방전량보다 많을 경우, Li-ion BESS는 최대 출력량을 방전하며 Lead-acid BESS는 나머지를 방전하게 된다.

$\Delta P \geq \sum P_{maxdischarge}$  일 경우, 2기의 BESS 모두 최대 출력치를 방전하고, 필요 시 추가적인 부하차단이 요구된다. 다음은 그림 9에 표기된 그 외 기호들에 대해서 설명한 것이다.

- $\sum P_{maxdischarge}$  : BESS의 최대 방전량의 합
- $Li\_P_{maxdischarge}$  : Li-ion BESS 최대 방전량
- $Lead\_P_{maxdischarge}$  : Lead-acid BESS 최대방전량

## 4. 시뮬레이션

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 설계한 주파수 협조제어전략을 모델링하였고, 그 성능을 검토하기 위하여 표 1과 같이 충/방전이 예상되는 4가지 Case를 상정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

상정된 Case들은 마이크로그리드가 독립운전모드로 전환 시 발전량이 부하량보다 많아 잉여 전력이 발생하여 전력저장장치의 충전이 예상되는 Case 1, 2와 발전량이 부하량보다 적어 부족전력이 발생하여 전력저장장치의 방전이 예상되는 Case 3, 4를 선택하였다. 여기서 Case 1, Case 3은 발전량과 부하량의 차이가 1기의 BESS 최대 출력량보다 적은

표 1 테스트 Cases

Table 1 Test cases

Cases	Condition
1	$\Delta P$ : 60kW, SOC of Li-ion BESS: 40%, SOC of Lead-acid BESS: 60%
2	$\Delta P$ : 165kW, SOC of Li-ion BESS: 40%, SOC of Lead-acid BESS: 60%
3	$\Delta P$ : -60kW, SOC of Li-ion BESS: 40%, SOC of Lead-acid BESS: 60%
4	$\Delta P$ : -160kW, SOC of Li-ion BESS: 40%, SOC of Lead-acid BESS: 60%

경우이고, Case 2, Case 4는 발전량과 부하량의 차이가 1기의 BESS 최대 출력량보다 많은 경우로 제안한 주파수 협조 제어전략의 성능을 검토하기 위하여 다음과 같이 테스트를 수행하였다.

마이크로그리드 구성요소의 용량은 표 2와 같다. 이때, EDLC의 용량은 150kW로 다른 BESS의 용량보다 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 EDLC의 낮은 에너지밀도와 높은 전력밀도를 갖는 특징을 가지고 있기 때문이다. 따라서 EDLC는 순간적으로 많은 전력을 출력할 수 있다.

표 2 마이크로그리드내 발전원 및 전력저장장치 용량

Table 2 Capacity of generator and ESS in microgrid

Components	Capacity
diesel generator	500 kW
wind generator	200 kW
Li-ion BESS	100 kW
Lead-acid BESS	100 kW
EDLC	150 kW

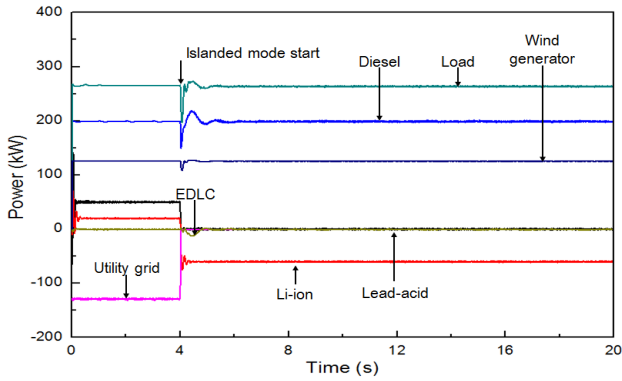
### 4.1 충전 Case

Case 1, 2는 발전량이 부하량보다 많은 경우로 초기 계통 연계모드에서는 마이크로그리드에서 전력계통으로 잉여전력을 송전하며, 4초에 전력계통의 고장 발생에 의해서 STS(static switch)가 동작하면 마이크로그리드는 독립운전모드로 전환되고 전력저장장치는 제안한 주파수 협조제어전략에 따라 운전하게 된다.

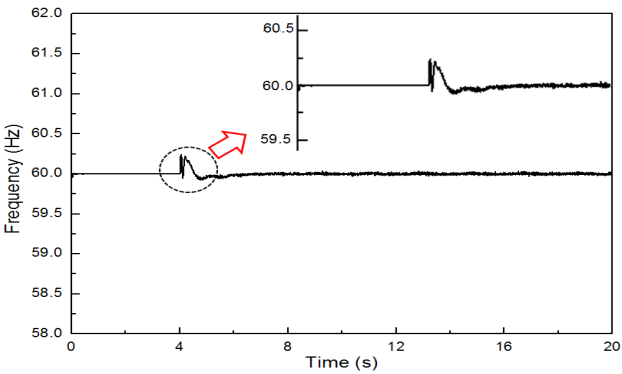
그림 10(a)는 Case 1의 시뮬레이션 결과로써 마이크로그리드 내의 디젤발전기, 풍력발전기, EDLC, Li-ion BESS, Lead-acid BESS의 동적 거동을 나타낸 것이다.

그림 10(a)에서 확인할 수 있듯이 초기에 마이크로그리드는 전력계통으로 잉여전력을 송전하고, 4초에 독립운전모드로 전환 시,  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 충전량보다 작은 경우로 제안한 제어전략에 따라 SOC가 더 적은 Li-ion BESS가  $\Delta P$ 를 충전하고, Lead-acid BESS는 운전을 정지하는 것을 확인할 수 있다. 또한, frequency following control을 수행하는 EDLC는 독립운전모드로 전환 시 주파수 변동이 큰 초기에 충전을 통하여 과도시간 및 주파수 변동폭을 줄이는 역할을 한다. 이러한 전력저장장치들의 주파수 협조제어운전으로 그림 10(b)와 같이 마이크로그리드의 주파수가 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

그림 11(a)는 Case 2의 시뮬레이션 결과로써 마이크로그리드 내의 디젤발전기, 풍력발전기, EDLC, Li-ion BESS, Lead-acid BESS의 동적 거동을 나타낸 것이다. 그림 11(a)에서 확인할 수 있듯이 초기에 마이크로그리드는 잉여전력을 전력계통으로 송전하고, 4초에 독립운전모드로 전환 시  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 충전량을 초과하므로 제안한 제어전략에 따라 Li-ion BESS는 최대 충전량인 100kW를 충전하고, Lead-acid BESS는 나머지를 충전한다. 또한, EDLC는 독립운전모드로 전환 시 주파수 변동이 큰 초기에 충전을 통하여 과도시간 및 주파수 변동폭을 줄이는 역할을 한다. 이러한 전력저장장치들의 주파수 협조제어운전으로 그림 11(b)와 같이 마이크로그리드의 주파수가 신속하게 제어되



(a) 마이크로그리드 출력



(b) 마이크로그리드 주파수

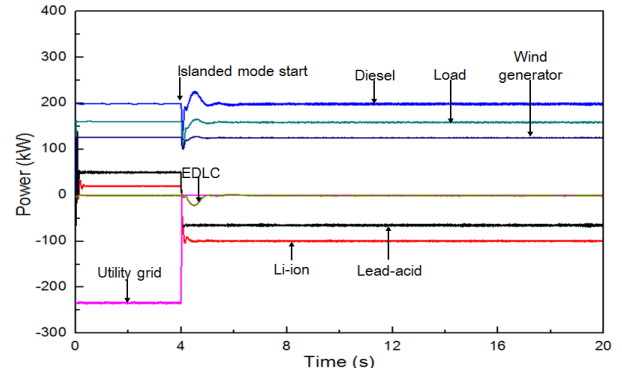
그림 10 시뮬레이션 결과 (Case 1)  
Fig. 10 Simulation result (Case 1)

어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

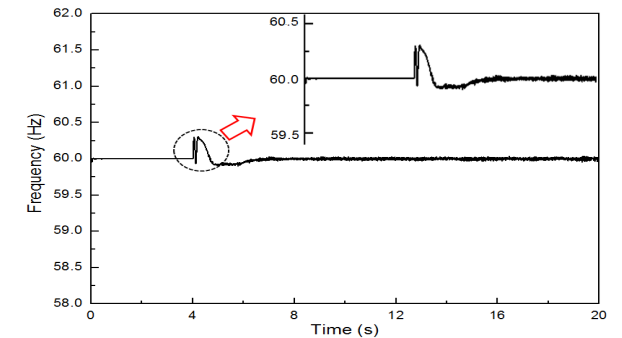
4.2 방전 Case

Case 3, 4는 발전량이 부하량보다 적은 경우로 초기 계통 연계 운전모드에서는 마이크로그리드내의 부족전력을 전력계통으로부터 수전받으며, 4초에 전력계통의 고장 발생에 의해서 STS가 동작하면 마이크로그리드는 독립운전모드로 전환되고, 전력저장장치는 제안한 주파수 협조제어전략에 따라 운전하게 된다.

그림 12(a)는 Case 3의 시뮬레이션 결과로써 마이크로그리드 내의 디젤발전기, 풍력발전기, EDLC, Li-ion BESS, Lead-acid BESS의 동적거동을 나타낸 것이다. 그림 12(a)에서 확인할 수 있듯이 초기에 마이크로그리드는 전력계통으로부터 부족전력을 수전받고, 4초에 독립운전모드로 전환시,  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 방전량보다 적으므로 제안한 주파수 협조제어전략에 따라 SOC가 더 많은 Lead-acid BESS가  $\Delta P$ 를 방전하고, Li-ion BESS는 운전을 정지한다. 또한, frequency following control을 수행하는 EDLC는 독립운전모드로 전환시 주파수 변동이 큰 초기에 방전을 통하여 과도시간 및 주파수 변동폭을 줄이는 역할을 한다. 이러한 전력저장장치들의 주파수 협조제어 운전으로 그림 12(b)와 같이 마이크로그리드의 주파수가 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

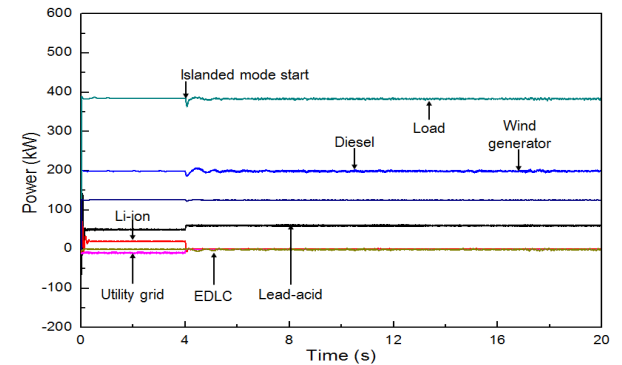


(a) 마이크로그리드 출력

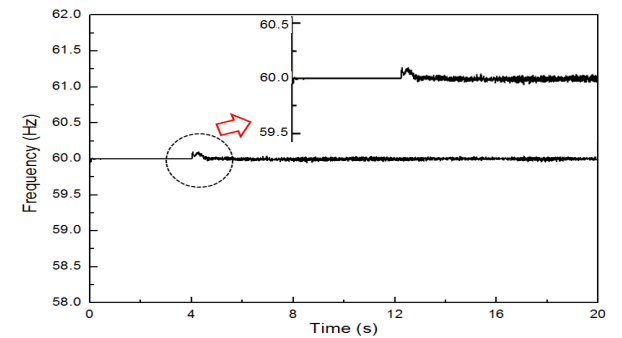


(b) 마이크로그리드 주파수

그림 11 시뮬레이션 결과 (Case 2)  
Fig. 11 Simulation result (Case 2)



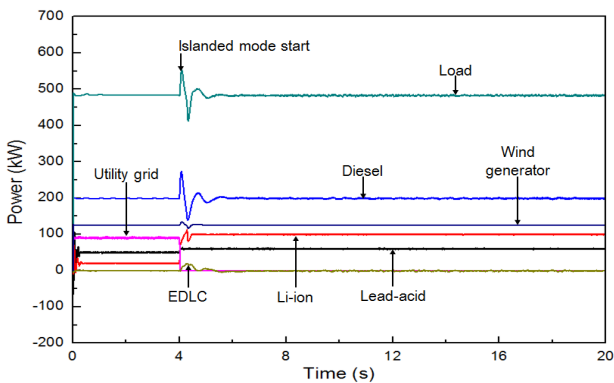
(a) 마이크로그리드 출력



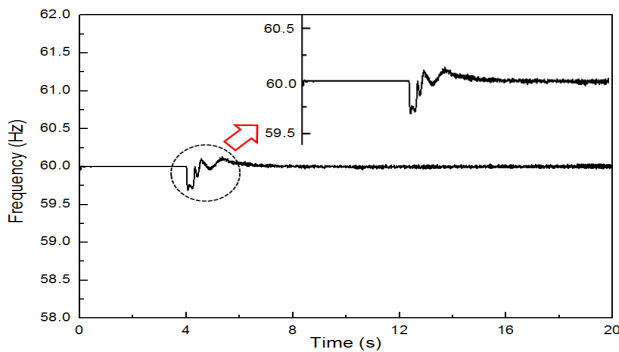
(b) 마이크로그리드 주파수

그림 12 시뮬레이션 결과 (Case 3)  
Fig. 12 Simulation result (Case 3)

그림 13(a)는 Case 4의 시뮬레이션 결과로써 마이크로그리드 내의 디젤발전기, 풍력발전기, EDLC, Li-ion BESS, Lead-acid BESS의 동적거동을 나타낸 것이다. 그림 13(a)에서 확인할 수 있듯이 초기에 마이크로그리드는 전력계통으로부터 부족전력을 수전받고, 4초에 전력계통의 고장 발생에 의해서 독립운전모드로 전환 시,  $\Delta P$ 가 1기의 BESS 최대 방전량을 초과하므로 제안한 주파수 협조제어전략에 따라 Li-ion BESS가 최대 방전량인 100kW를 방전하고, Lead-acid BESS는 나머지량을 방전한다. 또한, EDLC는 독립운전모드로 전환 시 주파수 변동이 큰 초기에 방전을 통하여 과도시간 및 주파수 변동폭을 줄이는 역할을 한다. 이러한 전력저장장치의 주파수 협조제어운전으로 그림 13(b)와 같이 마이크로그리드의 주파수가 신속하게 제어되어 60Hz로 유지되는 것을 확인할 수 있다.



(a) 마이크로그리드 출력



(b) 마이크로그리드 주파수

그림 13 시뮬레이션 결과 (Case 4)

Fig. 13 Simulation result (Case 4)

### 5. 결론

본 논문에서는 독립운전 마이크로그리드의 주파수 제어에 특성이 다른 EDLC, Lead-acid BESS와 Li-ion BESS의 적용 시 각 전력저장장치의 특성을 반영하여 전력저장장치의 효율 향상을 위한 주파수 협조제어전략을 제안하였다. 그리고 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 제안한 주파수 협조제어전략의 성능을 검증하였다. 테스트 결과, 주파수 편이에 따라 설계의도에 맞게 frequency following control, droop

control이 원활하게 수행되는 것을 확인하였고, 발전량과 부하량의 차이, BESS의 SOC에 따른 운전순서와 운전량이 원활하게 결정되며, 그 결과 주파수가 60Hz로 원활하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

추후 제안한 주파수 협조제어기법을 DSP를 이용하여 구현하고 실시간 시뮬레이션 기법인 HILS(hardware-in-the-loop simulation) 시스템에 적용하여 더욱 세부적으로 현장 적용 가능성을 검토하고자 한다.

### 감사의 글

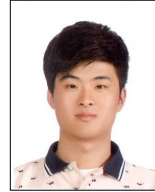
이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A1A1011306)

### References

- [1] N. D. Hatziargyriou, H. Asano, H. R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrid," IEEE Trans. on Power Energy, Vol. 5, pp. 78-94, 2007.
- [2] 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, 2010.
- [3] P. Basak, A. K. Saha, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Microgrid : Control Techniques and Modeling," Proc. of Universities Power Engineering Conference, pp. 1-5, 2009.
- [4] R. Majumder, A. Ghosh, G. Ledwich, and F. Zare, "Power Management and Power Flow Control with Back-to-Back Converters in a Utility Connected Microgrid," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 25, pp. 821-834, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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, 2011.
- [7] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 60, pp. 1390-1402, 2013.
- [8] N. Zhang, W. Gu, H. Yu, W. Liu, "Application of Coordinated SOFC and SMES Robust Control for Stabilizing Tie-Line Power," Energies, Vol. 6, pp. 1902-1917, 2013.

- [9] M. G. Molina and P. E. Mercado, "Power Flow Stabilization and Control of Microgrid with Wind Generation by Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 26, pp. 910-922, 2011.
- [10] C. Jin, N. Lu, S. Lu, Y. Makarov, and R. A. Dougal, "A Coordinated Control Algorithm for Hybrid Energy Storage Systems," Proc. of Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2011.
- [11] S. Manfredi and M. Pagano, "On the Use of Ultracapacitor to Support Microgrid Photovoltaic Power System," Proc. of Clean Electrical Power, pp. 491-497, 2011.
- [12] T. B. Reddy(Ed.), Linden's Handbook of Batteries, 4<sup>th</sup> Edition, McGraw Hill, 2011.
- [13] 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, 2007.
- [14] A. Yazdani, and R. Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power System, John Wiley and Sons, 2010.
- [15] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems, John Wiley and Sons, 2011.
- [16] L. Jan, B. Pavol, B. Petr, and R. Vladimir, "Bi-directional DC-DC Converters for Supercapacitor based Energy Buffer for Electrical Gene-Sets," Proc. on Power Electronics and Applications, pp.1-10, 2007.
- [17] Y. Du, X. Zhou, S. Bai, S. Lukic, and Huang, "A Review of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charge Station Application at Municipal Parking Decks," Proc. on Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1145-1151, 2010.

## 저 자 소 개

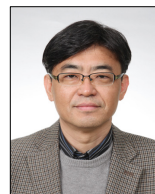


### 유형준 (劉亨準)

1987년 10월 10일생. 2012년 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 032-835-4206

E-mail : hjyoo@incheon.ac.kr



### 김학만 (金學萬)

1998년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사), 2011년 일본 Tohoku (東北)대학교 정보과학연구과 졸업(공학박사), 1996년 10월 ~ 2008년 2월 한국 전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 032-835-8769

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr