

# Fuzzy Logic을 이용한 마이크로그리드의 독립운전 제어

## Control of Islanded Microgrid Using Fuzzy Logic

이 흥 석\* · 박 준 호<sup>†</sup> · 구 본 길\* · 김 종 율\*\*  
(Heung-Seok Lee · June ho Park · Bon-Gil Koo · Jong-Yul Kim)

**Abstract** - This paper presents the design of Fuzzy PI controller that is used at BESS(Battery Energy Storage System) charging and discharging process for islanded operation in microgrid. Most of the PI controllers have fixed PI gains, but real-time updated gains are applied to PI controller using Fuzzy logic in this paper. The performances of suggested Fuzzy PI controller are simulated by PSCAD/EMTDC. As a result, output characteristics of ESS applied real-time updated gains to PI controller are faster than those of using fixed gains.

**Key Words** : Battery Energy Storage System, Islanded Microgrid, Coordinated Control, Fuzzy PI controller.

### 1. 서 론

최근 인구증가와 경제 발달로 인해 에너지소비가 급증하고 이에 따른 에너지자원의 고갈과 화석연료 사용량의 급격한 증가로 대체에너지의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대책중의 하나인 마이크로그리드는 다수의 분산전원과 부하로 구성되어 있는 시스템으로서 전력계통에 연계되거나 독립적으로 계통을 구성하여 전력을 공급할 수 있다. 따라서 마이크로그리드는 계통연계운전모드와 독립운전모드의 두 가지 운전모드로 각각 운전될 수 있다. 상위계통과 전기적으로 연결된 계통연계형 운전모드에서 마이크로그리드는 유, 무효 전력을 공급하여 전력품질 향상을 위한 역할도 하지만 상위계통에 고장이 발생하여 정전이 발생한 경우에는 상위계통과 전기적으로 분리되어 독립운전모드로 운전하게 된다. 이때, 마이크로그리드는 부하에서 요구하는 유, 무효 전력을 자체적으로 공급하여 마이크로그리드 계통내의 전압과 주파수를 일정한 수준으로 유지하도록 해야 하고, 상위계통의 고장이 제거된 후에는 상위계통에 재투입 될 수 있도록 해야 한다[1].

현재 널리 사용되는 독립마이크로그리드의 출력제어에는 droop특성을 이용한 출력제어, 분산전원간의 협조제어(Coordinated Control), battery의 SOC(State Of Charge) 제어 등이 있다. droop특성을 이용한 출력제어방법은 droop특성에 의해 미리 정해진 한계 값을 넘지 않게 출력 값을 조정할 수 있는 장점[2]이 있다. 디젤발전기와 battery를 사용

하는 협조제어방법은, 급격한 부하 변동 또는 계통 분리 시에 필요한 전력을 디젤발전기에 비해 응답특성이 빠른 battery를 방전하여 계통에 공급하고, 디젤발전기의 출력이 빠르게 증가되어 계통에 필요한 전력을 디젤발전기로 공급할 수 있는 상태가 되면 battery는 다시 대기상태로 두거나 초과되는 전력량을 충전하는 상태로 동작하게 하는 방법이다. 이 방법은 디젤발전기와 battery의 출력량 계산을 통해 각각의 출력 명령치를 주는 EMS(Energy Management System)를 사용하여 제어할 수 있다. SOC 제어는 battery의 충·방전을 제어하는 방법인데, 배터리의 수명을 연장하기 위해서는 배터리 충전상태(SOC)를 일정하게 유지시켜주는 것이 중요하다. SOC가 너무 낮거나 높은 상태가 계속되면 SOC를 중간 수준으로 유지할 경우에 비해서 배터리의 열화가 빠르게 진행되어 수명이 단축된다. 배터리의 각 상태를 판단하여 최적 효율점에서 작동하도록 하는 것이 배터리의 충전상태 제어이다.

대부분의 제어시스템은 비선형성과 불확실성을 가지고 있어 제어기 설계에 어려움이 있다. 이런 어려움을 극복하기 위해 신경회로망, 퍼지제어 등의 지능제어 방법들이 연구되어 왔다. FLC(Fuzzy Logic Controller)는 복잡한 수학적 모델이 필요하지 않으며 설계과정이 비교적 간단한 장점이 있지만, 퍼지 규칙과 소속 함수를 적절하게 결정하기 위해서는 시행착오 과정이 필요하다. 현재 전력계통분야에서도 전력계통 안정화 장치 제어, 전력시스템 동요감쇠 제어시스템, SVC(Static Var Compensator) 등에 Fuzzy 제어기의 응용 연구가 많이 발표되고 있다.

본 연구에서는, 기존의 PI제어기가 알고리즘이 간단하고, 강인성이 뛰어나며 제어기의 계수 값이 적절히 선정되는 경우 좋은 제어특성을 보여주고 있으나, 비선형시스템이거나 시스템의 파라미터가 변하는 경우에는 PI제어기의 성능이 나빠지므로 이런 단점을 해결하고자 퍼지 PI 제어기를 사용하여 BESS(Battery Energy Storage System)의 충·방전 제어기를 설계하고자 하였다.

<sup>†</sup> Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Korea

E-mail : parkjh@pusan.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Korea

\*\* Smart Distribution Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), Korea

Received : December 2, 2013; Accepted : May 26, 2014

또한, 풍력발전기가 포함된 마이크로그리드에서 독립운전모드로 전환된 경우에 마이크로그리드 계통내의 전력수급을 유지하고 계통주파수와 전압을 적정 값으로 유지하기 위해서 디젤발전기와 BESS를 사용하여 협조제어 하였으며, BESS의 제어기는 고정된 PI 계수를 가진 PI제어기와 퍼지논리를 이용하여 계수를 동조(tuning)하는 PI 제어기의 응답특성을 비교하였다. 제안한 방법은 PSCAD/EMTDC로 마이크로그리드의 독립운전을 시뮬레이션 하여 설계된 제어기의 성능을 검증하였다.

## 2. 마이크로그리드

### 2.1 마이크로그리드

현재 널리 구성되는 마이크로그리드의 구성도는 다음과 같다.

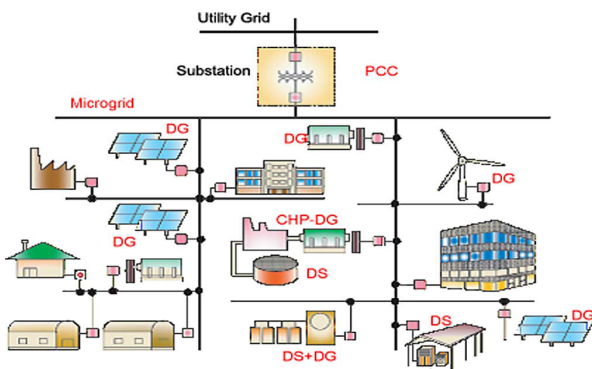


그림 1 마이크로그리드 구성도  
Fig. 1 Configuration of Microgrid

그림 1에서 보는 것처럼 마이크로그리드는 상위 계통과 PCC(Point of common coupling)을 통해 연결되어 있으며, DG(Distributed Generation), DS(Distributed Storage)과 Load, CHP(Combine Heating and Power) 등으로 구성되어 있다[2].

### 2.2 마이크로그리드 계층제어 구조

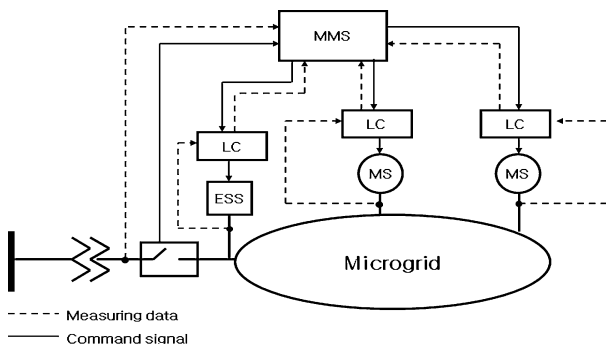


그림 2 마이크로그리드 계층제어 구조  
Fig. 2 Hierarchical control structure of microgrid

그림 2에 있는 것처럼 마이크로그리드는 많은 서브시스템을 제어해야 하며, 하나의 서브시스템을 제어해야 할 때 다른 서브시스템을 고려해야 하므로 계층제어구조를 가진다. 각 layer가 담당하는 일은 다음과 같다[3].

- 1) MMS(Microgrid Management System) : 운영부분을 담당하며 microsources와 ESS를 감시제어하고 output power set point를 LC로 전달.
- 2) LC(Local Controller) : MMS를 통해 내려진 power set point를 각각의 microsources 와 ESS에 전송.

## 3. 마이크로그리드 출력제어 방법

전력시스템의 주파수는 유효전력의 균형에 의해서 결정되며 주파수의 변동 정도는 시스템에 연계된 발전기의 회전관성에 영향을 받는다. 계통연계형 모드운전중인 마이크로그리드는 연계되어 있는 상위 전력계통의 관성이 매우 큰 발전기로 작용하여 마이크로그리드내의 전력수요와 공급의 편차를 흡수하므로 부하 및 발전의 변동에 대하여 주파수 변화가 거의 없다. 그러나 독립운전모드로 운전 중인 마이크로그리드는 상위 계통과 분리되어 있기 때문에 수요와 공급의 편차를 흡수할 수 있는 발전기가 탈락하여 운전하는 상태가 되므로 부하 및 발전량 변동과 같은 외란에 대해 주파수가 빠르고 크게 변하게 된다. 이는 마이크로그리드를 구성하는 전원이 풍력발전이나 태양광발전과 같은 신재생에너지원, 또는 마이크로가스터빈과 같이 전력변환 장치를 사용하는 소규모 분산전원이어서 회전관성이 크지 않기 때문이다. 따라서 작은 외란에 대해 빠르고 크게 변하는 주파수를 제어하기 위해서는 마이크로그리드 내의 각 전원이 외란을 빠르게 감지하여 적절하게 출력을 변동시켜야 하며 이 때 각 분산전원간의 협조가 매우 중요하다[1].

### 3.1 Droop특성을 이용한 출력제어 방법

상위 전력계통에 이상이 생겨 마이크로그리드가 계통에서 분리되어 운전되어야 할 경우에는 분리 직후에 계통에서 공급되던 전력을 각 분산전원 또는 특정 분산전원이 분담해야 마이크로그리드 계통이 붕괴되는 것을 막을 수 있다. 또한 독립운전이 지속되는 가운데 부하의 변동을 마이크로그리드 내 분산전원이 분담하여야 하며 각각이 분담한 전력의 총합은 부하의 변동과 일치하여야 한다. 이렇게 부하변동 또는 계통으로 수전하던 전력의 수급을 맞추기 위해 출력제어가 가능한 분산전원이 모두 정 주파수 (60 Hz) 제어만을 한다면 주파수 Hunting이 일어나게 되고, 마이크로그리드를 불안정한 상태로 만들 수 있다. 따라서 설치된 ESS와 디젤발전기가 EMS 또는 상호간에 통신을 통하지 않고 협조하여 마이크로그리드 내에서 필요로 하는 출력을 내기위해서 동기기에서 사용되던 P-f droop 제어가 인버터 제어에 적용되어야 한다.

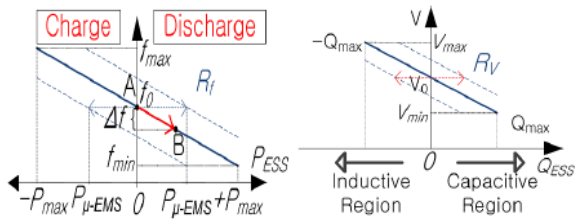


그림 3 유효전력-주파수, 무효전력-전압 Droop 특성  
Fig. 3 Droop Characteristics of P-f, Q-v

그림 3은 droop의 개념을 설명한 것으로, 각 분산전원에서는 유효전력공급이 부족한 경우 주파수를 조금 낮추면서 출력전력을 증가시키는 제어를 하며 같은 개념으로 무효전력은 전압을 통하여 제어가능하다. 유효전력과 주파수의 관계, 무효전력과 전압 관계는 식 (3.1)과 같다[1].

$$f_o - f = -R_f(P_o - P), V_o - V = -R_v(Q_o - Q) \quad (1)$$

$f_o$  : 정격 주파수,  $f$  : 변화된 주파수,  $R_f$  : 주파수 Droop 계수,  $P_o$  :  $f_o$ 에서의 유효전력,  $P$  :  $f$ 에서의 유효전력,  $V_o$  : 정격전압,  $V$  : 변화된 전압,  $R_v$  : 전압 Droop 계수,  $Q_o$  :  $V_o$ 에서의 무효전력,  $Q$  :  $V$ 에서의 무효전력

그러나 상기에 제시된 방법을 이용하여 마이크로그리드를 구성 하는 데에는 여러 가지 제약이 따르게 된다. 기존에 설치되어 있는 디젤발전기나 마이크로가스터빈과 같은 분산전원에 Droop 기능을 추가하는 것이 어려운 경우가 많으며, 실제 Droop 기능을 추가 하더라도 계통의 상태에 따라 무효전력의 지속적인 공급 등 원치 않는 Droop기능의 동작이 발생하게 된다. 또한 마이크로그리드의 독립 운전이 장시간 이루어질 경우 저장장치의 Droop 기능만을 이용해서는 부하에 지속적으로 전력을 공급할 수 없고 경제적인 운전을 할 수 없는 단점이 있다[1].

### 3.2 협조제어 이용한 출력제어 방법

본 논문에서 사용된 협조제어 방법은 아래 그림 4, 5와 같다.

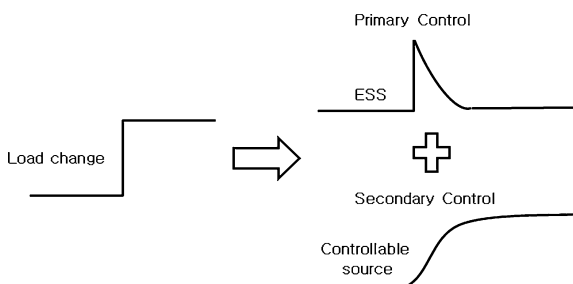


그림 4 협조제어의 기본 개념  
Fig. 4 Basic concept of coordinate control

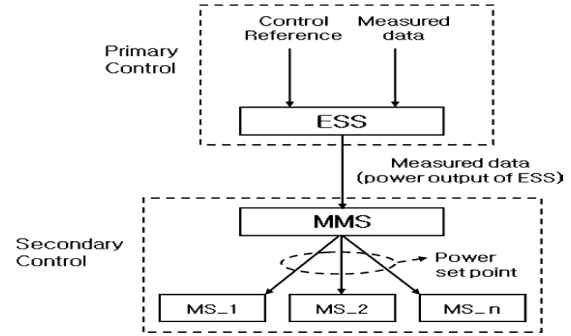


그림 5 적용한 협조제어의 구성도  
Fig. 5 Configuration of adapted cooperative control strategy

계통연계형 마이크로그리드가 상위계통의 고장으로 인해 전기적으로 분리된 형태인 독립운전으로 전환된 경우 상위계통에서 공급받던 전력이 중단되며 마이크로그리드내의 전력수요를 충족시켜야한다. 이 경우, 위 그림과 같은 협조제어를 통하여 계통전력수요를 만족시키며 적정 주파수(60Hz)와 전압(1p.u)을 유지할 수 있다. 본 논문에서 사용된 협조제어방법으로는 BESS와 디젤발전기를 이용한 제어방법으로서, MMS에서 부하변동을 감지하면 각 분산전원에 power set point를 제공하게 된다. 이때, 디젤발전기보다 응답 속도가 빠른 BESS를 통하여 필요한 전력을 계통에 빠르게 공급하고 추후에 디젤발전기가 출력을 내는 primary & secondary 제어를 사용하였다. BESS는 일정 출력량을 계속 공급 할 수 없으므로 디젤발전기의 출력이 증가하는 시간까지 출력을 내고 디젤발전기가 출력을 계통에 공급하기 시작하면 MMS에서 BESS의 출력을 zero가 되게 다시 power set point를 인가하게 되며 BESS는 점차 출력을 줄여나가면서 출력 값이 0이 되도록 구성하여 또 다시 있을 부하변동을 대비한다[3].

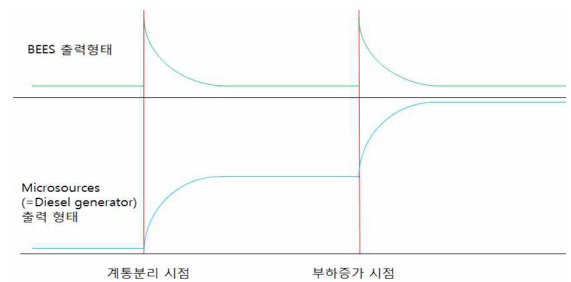


그림 6 BESS와 디젤발전기 사이의 협조제어  
Fig. 6 Coordinated Control of between BESS and Diesel Generator

위의 그림 6은 본 논문에서 제안한 BESS와 디젤 발전기 사이의 협조제어부분을 그림으로 나타낸 것으로, 마이크로그리드가 상위계통과 전기적으로 분리되는 즉, 계통연계형 모드에서 독립운전 모드로 전환되는 순간 마이크로그리드 내의 전력수급을 위해 응답속도가 빠른 BESS를 활용하여 계통 내에서 필요한 전력을 순간적으로 공급해 주며 그 후로 디젤 발전기를 통한 전력수급을 유지하는 방법이다. 또한,

마이크로그리드 내의 부하가 증가하는 상황에 대해서도 마찬가지로 BESS를 활용하여 계통내의 필요한 전력을 공급해주고 그 다음, 디젤 발전기를 통한 전력수급을 유지하는 방안을 적용 하였다.

#### 4. 에너지 저장장치의 출력제어 방법

##### 4.1 유, 무효 출력제어를 위한 PI제어

###### 4.1.1 PI제어기 설계

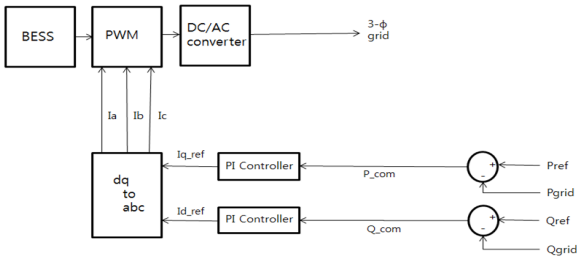


그림 7 에너지저장장치의 충, 방전 PI제어 구성도  
 Fig. 7 Configuration of charging and discharging PI controller of the ESS

발전계획에 따라 계통으로 보내어야 할 유효전력 기준 값  $P_{ref}$ 와 실제 계통으로 나가는 유효전력 출력  $P_{grid}$ 의 차이로 PI제어를 이용하여 q축 전류의 기준 값  $I_{q\_ref}$ 를 구하고, 마찬가지로 계통으로 보내어야 할 무효전력 기준 값  $Q_{ref}$ 와 실제 계통으로 나가는 무효전력 출력  $Q_{grid}$ 의 차이로 PI제어를 이용하여 d축 전류  $I_{d\_ref}$ 를 구한다. 이렇게 결정된 q축과 d축의 기준 값  $I_{d\_ref}$ 와  $I_{q\_ref}$ 을 dq-abc 변환을 통해  $I_{A\_ref}$ ,  $I_{B\_ref}$ 와  $I_{C\_ref}$ 로 변환된 값은 임의의 스위칭 주파수를 갖는 삼각파형과 비교하여 인버터의 각 PWM에 스위칭 신호를 전달하게 된다.[2]

###### 4.1.2 PI제어기 설계 과정

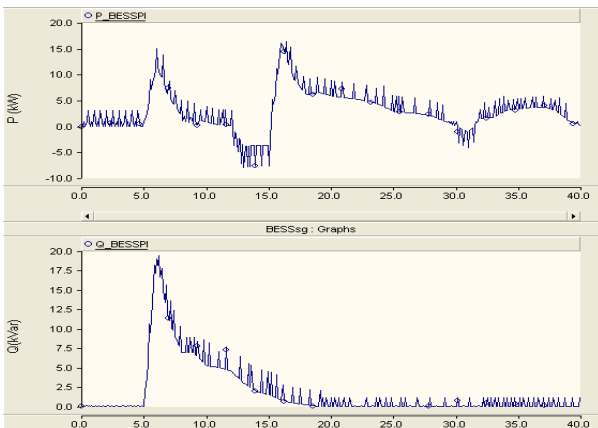


그림 8  $K_p=10, K_i=2$ 인 경우의 BESS 출력  
 Fig. 8 BESS power output in case of  $K_p=10, K_i=2$

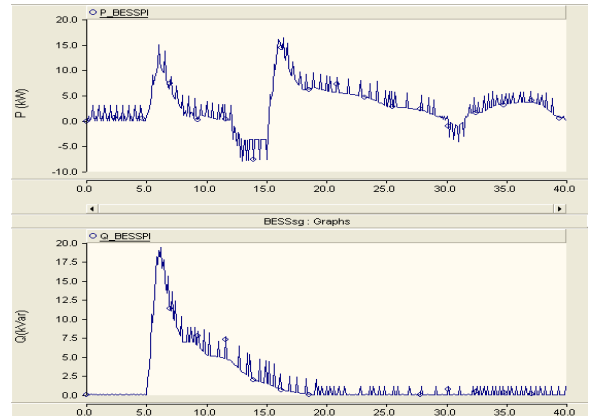


그림 9  $K_p=5, K_i=1$ 인 경우의 BESS 출력  
 Fig. 9 BESS power output in case of  $K_p=5, K_i=1$

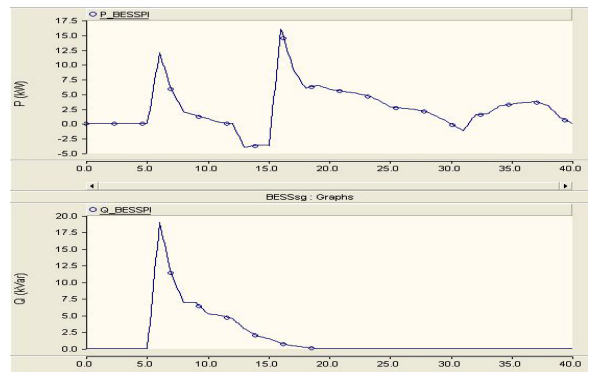


그림 10  $K_p=1, K_i=0.1$ 인 경우의 BESS 출력  
 Fig. 10 BESS power output in case of  $K_p=1, K_i=0.1$

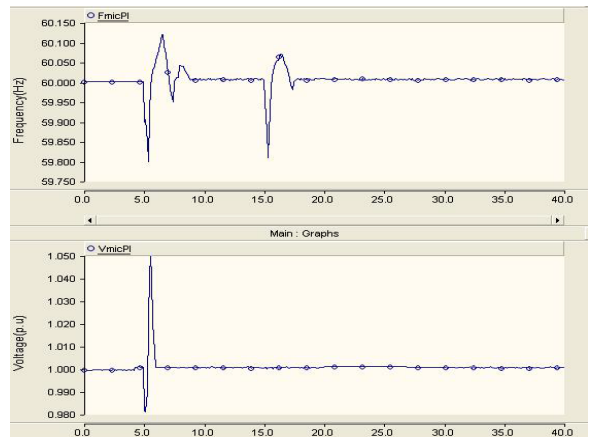


그림 11 마이크로그리드 전압과 주파수  
 Fig. 11 Voltage and frequency of Microgrid

PI 제어기의 계수인  $K_p, K_i$ 를 구하는 방법으로는 Try & error 방법과 한계감도법 이라고 불리는 Ziegler Nichols 방법, 과도 응답법 등 이 있다.

본 논문에서는, Try & error 방법을 이용하여  $K_p, K_i$  값을 구하였으며, 시뮬레이션 조건인 5초에 계통분리가 일어난 경우와 15초에 부하가 증가하는 경우에 대해 모의하였다.

그림 8, 9, 10과 같이 try & error 방법을 통하여 BESS의 PI 계수를 구하였으며 그림 10이 가장 출력특성이 좋은 결과이다. 그림 10, 11의 PI 제어기와 전압, 주파수 파형을 Fuzzy Logic을 이용한 PI제어기의 결과 값과 비교하였다.

**4.2 유, 무효 출력제어를 위한 Fuzzy Logic을 적용한 PI제어**

**4.2.1 Fuzzy PI제어기 설계**

Fuzzy 제어기 설계과정은 제어변수 선택, 소속함수 정의, 제어규칙 구축, 퍼지추론, 비퍼지화 의 5가지 과정으로 구성된다. 본 논문에서는 유효전력과 무효전력의 기준 값과 실제계통에 유입되는 값의 차이를 제어변수로 선택하였으며, 퍼지추론의 방법으로는 널리 알려진 Min-max방법을 선택하였고 마지막으로 비퍼지화 과정은 무게중심법을 이용하여 구성하였다[8]. 그림 12는 제한한 Fuzzy제어기의 구성도이며 P\_com은 BESS가 보상해 주어야 할 유효전력량을 의미하고 d\_P\_com은 P\_com의 변화량을 의미하고 P\_ref값은 마이크로그리드 내에서 필요한 유효전력량을 의미한다. FLC를 통해 PI 제어기의 계수인 Kp와 Ki가 구해지고, 그 값은 실시간으로 PI제어기의 계수로 입력된다. 즉, PI제어기의 계수가 고정된 값이 아닌 실시간 업데이트되기에 고정된 계수를 가진 PI제어기보다 응답이 더 빠른 적응제어가 가능하다.

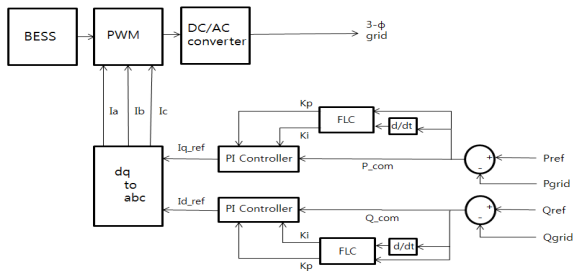


그림 12 Fuzzy PI 제어기의 구성도  
Fig. 12 Configuration of Fuzzy PI Controller

**4.1.2 Fuzzy 소속함수 설계 과정**

Fuzzy 제어기에 필요한 소속 함수를 구하는 과정은 BESS의 총, 방전에 이용되는 PI제어기의 계수인 Kp, Ki가 적절한 값으로 수렴되게 하며, try & erro 로 가장 적절한 소속 함수를 구하였다.

아래 표 1, 2에 사용된 소속 함수에 사용되는 퍼지언어 변수는 기본적으로 이용되는 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), PS(Postvie Small), ZE(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Medium), NB(Negative Big)와 계수 값은 VL(Very Large), L(Large), ML(Medium Large), M(Medium), S(Small), VS(Very Small)을 사용하여 양의 값만 출력하도록 구성하였으며, 각각의 계수를 구하기 위한 Fuzzy Rule구현 방법은 먼저 비례제어기의 계수 같은 경우, 비례제어 특징상 원하는 목표 값으로 서서히 접근하기 위한 제어방법이기에, 빠르게 BESS의 정격 출력 값

으로 도달할 수 있도록 설정하였으며 적분제어기의 계수 같은 경우 정상상태의 오차제어에 관련 있기 때문에 이와 같은 오차제어를 줄이기 위한 형태로 구성하였다[4].

표 1 비례 계수를 정하기 위해 사용된 퍼지 규칙 표

Table 1 Rule base of fuzzy logic for determination of P gain

E Ec	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VL	L	ML	M	S	S	VS
NM	L	ML	M	S	VS	S	S
NS	ML	M	M	S	S	S	S
ZE	M	M	S	VS	S	M	M
PS	S	S	S	S	M	M	ML
PM	S	S	VS	S	M	ML	L
PB	VS	VS	VS	ML	ML	ML	VL

표 2 적분 계수를 정하기 위해 사용된 퍼지 규칙 표

Table 2 Rule base of fuzzy logic for determination of I gain

E Ec	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VL	L	ML	M	VS	VS	VS
NM	L	ML	M	M	S	S	S
NS	ML	M	M	S	S	S	S
ZE	M	M	S	VS	S	M	M
PS	S	S	S	S	M	M	ML
PM	S	S	S	M	M	ML	L
PB	VS	VS	VS	ML	ML	ML	VL

아래 그림 13, 15는 적절한 Fuzzy 소속 함수를 구현하기 위한 try & error 방법을 나타내었고, 가장 좋은 결과인 소속함수와 BESS의 출력파형은 그림 14, 16에 나와 있다.

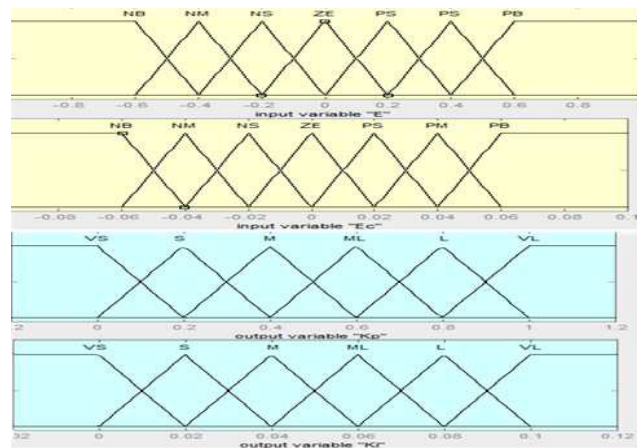


그림 13 E, Ec, Kp, Ki 의 소속 함수

Fig. 13 The membership function for the input E and Ec, output Ki and Ki

그림 13의 소속 함수를 적용한 BESS의 출력은 그림 14와 같다.



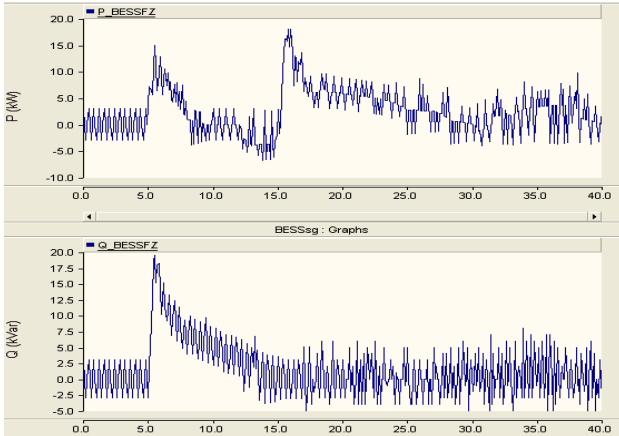


그림 14 BESS 출력  
Fig. 14 Output power of BESS

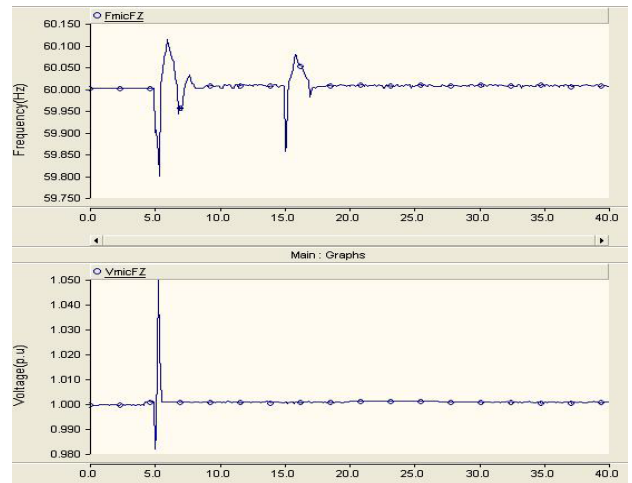


그림 17 마이크로그리드 전압과 주파수  
Fig. 17 Voltage and frequency of Microgrid

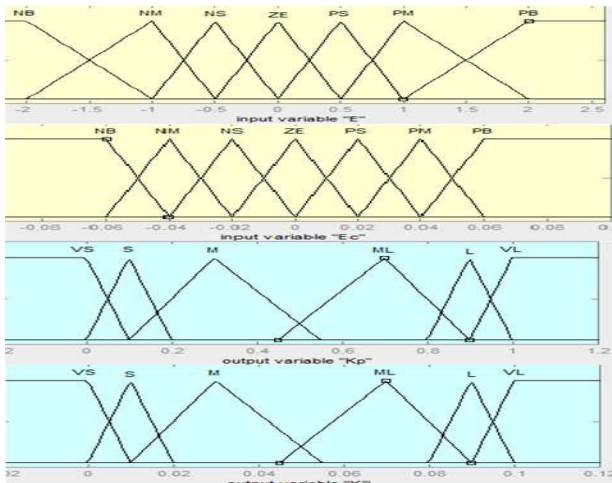


그림 15 E, Ec, Kp, Ki 의 소속 함수  
Fig. 15 The membership function for the input E and Ec, output Ki and Ki

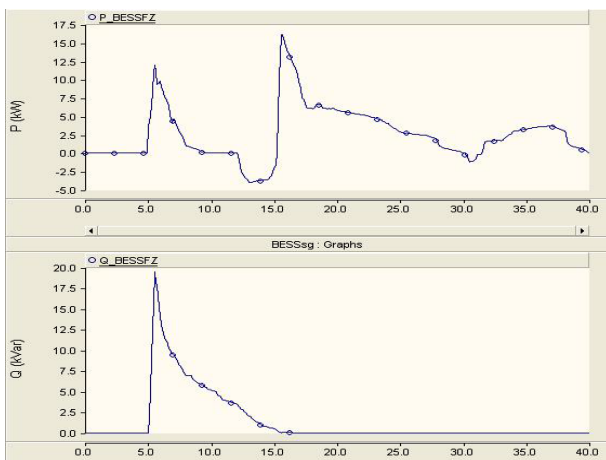


그림 16 BESS 출력  
Fig. 16 Output power of BESS

그림 13과 15의 소속 함수를 비교하여 보면 각각의 입력 E, Ec에 대해 Kp와 Ki의 Fuzzy 소속 함수가 다를 수 있다. 즉, 입력과 입력의 차이가 매우 크거나, 매우 작은 경우에 대해 소속 값의 차이를 두었으며 그 결과, BESS의 소속 함수가 그림 15인 경우에 BESS의 제어가 가장 뛰어나도록 확인할 수 있어 본 논문에서는 그림 15의 소속 함수를 적용하였다.

그림 15의 소속 함수를 적용한 경우의 마이크로그리드 전압과 주파수 파형은 그림 17과 같으며 PI제어기의 고정된 게인을 적용한 BESS의 출력그래프 비교는 시뮬레이션 결과 부분에 나타내었으며, Fuzzy Logic을 통해 구해진 Kp, Ki의 값은 아래 그림 18, 19와 같다.

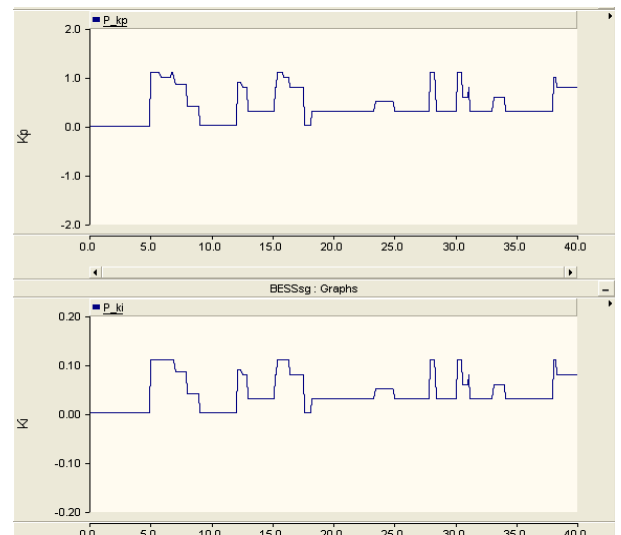


그림 18 Fuzzy logic을 통해 구해진 BESS의 유효전력 출력 제어에 사용되는 Kp, Ki 값  
Fig. 18 Kp, Ki value in BESS's active power control Using Fuzzy logic

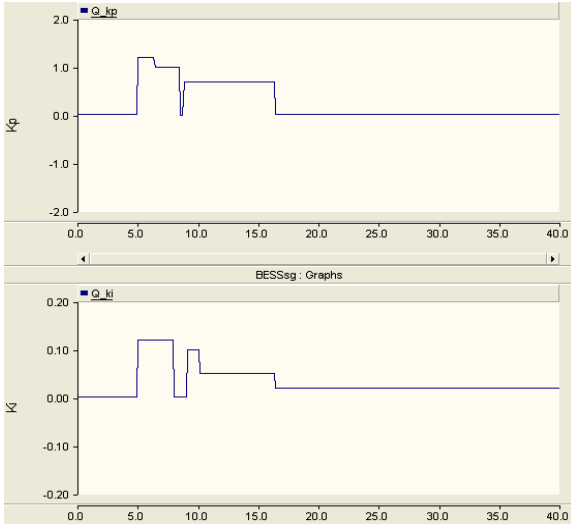


그림 19 Fuzzy logic으로 구해진 BESS의 무효전력 출력제어에 사용되는 Kp, Ki 값

Fig. 19 Kp, Ki value in ESS's reactive power control Using Fuzzy logic

#### 4.1.3 설계된 퍼지 PI제어기의 강인성

그림 15의 소속 함수로 설계된 퍼지 PI제어기의 강인성을 보여주기 위하여 앞서 적용한 경우와 다른 조건인, 부하가 15초에 60kW에서 40kW로 감소한 경우에 대해 시뮬레이션 하였다.

그림 20 은 앞서 시행한 시뮬레이션과 다른 조건인 15초에 부하를 60kW에서 40kW로 감소시킨 경우의 BESS 출력 그래프이며 이 경우에도 BESS의 출력이 적절히 제어됨을 확인할 수 있다.

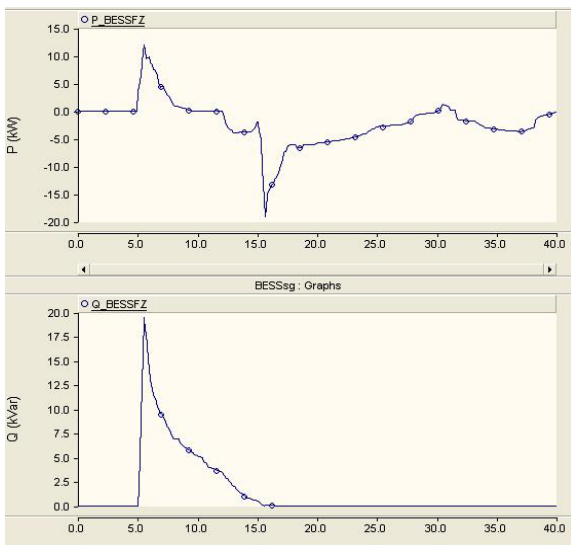


그림 20 BESS 출력  
Fig. 20 Output power of BESS

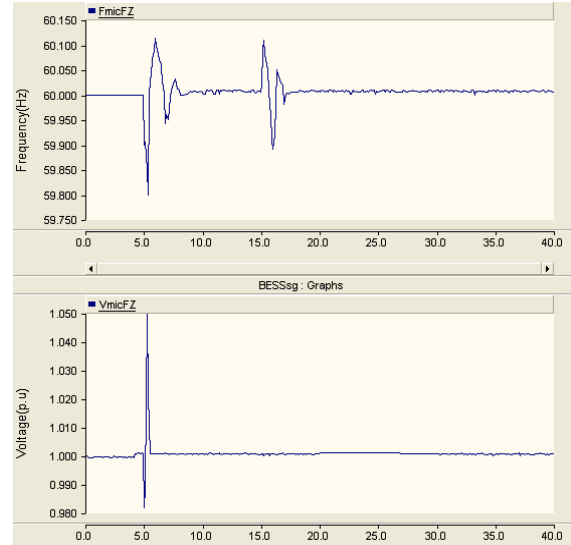


그림 21 마이크로그리드의 전압과 주파수  
Fig. 21 Voltage and frequency of Microgrid

그림 21은 15초에 부하가 60kW에서 40kW로 감소하는 경우의 마이크로그리드 전압과 주파수 파형이며 이 경우에도 주파수와 전압이 적절히 제어됨을 보여주어 설계된 BESS의 퍼지 PI제어기의 강인성을 확인하였다.

### 5. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션

#### 5.1 시뮬레이션 모델

그림 22는 본 논문에서 적용한 마이크로그리드 모델을 도식적으로 표현한 것으로서 디젤발전기 2대, 가변부하, BESS, 풍력발전기로 구성되어 있으며, 구성요소에 대한 데이터는 표 3에 있다.

표 3 마이크로그리드 구성요소  
Table 3 Component of Microgrid

ITEM	Description and Parameters
시스템 구성	디젤발전기, 풍력발전기, BESS, 가변부하
발전용량	디젤발전기 50kW , 40kW 풍력발전기 20kW
부하용량	BESS 20kW 90kW+j25kVar

시뮬레이션 조건은 표 4에 있으며, 5초에 상위계통과 마이크로그리드가 전기적으로 분리가 되어 마이크로그리드는 독립운전모드로 전환하고 15초에 마이크로그리드내의 부하가 증가하는 상황일 때, BESS와 디젤발전기의 협조제어를 중점적으로 살펴본다.

표 4 시뮬레이션 모의상황

Table 4 Simulation conditions

시간	조건	내용
5초		계통분리 (독립운전 모드 전환)
15초		부하증가(60kW + j25Kvar) → (90kW + j25Kvar)

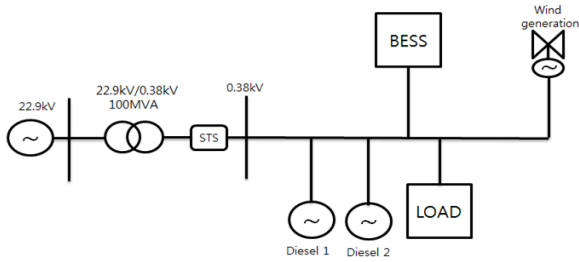


그림 22 마이크로그리드 시험 모델

Fig. 22 Microgrid test model

## 5.2 시뮬레이션 결과

시간에 따라 변하는 풍속에 의해 출력 값이 변하는 풍력발전기가 연계된 계통연계형 마이크로그리드에서 상위계통이 고장 나서 마이크로그리드가 독립운전모드로 변환하는 경우와 독립운전 모드 중에서 부하가 변동되는 경우, 디젤발전기와 BESS의 출력성능을 모의한다. 모의사항 조건으로는 5초에 계통분리가 일어나서 독립운전을 시작하게 되며 15초에 유효전력부하가 60kW에서 90kW로 증가하는 경우에 대해서 모의한다.

### 5.2.1 풍력 발전기 출력

풍력발전기는 시간에 따라 변하는 풍속에 의해 출력 값이 변하게 된다. 본 논문에서는, 임의의 풍속을 인가하였으며 아래 그림23은 풍속과 풍속에 따른 풍력발전기의 출력 값을 나타낸 그림이며 그림 24는 풍력터빈 속도와 출력계수 Cp를 나타낸 그림이다.

### 5.2.2 부하

본 논문에서는 15초에 유효전력부하가 60kW에서 90kW로 증가하는 상황에 대해 모의 하였으며 무효전력부하는 25kVar로 동일하다.

### 5.2.3 BESS

5초에 계통분리가 일어나 독립운전이 시작될 경우, 상위계통에서 공급받던 전력이 중단되므로 마이크로그리드 계통내의 전력량이 상대적으로 작아지게 된다. 그러므로 응답특성이 빠른 BESS를 통하여 모자란 전력량을 계통에 공급

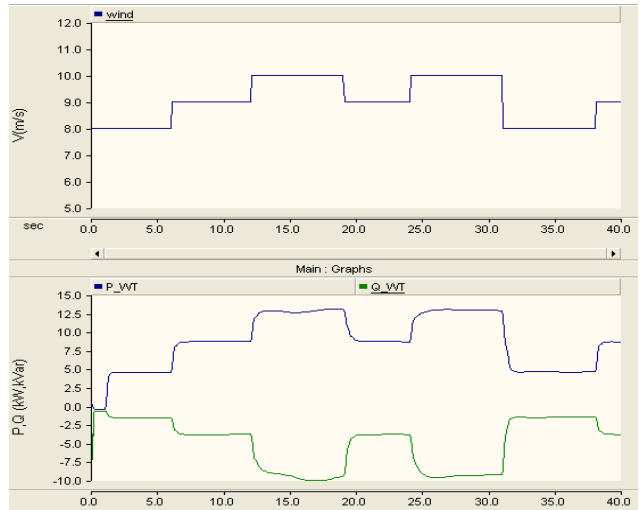


그림 23 풍속과 풍력발전기의 출력

Fig. 23 Wind speed and Wind generation power output

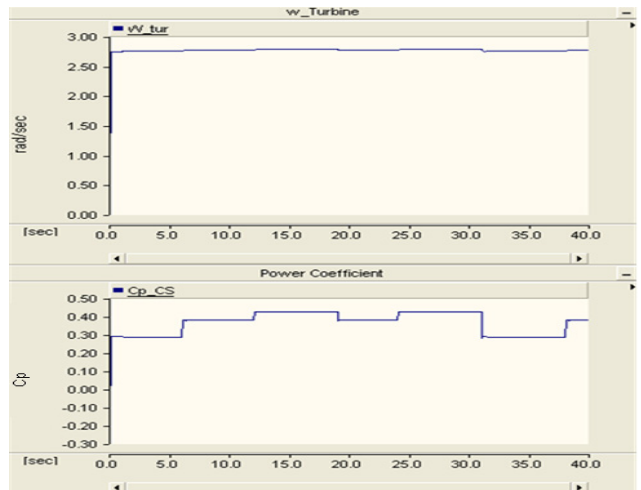


그림 24 풍력터빈 회전속도와 계수

Fig. 24 Generator speed and Power coefficient

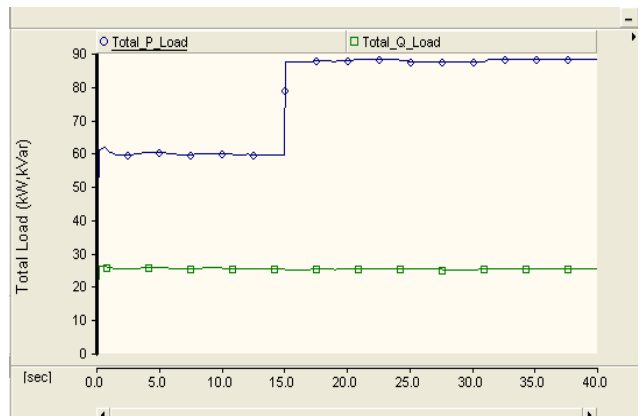


그림 25 부하 변동

Fig. 25 Load fluctuation



하고 그 뒤를 이어서 디젤발전기를 통해 전력을 공급한다. 그리고 15초에 유효전력 부하가 30kW 증가하는 경우 이때 또다시 BESS와 디젤의 협조제어를 통해 계통 전력수급을 만족시키고 전압과 주파수를 적절히 제어하여 계통안정도를 유지시켜 준다.

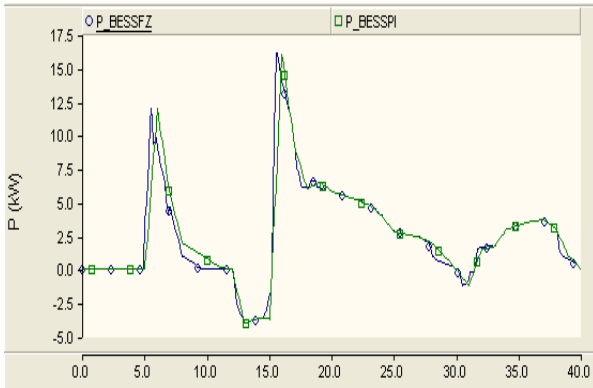


그림 26 PI 제어를 적용한 경우와 Fuzzy Logic을 이용한 PI제어를 이용한 경우의 BESS의 유효전력출력  
 Fig. 26 Active power output of BESS PI controller and Fuzzy logic PI controller

P\_BESSPI는 고정된 PI 계수를 가진 제어를 적용한 BESS의 유효전력 출력 그래프이며, P\_BESSFZ는 Fuzzy Logic을 이용하여 실시간 계수를 동조를 하는 PI 제어를 적용한 BESS의 유효전력 출력 그래프이다. 위 그림 26에서 알 수 있듯이, Fuzzy Logic을 이용한 PI제어를 적용한 BESS의 출력이 고정된 PI 계수를 가진 PI제어를 적용한 BESS의 출력보다 응답특성이 빠른 것을 알 수 있다.

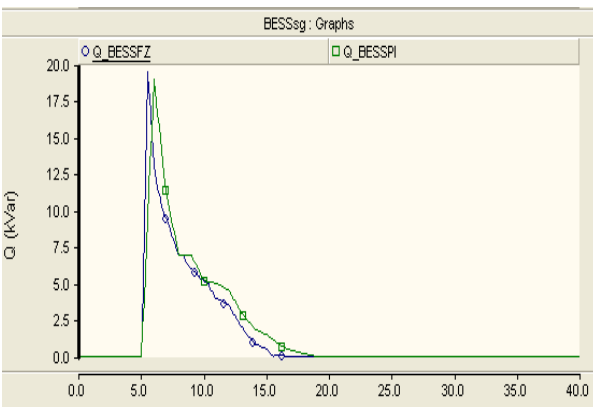


그림 27 PI 제어를 적용한 경우와 Fuzzy Logic을 이용한 PI제어를 이용한 경우의 BESS의 무효전력출력  
 Fig. 27 Reactive power output of BESS PI controller and with Fuzzy logic PI controller

위 그림 27과 같이 무효전력 출력 그래프에서도 Fuzzy Logic을 이용한 PI제어를 적용한 BESS의 출력특성이 더 빠른 것을 확인 할 수 있다.

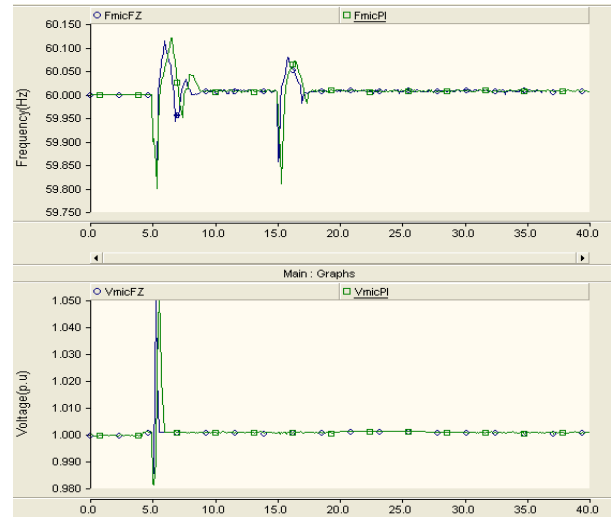


그림 28 전압과 주파수  
 Fig. 28 Voltage and frequency of Microgrid

FmicPI, VmicPI는 고정된 PI 계수를 가진 제어를 BESS를 통해 제어되는 주파수, 전압 그래프이며, FmicFZ, VmicFZ는 Fuzzy Logic을 이용한 실시간 계수를 동조 하는 PI 제어를 적용한 BESS에 의해 제어되는 주파수, 전압 그래프이다. 위 그림 28에서 알 수 있듯이, Fuzzy Logic을 이용한 PI제어를 적용한 BESS의 출력이 고정된 PI 계수를 가진 PI제어를 적용한 BESS의 출력보다 응답특성이 빠른 것을 알 수 있기에 주파수와 전압 회복속도 또한 빠른 것을 알 수 있다.

5.2.4 마이크로그리드 시뮬레이션 결과

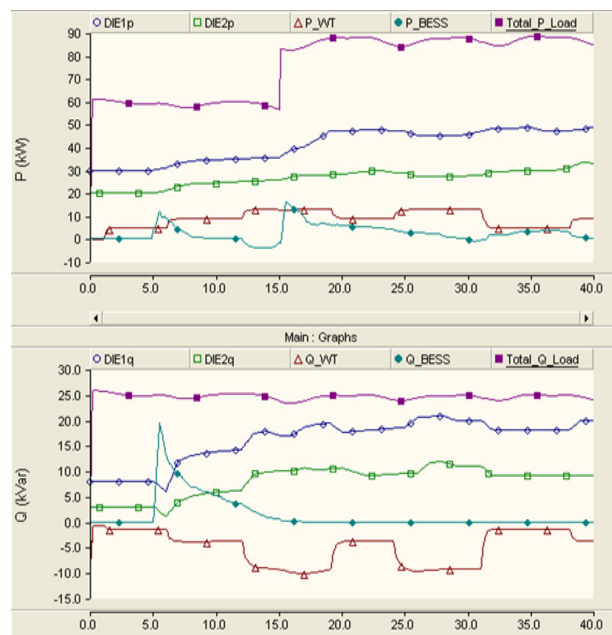


그림 29 각 구성요소별 유효, 무효전력  
 Fig. 29 Real and reactive power of each components

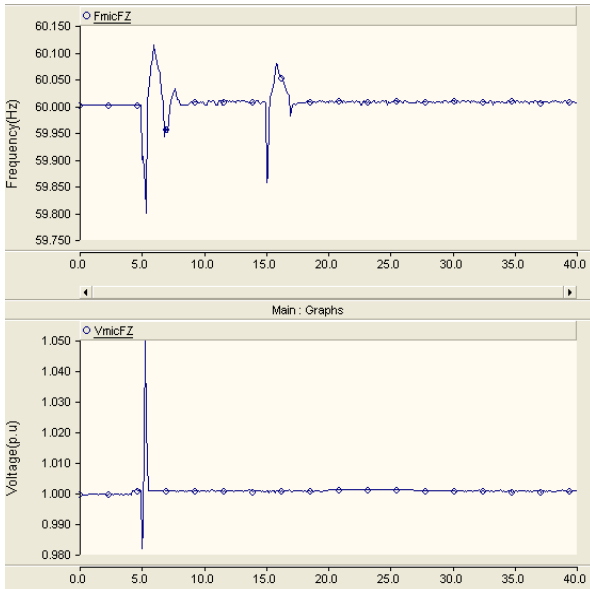


그림 30 마이크로그리드의 전압과 주파수  
 Fig. 30 Voltage and frequency of Microgrid

위 그림 29를 보면, 5초에 계통분리가 일어나 마이크로그리드가 독립운전으로 전환하게 되는데, 이때 상위계통에서 공급받던 전력인 12kW를 응답속성이 빠른 BESS가 작동하여 보상해주는 것을 확인할 수 있으며 그 후에, 디젤 발전기의 출력이 증가함에 따라 BESS의 출력은 “0”으로 유지시키며 계통내의 잉여전력을 흡수하는 충전모드 또는 흡수 모를 부하변동에 대비하는 상태로 유지한다. 그리고 15초에 유효전력부하가 60kW에서 90kW로 증가하는데 이때, BESS의 출력이 증가하고 점차 디젤 발전기가 출력을 증가함에 따라 BESS는 다시 출력을 “0”으로 유지하려고함을 알 수 있다. 즉 디젤발전기와 BESS의 협조제어가 잘 이루어짐을 확인할 수 있으며, 무효전력 부분 또한 협조제어가 잘 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 30은 마이크로그리드의 전압과 주파수 그래프이며 5초 계통분리시점과 15초 부하변동시점을 보면, BESS와 디젤발전기의 협조제어로 인해 정격 값(주파수 60Hz, 전압 1p.u)으로 빠르게 제어됨을 확인할 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC로 계통연계형 마이크로그리드 시스템을 모델링 하였고 에너지저장장치의 유, 무효 전력 제어를 위해, 기존의 고정된 계수를 갖는 PI제어기 대신에 계통에서 필요한 전력 reference 값과 실제 계통에 보내어지는 전력 값의 차이를 이용하고 그 차이의 변화율을 통해 Fuzzy Logic을 이용하여 PI 제어기의 계수를 동조하는 방법을 제안하였다.

Fuzzy Logic을 적용한 PI 제어기 모델과 고정된 계수를 갖는 PI제어기 모델사이의 시뮬레이션 결과를 비교하면 Fuzzy Logic을 이용한 PI제어기를 사용하는 ESS의 출력 그래프를 보면 반응 속도 부분에서 뛰어난 것을 확인할 수 있으며, 전압과 주파수 회복부분에서도 응답특성이 빠른 것을 확

인 할 수 있었다. 그리고 협조제어 부분에서도 디젤 발전기와 BESS 사이에는 응답속도가 빠른 BESS가 먼저 작동하여 모자란 전력을 공급하고 그 뒤로, 디젤발전기가 작동하여 BESS는 출력량을 감소시키고, 모자란 부분을 디젤발전기를 통하여 전력을 공급함을 볼 때, 협조제어 부분에서도 적절한 제어가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 향후, PI제어기의 단점을 보완하기 위해 PID 제어기를 도입하면 기존의 PI제어기 보다 효과적인 제어가 가능할 것이다. 그리고 배터리를 사용하는 경우 추가적으로 배터리의 충전상태인 SOC 개념을 도입하여 BESS 출력부분에 적용하면 BESS활용도를 증가시킬 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)와 BK플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] Woo-Kyu Chae, Hak-Ju Lee, Jung-Sung Park, Jin-Tae Cho, Dong-June Won, “Frequency Control Method of Grid Interconnected Microgrid Operating in Stand Alone Mode”, The Transactions of The KIEE, Vol. 61, No.8, pp.1099-1106, 2012.
- [2] Jong-Yul Kim, Jin-Hong Jeon, Seul-Ki Kim, “Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation” IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25, No, 12, pp. 3037-3048, Dec. 2010.
- [3] Jong-Yul Kim, “Power Output Control of Wind Generation System Through Energy Storage System and STATCOM” The Transactions of The KIEE, VOL. 59, No. 10, PP.1718-1726, 2010
- [4] Zhitong Guo, Kwang Y. Lee, “A Self-adaptive Fuzzy PI Controller of Power Conditioning System for Hybrid Fuel-Cell/Turbine Power Plant”, North American Power Symposium, pp.1-6, Aug, 2011
- [5] S. K. Kim, J. H. Jeon, C.H. Cho, J. B. Ahn, and S. H. Kwon, “Dynamic modeling and control of a grid-connected hybrid system with versatile power transfer”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 4, pp.1677-1688, April 2008
- [6] R. Lasseter, P. Piagi, “Control and design of Microgrid Components”, Power System Engineering Research Center, final project report, Jan. 2006
- [7] Mohamed E. EL-Hawary, Electric power applications of fuzzy systems, IEEE Press, New York, 1997
- [8] H. T. Lee, B. K. Koo, S. H. Lee, J. H. Park, “Wind turbine output control using Fuzzy PI controller of Energy Storage System”, The Transactions of The

KIEE, PP.402-403, 2011

- [9] J. Y. Kim, J. H. Jeon, S. K. Kim, "Coordinated State-of-Charge Control Strategy for Microgrid during Islanded Operation", Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 133-139, June. 2012

## 저 자 소 개



### 이 흥 석 (李興錫)

1989년 08월 23일생, 2012년 울산대 공대 전자전기컴퓨터공학과 졸업, 2014년 부산대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 2014~현재, 동 대학원 박사과정

Tel : 051-510-3188

Fax : 051-513-0212

E-mail : zznada@naver.com



### 박 준 호 (朴俊灝)

1955년 09월 17일생, 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.

Tel : 051-510-2370

Fax : 051-513-0212

E-mail : parkjh@pusan.ac.kr



### 구 본 길 (具本佶)

1984년 07월 19일생, 2008년 부산대 공대 전기공학과 졸업, 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2010~현재, 동 대학원 박사과정

Tel : 051-510-3188

Fax : 051-513-0212

E-mail : cancer2000@hanmail.net



### 김 종 울 (金鍾律)

1974년 07월 06일생, 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국 전기연구원 스마트그리드 연구본부 신재생에너지 시스템 연구센터 선임연구원

Tel : 055-280-1336

Fax : 055-280-1390

E-mail : jykim@keri.re.kr