

멀티에이전트 시스템을 이용한 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템 파일럿 플랜트 개발

Development of Pilot Plant for Distributed Intelligent Management System of Microgrids

오 상 진* · 유 철 희* · 정 일 엽* · 임 재 봉†
 (Sang-Jin Oh · Cheol-Hee Yoo · Il-Yop Chung · Jae-Bong Lim)

Abstract - This paper describes the development of the pilot plant of distributed intelligent management system for a microgrid. For optimal control and management of microgrids, intelligent agents are applied to the microgrid management system. Each agent includes intelligent algorithms to make decisions on behalf of the corresponding microgrid entity such as distributed generators, local loads, and so on. To this end, each agent has its own resources to evaluate the system conditions by collecting local information and also communicating with other agents. This paper presents key features of the data communication and management of the developed pilot plant such as the construction of mesh network using local wireless communication techniques, the autonomous agent coordination schemes using plug-and-play functions of agents and contract net protocol (CNP) for decision-making. The performance of the pilot plant and developed algorithms are verified via real-time microgrid test bench based on hardware-in-the-loop simulation systems.

Key Words : Microgrid, Multi-agent system, Distributed intelligent management system, Energy management system, Contract net protocol, Hardware-in-the-loop, Intelligent systems

1. 서 론

마이크로그리드는 태양광 전원, 풍력발전기, 마이크로가스 터빈 등 하나 이상의 분산전원과 부하로 구성되며, 에너지 효율 및 경제성 등을 고려하여 전력의 소비와 공급을 독립적으로 결정할 수 있는 능동적인 배전계통이다. 마이크로그리드는 전력계통 전체를 관리하는 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)과 별도의 관리시스템을 가지며 마이크로그리드 운영에 대한 전반적인 제어와 보호를 수행한다. 마이크로그리드는 신뢰성 있는 운영을 전제로 계통 측면에서 하나의 급전 가능한 전원 또는 제어 가능한 부하로 볼 수 있어 계통 전반의 운영과 관리를 효과적으로 할 수 있도록 도와줄 수 있다[1]. 그림 1은 일반적인 형태의 마이크로그리드의 개념도이다.

송전계통에서 사용하는 일반적인 EMS의 주요기능은 발전소 및 변전소 전력기기의 상태를 원격에서 취득하고 제어할 수 있는 원격감시제어(SCADA) 기능, 취득한 데이터의 오차나 오류를 보정하는 상태추정(State Estimation) 기능, 계통 주파수의 유지를 위한 자동발전제어(AGC) 기능, 발전 비용을 고려한 발전기의 경제급전(Economic Dispatch) 기

능, 그리고 오프라인에서 실제 전력계통을 시뮬레이션 하는 급전훈련시뮬레이터(Dispatcher Training Simulator) 기능 등을 주요한 기능으로 가진다. 마이크로그리드의 관리시스템은 송전계통 EMS를 기반으로 일부 기능이 추가되거나 삭제된다. 상세한 내용은 4장에서 살펴보기로 한다[2].

최근 많은 연구에서 마이크로그리드 관리시스템에 지능적이고 자율적 기능을 적용할 수 있는 멀티에이전트 시스템(Multi-Agent System)의 도입이 주목받고 있다. 그 이유는

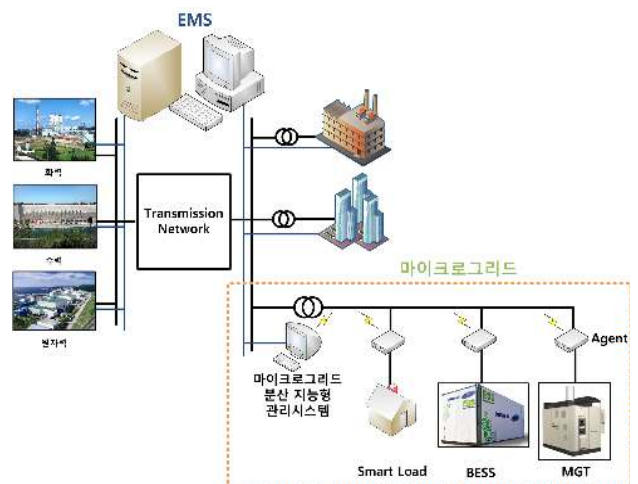


그림 1 마이크로그리드의 개념도

Fig. 1 Concept of Microgrid and Microgrid Management System

* School of Electrical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

E-mail : ljb@kookmin.ac.kr

Received : October 16, 2012; Accepted : December 31, 2012

기능을 갖는 에이전트를 이용함으로써 마이크로그리드 제어 시 신재생 에너지 전원 등의 출력이나 부하 전력소비의 불확실성에 효과적으로 대처하고 분산전원 운영상의 제약조건 및 경제성 등 다양한 사항을 고려할 수 있기 때문이다 [3-4].

멀티에이전트 시스템에서의 에이전트는 환경의 변화에 반응하는 반응성(Reactivity)과 목표를 지향하여 행동하는 목표지향성(Pro-activity) 그리고 다른 에이전트와 상호작용하는 사회성(Sociability)을 특징으로 한다. 멀티에이전트 시스템을 도입함으로써 얻는 이점으로는 에이전트가 자율적인 의사결정을 하는 독립체로 과거의 행동을 바탕으로 의사결정의 규칙을 갱신하는 학습능력을 가짐으로써 분산 지능형 시스템으로 동작한다는 것이다[4-5].

자율적 의사결정과 사회성을 가지는 멀티에이전트 시스템에서 업무 분배 프로토콜은 Contract Net Protocol(CNP)에 기반 하여 설계한다. CNP를 이용한 업무 분배의 과정은 문제인식(Recognition), 문제공표(Announcement), 업무 할당량 입찰(Bidding) 및 업무부여(Awarding)로 이루어져 있으며 CNP와 같은 의사교환 프로토콜은 멀티에이전트 시스템에서의 주요한 연구의 한 분야이다[6-9].

그림 2는 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 개념도를 나타낸다. 멀티에이전트 시스템을 도입한 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템은 주변 환경에 대한 정보와 다른 에이전트와의 상호작용 그리고 중앙 관리시스템(MGCC)와의 정보교환을 필수적으로 필요하기 때문에 서로 간의 통신이 필수적이다. 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 기능으로는 상위 전력계통과 마이크로그리드 내의 에이전트를 감시하는 모니터링 기능, 전압 및 주파수, 무효전력 및 전력품질 등을 보상하는 보상과 제어 기능 그리고 유무효전력과 수요반응(Demand Response), 보조서비스에 따른 전력시장거래에 참여하는 기능을 수행하여야 한다.



그림 2 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템 개념
 Fig. 2 Concept of Microgrid Distributed Intelligent Management System

2. 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템 파일럿 플랜트의 구성

본 논문에서는 그림 3과 같이 마이크로그리드 분산지능형 관리시스템의 파일럿 플랜트를 구성하였다. PC를 이용한 비주얼베이직 프로그램으로 MGCC(Microgrid Central Controller)를 구성하였고 마이크로컨트롤러 ATmega128을 사용하여 에이전트를 구성하였다. MGCC-에이전트, 에이전트-에이전트 간의 통신으로 지그비(Zigbee) 통신 FZ750BC 모듈을 사용하여 메시 네트워크(mesh network)를 구축하였다. 모든 장치는 1:n으로 통신하며 필요에 의해 데이터를 선택적으로 송/수신하여 메시 네트워크로 동작한다. 구축한 파일럿 플랜트는 1:n 통신을 통해 에이전트의 상태를 MGCC 뿐만 아니라 다른 에이전트들도 수신할 수 있도록 통신망을 구현하였다. 개발된 파일럿 플랜트에서는 에이전트간의 통신채널을 구현하여 다른 에이전트로부터 전달받은 데이터를 에이전트의 의사결정 알고리즘에 활용하는 것이 가능하다. 통신의 흐름은 MGCC가 에이전트에 필요한 정보를 요청하면 요청을 받은 에이전트가 정보를 보내주는 것을 기본으로 하며 에이전트가 네트워크에 등록할 때와 마이크로그리드 비정상 동작 시 등 특정한 상황에 한해서 에이전트가 MGCC에 문제해결을 요청할 수 있다.

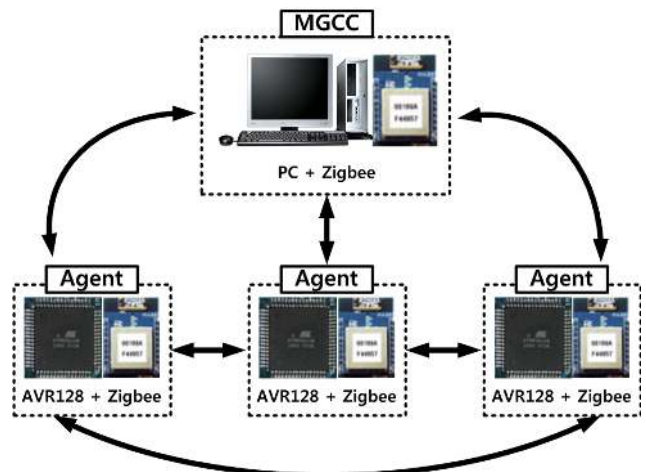


그림 3 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 파일럿 플랜트 구성

Fig. 3 Pilot-Plant Construction of Microgrid Distributed Intelligent Management System

본 논문에서 구현한 마이크로그리드 분산지능형 관리시스템의 파일럿 플랜트는 실험실 환경에서의 분산지능형 시스템의 구현과 마이크로그리드 관리시스템 알고리즘의 검증 그 목적으로 한다. 따라서 근거리 통신인 지그비통신은 데이터 교환을 위한 수단으로 이용한다. 실제 마이크로그리드 적용에서의 통신은 유/무선의 적합한 방법을 고려해야한다. 마이크로그리드 통신수단의 주요한 고려사항으로는 1:n 통신을 지원해야 한다. 1:n 통신을 통하여 환경의 변화(에이전트 자신과 다른 에이전트의 상태변화)에 대한 반응과 다른 에이전트들과의 사회적 기능을 특징으로 하는 분산지능형 시스템을 구현할 수 있기 때문이다.

3. 통신 네트워크 구축

3.1 지그비(Zigbee) 통신

지그비는 IEEE 802.15.4 표준을 따르는 PHY/MAC층을 기반으로 상위프로토콜 및 응용층을 규격화한 기술이다. 100m안에서 250kbps의 속도로 데이터를 전송할 수 있으며 메시 네트워크 구조를 통해 약 65,000대의 기기를 연결할 수 있다. 지그비의 가장 큰 특징은 최대 125mW의 낮은 전력소모이다. 특히 저전력모드로 진입 시에는 최소 3.3uW의 전력을 소모한다. 표 1에 본 논문에서 사용한 FZ750BC모듈의 상세한 제원을 설명한다.

표 1 FZ750BC 모듈의 상세제원

Table 1 Detail Specification of FZ750BC Module

FZ750BC	사양
지그비 규격	지그비 2006 지원
주파수 대역	2.4GHz ISM band
입력전압	DC 3.3V(+/- 0.2V)
소비전류	1uA ~ 38mA
통신거리	120M
통신속도	9,600~230,400bps
최대 전송 데이터 길이	53Byte
인터페이스	UART, ADC, KEY, GPIO

지그비는 네트워크에서의 역할에 따라 코디네이터(coordinator), 라우터(router), 엔드디바이스(end-device), 세 가지 중 하나로 설정할 수 있으며 지그비 네트워크는 코디네이터가 중심이 되어 구성한다. 하나의 네트워크에는 하나의 코디네이터가 존재하며 복수의 라우터나 복수의 엔드디바이스가 코디네이터가 구성한 네트워크에 참가할 수 있다. 코디네이터는 자신이 사용할 채널이 다른 디바이스 혹은 2.4GHz의 같은 대역을 사용하는 무선 랜의 존재 여부를 Active Scan과 Energy Scan을 이용하여 검색한다. 만약 다른 지그비 디바이스들이나 무선 랜 등이 존재하여 충돌이 예상되면, 코디네이터는 다른 채널을 스캔하여 통신상태가 가장 좋은 채널을 선택하여 통신을 시작한다. 이후에 새로운 디바이스가 네트워크에 연결되면, 주위의 디바이스를 Active Scan으로 검색하고 검색된 디바이스를 저장하여 그 중에 가장 통신 상태가 좋은 디바이스에게 연결을 요청한다.

3.2 데이터 패킷의 구조

개발된 파일럿 플랜트에서는 지그비 통신을 이용하여 전송하는 데이터의 패킷을 그림 4와 같이 Instruction, Device ID, Agent Number, Data로 설계하였다. Instruction은 시스템의 동작에 관한 정보를 나타내고 Device ID는 에이전트와 연결된 장치의 종류에 대한 정보를 나타낸다. Device ID는 장치의 종류에 따라 부여된 고유한 값으로, 분산전원이나 부하 등 에이전트와 연결된 장치에서 에이전트로 보내오는 값이다. 표 2에 장치의 종류에 따른 Device ID의 할당에 관해

나타낸 것과 같이 태양광 전원의 ID는 “2”, 지능형 부하의 ID는 “8”과 같은 식으로 부여한다. Agent Number은 마이크로그리드 내의 같은 종류의 장치를 구분하기 위해 사용한 구분 데이터로 마이크로그리드 내에 등록된 동종의 장치와 연결된 에이전트에 번호를 부여함으로써 나타낸다. Device ID와 Agent Number를 이용하여 마이크로그리드 네트워크에서 에이전트를 구분 할 수 있는 네트워크 ID로 사용한다. Data는 교환되는 정보를 나타내며 Instruction에 따라 주고

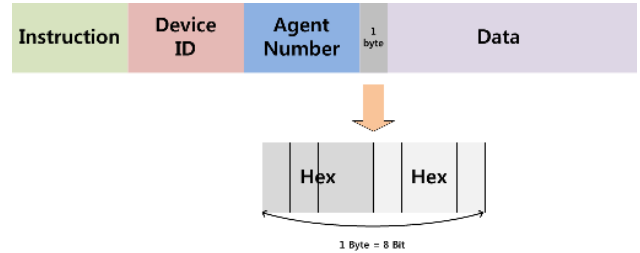


그림 4 데이터 패킷의 구조

Fig. 4 Structure of Data Packet

표 2 장치 종류에 따른 Device ID 할당

Table 2 Device ID Assignment According to Type of Device

Device ID	장치 종류
0	MGCC
1	배터리 에너지 저장장치
2	태양광
3	풍력
4	마이크로가스터빈
5	전기자동차
6	제어가능부하
7	제어불가능부하
8	지능형 부하

표 3 Instruction에 따른 Data 값

Table 3 Data and Motion According to Instruction

Instruction	동작	Data
ID	네트워크 등록 요청	MAC Address
RI	네트워크 ID 부여	MAC Address
FR	네트워크 탈락 정보 송신	MAC Address
RM	모니터링 데이터 요청	-
TM	모니터링 데이터 송신	State, Active Power, Reactive Power, Voltage, Frequency
RE	Emergency DR 입찰 요청	Sell Price, Buy Price, Needed Active Power, Incentive
TE	Emergency DR 입찰 데이터 송신	Bidding Active Power
AE	Emergency DR Reference 송신	Awarded Active Power
RR	Reference 송신 ACK	-

받는 데이터의 내용이 달라진다. 표 3은 Instruction에 따른 Data의 구조와 동작을 나타낸다.

네트워크 ID의 구성을 통해서 통신 데이터가 어떤 에이전트의 데이터인지 구분할 수 있고 MGCC는 특정 에이전트에게 데이터를 요청할 수 있다. Instruction의 구성으로 에이전트는 Instruction을 바탕으로 동작을 수행하여 MGCC가 필요로 하는 데이터를 송신한다. 이처럼 데이터 패키지의 설계를 통해 멀티에이전트 시스템에서 에이전트 동작과 에이전트 구분 그리고 데이터 처리를 용이하게 할 수 있다.

한 바이트는 16진수로 나타내어 256개의 값을 표현할 수 있으며 이러한 표현 방법은 숫자정보를 통신할 때 데이터의 압축에 용이하다. 필요에 따라 Instruction, Device ID, Agent Number에도 적용할 수 있으며 이를 통해 적은 데이터의 수로 많은 정보를 송신할 수 있다. 비주얼베이직에서는 한 바이트의 표현 범위를 0~125 또는 126~255로 선택적으로 사용할 수 있어 개발한 파일럿 플랜트에서는 0~100의 표현 범위를 사용하여 데이터를 16진수로 표현하였다. 또한 데이터를 송신할 때 비주얼베이직과 ATmega128은 통신 시에 0x0D와 0x0A 값을 필수적으로 보내게 되어 있는데, 0x0D와 0x0A를 이용하여 패키지의 종료 식별지표로 사용하고 Instruction을 패키지 시작 식별 지표로 사용하여 하나의 패키지를 구분하는데 사용한다.

3.3 통신환경 설정

개발된 파일럿 플랜트의 통신 속도는 115,200bps를 사용하고 비트의 구조는 None Parity, 8 Data bits, Stop bit를 사용한다. 패키지는 30바이트의 길이를 가진다. ATmega128은 패키지 길이의 변화에도 같은 송수신 지연시간을 필요로 하기 때문에 사용하고자 하는 패키지의 길이를 최대 패키지 데이터의 크기 안에서 적당한 값을 선정하여야 한다.

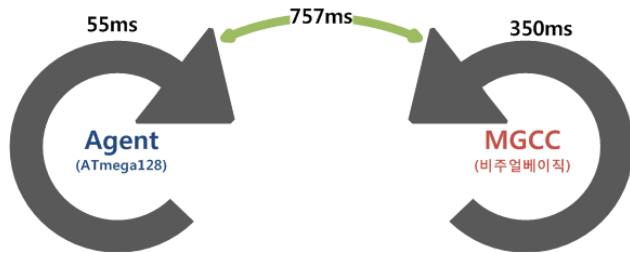


그림 5 MGCC - 에이전트 송수신 타이밍도
Fig. 5 MGCC-Agent Transmit & Receive Timing

데이터 송수신 필요 지연시간은 프로세서의 성능에 따라서 달라지는데 ATmega128의 송신 시 필요 지연시간은 55ms이고 수신 시 필요 지연시간은 15ms이다. 송수신 지연시간을 송수신 필요 지연시간보다 적게 적용할 경우 데이터 송수신이 성공적으로 이루어지지 않으므로 주의해야 한다. 따라서 Atmega128의 송신 필요 지연 시간과 수신 필요 지연시간을 고려하여 마이크로프로세서 알고리즘 루프(loop)의 주기를 적합하게 선정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 이를 실험적인 방법으로 찾아 최적 송신지연시간을

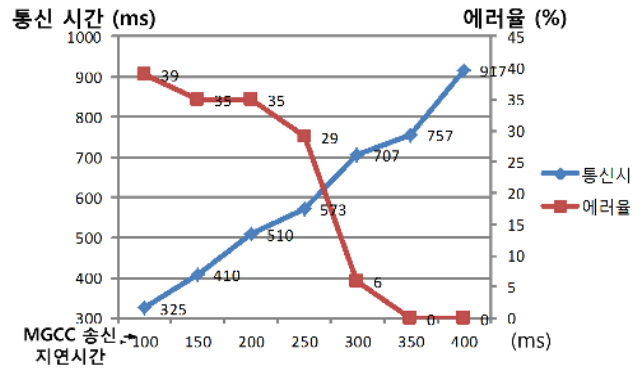


그림 6 통신시간과 에러율 (ATmega128의 전송지연시간 : 55ms)
Fig. 6 Communication Time and Error Rate (ATmega128 Transmission Delay Time : 55ms)

55ms로 선정하여 사용한다. 그림 5는 MGCC-에이전트간의 송수신 타이밍을 나타낸다. MGCC는 일반적으로 고성능 프로세서를 사용하기 때문에 송수신 필요 지연시간은 적용하지 않아도 신뢰성 있는 데이터의 송수신이 가능하다. 하지만 ATmega128와의 안정적인 연속적인 데이터 송수신을 위해 MGCC에 송신 지연시간이 필요하다. 그림 6는 실험적으로 찾아 본 MGCC 프로그램의 송수신 지연시간의 변화에 따른 데이터의 에러율과 데이터 통신시간을 나타낸다. 실험에서 데이터에 에러가 발생한 경우는 MGCC의 데이터 요청 후 MGCC에 두 개 이상의 같은 데이터가 같은 에이전트로부터 수신되는 경우가 대표적이다. 데이터 통신시간은 MGCC의 요청에 에이전트가 반응하여 데이터를 MGCC로 송신하고 최종적으로 MGCC에 그 데이터가 수신되는 시간을 측정함으로써 구하였다. 실험은 ATmega128의 송수신 지연시간을 55ms로 설정하여 진행하였으며 시스템 구성조건은 1대의 MGCC와 3대의 Agent와의 송수신 상황을 가정하여 진행하였다. MGCC와 3대의 에이전트들과의 데이터 송수신을 총 100회 씩 세 번 수행한 평균값으로 통신시간을 측정할 결과, MGCC가 데이터를 송신할 때 350ms의 시간지연이 있을 시에 MGCC가 최종적으로 에이전트로부터 데이터를 에러 없이 안정적으로 수신하는 것을 확인하였고 이때 평균적으로 757ms의 시간이 소요되었다.

4. 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 기능

마이크로그리드 관리시스템이 갖는 기능은 그림 7과 같다. 일반적으로 송전계통에서 사용하는 EMS와 비교하여 마이크로그리드 관리시스템은 SCADA 기능에 분산전원 및 부하와 협조제어를 해야 하는 기기들의 제어신호가 추가된다. 자동발전 및 경제급전 기능에서의 송전계통 EMS와 차이점은 송전계통 EMS의 AGC 기능이 주파수 유지에 초점을 맞추고 있다면 계통연계형 마이크로그리드 관리시스템의 AGC 기능은 수급균형 및 연계점에서의 조류제어(Flow Control)에 초점을 둔다는 것이다. 계통해석 기능은 송전계통 EMS와 달리 급전원에게 계통상태를 전달하기 위한 기능이 아닌, 자동발전 및 급전계획 수립 시 계통상태에 의한 제약조건을 판단하기 위한 기능으로 사용된다. 급전원 훈련 시뮬레이터

는 구현되지 않아도 되나, 마이크로그리드에 급전원이 있을 경우 마이크로그리드의 안정적인 운영을 위해서 구현이 필요하다[10]. 또한 필요한 경우, 전력시장의 중간 운영자로서의 기능을 수행할 수 있어야 한다.

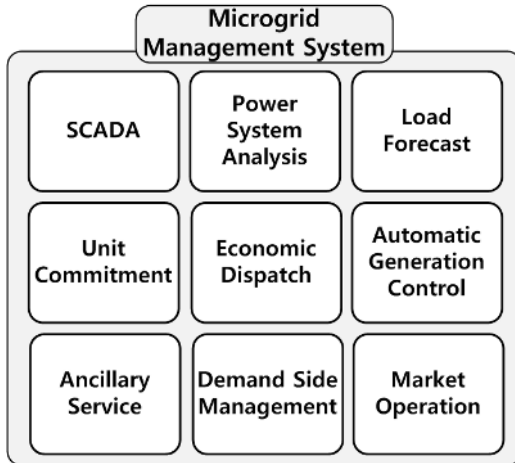


그림 7 마이크로그리드 관리시스템의 기능
Fig. 7 Function of Microgrid Management System

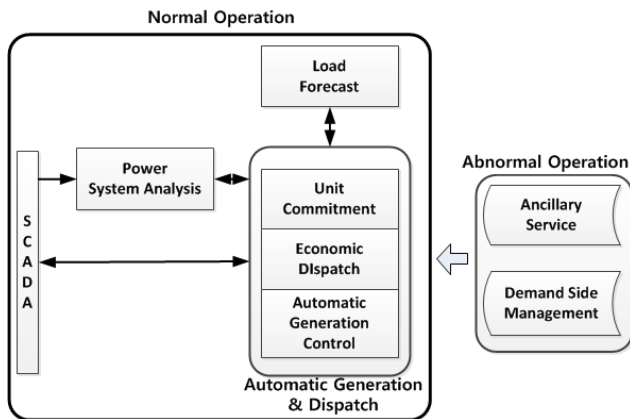


그림 8 마이크로그리드 관리시스템의 동작
Fig. 8 Operation of Management System

그림 8은 마이크로그리드 관리시스템의 동작을 나타내고 동작은 다음과 같다. 자동발전 및 급전계획을 세우기 위해 기후 환경 분석 등의 환경 요소를 바탕으로 시간대별 부하 크기를 예측한다. 계통해석 기능을 통해 부정확한 취득 데이터의 오류를 보정하고 자동발전 및 급전계획 수립 시 제약조건을 판단한다. 예측한 부하의 크기 및 제약조건을 바탕으로 발전기의 가동여부를 결정하는데 마이크로그리드에서의 Unit Commitment는 MGCC의 직접 제어가 가능한 것에 한해서 이루어진다. 다음으로 부하의 요구에 따라 각 발전기에 경제적으로 전력을 배분하는 경제급전(Economic Dispatch)을 수행하게 되는데 보통 분 단위로 수행하게 된다. 이후 부하 변동에 따른 발전량 수정치를 각 발전기에 전달하게 되는데, 이 과정을 자동발전제어(Automatic Generation Control)이라 하고 초 단위로 수행하게 된다. 여기까지의 과정을 평시에 동작하게 되고 운영 중에 전압, 주

파수 그리고 무효전력 등의 마이크로그리드가 비정상 범위에서 동작하게 될 경우 보조서비스(Ancillary Service)를 수행함으로써 마이크로그리드의 안정적인 운영을 돕는다. 추가적으로 부하차단, 수요반응(Demand Response) 등의 수요관리(Demand Side Management)를 수행하는데, 급전가능여부에 따라 동작이 달라지며 급전이 가능한 경우 경제급전과 같이 또는 경제급전과 자동발전제어 사이의 부하변동을 추정하는 기능을 수행하게 되며 급전이 가능하지 않은 경우 계통의 전력 공급이 어려운 비상시에 동작하여 마이크로그리드의 안정적인 운영을 돕는다.

본 논문에서는 마이크로그리드 관리시스템의 기능을 모듈화 하여 구축하는 것을 통해 기능의 추가 및 프로그램 관리가 용이하도록 설계한다. 각 모듈은 독립적으로 기능을 수행하며 기능 수행에 필요한 데이터는 공유하여 사용한다. 그리고 분산 지능형 관리시스템 구축을 위해서 EMS의 기능과 정보를 에이전트에 분산하여 개발하는 것을 목적으로 한다. 특히 전력 공급이 불안정한 상황에서 수요관리를 진행하는 Emergency Demand Response(EDR)에서의 기능을 모듈화 하여 구현하였다.

4.1 에이전트의 Plug&Play 기능

플러그-앤-플레이 (Plug & Play) 기능은 마이크로그리드 관리시스템에서 에이전트의 참가와 탈락을 자동으로 감지하여 멀티에이전트 시스템의 네트워크를 유연하게 관리하기 위한 기능이다. 기존의 전력계통에 비해 마이크로그리드의 전원의 계통연계 및 동작이 불확실성을 가지고 있고 부하역시 수시로 On/Off 되기 때문에 마이크로그리드 네트워크의 규모가 커질수록 구성의 변화가 잦아지게 된다. 따라서 네트워크의 구성의 변화에 유연한 대응을 할 수 있는 플러그-앤-플레이 기능이 필수적이다.

플러그-앤-플레이를 수행에 중요한 데이터로 통신 모듈의 MAC 주소가 사용된다. MAC 주소는 통신 모듈의 변하지 않는 고유값으로 초기 네트워크 구성 시 다른 에이전트들과 공통적으로 가지고 있으면서 서로 다른 값을 가지기 때문에 에이전트들을 구분할 수 있는 지표이다. 그림 9는 플러그-앤-플레이 기능에서 새로운 에이전트가 네트워크에 참여 할 때의 알고리즘을 MGCC를 중심으로 하여 나타낸다. 새로운 에이전트가 마이크로그리드에 참여하면 에이전트는 통신 모듈의 고유값인 MAC 주소를 초기화하고 Device ID 및 Device 초기 데이터와 함께 MGCC로 전송한다. 통신모듈의 MAC 주소를 초기화하는 이유는 고유한 값을 가지는 MAC 주소가 에이전트를 구분하는 최우선 지표로 사용되기 때문이다. 네트워크의 새로운 참여자를 인지한 MGCC는 MAC 주소와 Device ID를 이전의 등록된 데이터와 비교하여 네트워크에 참여했던 에이전트인지 처음으로 참여한 에이전트인지를 판단한다. 등록을 원하는 에이전트가 네트워크에 새롭게 참여하기를 원하는 에이전트일 때는 Device ID를 비교하여 등록된 순서대로 Agent Number를 부여하고 과거에 참여했던 기록이 있는 에이전트일 때는 이전에 부여했던 Agent Number를 부여한다. 이후 네트워크의 새로운 참여자에 대한 정보를 전체 네트워크 참여자에게 알리고 에이전트 참여시의 플러그-앤-플레이 동작을 마치게 된다.

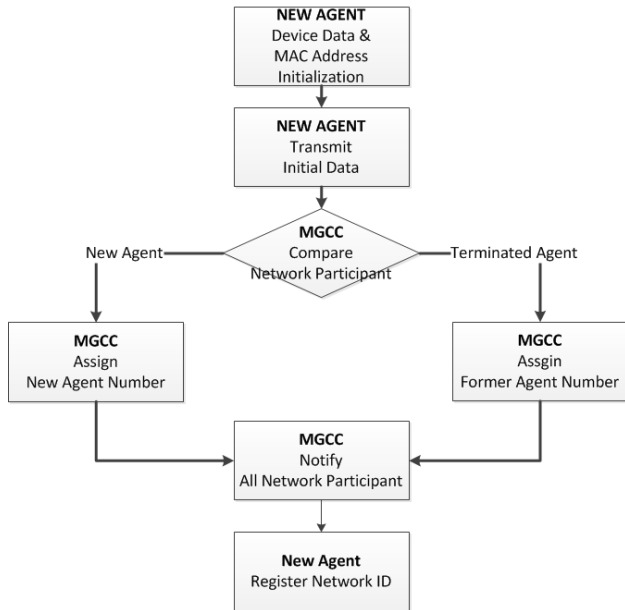


그림 9 에이전트 참여시의 Plug& Play 알고리즘
Fig. 9 Agent Participation Plug&Play Algorithm

네트워크의 구성 후 MGCC는 네트워크 모니터링을 수행하기 위해 에이전트에 일정시간 마다 데이터를 요청한다. 에이전트의 오동작 또는 장치 제거 등 네트워크의 구성에 변화가 있을 때에는 MGCC의 데이터 요청에 에이전트가 응답하지 못하게 되고 MGCC는 일정 횟수동안 응답이 없는 에이전트를 네트워크에 탈락되었다고 판단하여 네트워크의 변화를 인지한다. 이후 MGCC는 미응답 에이전트의 Device Number를 임시로 저장하고 네트워크에서 제외 한 후 변경사항을 전체 네트워크 참여자에게 알린다. 이 과정을 통해 네트워크 관리를 효율적으로 수행할 수 있으며 관리시스템의 기능 수행 중에 탈락된 에이전트의 데이터를 요청하는 불필요한 통신과정을 제거할 수 있다.

4.2 Contract Net Protocol(CNP)

마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템에서 의사결정 프로토콜인 CNP는 에이전트들이 업무를 분담해서 문제를 해결해 나가야하는 프로세스에서 사용된다. 중앙집중형 관리 환경에서는 중앙제어장치가 네트워크의 모든 정보를 가지고 제어를 수행하지만 분산제어환경에서는 중앙에서 제한된 정보만을 가지고 주요기능을 분산하여 문제를 해결해야 하기 때문에 CNP와 같은 의사결정 프로토콜이 필요하게 된다.

그림 10은 CNP의 동작을 설명한다. MGCC는 에이전트에게 해결하고자 하는 전체 목표에 대해 알리고 에이전트는 전체 목표를 이루기 위한 자신의 역할을 결정하여 MGCC에 제안한다. MGCC는 모든 에이전트로부터 제안을 받은 후에 먼저 에이전트들로부터 받은 제안으로부터 문제를 해결 할 수 있는지 판단한다. 문제를 해결할 수 없는 경우 MGCC와 에이전트는 협상을 진행하고 에이전트의 제안으로부터 문제를 해결할 수 있는 경우, 지능형 알고리즘을 통해서 각 에이전트의 최적해를 도출하고 이 값을 에이전트들에게 전달한다.

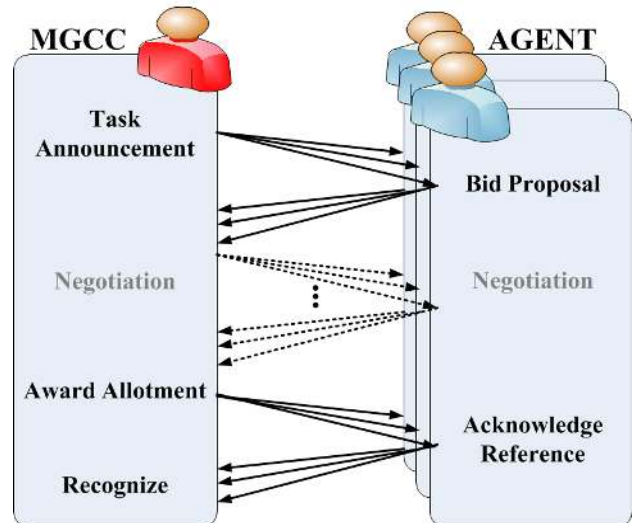


그림 10 CNP의 동작 개념도
Fig. 10 Conceptual Operation of CNP

다. MGCC로부터 값을 전달 받은 에이전트는 ACK를 송신하고 MGCC가 에이전트의 수신을 확인하면 CNP 과정이 종료된다.

CNP는 문제를 인식하는 주체에 따라서 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째로 MGCC가 문제를 인식하여 CNP 과정을 수행하는 것을 Call-by-MGCC CNP라고 정의할 수 있으며 상시 운영 중에 동작한다. 둘째로 에이전트가 문제를 인식하여 MGCC에 문제 상황을 알림으로써 CNP 과정을 수행하는 것으로 Call-by-Agent CNP라고 정의하며 비상시에 동작한다. Call-by-Agent CNP의 동작은 문제를 인식한 에이전트가 MGCC에게 문제 상황을 알려 CNP를 요청하는 동작을 먼저 수행하게 된다.

5. 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 데모 시스템 구현

본 논문에서 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 파일럿 플랜트의 기능을 검증하기 위한 데모 시스템의 구성은 그림 11과 같다. 파일럿 플랜트는 그림 3과 같이 MGCC를 PC와 Zigbee모듈을 사용한 비주얼베이직 프로그램 기반의 관리 프로그램 및 GUI로 구성하고 각 에이전트를 ATmega128 과 Zigbee모듈로 구현하였다. 마이크로그리드의 전력계통 모델은 MATLAB 기반의 실시간 시뮬레이터인 OPAL-RT를 이용하여 구현하였으며 시뮬레이션과 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 파일럿 플랜트는 Hardware-In-the-Loop Simulation (HILS)으로 구성하였다. 그림 12는 데모 시스템에 사용한 마이크로그리드 계통의 구성과 분산전원 및 부하와 에이전트와의 연계를 나타낸다. 본 데모 시스템은 배터리 에너지 저장장치, 마이크로가스터빈 그리고 스마트 부하로 이루어진 계통연계형 DC 마이크로그리드를 구성하였다. 스마트 부하는 제어 불가능 부하와 제어가능 부하로 구성된다.

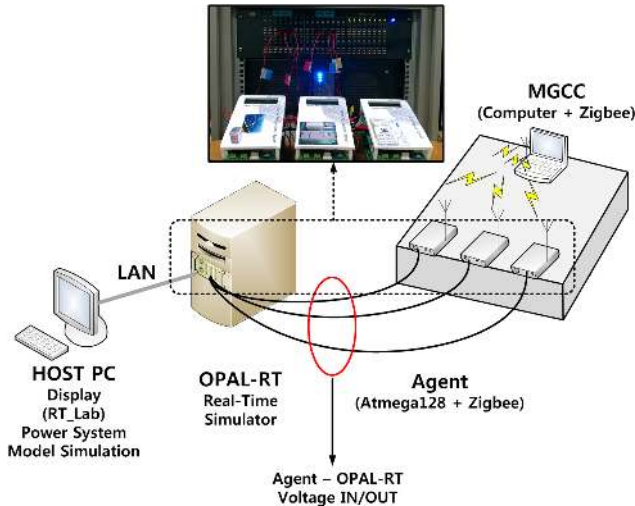


그림 11 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 데모 시스템 구성
 Fig. 11 Configuration of Demonstration System for Microgrid Distributed Intelligent Management System

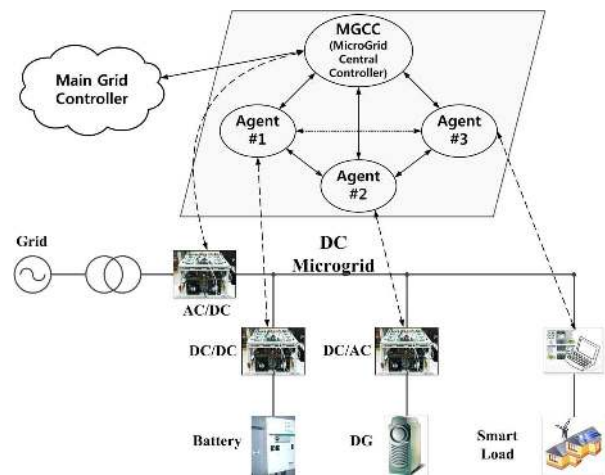


그림 12 마이크로그리드 구성과 분산전원 및 부하와 에이전트의 연계
 Fig. 12 Configuration of Microgrid and Interconnection between Agents and Devices

5.1 데모 시스템의 동작

그림 13은 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 동작 순서를 나타낸다. 관리시스템의 동작은 MGCC가 계통의 상태 및 마이크로그리드의 상태를 동기화하는 초기화과정을 수행하고 에이전트가 연계된 분산전원 및 부하의 참여를 기다린다. 에이전트가 동작하면 장치와의 초기화를 수행하고 플러그-앤-플레이 기능을 통해 마이크로그리드 네트워크에 등록된다. 등록과정을 수행한 후에 MGCC는 모니터링 기능과 EDR 기능 등의 관리시스템 기능을 수행한다. 각 에이전트는 연계된 장치의 정보를 주기적으로 수신하고 MGCC의 요청에 따라 데이터를 수신 및 장치에 제어 명령을 내린다.



그림 13 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 동작
 Fig. 13 Operation of Microgrid Distributed Intelligent Management System

5.2 마이크로그리드 네트워크 관리 프로그램

그림 14는 마이크로그리드 관리시스템의 네트워크 관리프로그램의 디스플레이 화면을 보여준다. MGCC 초기화 과정에서 인지한 MAC 주소를 바탕으로 MGCC의 네트워크 ID를 생성한 것을 표시한다. 관리시스템 네트워크에 참가한 에이전트를 나타내며 해당 에이전트의 초기 데이터(정격 유효전력 정격 무효전력, 정격 전압)를 열람할 수 있고 필요에 따라서 에이전트를 강제로 탈락시킬 수 있다.

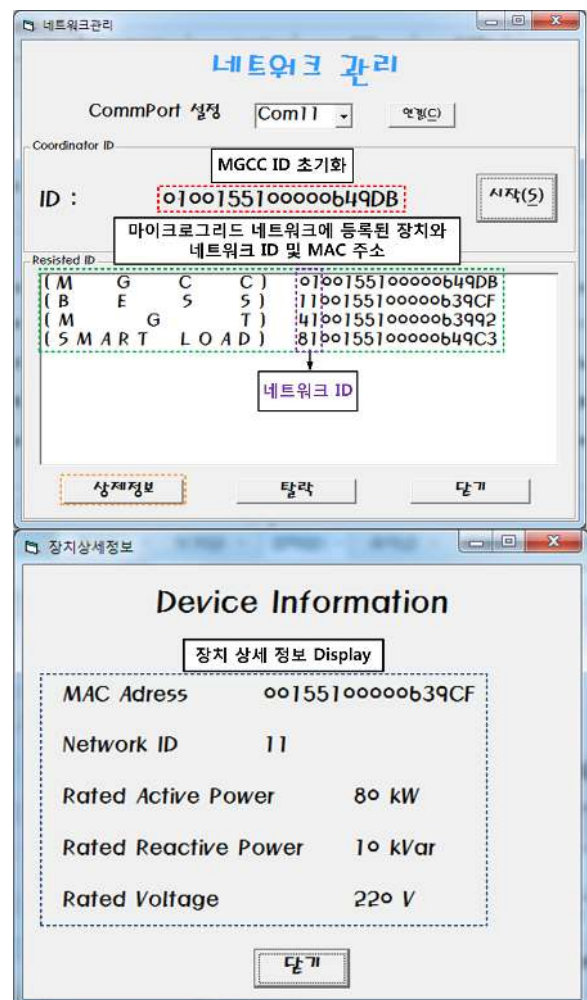


그림 14 마이크로그리드 네트워크 관리프로그램
 Fig. 14 Microgrid Network Management Program

5.3 마이크로그리드 모니터링 프로그램

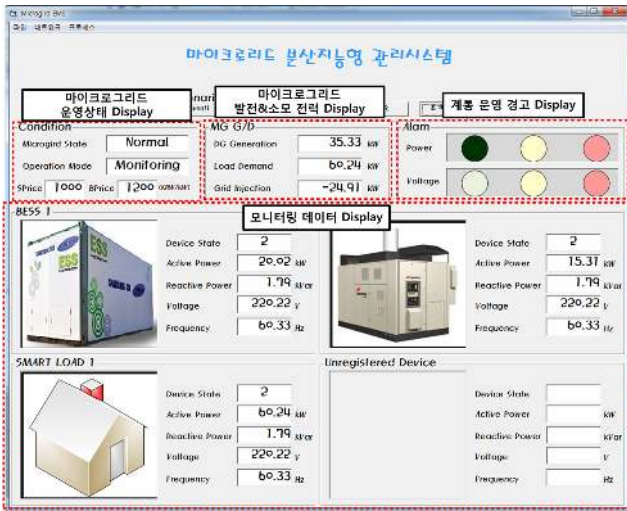


그림 15 마이크로그리드 실시간 모니터링 프로그램
Fig. 15 Microgrid Real-Time Monitoring Program

그림 15는 마이크로그리드 실시간 모니터링 프로그램을 나타낸다. 마이크로그리드의 상태와 동작 모드 그리고 전력 가격을 표시하고 분산전원에 의한 총 발전량과 부하의 소모량 그리고 계통전력의 유/출입 전력량을 나타낸다. 그리고 계통 상태 이상에 따른 알람을 나타내며 관리시스템의 네트워크에 등록된 분산전원 및 부하의 실시간 데이터를 모니터링 한다.



그림 16 에이전트-에이전트 간의 통신 확인
Fig. 16 Verify Communication Between Agents

그림 16은 모니터링 동작 중의 에이전트 - 에이전트 간의 통신을 나타낸다. 그림 16에서는 배터리 에너지 저장장치 에이전트가 모니터링 데이터를 송신하고 다른 에이전트들이 그 정보를 수신하는 모습을 확인할 수 있다.

5.4 Emergency Demand Response(EDR) 프로그램

그림 17은 본 논문에서 구현한 CNP를 EDR 상황을 통해 검증하는 알고리즘의 순서도이다. EDR 상황이 발생되면 MGCC는 모든 에이전트에 EDR 상황을 알린다. MGCC로 인해 EDR 상황을 인식한 에이전트는 담당할 수 있는 할당량에 대해 제안하고 MGCC는 모든 에이전트로부터 제안을 받은 후에 지능형 알고리즘을 이용해서 최적해를 도출하고 에이전트에 할당량을 수여한다. 하지만 최적해가 수요에 만족하면 에이전트에게 할당량을 수여하고 만족하지 못하면 에이전트와 협상과정을 거치게 된다. 3번의 CNP 과정 내에 수요를 만족하면 도출한 최적해를 에이전트에 수여하게 되고 만족 하지 못하더라도 도출 한 최적해를 에이전트에 수여하게 되고 EDR과정이 끝나게 된다.

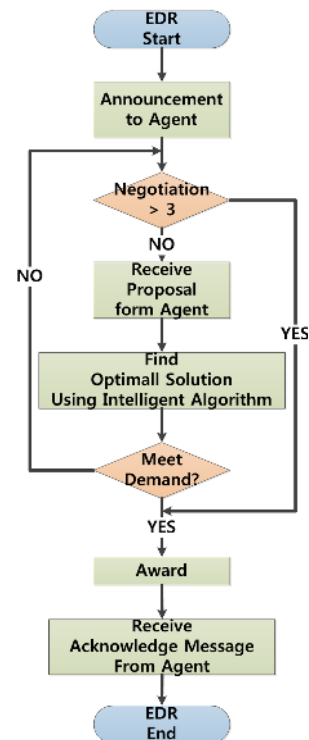


그림 17 EDR 순서도
Fig. 17 EDR Flow Chart

CNP 검증을 위한 EDR 시나리오는 다음과 같다. EDR 상황에서 추가전력을 필요하게 되고 MGCC는 이 문제를 해결하기 위해 EDR 알고리즘을 수행한다. 다음은 필요 전력량, 각 장치들의 초기 동작값, 에이전트들이 담당할 수 있는 제안값 그리고 MGCC에 의해 수여된 할당량에 의한 장치들의 최종 동작 값을 나타낸다.

- 필요 전력량 : 45(kW)
- 배터리 에너지 저장장치 :
초기값 = 20(kW), 제안값 = 10(kW), 최종값 = 30(kW)
- 마이크로가스터빈 :
초기값 = 10(kW), 제안값 = 5(kW), 최종값 = 15(kW)
- 스마트부하 :
초기값 = 60(kW), 제안값 = 30(kW), 최종값 = 30(kW)

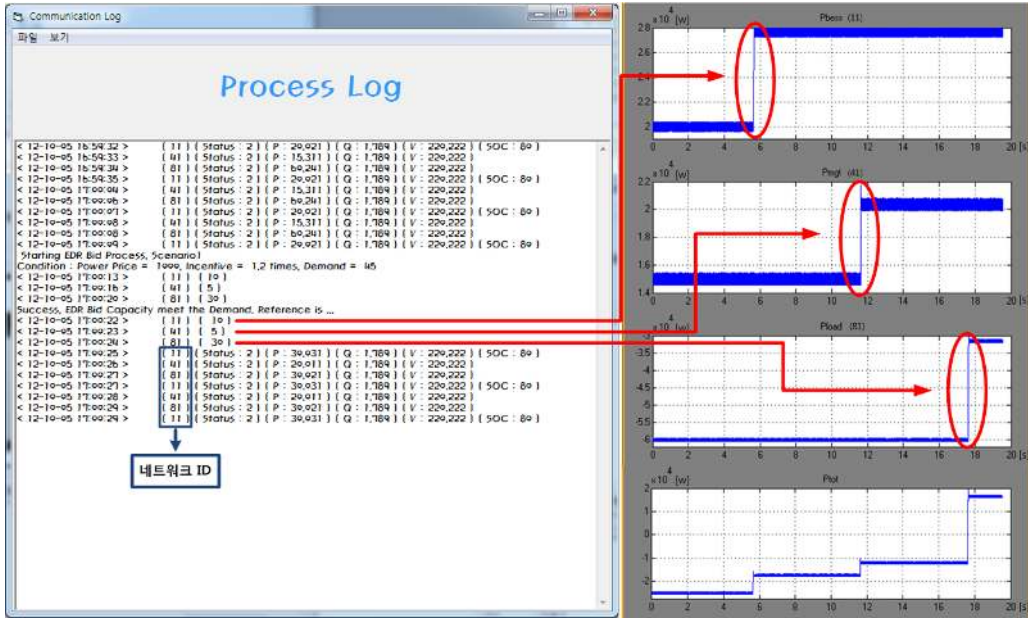


그림 18 EDR 결과에 따른 실시간 모델의 출력 변화 (첫 번째: 배터리 에너지저장장치, 두 번째: 마이크로가스터빈, 세 번째: 스마트부하, 가로축 : 시간(초) 세로축: 전력량(W))

Fig. 18 Output Change of Real-Time Model According to EDR Result

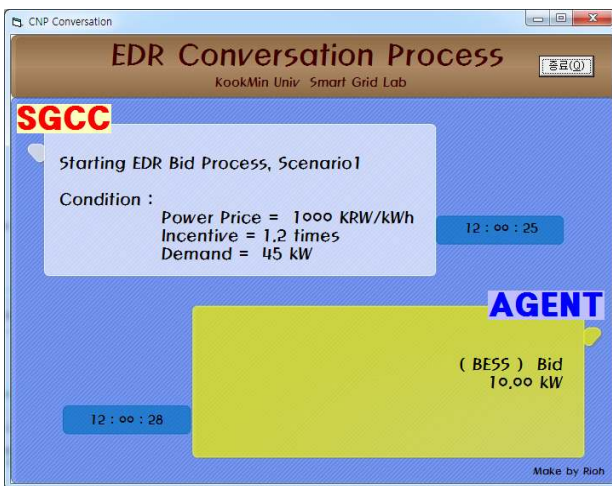


그림 19 EDR 대화창

Fig. 19 EDR Conversation Window

EDR 상황에서의 CNP 수행결과 분산전원인 배터리 에너지 저장장치와 마이크로가스터빈은 수여받은 할당량만큼 추가적으로 전력을 발전하고 제어 가능한 스마트 부하는 수여 받은 할당량만큼 부하를 줄여서 동작하게 된다. 그림 18은 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템에서 EDR을 수행한 결과가 실시간 시뮬레이션에 적용되는 것을 나타낸다. 그림 18의 왼쪽 그림에서 에이전트의 네트워크 ID는 플러그-앤-플레이 기능을 통해 부여되고 그 값은 배터리 에너지 저장장치-11, 마이크로가스터빈-41, 스마트부하-81로 부여된 것을 확인할 수 있다. 11번째 줄에서 19번째 줄은 EDR 수행 과정을 나타내고 이외의 줄에서 표시하는 내용은 네트워크 모니터링기능 수행에 따른 데이터를 나타낸다. 11번째 줄에서 EDR 상황이 발생했음을 알 수 있고 13번째 줄에서 15번째

줄은 에이전트들이 MGCC에 자신의 할당량을 제안한 양을 나타낸다. 16번째 줄에서 MGCC가 에이전트들의 제안량이 필요량을 충족시켰음을 나타내고 17번째 줄에서 19번째 줄은 MGCC가 에이전트들에게 수여하는 할당량을 나타낸다. 그림 18의 오른쪽 그림에서 에이전트들에 수여된 할당량이 실시간 시뮬레이션에 적용되어 출력이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 그림 19는 MGCC와 에이전트 간의 CNP 과정 수행 중에 데이터가 교환되고 있는 것을 표시하는 대화창을 보여준다.

6. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 관리시스템에 멀티에이전트 시스템을 적용한 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 실험실 환경에서의 파일럿 플랜트 개발에 대한 내용을 기술하였다. 파일럿 플랜트는 PC를 이용한 비주얼베이직 프로그램과 마이크로프로세서인 ATmega128을 사용하여 각각 MGCC 및 에이전트를 구성하였다. MGCC - 에이전트, 에이전트 - 에이전트 간의 통신은 무선 통신 모듈인 지그비를 이용하여 구성하였으며 같은 통신 프로토콜을 사용한다. 메시 네트워크 구성을 통해 네트워크의 모든 구성원이 동시에 선택적으로 데이터를 수신 할 수 있고 이로 인하여 주변 환경의 변화에 반응하고 서로 다른 에이전트들이 협력하여 문제를 해결 할 수 있는 멀티에이전트 시스템의 기반을 구축 할 수 있었다. 또한 데이터 교환 프로토콜 및 패킷 구조 설계 그리고 최적 통신 환경 구축을 하였으며 플러그-앤-플레이, CNP 기능을 개발하고 MATLAB기반의 실시간 시뮬레이터인 OPAL-RT를 이용한 HILS를 통해 모니터링과 EDR을 대상으로 기능을 검증하였다. 개발한 마이크로그리드 분산 지능형 관리시스템의 파일럿 플랜트는 최적의 통신 환경 구

축을 통해 실시간 운영이 가능하며 기능의 모듈화로 향후 기능의 추가가 용이하다. 개발한 파일럿 플랜트를 기반으로 분산제어 환경에서의 지능형 마이크로그리드 관리시스템 기능 구현 및 검증에 이용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신 산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었으며 (NIPA-2012-H0301-12-2007) 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0003555)

References

[1] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, P. Crossley, Microgrid and Active Distribution Network, The Institution of Engineering and Technology, 2009.

[2] Y. Sohn, "EMS: Energy Management System", Journal of the KIEE, vol. 21, no. 6, pp.3-11, 2007.

[3] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A.M. Khambadkone, "Multi-agent System for Energy Resource Scheduling of Integrated Microgrids in a Distributed System", Electric Power System Research, Vol. 81, pp.138 - 148, 2011.

[4] Aris L. Dimeas, Nikos D. Hatziargyriou, "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 1447 - 1455, 2005.

[5] S. Rahman, M. Pipattanasomporn and Y. Teklu, "Intelligent Distributed Autonomous Power Systems (IDAPS)", In Proc. 2007 the IEEE PES Annual General Meeting, 2007.

[6] M. Wooldridge, An Introduction to Multiagent Systems, John Wiley & Sons, LTD, 2008.

[7] J. Wu, "Contract Net Protocol for Coordination in Multi-Agent System", Intelligent Information Technology Application, Vol. 2, pp.1052 - 1058, 2008.

[8] Hak-Man Kim, Tetsuo Kino shita, "A Multiagent System for Microgrid Operation in the Grid-interconnected Mode", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, pp.246 - 254, 2010.

[9] Reid G. Smith, "The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, IEEE Trans. Comput., Vol. C-29, pp.1104 - 1113, 1980.

[10] Microgrid Technology for Smartgrids, KESRI, 2012

저 자 소 개



오 상 진 (吳 相 珍)

1988년 2월 26일생. 2012년 국민대학교 전자공학부 졸업. 2012년-현재 국민대학교 대학원 전자공학부 석사과정
 Tel : 02-910-5581
 Fax : 02-910-4449
 E-mail : rioh@kookmin.ac.kr



유 철 희 (柳 哲 熙)

1982년 6월 8일생. 2007년 국민대학교 전자공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전자공학부 석사 취득. 2009년-현재 동 대학원 전자공학부 박사과정
 Tel : 02-910-5048
 Fax : 02-910-4449
 E-mail : cheol21c@kookmin.ac.kr



정 일 엽 (丁 一 燁)

1976년 3월 16일생. 1999년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업. 2001년, 2005년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 석사, 박사 취득. 2005년-2006년 미국 버지니아텍 연구원, 2006년-2007년 ABB USCRC 방문연구원, 2007년-2010년 미국 FSU-CAPS 연구원, 2010년 9월-현재 국민대학교 전자공학부 조교수
 Tel : 02-910-4702
 Fax : 02-910-4449
 E-mail : chung@kookmin.ac.kr



임 재 봉 (林 在 鳳)

1952년 4월 14일생. 1974년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1976년, 1987년 동 대학원 전기공학과 석사, 박사 취득. 1975-1981년 충남대학교 전자공학과 조교수, 1988년 미국 텍사스 주립대학교 전자공학부 조교수, 1981-현재 국민대학교 전자공학부 정교수
 Tel : 02-910-4703
 Fax : 02-910-4449
 E-mail : ljb@kookmin.ac.kr