

# Design and Implementation of Multi-Agent System for Load Shedding in Microgrid

Yujin Lim<sup>†</sup> · Hak-Man Kim<sup>\*\*</sup>

## ABSTRACT

In an islanded operation mode of a microgrid, load shedding is used to balance between the power supplied and the power demanded. The conventional load-shedding schemes have considered that a load uses a continuous range of values to present its load demand. However, in reality, some loads use integer and discrete values. We design a multi-agent system for the load shedding with consideration of the discrete characteristic of load demands. Besides, we define a control architecture, functionalities of agents, and interactions among agents for implementation of the system. Through experiments in various test scenarios, we show the feasibility and performance of the system.

**Keywords :** Microgrid, Load Shedding, Multi-Agent System

# 마이크로그리드 환경에서 부하차단을 위한 다중 에이전트 시스템의 설계 및 구현

임 유 진<sup>†</sup> · 김 학 만<sup>\*\*</sup>

## 요 약

마이크로그리드(microgrid)의 독립적 운용방식(islanded operation mode)에서는 전력 공급량과 전력 수요량 사이의 균형을 맞추기 위하여 부하차단(load shedding) 기법이 사용된다. 기존의 부하차단 기법들은 부하의 요구량이 연속적인 값의 범위를 갖는다고 가정하였다. 그러나 일부 부하는 이산적인 정수 값을 사용하여 자신의 요구량을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 독립형 운용방식 환경에서 부하 요구량의 이산적인 특성을 고려한 부하차단 기법을 다중 에이전트 시스템을 이용하여 설계한다. 또한 시스템 구조, 에이전트 기능, 그리고 에이전트 간 통신 프로토콜을 추가로 정의 및 확장함으로써 시스템을 구현하였으며, 구현된 시스템을 기반으로 다양한 시나리오 환경에서의 실험을 통하여 그 성능을 증명하였다.

**키워드 :** 마이크로그리드, 부하차단, 다중 에이전트 시스템

## 1. 서 론

마이크로그리드(Microgrid)는 전력 생산자로서의 분산 발전기(DGs: Distributed Generations), 분산 저장기(DSs: Distributed Storages), 그리고 전력 소비자로서의 부하(Loads)로 구성된 작은 규모의 전력 시스템으로 복수의 전원 및 열원이 IT 기술을 이용하여 제어, 운용 및 관리되고

전력회사의 상용계통과 연계운전은 물론 독립운전이 가능한 온 사이트형 전력공급 시스템으로 정의된다[1-3]. 또한, 신재생 에너지 전원, 마이크로 가스터빈, 연료전지 및 열병합발전 등 다양한 형태의 전원이 연계 가능하고, 전력공급 신뢰도 및 전력품질 향상, CO<sub>2</sub>저감, 손실절감 등의 장점으로 인하여 기존 대규모 전력계통(power grid)의 단점을 보완, 극복할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 이러한 마이크로그리드 기술에 대하여 전 세계적으로 요소기기, 시스템 운영 기술, 에너지 관리 기술 등 마이크로그리드 시스템 체반 기술에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며 특히, 유럽연합, 미국, 일본 등에서 마이크로그리드 시스템을 상용화하기 위한 다양한 실증 프로젝트들이 진행되고 있다[4].

마이크로그리드의 운용 목표는 전력 공급량과 전력 수요

\* This work was supported under the framework of international cooperation program managed by the National Research Foundation of Korea(2012K2A2A4021447).

<sup>†</sup> 종신회원: 수원대학교 정보미디어학과 조교수

<sup>\*\*</sup> 정 회 원: 인천대학교 전기공학과 교수

논문접수: 2012년 11월 1일

심사완료: 2012년 11월 15일

\* Corresponding Author: Hak-Man Kim(hmkim@incheon.ac.kr)

량 사이의 균형을 맞추는 것이다. 이 균형이 깨지면 전력의 주파수가 변동하며, 이것이 기준 값(50Hz 또는 60Hz)에서 크게 벗어나게 되면 전력 시스템은 안정적으로 운용될 수 없다. 이러한 균형 유지를 위해서는 마이크로그리드 구성 요소들 간 지능형 협력제어 운용기법이 요구된다. 지능형 협력제어 기법은 구성요소 간 자유로운 정보전달이 가능해야 하고, 사용자의 지시없이 스스로 또는 다른 구성 요소와의 협상 후 판단하여 행동할 수 있어야 한다. 또한 어떤 입력에 대해 자체적인 처리과정을 통해 자신에게 유리한 방향으로 행동할 수 있어야 한다. 다중 에이전트 시스템(Multi-Agent System: MAS)은 이러한 지능형 협력제어 기법을 기반으로 마이크로그리드의 운용 목표를 달성하기 위한 효율적인 기술이다[5-7]. 에이전트는 전체 시스템이 협력 기반 문제 해결이라는 공동의 목표를 향해 나아가도록, 자율성과 자체 조직화 그리고 분산화의 특징을 가지는 소프트웨어 또는 하드웨어 요소를 말한다[8].

본 논문에서는 전력 공급량과 전력 수요량 사이의 균형을 맞추기 위한 기법들 중 하나인 부하차단(load shedding) 기법에 초점을 맞춘다. 부하차단이란 전력수급 균형(power balance) 유지를 위하여 의도적으로 전기 공급을 차단함으로써 전력 시스템의 안정성을 확보하는 방법이다. 본 논문에서는 이러한 부하차단을 위하여 다중 에이전트 시스템 기반의 마이크로그리드 제어 시스템을 설계 및 구현한다. 이를 위하여 먼저 부하차단을 위한 제어 구조를 정의하고, 설계된 구조에서 각 구성 요소들의 기능을 정의한 다음, 실제로 시스템을 구현한다. 또한 다양한 시나리오에서 실험을 통하여 시스템의 성능을 증명한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 부하차단 기법을 소개한다. 3절에서는 다중 에이전트 시스템 기반의 부하차단 시스템을 설계한다. 4절에서는 다양한 시나리오 환경에서의 실험을 통하여 시스템의 동작성 및 성능을 증명한다. 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

## 2. 부하 차단

마이크로그리드의 운용방식은 계통연결형 운용방식(grid-connected mode)과 독립형 운용방식(islanded mode)으로 나뉜다. 계통연결형 운용방식은 상위 전력계통과 연계하여 에너지 요금과 전력계통 혼잡에 따른 상위 전력계통의 수요관리에 대응하고, 피크부하절감(peak load shaving) 및 실시간 전기요금에 대응하여 에너지 비용을 절감할 수 있다. 또한 신재생에너지의 불규칙한 출력 평준화와 무효전력 공급을 통한 마이크로그리드의 전압 품질을 향상시킬 수 있다[9]. 계통연결형 운용방식에서 마이크로그리드는 분산 발전기에서 발생한 전력과 부하에서 요구한 전력 사이의 차이를 전력계통과의 전력거래로 균형을 맞출 수 있다. 상위 전력계통에서의 사고 등으로 인한 과도상태가 발생하였을 때, 마이크로그리드는 전력품질을 유지하기 위하여 상위 전력계통과 물리적으로 분리하여 운전하는 독립형 운용방식으로 동

작할 수 있다. 다시 말해서, 독립형 운용방식은 관리 목적이거나 경제적인 이유로, 또는 전력계통 구성 요소의 물리적인 장애로 인하여 전력계통에서 격리되어 운용하는 것이다. 만약 전력 수요량이 전력 공급량보다 크다면 일부 부하와의 연결을 끊거나 전력 소비를 줄일 필요가 있다. 다시 말해서, 독립형 운용방식에서는 전력 공급과 전력 수요 사이의 균형을 위하여 부하차단과 같은 기술이 사용된다. 마이크로그리드는 시스템의 전압 안정성을 유지하고 시스템의 한계를 넘는 과전압을 막기 위하여 부하차단 기법을 통하여 수락하거나 거절할 부하의 양을 결정한다.

기존의 부하차단 기법에서는 부하 요구량이 연속적인 값의 범위를 갖는다고 가정하였다. 그러나 실제로 일부 부하의 요구량은 이산적인 정수 값의 범위를 갖는다. 예를 들어, 부하 1의 부하 요구량이 30kWh이고, 해당 부하 요구량은 TV 전원을 위한 10, 세탁기 전원을 위한 13, 그리고 전등을 위한 7, 이렇게 3개의 하위 부하 요구량들로 구성된다고 가정해보자. 이때 기존의 부하차단 기법에서는 부하 1의 부하 차단량을 8로 결정할 수 있다. 이때, 부하 1은 자신에게 허락된 22kWh의 전원으로 TV는 켤 수 있지만, 세탁기까지 사용할 수는 없게 된다. 따라서 부하 1에게 할당된 22kWh의 전원 중에서 실제로 사용되는 전원은 10kWh뿐이고 나머지 12kWh는 사용할 수 없게 된다. 따라서 이와 같은 부하 요구의 이산적인 특성을 반영한 부하차단 기법이 요구된다. 본 논문에서는 마이크로그리드의 독립형 운용 환경에서 부하 요구량의 이산적인 특성을 고려한 부하차단 시스템을 설계한다.

본 논문에서는 부하차단의 목적을 부하관리(load management)와 공정성(fairness)의 극대화로 설정하였다. 부하관리란 부하에서의 전력 사용률, 즉 부하에게 할당된 전력 대비 부하가 실제로 사용한 전력의 비율을 향상시키는 것을 의미한다. 예를 들어, 위의 예에서 부하 1의 전력 사용률은  $10/22=0.45$ 이다. 공정성이란 모든 부하가 전력을 공평하게 할당받는 것을 의미한다. 본 논문에서는 이러한 목적을 달성하기 위하여 게임이론을 적용하였다. 협동적 게임이론의 협상 해법 중 대표적인 기법인 NBS(Nash Bargaining Solution) [10]를 사용하여 최적의 부하 차단량을 결정할 수 있다. 전력 공급량은 한정되어 있으므로, 부하의 전력요구량이 공급량을 초과한다면 모든 부하 요구를 수용할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위하여 NBS를 기반으로 시스템 효율(부하관리 및 공정성)을 극대화하기 위한 각 부하의 부하차단량을 결정할 수 있다. 예를 들어, 전력 공급량이 100kWh이고, 3개의 부하가 각기 30kWh, 50kWh, 그리고 60kWh의 전력 요구량을 가지는 경우를 가정해보자. 각 부하의 부하 요구량을 구성하는 하위 부하 요구량은 다음과 같다:  $30kWh = 10 + 13 + 7$ ,  $50kWh = 20 + 11 + 6 + 13$ ,  $60kWh = 5 + 35 + 20$ . 부하요구의 이산적인 특성을 고려한 NBS를 기반으로 결정된 부하 차단량은 부하 1은 7, 부하 2는 13, 그리고 부하 3은 20이 된다. 따라서 부하 요구량의 이산적인 특성으로 인하여 발생하는 문제 즉, 전력 사용률 감소 문제를 해결할 수 있다.

### 3. 다중 에이전트 시스템의 설계

다중 에이전트 시스템은 환경을 인지하는 능력을 가진 에이전트라는 자율 객체의 집합이며, 주로 제한된 환경 내에서 동작한다. 에이전트는 시스템 내 자신의 역할에 따라 다양한 수준의 지능을 가진다. 에이전트는 분석적으로 정의하기 힘든 환경에서 성능 지표들을 최적화하는 것을 목표로 한다. 또한 에이전트는 다른 에이전트와 상호작용할 수 있다. 이러한 상호작용은 단순한 정보교환일 수도 있고 또는 공동의 목표를 위하여 협상/협조하는 것일 수도 있다. 에이전트들은 제안(propose), 역제안(counter-propose), 결정 수락(accept), 또는 거절(reject)하는 과정을 거쳐 상호간 작용할 수 있다.

본 논문에서는 마이크로그리드 환경에서 부하차단을 위한 다중 에이전트 시스템 설계를 위하여 마이크로그리드 구성 요소들을 다음과 같이 네 가지로 분류하였다 : 분산 발전기, 부하, 분산 저장기, 그리고 부하차단 통제센터(MGOCC-LS : MicroGrid Operation and Control Center for Load Shedding). MGOCC-LS는 기존의 마이크로그리드 운용센터인 MGOCC [7]에 부하차단 기능을 추가한 것이다. 이러한 마이크로그리드 구성 요소들에는 각기 자신의 운영 목적에 적합한 에이전트들이 다음과 같이 할당된다 : Ag<sub>DG</sub>, Ag<sub>LOAD</sub>, Ag<sub>DS</sub>, 그리고 Ag<sub>MGOCC-LS</sub>.

마이크로그리드는 interval 기반으로 운용된다. 또한 기존의 전력 시스템과 마찬가지로 계획 단계와 실행 단계로 나누어 구성된다. 예를 들어, 하루 24시간을 시간단위로 24개의 interval로 나누어 운용 계획을 수립 및 실행할 수 있다. 다시 말해서,  $i+1$  interval의 운용 계획은  $i$  interval에 수립되며  $i+1$  interval에 실행된다. MGOCC-LS는 마이크로그리드 운용을 위하여 시스템의 정보를 수집하고 시스템의 상황을 관찰한다. 또한 수집한 정보를 바탕으로 다음 interval의 운용 계획을 세우고, 수립된 계획을 마이크로그리드 구성 요소들에게 통보한다. 마지막으로, 수립된 계획이 잘 실행되는지 추적 관찰함으로써 마이크로그리드 운용을 제어한다.

본 논문에서는 마이크로그리드의 효율적인 운용 및 부하차단을 위한 각 에이전트들의 기능을 다음과 같이 정의하였다.

- Ag<sub>DG</sub>
  - 다음 운용 interval을 위하여 연결된 DS의 공급 가능한 전력 양과 단가를 결정한다.
  - Ag<sub>MGOCC-LS</sub>에게 공급 가능한 전력 양과 단가를 통보한다.
  - Ag<sub>MGOCC-LS</sub>가 승인한 최종 전력 공급량을 통보 받는다.
  - Ag<sub>MGOCC-LS</sub>가 승인한 전력량을 바탕으로 DS에게 공급 시작, 종료, 또는 설정 변경 등의 명령을 내린다.
  - DS가 공급하는 전력량을 추적 관찰한다.
- Ag<sub>LOAD</sub>
  - 다음 운용 interval을 위하여 연결된 부하에서 요구하는 전력량을 예상 및 결정한다.

- Ag<sub>MGOCC-LS</sub>에게 필요한 부하량을 통보한다.
- Ag<sub>MGOCC-LS</sub>가 승인한 최종 부하량을 통보 받는다.
- 승인 받은 최종 부하량을 기반으로 부하에게 소비 시작, 종료, 또는 설정 변경 등의 명령을 내린다.
- 부하가 소비하는 전력량을 추적 관찰한다.
- Ag<sub>DS</sub>
  - 다음 운용 interval을 위하여 Ag<sub>MGOCC-LS</sub>부터 전력수급 균형 정보를 통보 받는다.
  - 연결된 DS의 SoC(State of Charge)을 결정한다.
  - Ag<sub>MGOCC-LS</sub>부터 통보받은 정보와 SoC를 고려하여 전력 공급자(DS) 또는 전력 소비자(부하)로서의 자신의 역할을 결정한다.
  - Ag<sub>MGOCC-LS</sub>에게 (전력 공급자로서) 공급 가능한 전력 양과 단가를 통보하거나, (전력 소비자로서) 필요한 부하량을 통보한다.
  - Ag<sub>MGOCC-LS</sub>가 승인한 최종 전력 공급량 또는 부하량을 통보 받는다.
  - DS에게 충전, 방전, 또는 충/방전할 전력량 등에 대하여 명령한다.
  - DS가 충/방전하는 전력량을 추적 관찰한다.
- Ag<sub>MGOCC-LS</sub>
  - 다음 interval을 위한 마이크로그리드의 운용 계획 수립을 시작한다.
  - 운용 계획 수립을 위하여 마이크로그리드를 구성하는 다른 에이전트들로부터 관련 정보를 수집한다.
  - 수집한 정보를 이용하여 전력수급 균형을 확인한다.
  - 전체 전력 공급량이 전체 전력 수요량보다 적다면 부하차단을 시작한다. (부하차단이 시작되면) 차단할 부하의 양을 결정한다.
  - 전체 전력 공급량이 전체 전력 수요량보다 많다면, 전원을 공급할 DS들과 해당 DS들의 전력 공급량을 결정한다.
  - Ag<sub>DS</sub>를 위한 최종 전력 공급량과 Ag<sub>LOAD</sub>를 위한 최종 부하량을 결정한다.
  - 에이전트들에게 최종 전력 공급량 또는 최종 부하량을 통보한다.
  - 통보된 마이크로그리드의 운용계획의 올바른 실행을 추적 관찰한다.

다중 에이전트 시스템의 중요한 기능 중 하나는 에이전트 간 정보교환이다. FIPA(Foundation for Intelligent Physical Agents)는 다중 에이전트 시스템을 위한 에이전트 간 통신 및 통신 프로토콜, 상호 운용성 등을 위한 표준을 정의하였다[11]. FIPA-CNIP(Contract Net Interaction Protocol)은 에이전트 간 통신을 위하여 CFP, PROPOSE, REFUSE, ACCEPT, REJECT, FAILURE, 그리고 INFORM 등을 포함한 performative 집합을 정의하였다. 이러한 FIPA-CNIP performative들은 마이크로그리드 환경에서 에이전트 간 통

Table 1. Performatives for load shedding in the microgrid

Performative	Purpose
CFP	sent by Ag <sub>MGOCC-LS</sub> to initiate the microgrid operational process
PROPOSE SUPPLY	sent by Ag <sub>DG</sub> to Ag <sub>MGOCC-LS</sub> in order to propose the amount of power supplied with the cost per unit
PROPOSE LOAD	sent by Ag <sub>LOAD</sub> to Ag <sub>MGOCC-LS</sub> in order to propose the amount of load demanded
REFUSE	sent by Ag <sub>DG</sub> /Ag <sub>DS</sub> /Ag <sub>LOAD</sub> to refuse to send a proposal
ACCEPT	sent by Ag <sub>MGOCC-LS</sub> to accept a proposal of Ag <sub>DG</sub> /Ag <sub>DS</sub> /Ag <sub>LOAD</sub>
REJECT	sent by Ag <sub>MGOCC-LS</sub> to reject a proposal of Ag <sub>DG</sub> /Ag <sub>DS</sub> /Ag <sub>LOAD</sub>
FAILURE	sent by Ag <sub>DG</sub> /Ag <sub>DS</sub> /Ag <sub>LOAD</sub> to Ag <sub>MGOCC-LS</sub> in order to tell a requested action to be failed
INFORM	sent by Ag <sub>DG</sub> /Ag <sub>DS</sub> /Ag <sub>LOAD</sub> to Ag <sub>MGOCC-LS</sub> in order to tell results of action to be carried out

신을 위하여 확장되었다[7]. 다시 말해서, PROPOSE 메시지를 PROPOSE SUPPLY와 PROPOSE LOAD의 두 개의 메시지로 나누었다. 이는 DG와 같은 전력 공급자를 위한 PROPOSE 메시지는 전력 공급량과 단가 정보를 포함하고 있으며, 부하와 같은 전력 소비자를 위한 PROPOSE 메시지는 부하량 정보를 포함하고 있기 때문이다. Table 1은 마이크로그리드 운영을 위한 FIPA-CNIP performative들을 자세히 설명하고 있다.

Fig. 1은 Table 1에서 설명된 FIPA-CNIP performative들의 교환 흐름을 보인 것이다. Ag<sub>MGOCC-LS</sub>는 Ag<sub>DG</sub>와 Ag<sub>LOAD</sub>들에게 다음 interval을 위한 운영 계획 수립의 시작을 알리는 CFP 메시지를 전송한다. 이를 수신한 Ag<sub>DG</sub>와 Ag<sub>LOAD</sub>들은 PROPOSE SUPPLY와 PROPOSE LOAD 메시지를 Ag<sub>MGOCC-LS</sub>에게 전송한다. Ag<sub>DG</sub>와 Ag<sub>LOAD</sub>들로부터 메시지를 수신한 Ag<sub>MGOCC-LS</sub>는 수집된 정보를 기반으로 전력수급 균형을 확인한 후, 해당 정보를 Ag<sub>DS</sub>에게 전송한다. Ag<sub>DS</sub>는 전력수급 균형 정보를 기반으로 전력 공급자 또는 전력 소비자로서의 자신의 역할을 결정한 후, PROPOSE SUPPLY 또는 PROPOSE LOAD 메시지를 전송한다. 이를 수신한 Ag<sub>MGOCC-LS</sub>는 다시 전력수급 균형을 확인한다. 이때 전력 공급량이 전력 수요량보다 작을 경우 부하차단이 시작된다. Ag<sub>MGOCC-LS</sub>는 각 부하들의 차단 부하량을 결정한다. 이를 기반으로 Ag<sub>DG</sub>, Ag<sub>LOAD</sub>, 그리고 Ag<sub>DG</sub>들에게 최종 승인된 최종 전력 공급량 또는 부하량을 통보하기 위하여 ACCEPT 메시지를 전송한다.

본 논문에서는 에이전트 간 교환되는 메시지 형식을 정의하기 위하여 KQML(Knowledge Query and Manipulation Language)을 사용하였으며, 정의된 메시지 형식은 다음과 같다.

```
<performative> :from <에이전트 이름>
                :to <에이전트 이름>
                :content <OAV형 데이터>
```

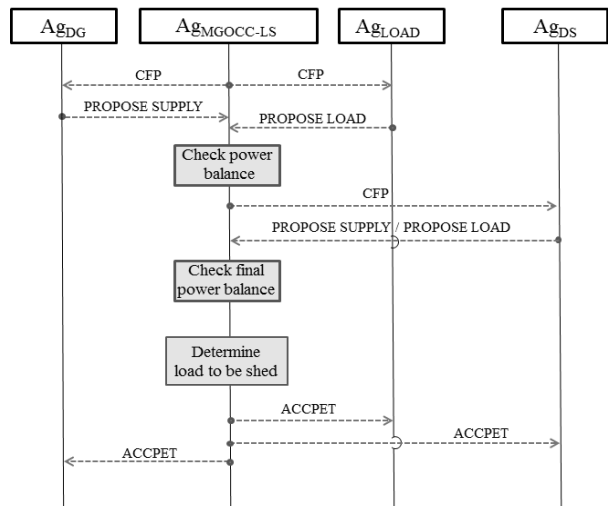


Fig. 1. Message flow among agents for load shedding in the microgrid

```
(Msg :performative propose-load
 :to ?to
 :content (m_propose_load :from ?my_name
 :amount ?load_demand
 :subdemand ?sub_load_demands
 :interval ?interval))
```

Fig. 2. The PROPOSE LOAD message format

<OAV형 데이터>는 객체, 객체의 속성, 그리고 속성 값으로 구성된다. 본 논문에서는 부하요구의 이산적인 특성을 부하차단에 반영하기 위하여 PROPOSE LOAD performative를 확장하였다. 부하가 자신의 부하 요구량을 제시하기 위하여 PROPOSE LOAD를 Ag<sub>MGOCC-LS</sub>에게 전송할 때 부하 요구량뿐만 아니라 그것을 구성하는 하위 부하 요구량 또한 통보한다. Fig. 2는 시스템에서 구현된 PROPOSE LOAD performative의 메시지 형식이다.



#### 4. 시스템 구현 및 성능 평가

본 논문에서는 앞서 제안한 시스템을 ADIPS(Agent-based architecture of Distributed Information Processing System)/DASH(Distributed Agent System based on Hybrid Architecture) 플랫폼을 사용하여 구현하였다[12].

시스템의 동작성과 효율성을 보이기 위하여, 하나의  $Ag_{MGOCCL-S}$ , 3개의  $Ag_{DG}$ , 그리고 10개의  $Ag_{LOAD}$ 로 구성된 실험환경을 설정하였다. 전체 전력 공급량은 650kWh로 DG 1=200kWh, DG 2=200kWh, 그리고 DG 3=250kWh로 구성된다. 전체 부하 요구량은 1300kWh로 각  $Ag_{LOAD}$ 의 부하 요구량은 {20, 50, 70, 100, 120, 150, 170, 180, 190, 250}이다. 또한 각  $Ag_{LOAD}$ 의 부하 요구량은 하위 부하 요구량들의 집합으로 구성된다. 예를 들어  $Ag_{LOAD}$  10인 경우, 부하 요구량은 250kWh이며, 이는 다음과 같은 하위 부하 요구량으로 구성된다: {25, 24, 16, 17, 38, 14, 14, 16, 25, 16, 15, 30}. 부하 별 하위 부하 요구량은 포아송(Poisson) 분포를 따른다. 또한 각 부하에 따른 하위 부하 요구량 집합의 크기는 8보다 작게 설정한다.

Fig. 3은 다중 에이전트 시스템을 기반으로 6대의 PC에 구축한 마이크로그리드 분산 시스템을 보이고 있다. 각 PC들은 인터넷으로 연결되어 통신한다. Fig. 4는 실험 시나리오를 설정하기 위한 DASH/IDEA [12]기반 다중 에이전트 시스템 화면이다. Fig. 5와 Fig. 6는  $Ag_{MGOCCL-S}$ 의 운용 화면이다. 각 화면의 상단은 마이크로그리드 운용 중에 수집

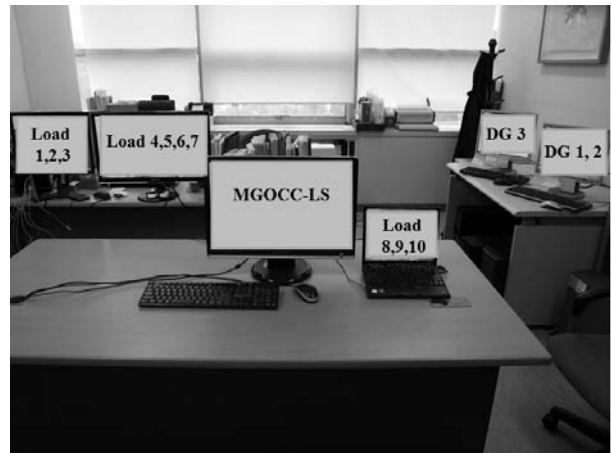


Fig. 3. Implemented system in a distributed environment

되거나 결정된 내용이 표시되고, 화면의 하단은 에이전트 간 교환된 메시지가 표시된다. Fig. 5는  $Ag_{MGOCCL-S}$ 가  $Ag_{DG}$ 와  $Ag_{LOAD}$ 들과 CFP, PROPOSE SUPPLY, 그리고 PROPOSE LOAD 메시지를 주고받음으로써, 전체 전력 공급량과 전체 부하 요구량 정보를 수집하는 화면이다. Fig. 6는 Fig. 5에서 수집된 정보를 기반으로 부하 요구량의 이산적인 특성을 반영한 NBS를 이용하여 각  $Ag_{LOAD}$ 별 부하 차단량을 {0, 0, 22, 31, 33, 80, 110, 81, 108, 185}와 같이 결정하고, 이를 ACCEPT 메시지를 통해 각 에이전트에게 통보하는 화면이다.

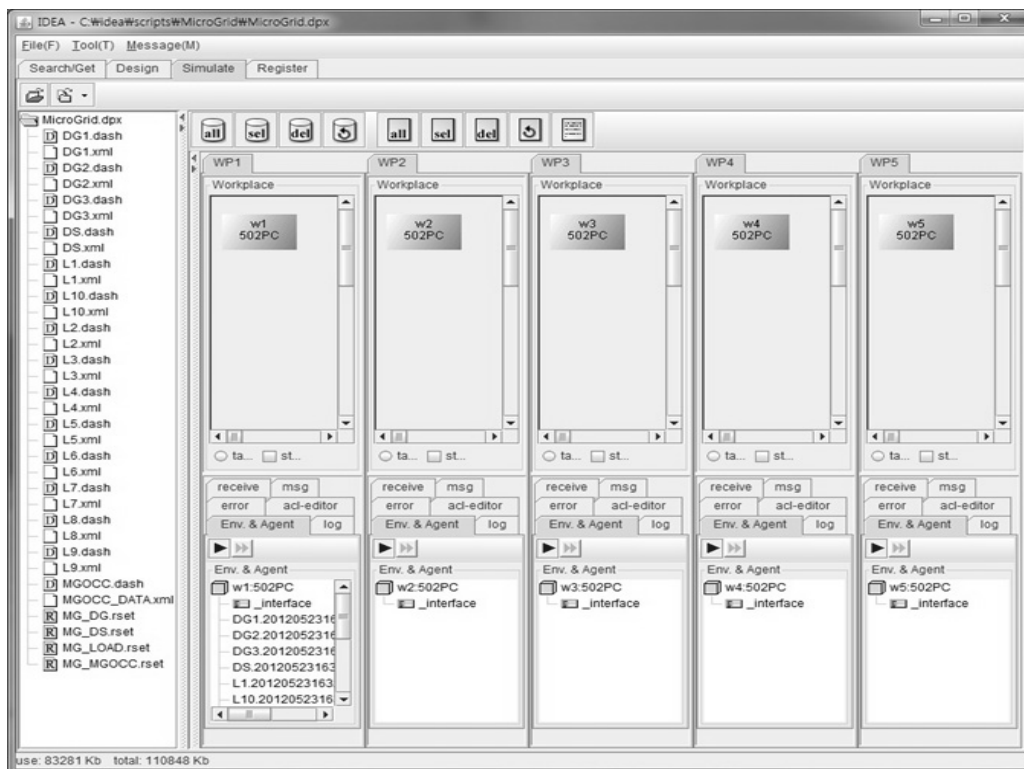


Fig. 4. Window for the configuration of test scenario

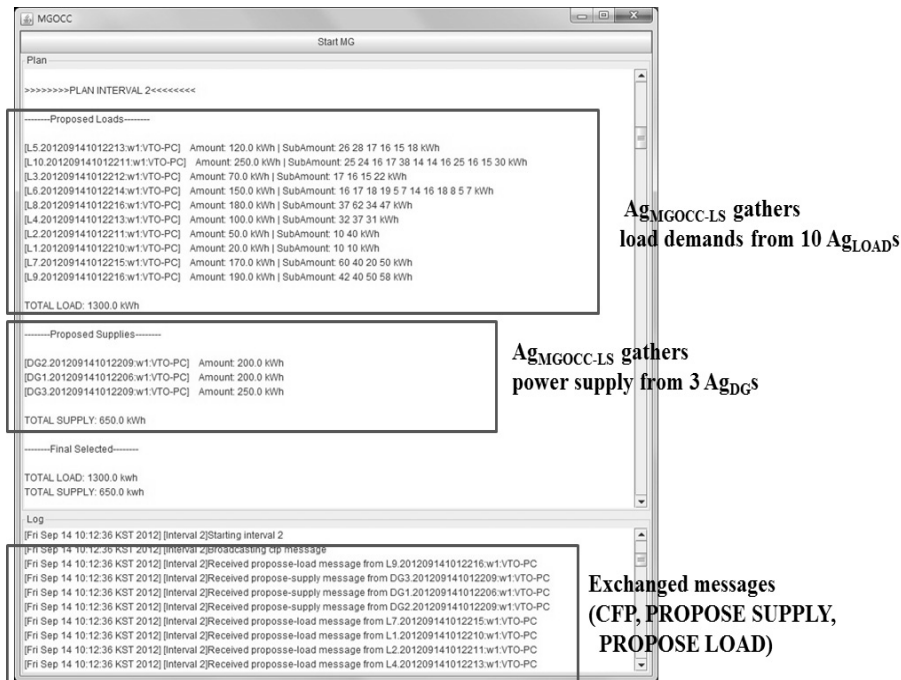


Fig. 5. Window for information gathering of AgMGOCC-LS

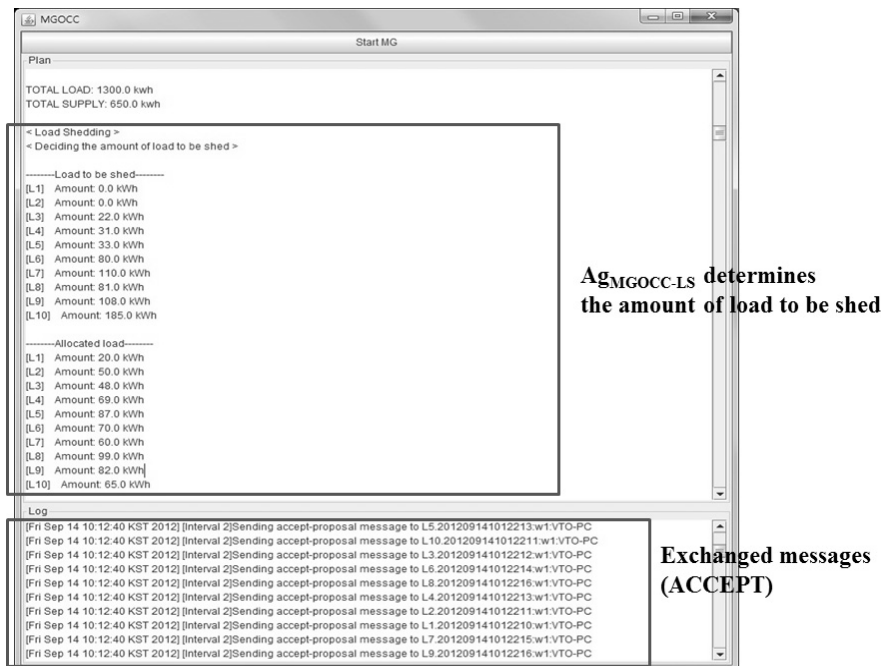
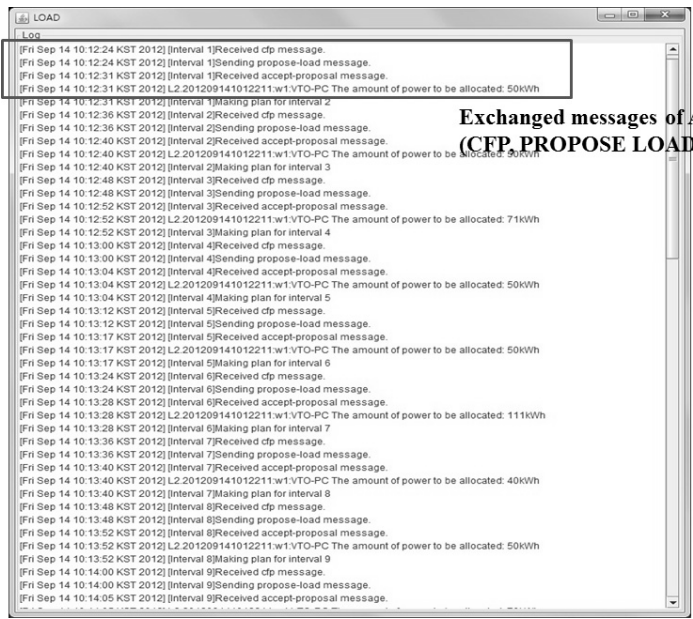


Fig. 6. Window for decision making of AgMGOCC-LS

Fig. 7은 AgLOAD 2가 AgMGOCC-LS로부터 CFP 메시지를 수신하고, PROPOSE LOAD 메시지를 송신하는 화면이다. 또한 AgMGOCC-LS로부터 ACCEPT 메시지를 수신함으로써 자신의 부하 요구량인 50kWh를 모두 할당받았음(부하 차단량이 없음)을 알 수 있다. 본 논문에서는 마이크로그리드 운용을 위하여 하루를 24개의 interval로 나누어 한 시간마다 각 interval에 대응되도록 하였다. 또한 매 interval마다 각 AgLOAD의 부

하 요구량과 각 부하 요구에 따른 하위 부하 요구 집합을 변화시켰다. Fig. 8은 하루 동안의 전체 부하 요구량, 전체 전력 할당량(= 전체 전력 요구량 - 전체 부하 차단량), 그리고 잔여 전력량(= 전체 전력 공급량 - 전력 할당량)을 보이고 있다. 그림은 개발된 시스템의 운용성을 증명하고 있으며 또한 부하 요구의 이산적인 특성을 고려한 NBS를 이용한 부하차단 기법이 효율적으로 부하차단을 수행하고 있음을 보이고 있다.



Exchanged messages of Ag<sub>LOAD</sub> (CFP, PROPOSE LOAD, ACCEPT)

Fig. 7. Window for the operation of Ag<sub>LOAD</sub> 2

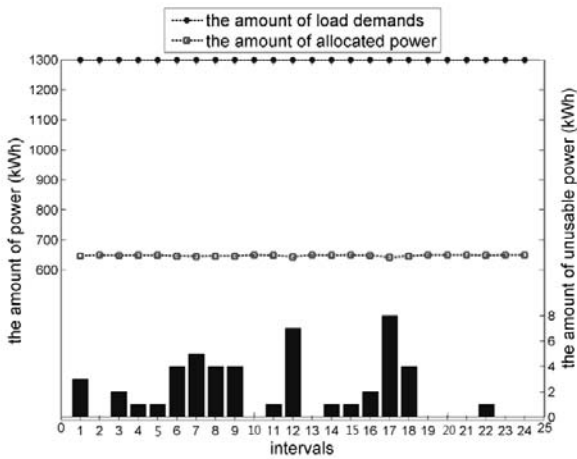


Fig. 8. System operation for one day

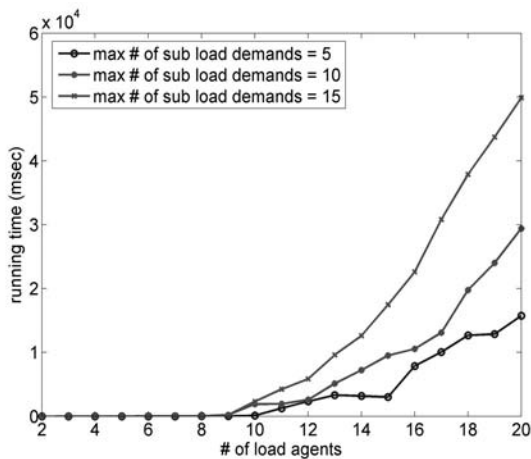


Fig. 9. The running time of our load-shedding system

Fig. 9는 Ag<sub>LOAD</sub>의 수를 2부터 20까지 변화시키면서 NBS 기법의 실행시간을 측정한 결과이다. 전체 부하 요구량은 1300kWh로 부하의 수가 변해도 전체 부하 요구량은 일정하다. 또한 각 부하의 하위 부하 요구 집합의 크기,  $\delta$ 를 변화시켜가면서 측정하였다. NBS 기법은 NP-hard 문제 [13]이기 때문에 부하차단을 위한 실행 시간의 대부분이 NBS 해를 구하는데 소요되기 때문에 본 실험은 중요한 의미를 가진다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 1분 이내에 해를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 부하의 개수가 늘어났다 하더라도, NBS 해를 polynomial time에 구할 수 있는 다양한 근사 알고리즘(approximation algorithm) [14]이 제안되어 있으므로 NBS로 인한 성능 저하 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

5. 결론

본 논문에서는 독립형 운용방식으로 동작하는 마이크로그리드 환경에서 부하 차단을 위한 에이전트 기반 협력제어 시스템을 개발하였다. 기존의 부하차단 기법들은 부하 요구량의 이산적인 특징을 고려하지 않아 성능 상의 많은 제약을 가지고 있었다. 따라서 본 논문에서는 부하요구의 이산적인 특징을 고려한 마이크로그리드 부하차단 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 부하차단을 위하여, 마이크로그리드를 구성하는 각 에이전트의 기능을 정의하고, 에이전트 간 통신 프로토콜을 확장하였으며, 또한 NBS에 기반 한 부하차단 기법을 제안하였다.

시스템의 동작성과 성능을 증명하기 위하여 실제 분산 환경에 마이크로그리드 에이전트 시스템을 구현하고, 다양한 시나리오에서 실험을 진행하였다.

**참 고 문 헌**

[1] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE Power Energy*, Vol.5, No.4, pp.78-94, 2007.

[2] N. D. Hatziargyriou, "Microgrids," *IEEE Power Energy*, Vol.6, No.3, pp.26-29, 2008.

[3] S. Suryanarayanan, J. Mitra, and S. Biswas, "A Conceptual Framework of a Hierarchically Networked Agent-based Microgrid Architecture," *Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, New Orleans, LA, USA, April 19-22, 2010.

[4] M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter, N. Hatziargyriou, and T. Green, "Real-Word MicroGrids - An Overview," *Proceedings of IEEE International Conference of System of Systems Engineering*, Hong-Kong, China, pp.1-8, April, 2007.

[5] A. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Agent based Control for Microgrids," *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, FL, USA, pp.1-5, June 24-28, 2007.

[6] A. L. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No.3, pp.1447-1455, 2005.

[7] H.-M. Kim and T. Kinoshita, "A Multiagents System for Microgrid Operation in the Grid-interconnected Mode," *KIEE Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol.5, No.2, pp.246-254, 2011.

[8] M. J. Woolridge, "An Introduction to Multi-agent Systems," John Wiley & Sons, New York, NY, 2002.

[9] J-H. Jeon, K-H. Kim, C-S. Hwang, J-M Kim, "A Novel Frequency Tracker for Islanded-Mode Operation in Microgrid," *The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers, KIEE*, Vol.60, No.7, pp.1331-1338, 2011.

[10] Y. Lim, H.-M. Kim, J. Park, and T. Kinoshita, "A Game Theoretic Approach for Load Shedding in the Islanded Microgrid," *Information Journal*, In Press.

[11] FIPA. Available online: <http://www.fipa.org>.

[12] IDEA/DASH Tutorial. Available online: <http://www.ka.riec.tohoku.ac.jp/idea/index.html> (accessed on Oct. 2012).

[13] C. H. Papadimitriou and M. Yannakakis, "On the Approximability of Trade-Offs and Optimal Access of Web Sources," *In Proceedings of the IEEE Symposium Foundations of Computer Science*, pp.86-92, July, 2000.

[14] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization," Cambridge University Press, United Kingdom, 2004.



**임 유 진**

e-mail : yujin@suwon.ac.kr  
 1995년 숙명여자대학교 전산학과(학사)  
 1997년 숙명여자대학교 전산학(석사)  
 2000년 숙명여자대학교 전산학(박사)  
 2000년 서울대학교 박사후연구원  
 2000년~2002년 UCLA 박사후연구원

2003년~2004년 삼성종합기술원 전문연구원  
 2004년~현 재 수원대학교 정보미디어학과 조교수  
 관심분야 : Ad-hoc Network, Sensor Network, Microgrid



**김 학 만**

e-mail : hmkim@incheon.ac.kr  
 1998년 성균관대학교 전기공학과(박사)  
 2011년 일본 Tohoku(東北)대학교 정보과  
 학과(박사)  
 1996년~2008년 한국전기연구원 선임연구원  
 현 재 인천대학교 전기공학과 교수

관심분야 : Smartgrid, Microgrid, 신재생에너지시스템, 전력변환  
 기반 전력시스템