

스마트 그리드를 위한 무선 기반의 수요 반응 기능을 가지는 조명 제어용 장치 개발 및 실험적 평가

| |
|---------|
| 논 문 |
| 60-6-22 |

Development and Experimental Evaluation of the Wireless Illumination Controller with Demand Response for the Smart Grid

최인호* · 이정환** · 홍승호†
(In-Ho Choi · Jung-Han Lee · Seung-Ho Hong)

Abstract - Recently, a lot of research for the smart grid technology have been carried out to achieve energy efficiency for the electronic products. In order to practically apply this study, smart instruments which are capable of the AMI (Advanced Metering Infrastructure) and DR (Demand Response) function are necessary. However, it is difficult to apply the function of the smart grid to the electronic product that cannot support the smart grid. Accordingly, the efficient use of electric energy is impossible. In order to solve this problem, the electronic product has to be changed into the exclusive electronic product supporting smart grid technology or the smart controller has to be attached the outside of the device. In this study, we developed the smart controller for connecting the electric appliances to the smart grid system. It can be attached to the illumination and the smart grid-based lamp control system at home. We additionally designed the message frame and the protocol to operate the smart controller with the AMI based EMS (Energy Management Server). We developed an experimental system to practically verify functions of the smart controller which is attached to the lighting device. From the system, we showed that the electric source of the illumination can be controlled according to the load change and saved energy effectively. We also confirmed the structural benefit and the energy-efficient effect through the verification of the smart controller.

Key Words : Smart grid, DR, Smart controller, Energy efficiency

1. 서 론

미래의 에너지 고갈을 대비하여 최근 정부에서 추진하고 있는 '저탄소 녹색 성장'은 기존의 화석 연료 소모를 최소화하고 에너지의 효율적 사용을 통해 에너지 사용량의 절감 및 신재생 에너지 개발, 온실가스 및 폐기물 배출을 억제하는 것을 주요 내용으로 하고 있다. 화력이나 원자력 발전소에만 전기 에너지 생산을 의존하는 시절에는 사용량의 증가에 따라 거대한 발전소를 구축해야 했으나 IT기술의 발달로 인해 기존 전력망에 IT 기술을 접목하여 전력 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환함으로써 에너지 효율을 최적화하는 스마트 그리드(Smart Grid) 기술이 최근 개발 및 논의되고 있다[1].

스마트 그리드를 통해 기존 전력망의 낭비요소를 줄이고 전력 효율화의 극대화를 모색할 수 있는데, 이러한 스마트 그리드 기술이 빌딩/가정에서 적용되기 위해서는 에너지를 공급하는 공급자가 사용자의 에너지 사용량을 원격에서 자동으로 검침하고 사용자에게 에너지 공급량과 이에 따른 요금 정보 등의 서비스를 실시간으로 제공하기 위하여

AMI(Advanced Metering Infrastructure)가 필요하다. 그리고 전기 에너지 사용 부과금이 최고치일 때 가정 내에서 사용되는 전기 사용량을 줄여 에너지의 효율적 관리를 하기 위한 EMS (Energy Management Server)와 DR(Demand Response)기능을 갖는 스마트 기기들이 필요하다. 이와 같은 인프라를 구축하기 위해서는 빌딩이나 가정에서 소모되는 전력을 측정하고, 소모되는 부하를 제어하는 것과 같이 양방향 전력 정보를 교환할 수 있는 HAN(Home Area Network)이 필요하다[2]. 앞에서 언급한 바와 같이 가정 및 빌딩에서 스마트 그리드를 이용한 에너지의 효율적 관리를 위해 HAN에 대한 요구가 증대하면서, 통신 기기들 간의 배선을 배제해 가까운 거리에 있는 각종 정보처리 기기들 간에 정보를 교환의 필요성이 부각되는데, 이를 해결할 수 있는 방법으로 근거리 무선통신기술이 주목 받고 있다. 많은 근거리 무선통신기술 중에서 특히 IEEE 802.15.4 기반으로 저속 근거리 개인 무선통신의 국제 표준인 ZigBee는 스마트 에너지 기반의 가정과 같은 상업 환경을 위한 수요 반응과 부하 관리용 '스마트 에너지 프로파일'을 규격화하고 이에 대한 어플리케이션을 제공하고 있어 최근 미국 스마트 그리드 상호 운용성 프레임워크에 표준으로 포함되었다[3].

본 연구에서는 빌딩 또는 가정에서 사용되는 조명기기에 스마트 그리드 기술을 적용하여 에너지 사용을 효율화하는 방법을 제안한다. 최근 에너지 절약에 관한 연구 결과에 의하면 생산된 전력의 40%가 조명장치에 의해 사용되고 있고 이를 관리하기 위한 시스템을 이용하면 45%이상의 에너지

* 정 회 원 : 한양대 전자전기제어계측공학과 박사과정

** 정 회 원 : 한양대 전자전기제어계측공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 한양대 전자전기제어계측공학과 교수

E-mail : shhong@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2010년 11월 2일

최종완료 : 2011년 5월 19일

절감효과를 볼 수 있다고 한다[4][5]. 따라서 빌딩 또는 가정에서 에너지의 효율적 사용을 목적으로 스마트 그리드를 조명기에 적용하기 위해서는 DR기능을 가지는 스마트 컨트롤러가 내장된 조명기가 필요하다[6]. 그러나 이미 생산되거나 스마트 그리드를 지원하지 않는 조명 기기는 스마트 그리드를 적용하기 어려우며, 이에 따라 효율적인 전기 사용이 불가능하다. 이를 해결하기 위해서는 조명기기를 스마트 그리드 기술을 적용한 전용 조명기로 바꾸거나 외부에 스마트 컨트롤러를 추가 구입해서 부착시켜야 한다. 조명기의 전면적 교체는 비용이 많이 발생해서 사용자가 선호하지 않으므로 조명기용 스마트 컨트롤러를 구입하여 부착시키는 것이 매우 경제적이고 자원의 재활용이라는 측면에서 효율성을 가진다.

본 논문에서는 위에 언급한 문제점을 해결하기 위해 가정에서 사용되는 전기 제품을 스마트 그리드 시스템에 연결하기 위한 스마트 컨트롤러를 개발하고, 이를 조명에 부착시켜 빌딩 또는 가정용 스마트 그리드 기반 조명 제어 시스템을 제안한다. 이를 위해 스마트 컨트롤러를 설계, 제작하고 AMI기반의 EMS와 연동하기 위해 메시지 프레임과 프로토콜을 설계하였다. 그리고 스마트 컨트롤러를 실제 조명에 부착시켜 데모 시스템을 구현하였다. 이 데모 시스템을 이용하여 부하 증가에 따른 조명의 전원을 제어하여 에너지 절약 효과를 확인하고자 한다. 상기와 같은 검증을 통해 스마트 컨트롤러를 구성할 때 구조적 이점과 에너지의 효율적 운용 효과에 대해 검증하고자 한다.

제 2 장에서는 스마트 그리드 및 관련 기술에 대해 설명하고 제 3 장에서는 스마트 컨트롤러의 구조 및 소프트웨어, 프로토콜을 제안한다. 제 4 장에서는 이를 조명에 연결하여 성능 및 스마트 그리드 요금제 적용으로 인한 에너지 절약 효과를 검증하고 5 장에서 결론을 내린다.

2. 본 론

2.1 관련 연구 및 동향

최근 전력 에너지의 사용량이 폭발적으로 증가되고 있는 상황에서 이를 효율적으로 사용하고 절감하기 위해 전기 요금이 피크전력 중심으로 실시간 연동되는 요금제가 도입되고 있다[7]. 이에 따라, 소비자는 에너지의 효율적 사용을 위해 최적의 요금 시간대를 찾아 에너지를 사용해야 한다. 예를 들면, 가정에서 세탁기는 전기요금이 가장 싼 시간대에 맞춰 작동해야 하고 전기 자동차는 주간에 주차를 해도 심야 시간에 맞춰 싼 요금으로 충전을 하게 된다. 그러나 이와 같은 일을 소비자가 일일이 제어하기는 어려우므로, 에너지의 사용을 전체적인 전기에너지의 수요 및 공급에 따라 자동으로 제어하는 기술이 연구되고 있다[8].

상기 기술 외에도 미국 Google사의 "Power Meter"와 같은 수요 정보 시스템을 통해 현재 사용하고 있는 전기량과 같은 상세한 정보를 전기 에너지를 사용하는 사용자에게 제공함으로써 전기 요금 및 사용량을 사용자 스스로 줄이도록 유도하는 시스템들이 개발되고 있으며[9], 이러한 정보를 바탕으로 빌딩 또는 가정에서 사용되는 전기 제품들의 효율적 에너지 사용 및 절감을 위해 스마트 그리드 기반의 제품들

역시 개발되고 있다[10]. 앞에서 나열한 기술과 제품들로 구성된 시스템들과 전기 제품들이 서로 정보를 교환하고 에너지 사용의 효율적 관리를 위해서는 유무선 네트워크 역시 필수적으로 요구되지만, 유선 방식에 비해 스마트 그리드 기반의 전기 제품들 사이에서 통신을 위한 배선을 가능한 배제하고, 가까운 거리에 있는 각종 정보처리 기기들 간에 정보를 교환하기 위해 근거리 무선통신기술인 ZigBee가 주목받고 있다. ZigBee는 설치나 관리가 쉽고 시스템 구조가 간결하여 홈오토메이션과 유비쿼터스 센서네트워크 환경 구축에 중추적 역할을 담당하고 있다. 이러한 장비들 간의 호환성을 유지하기 위해 미 상무부 산하 기술표준연구원(National Institute of Standards and Technology : NIST)은 대형 전기 장비에서부터 전기자동차, 소형 가전에 적용하기 위한 스마트 그리드 기술 호환성에 관한 가이드라인을 제시하였다[11].

2.2 AMI & DR

AMI는 가스, 전기, 열, 온수, 수도 등과 같은 유틸리티를 공급하는 회사가 사용자의 에너지 사용량을 원격에서 자동으로 검침하고 사용자에게 정확한 에너지 공급과 에너지 과금 등의 서비스를 제공한다. 또한 스마트 미터를 기반으로 양방향 통신을 통해 사용자와 생산자 간에 실시간 정보 소통이 가능하여 다양한 서비스를 제공할 수도 있다. 이 방법은 기존의 인력에 의한 검침에 따른 검침 효율 및 정확성 등을 개선하기 위해 제안된 방법이다. AMI는 수요 정보 시스템으로서 전기 에너지 절감 및 효율화 수단인 수요반응을 구현하기 위한 인프라이기 때문에 스마트 그리드의 중요한 구성요소로 인식되고 있다[12].

수요반응(Demand Response)은 스마트 그리드를 구성하는 핵심 요소 중 하나이다. 시간대별 요금 차별화를 통해 소비자가 전력사용 패턴의 자발적 변화를 유도하도록 수요 및 공급에 따른 전기 요금 정보를 스마트 그리드에 적용할 경우, 수요 자원에 대한 경제적 가치와 운영 특성을 전력시장에 효과적으로 반영할 수 있다. 또한 경제성 기반 수요반응 관련정보는 다양한 시장참여자의 요구를 만족시키는 다각화된 스마트 기기에 제공됨으로써 소비자의 편의 및 선택권의 폭을 넓히는 역할을 한다[13][14].

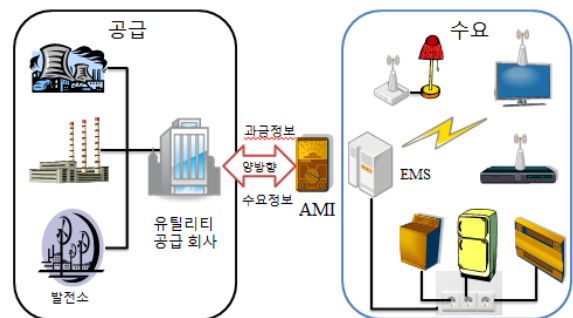


그림 1 스마트 그리드 기반의 에너지 관리 모형
Fig. 1 The model of energy control smart grid based in Home

그림 1은 스마트 그리드가 빌딩 또는 가정 내 적용에 대한 구조를 보여 준다. 빌딩 또는 가정 내에는 에어컨, TV, 냉장고 등 다양한 전기 제품들이 설치되어 있다. 이러한 제품들은 ZigBee 나 PLC(Power Line Communication)와 같은 HAN을 이용하여 AMI기반의 EMS에 연결된다. EMS는 가정에서 사용되는 전기 제품에서 소모되는 전기 에너지를 파악하고 AMI를 통해 전기 공급회사에 실시간 양방향 통신을 이용하여 전달한다. 그리고 AMI는 전기 공급 회사로부터 전기 에너지 요금 정보를 전달 받고, EMS는 이 요금 정보에 의해 가정 내에서 사용되는 전기 제품의 사용을 제한하는 기능을 수행한다. 전기 요금은 발전소의 전기 에너지 공급량과 AMI로부터 전달되는 수요량을 파악하여 전기 공급 회사에 의해 결정된다.

2.3 스마트 그리드 기반의 전기 요금 체계

스마트 그리드 환경에서의 전기 요금은 전체적인 전기 공급과 사용자의 수요에 의해 가격이 시간대 별로 차등 책정된다. 이를 이용하면 전기 에너지의 정확한 생산 비용을 소비자에게 전달할 수 있다. 그리고 이를 통해 사용자로 하여금 전기 에너지의 소비를 자발적으로 감소시키거나 조절시킬 수 있다.

3. DR 기능의 스마트 컨트롤러

3.1 스마트 컨트롤러의 요구사항 분석

AMI 기반의 에너지관리 서버나 미터는 빌딩 또는 가정 내의 다양한 기기를 네트워크로 연결하여 제어하고 모니터링 하는 시스템이다. 사용자는 AMI 기반의 서비스를 통해 전기 에너지의 효율적 사용을 위한 다양한 부가 서비스를 제공받는다. 이를 위한 AMI기반의 에너지 관리 시스템에 대한 시장의 요구사항은 다음과 같다.

- 에너지 수요 파악을 위한 일정 시간 단위의 검침 지원
- 시간대별 사용료에 차등을 주는 검침 서비스 지원
- 집중 사용 시간대 분석 및 에너지 사용량에 대한 예측 기능
- 전력 수요에 대한 분산 기능
- 사용자가 에너지 사용량을 검색할 수 있는 기능

위의 요구사항을 이용하여 스마트 컨트롤러의 구조 및 역할에 대해 다음과 같이 정의하였다.

- AMI에 연결할 수 있는 양방향 네트워크 지원 장치
- 다양한 전기 요금 형태에 따른 에너지 사용을 제한할 수 있는 부하 관리 장치
- 전기 제품의 에너지 소모량을 파악할 수 있는 기능 및 장치
- 배터리 없이 상용 전원을 이용한 전원 공급 장치
- 조명의 조도를 제어할 수 있는 가변 출력 장치
- 주변 환경 요소(온도/습도/조도)를 반영할 수 있는 센서를 설치하기 위한 하드웨어 장치

- 사용자가 네트워크를 통해 컨트롤러의 정보를 확인할 수 있는 장치

본 논문에서는 상기 언급된 분석 및 정의를 기반으로 실제 하드웨어와 소프트웨어 그리고 스마트 그리드 환경에서의 운용 방안을 제시하였다.

3.2 스마트 컨트롤러의 하드웨어 설계

조명 및 빌딩 또는 가정에서 사용되는 전기 제품 제어용 스마트 컨트롤러를 설계할 때 상기의 요구사항을 반영하려면 전기 제품에 대한 에너지 사용량을 분석하기 위한 전력을 측정하는 부분이 필요하다. 뿐만 아니라, 에너지 수요나 관리를 위해 실시간으로 데이터를 갱신할 수 있어야 하며, 네트워크를 통해 전원을 제어할 수 있어야 한다. 그 외에도 사용자가 현재의 상태를 쉽게 파악 할 수 있도록 디스플레이 기능 및 센서를 이용하여 다양한 환경에 적용 가능하도록 인터페이스 부분이 필요하다. 이와 같은 기능을 만족시키기 위해 스마트 컨트롤러를 그림 2와 같이 설계하였으며 실제 구현한 컨트롤러를 그림 3에 나타내었다.

그림 2는 스마트 컨트롤러의 구조를 보여준다. 스마트 컨트롤러는 디지털 부분, 아날로그 부분과 전원/신호 분리 부분으로 나뉜다. 아날로그 부분은 직접적으로 교류 전류를 이용하는 전기 제품에 연결된다. 디지털 부분은 스마트 컨트롤러를 작동시키는 통제 장치를 포함한다. 전원 및 신호 분리 부분은 아날로그부가 디지털 부분의 동작을 방해하지 않고, 안정적인 동작을 위해 접지와 신호를 분리하였다. 그림 3은 실제 구현된 스마트 컨트롤러 사진이다.

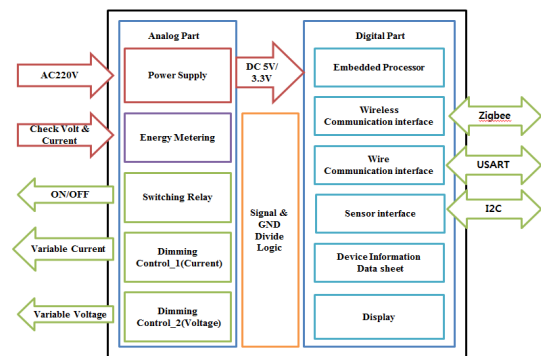


그림 2 스마트 컨트롤러의 구조
Fig. 2 The structure of smart controller

3.2.1 아날로그 부분 설계

- ◆ 전원 공급 장치 (Power Supply) : 스마트 컨트롤러의 디지털 부분에 동작 전압을 공급하기 위해 상용 전원인 교류(220V)를 DC5V와 3V로 변환시킨다.
- ◆ 전력 측정 (Energy Metering) : DR에 연결된 전기 제품의 사용 전류와 전압을 측정하여 현재 사용되고 있는 전력량을 계산한다.
- ◆ 전원 제어 장치 (Switching Relay) : 스마트 컨트롤러에 연결된 전기 제품의 전원을 "ON/OFF" 제어한다.

- ◆ Dimming 제어 : 조명과 같은 전기 제품은 밝기 조절을 통해 에너지의 효율적 운용이 가능하다. 이러한 조명의 밝기를 제어하기 위해 전압과 전류를 각각 가변적으로 출력한다.

3.2.2 디지털 부분 설계

- ◆ 내장 프로세서(Embedded Processor) : 스마트 컨트롤러의 동작을 제어하기 위해 8비트 코어의 마이크로프로세서를 사용한다. 마이크로프로세서와 주변 구성 회로 소자들은 SPI 통신을 사용하여 데이터를 교환한다.
- ◆ 무선 네트워크 (Wireless Communication Interface) : HAN을 구성하기 위해 ZigBee 무선 네트워크 모듈을 설치할 수 있다.
- ◆ 유선 네트워크 (Wire Communication Interface) : PLC와 같은 유선 네트워크 모듈 또는 ZigBee 외에 다른 무선 네트워크 모듈을 연결하기 위해 RS232 방식의 인터페이스를 설치하였다.
- ◆ 장치 정보 데이터 시트 (Device Information Data Sheets) : DR 컨트롤러에 연결된 전기 제품의 정보를 다루기 위한 디지털 방식의 명세서이다. DIDS는 제품의 제조사, 명칭과 같은 정보를 Flash memory에 내장하고 있다.
- ◆ 센서 인터페이스(Sensor Interface) : 조도 또는 온도/습도와 같은 외부 환경에 대한 정보를 수집하기 위해 추가적인 센서를 설치할 수 있다. 이와 같은 센서 인터페이스로서 I2C방식의 인터페이스가 구현되어 있다.
- ◆ 디스플레이(Display) : 사용자가 스마트 컨트롤러의 동작 상태 확인과 전기 제품의 전력을 확인할 수 있도록 LCD가 제공된다.



그림 3 실제 구현된 스마트 컨트롤러 사진
Fig. 3 The figure of real smart controller

3.2.3 전원 및 신호 분리 부분 설계

아날로그 부분의 입력 전압은 AC220V와 같은 고전압이고, 디지털 부분에 사용된 전압은 DC 5V 또는 3.3V의 저전압이다. 높은 전압차가 있기 때문에, 디지털 부분과 아날로그 부분은 동작에 있어서 고장 또는 신호 왜곡의 원인이 될

수 있다. 이 문제를 방지하기 위해, 전원과 접지는 DC-DC 컨버터를 이용하여 분리하고, 포토-커플러를 이용하여 신호를 분리하였다.

3.3 스마트 컨트롤러의 소프트웨어 설계

그림 4를 보면 스마트 컨트롤러 소프트웨어는 Main Loop 부분과 Operation 동작부로 구성된다. Main Loop에서는 동작 전원이 스마트 컨트롤러에 인가되는 동시에 초기화가 실행된다. 초기화가 끝나면 외부 신호에 대한 인터럽트가 활성화된다. 수신 데이터는 네트워크 모듈에 연결된 UART로부터 기다려진다. 인터럽트는 네트워크 모듈로부터 메시지를 수신하면 비활성화 시킨다. 전달된 메시지의 내용을 분석하여 스마트 컨트롤러의 해당 기능을 동작시킨다. 각 동작 단계별 수행 후 결과 데이터는 메시지 프레임으로 만들어진다. 메시지 프레임은 네트워크 모듈을 통하여 EMS에게 전해진다. Operation 소프트웨어는 전력 측정, 전력 제어와 메시지 프레임 작성으로 구성된다. 전력 측정은 정기적으로 MCU와 SPI 커뮤니케이션으로 연결된 전력 측정 소자로부터 데이터를 전달 받는다. 전력 제어는 MCU의 입출력 포트에 연결된 릴레이를 작동시킨다. 작동 이벤트는 네트워크로부터 전달된 명령을 기반으로 전기 제품의 "ON/OFF"를 제어한다. 상태 및 동작 데이터는 MCU에 저장되고, 정기적으로 메시지 프레임 형태로 저장된다. 저장된 데이터는 명령에 의해 EMS로 전달된다.

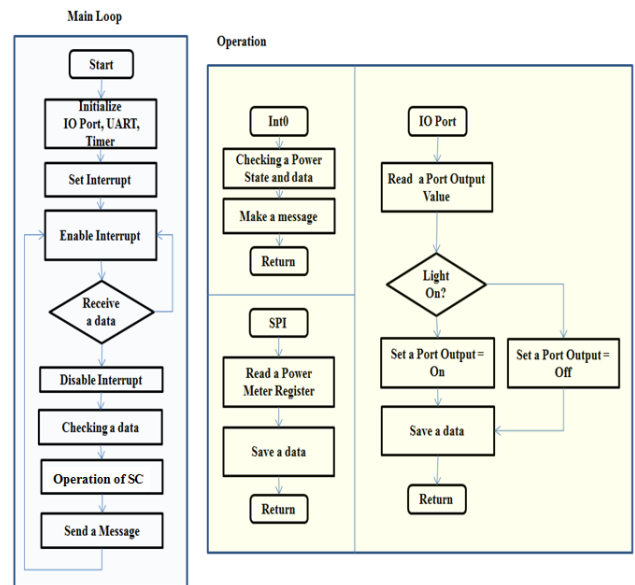


그림 4 스마트 컨트롤러의 소프트웨어 동작
Fig. 4 The operation of smart controller

3.4 EMS와 스마트 컨트롤러 간의 프로토콜 설계

현재 스마트 그리드 기술을 빌딩 또는 가정에 적용하기 위해 다양한 표준들이 논의되고 있다. NIST에서는 스마트 그리드 표준 및 호환성에 대한 가이드라인을 제시하고 있으나 아직 공식적인 표준안은 준비 중에 있다. HAN의 경우에도 PLC, ZigBee, Bluetooth 등 다양한 네트워크 기술이 제

안되고 있으므로, 본 스마트 컨트롤러는 다양한 네트워크 모듈이 연결 가능하도록 RS232 인터페이스를 제공하고 있다. 뿐만 아니라, 네트워크 모듈을 이용하여 스마트 컨트롤러를 제어하기 위해서는 패킷의 구조 및 프로토콜에 대한 정의가 필요하므로 본 논문에서는 통신을 위한 프레임 구조와 프로토콜을 제안하였다. 이와 같은 결과를 이용하면 컨트롤러는 네트워크 프로토콜 표준에 대한 유연한 적용이 가능하고, 호환성을 유지시킬 수 있다. 따라서 표준을 이용한 인터페이스 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 스마트 그리드 기반의 요금체계에 대응하여 EMS와 스마트 컨트롤러 간의 프로토콜을 설계하기 위해 AMI 규약[15] 및 에어컨 관리 프로토콜[16]을 이용하여 새롭게 설계하였다. 새롭게 정의된 프로토콜 패킷의 기본 구조를 표 1에 도식화 하였다. 패킷은 크게 Header, Message, Tail로 구성되어 있다. Header에는 패킷의 시작을 알리는 값(0xFF), 목적지 주소(Destination Address(D/A), 소스 주소(Source Address: S/A), 패킷의 길이(LEN: STX ~ETX의 길이), 패킷의 종류(Packets Identifier: P/D)로 구성되어 있다. 패킷의 종류에는 명령 패킷(0x01), 응답 패킷(0x02), 에러 패킷(0x03)으로 되어 있다.

Message의 종류로는 커맨드(CMD), 데이터(DATA)가 있으며, Tail은 패킷 에러 검사를 위한 CRC16 및 패킷의 끝을 알리는 값(0xEE)으로 되어 있다.

표 1 스마트 컨트롤러의 프레임 구조

Table 1 The structure of the frame in smart controller

| Defi ne | Header | | | | | Message | | Tail | |
|------------|--------|-----|-----|-----|-----|---------|-----------|------|------|
| | STX | D/A | S/A | LEN | P/I | CMD | DATA | CRC | ETX |
| Byte | 0xFF | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1... N | 2 | 0xEE |

스마트 컨트롤러의 주목적은 전기 제품의 부하를 제어하고, 에너지 소비량을 파악하여 EMS에 전달하는 것이다. 상기 기능은 ZigBee Alliance에서 제공되는 ZigBee Smart Energy Profile (SEP)에서 정의되어 있다[17]. 프로파일에서 보면 스마트 컨트롤러는 다음과 같은 기능을 명령으로 받을 수 있다.[표 2]

위에서 제시된 프로파일의 명령어를 보면 에너지 요금과 수요응답에 따른 부하제어, 전력 측정 및 메시지 교환과 같은 서비스를 지원한다. 본 논문에서 제작된 스마트 컨트롤러는 상기 언급된 명령어를 기반으로 스마트 컨트롤러용 명령어를 구성하였다. 이러한 명령어들은 표 1에 제시한 스마트 컨트롤러 프레임을 통하여 전송된다.[표 3]

표 2 SEP 기반의 스마트 컨트롤러 기능

Table 2 The function of smart controller based on SEP

| 명령어 (Cluster) | 기능 |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Price | 유틸리티 회사에서 부과되는 요금 |
| Demand Response & Load Control | 사용되고 있는 에너지 소비 및 요금에 따른 부하 제어 |
| Simple Metering | 현재 소비되고 있는 에너지량 |
| Message | 현재 사용되고 있는 요금제 정보를 알림 |

표 3 스마트 컨트롤러의 명령어

Table 3 The command of smart controller

| CMD | P/I | DATA | 설명 |
|------|------|-------------------|--|
| 0x90 | 0xD1 | Null | 스마트 컨트롤러 부착된 전기 제품 상태 요청 |
| | 0xD2 | 0.0 0.0 0.0 0.0 X | 스마트 컨트롤러 부착된 전기 제품 상태 X 값이 "0" OFF, "1" ON |
| | 0xD3 | Null | 무응답 시 error |
| 0x91 | 0xD1 | 0.0 0.0 0.0 0.0 X | 스마트 컨트롤러 부착된 전기 제품 제어 명령 X값이 1 이면 "On", 0 이면 "OFF" |
| | 0xD2 | 0.0 0.0 0.0 0.0 X | 스마트 컨트롤러 부착된 전기 제품 상태 1 이면 "On", 0 이면 "OFF" |
| 0x92 | 0xD1 | Null | 스마트 컨트롤러 부착된 전기 제품의 전기 소모량 요청 |
| | 0xD2 | XX XX XX XX XX | 소비 전력량 전달 (0~ 256W) |
| | 0xD3 | Null | 무응답 시 error |
| 0x93 | 0xD1 | XX XX XX XX XX | EMS로부터 가격 정보를 브로드 캐스팅 전달 요금 정보 (1KW = XX원) |
| 0x94 | 0xD1 | 1.1 1.1 0 XX XX | EMS로부터 가격 정보를 브로드 캐스팅 전달 요금 상태 (010 = High, 0 1.1 = Medium 원, 1 0.0 = Low) |

3.5 EMS와 스마트 컨트롤러간의 부하 제어 절차

AMI기반의 EMS와 스마트 컨트롤러간의 제어 절차는 그림 5와 같다.

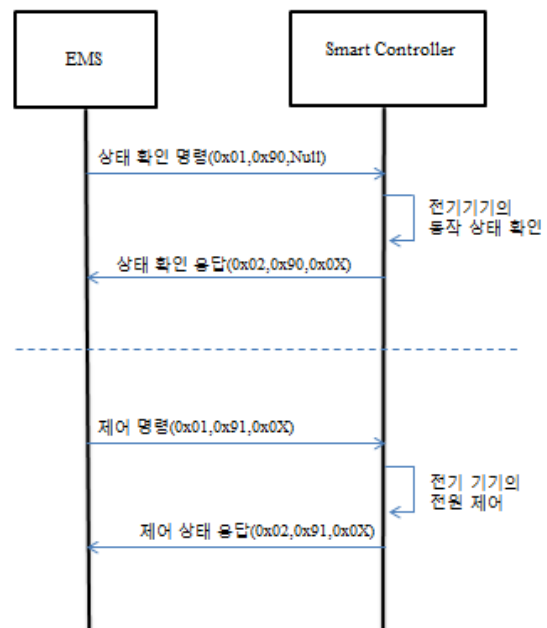


그림 5 제어 및 상태 명령 전달 절차
Fig. 5 The sequence of control and checking state

사용자는 전기 제품의 상태를 확인하기 위해 EMS를 통해 스마트 컨트롤러에 상태확인 요청의 메시지(명령 패킷:0x01, 명령:0x90, DATA:Null)를 전달한다. 스마트 컨트롤러는 해당 전기 제품의 전원 ON/OFF 상태를 확인한 후 응답 메시지(명령 패킷:0x02, 명령:0x90, DATA:0x0X)를 EMS 전달한다. 일정 시간이 지나거나 스마트 컨트롤러의 기능이 정상적으로 동작 하지 않아 응답 메시지가 생성되지 않으면 해당 스마트 컨트롤러는 오류 메시지를 EMS에게 보고한다. 상태가 확인되면 사용자는 EMS를 통해 전기 제품의 전원을 제어하는 메시지를 스마트 컨트롤러에게 전달(명령 패킷:0x01, 명령:0x91, DATA:0x0X)한다. 스마트 컨트롤러는 해당 메시지의 명령을 파악하여 전기 제품을 동작 시킨 후 확인 응답 메시지(명령 패킷:0x02, 명령:0x91, DATA:0x0X)를 생성 후 EMS에게 전달한다.

3.6 EMS와 스마트 컨트롤러간의 에너지 관리 제어 절차

EMS는 주기적으로 전기 요금 정보를 브로드 캐스팅 방식으로 스마트 컨트롤러에게 전송한다. 스마트 컨트롤러는 요금 정보의 종류에 따라 전기 제품의 전원을 제어한다. EMS는 전기 요금 정보 전달 후 전력 소모 정보를 요청한다.

그림 6에서 AMI/Utility는 가격 정보를 EMS에게 전달한다. 전달된 정보는 현재 유틸리티 회사로부터 책정되고 AMI를 통해 전달된 요금 정보 또는 상태(Price State)를 포함하고 있다. EMS는 전달 받은 요금 체계와 가격 정보 메시지(<예> 요금 상태 요금제: 명령 패킷:0x01, 명령:0x94, DATA:price state)를 스마트 컨트롤러에게 전달한다. EMS는 전기 제품에서 소모되는 전기 에너지를 확인하기 위해 스마트 컨트롤러에 소모 전력 확인 요청 메시지(명령 패킷:0x01, 명령:0x92, DATA:Null)를 전달한다. 스마트 컨트롤러는 해당 전기 제품의 에너지 소모량을 확인한 후 응답 메시지(명령 패킷:0x02, 명령:0x92, DATA:소모되고 있는 에너지양)를 EMS 전달한다. EMS는 스마트 컨트롤러부터 전달된 전기 에너지를 합산하여 전기 에너지 총 소모량을 AMI를 통해 유틸리티 회사에 전달한다.

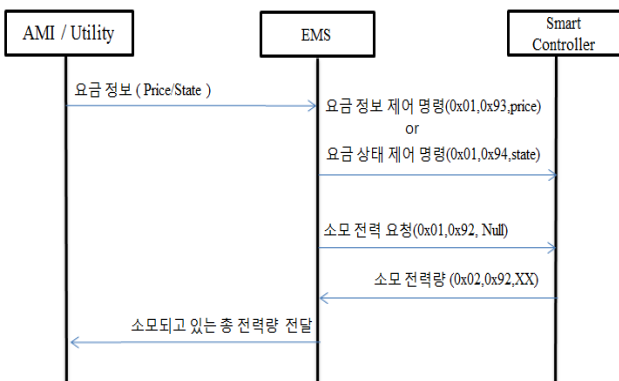


그림 6 요금 정보 및 전력량 파악 절차
Fig. 6 The sequence of price and energy consumption

4. 실 험

4.1 데모 시스템 구성

본 실험은 스마트 컨트롤러를 이용하여 스마트 그리드 기반의 요금제를 빌딩 또는 가정에 적용하기 위한 데모 시스템을 구성하였다. 그리고 사용되는 조명의 전기 에너지를 효율적으로 사용하는 상황을 가정하였다. 빌딩 또는 가정에서 사용되는 조명은 대표적으로 형광등, 백열등, 할로겐 조명이 주로 사용되므로 이들 조명을 제어하기 위한 데모시스템을 구성하였다.

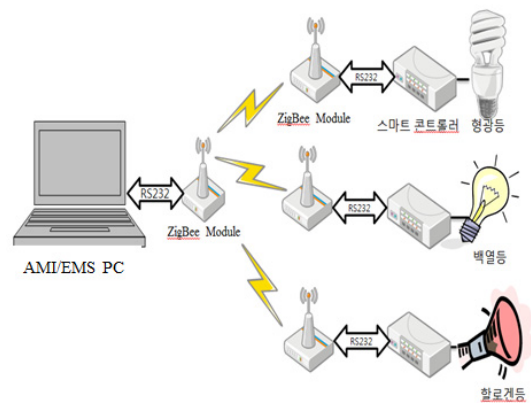


그림 7 조명 제어 데모 시스템의 구성
Fig. 7 The composite of demo system

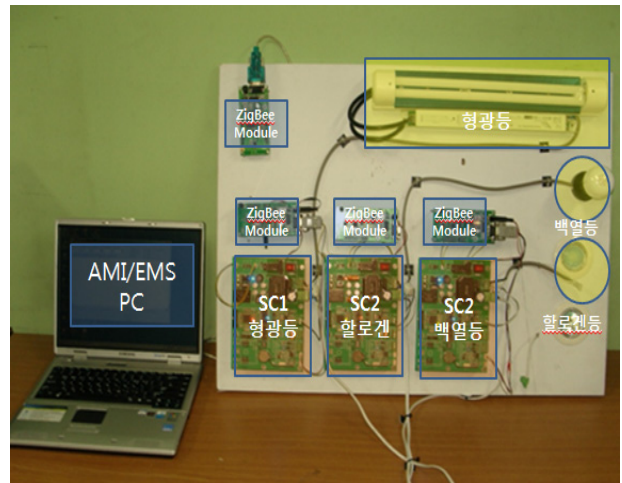


그림 8 조명 제어를 위한 데모 시스템
Fig. 8 The real demo system for lighting control

그림 7은 스마트 그리드 기반의 조명 제어 시스템의 구성 환경이다. 조명 제어 시스템은 여러 조명들과 스마트 컨트롤러, 네트워크 모듈, 및 모니터링 PC로 구성된다. 그림 8은 실제 제작된 데모 환경이다. 그림 8의 실험 장치에서 오른쪽에는 조명이 설치되어 있다. 맨 위의 조명은 형광등이고 아래에 백열등, 할로겐등이 설치되어 있다. 각각의 조명에는 조명의 상태, 전기 소모량 확인 및 조명의 전원을 제어하는

스마트 컨트롤러가 설치되어 있다. 스마트 컨트롤러 상단에는 Texas Instrument사의 CC2420DB ZigBee 모듈이 설치되어 있는데, 이는 상위 EMS와 연결하기 위한 네트워크를 구성한다. 스마트 컨트롤러는 네트워크와는 독립적으로 설치될 수 있는데, 본 스마트 컨트롤러는 통신을 위한 인터페이스로서 RS232를 사용해서 네트워크 모듈과 연결되어 있다. 실험장치의 좌측 상단에는 모니터링 PC와 UART로 연결된 EMS 역할을 하는 ZigBee 모듈이 설치되어 있으며, 모니터링 PC는 스마트 컨트롤러를 이용하여 조명이 사용하는 전기량 및 전원 상태의 파악, 전원 제어를 할 수 있다. 스마트 그리드 시스템은 AMI와 에너지 관리 서버가 필요하나 본 실험에서는 모니터링 PC와 네트워크 모듈이 이 역할을 대신한다.

4.2 시나리오 설계

스마트 그리드 기반의 조명 제어 시스템이 기존의 조명 제어 시스템과 다른 점은 가변적으로 변화하는 전기 요금 체계를 시스템에 반영시킬 수 있다는 점이다. 요금제는 매월, 일일 단위로 전달될 수 있고 사용자는 전달된 요금에 따라 전기 제품의 운영 시간을 정할 수 있어 전기 에너지의 효율적 사용이 가능하다. 본 실험에서는 효율적인 전기 에너지 사용을 위해 조명 제어를 위한 세 가지의 가정을 수립하였다.

- 가정 1)** 조명에서 사용되는 전기 에너지는 모두 다르다. 백열등이 60W로 가장 많은 전기 에너지를 사용한다. 형광등은 32W, 할로겐등이 50W의 전기 에너지를 사용한다.
- 가정 2)** 에너지 관리 서버는 사용되는 전기 에너지의 크기에 따라 순위를 정한다. 본 실험에서는 가정 1에 의해 전기 소모량이 많은 백열등 -> 할로겐 조명 -> 형광등 순으로 전원을 차단한다.
- 가정 3)** 전기 요금이 오를수록 전기 에너지 소모가 가장 많은 조명 장치의 전원을 차단한다. 전기 요금이 가장 낮을 때는 모든 조명을 사용하지만 높을 때는 에너지 소비를 가장 적게 하는 조명만 사용한다.
- 가정 4)** 전기 요금은 전기 에너지의 부하에 비례해서 결정된다.

위의 가정을 바탕으로 스마트 그리드 기반의 조명 제어를 실험하였다. 스마트 그리드 기반의 전기 사용 요금을 가정하기 위해 빌딩 또는 가정에서 사용되는 일일 부하 곡선을 참조하였다[18]. 이를 기반으로 하여 빌딩 또는 가정 내에서 사용되는 조명의 부하에 따라 전기 요금을 책정하였다.

표 4를 보면 스마트 그리드기반의 요금제에서는 부하가 많을수록 전기 요금이 단계적으로 책정된다. 전기 요금이 가장 낮은 때(Level 1)는 모든 조명이 사용 가능하며 총 146W의 전기 에너지를 소모한다. 그리고 전기 요금이 가장 높은 때(Level 8)는 모든 조명의 전원이 차단되어 사용되는 에너지는 0W이다. 그 외의 경우에는 각 Level 마다 사용

가능한 조명을 설정하고 이에 대한 전력 소모량을 결정하였다. 도표의 제어 단계를 기반으로 하여 스마트 컨트롤러가 부착된 조명 기기와 EMS 및 AMI의 동작 시나리오를 작성하였다.[그림 9]

표 4 스마트 그리드 기반의 요금제에 따른 조명 사용
Table 4 Pricing levels of lighting control in smart grid system

| 단계 | 설 명 | 조명 제어 | 전력 소모량(W) |
|--------|--------------|---------------|-----------|
| Level1 | 요금이 매우 낮음 | 형광등, 할로겐, 백열등 | 146 |
| Level2 | 요금이 비교적 낮음 | 할로겐, 백열등 | 110 |
| Level3 | 요금이 상대적으로 낮음 | 형광등, 할로겐 | 96 |
| Level4 | 요금이 보통 | 형광등, 백열등 | 86 |
| Level5 | 요금이 상대적으로 높음 | 백열등 | 60 |
| Level6 | 요금이 비교적 높음 | 할로겐 | 50 |
| Level7 | 요금이 높음 | 형광등 | 36 |
| Level8 | 요금이 매우 높음 | 모든 조명 전원 차단 | 0 |

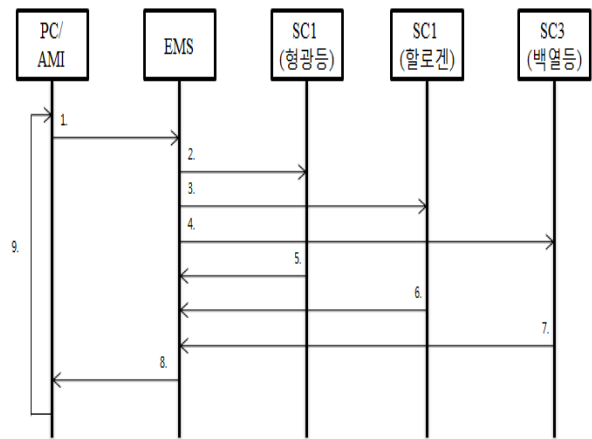


그림 9 조명 제어 방법에 대한 시퀀스 다이어그램
Fig. 9 The sequence diagram of lighting control

다음의 표 5는 그림 9에서 언급한 조명 제어 시퀀스 각 단계에 대해 조명 제어 방법을 구체적으로 설명하였다. 현재 실험 모델에서는 AMI가 지원되고 있지 않다. 이 역할은 PC가 수행 하였다. PC는 EMS 역할을 하는 ZigBee 모듈과 스마트 컨트롤러들을 통해 현재 소모되는 조명의 전력량을 파악할 수 있고 요금 변화에 따라 스마트 컨트롤러를 통해 조명의 전원을 제어할 수 있다.

표 5 AMI, EMS 그리고 스마트 컨트롤러간의 조명 제어 절차

Table 5 Lighting control procedures according to sequence diagram in AMI, EMS, and smart controllers

| 순서 | 방 향 | 내 용 |
|----|------------------|-----------------------------------|
| 1 | PC/AMI -> EMS | EMS 요금 상태 전달 |
| 2 | EMS -> SC1 | EMS는 요금 체계에 기반을 두어 SC1에게 동작 명령 전달 |
| 3 | EMS -> SC2 | EMS는 요금 체계에 기반을 두어 SC2에게 동작 명령 전달 |
| 4 | EMS -> SC3 | EMS는 요금 체계에 기반을 두어 SC3에게 동작 명령 전달 |
| 5 | SC1 -> EMS | SC1은 조명 상태 및 부하량 전달 |
| 6 | SC2 -> EMS | SC2은 조명 상태 및 부하량 전달 |
| 7 | SC3 -> EMS | SC3은 조명 상태 및 부하량 전달 |
| 8 | EMS -> PC/AMI | EMS는 조명의 총 에너지 사용량 전달 |
| 9 | PC/AMI -> PC/AMI | 수신된 부하량을 참조하여 새로운 요금단계 설정 |

(*) SC : smart controller

4.3 실험 및 결과 분석

스마트 그리드 시스템이 다른 에너지 관리 시스템과 차별되면서 유용한 이유는 두 가지이다. 첫 번째는 요금제의 변화이다. 다른 에너지 관리 시스템은 일정한 전기 요금 상황에서 에너지의 효율적 사용을 도모하였다. 그러나 스마트 그리드 기반의 에너지 관리 시스템은 에너지 수요에 따라 에너지 가격이 다르게 책정되므로 사용자는 자발적인 에너지 절약을 도모한다. 이런 이유로 인해 스마트 그리드 기반의 에너지 관리 시스템은 적극적으로 에너지의 효율적 사용이 가능하게 된다.

두 번째는 위의 언급한 에너지의 효율적 사용을 위해 양방향 통신을 지원한다는 점이다. 사용되는 에너지의 부하를 파악하고 이로부터 차등적 에너지 사용 요금이 부과되기 위해서는 모든 전기 제품이 양방향 네트워크로 연결되어 있어야 한다. 본 논문에서는 위의 언급한 사항을 증명하기 위해 먼저 양방향 통신을 이용한 조명의 에너지 소모 현황을 측정하였다.

4.3.1 전기 요금 변화에 따른 부하 변화

그림 10은 표 4에 의거하여 요금 변화에 따른 조명의 에너지 사용 부하를 보여주고 있다. 즉, 전기요금 상태 변화에 대한 전기 부하 변화량을 나타낸다. 본 실험에서는 AMI 역할을 하는 PC를 통해 요금의 상태를 인위적으로 가변적 변화를 주었다. 그림에서 보면 유틸리티 회사에서 전기 요금 단계가 결정되면, AMI/EMS는 해당 요금 단계를 확인하여 요금이 상향/하향 될 때 각 조명의 전원이 차단/인가 된다.

이러한 역할은 EMS와 스마트 컨트롤러 사이에서 전기 요금 변화에 따른 명령을 네트워크를 통해 교환함으로써 가능하다. 그림에서 보는 바와 같이 EMS는 Level의 변화에 따라서 조명의 에너지 부하가 실시간으로 반비례하는 특성을 확인할 수 있다.

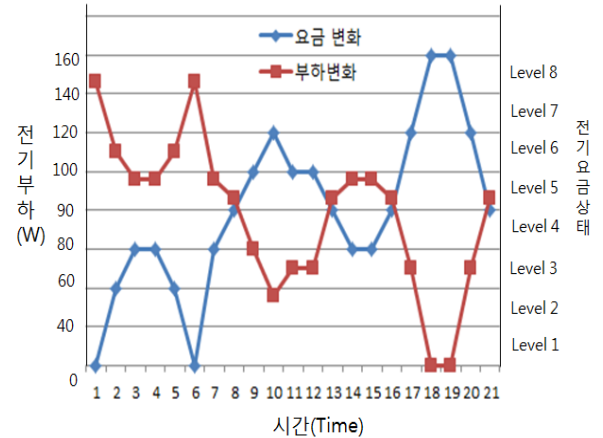


그림 10 요금 변화에 따른 조명의 부하 변화
Fig. 10 The load variance of lighting according to the change of the price

4.3.2 부하 변화에 따른 요금 변화

양방향 통신의 특징을 확인하기 위해 조명의 에너지 부하에 따른 요금 설정에 대해 확인하였다. 실험 장치에서 사용자가 조명의 전원을 인가하면 스마트 컨트롤러는 조명의 전원 상태 및 전기 에너지 소비량을 측정하고, EMS는 스마트 컨트롤러로부터 각 조명의 전원 상태와 에너지 소비량에 대한 데이터를 전달받아 현재 사용되고 있는 총에너지 사용량을 실시간으로 측정한다. 실제 시스템에서 EMS는 AMI를 통해 유틸리티 회사로 총에너지 사용량을 실시간으로 전달한다. 유틸리티 회사는 에너지 사용량에 따라 새롭게 에너지 요금을 책정한 후 AMI를 통해 이를 실시간으로 재 전달한다. 이러한 과정은 실제로는 EMS와 AMI 사이에서 양방향 통신을 이용한 실시간 데이터 교환을 통해 이루어진다. 본 실험에서는 유틸리티 회사의 요금 책정 기능을 AMI/EMS PC에 구현하였으며, 그림 11에서 보는 바와 같이 유틸리티 회사는 전가 사용량 부하의 변화에 대하여 실시간으로 변동 요금을 책정할 수 있음을 알 수 있다.

4.3.3 스마트 그리드 기반의 조명 제어 시스템

앞 절에서 언급한 양방향 통신 실험을 기반으로 스마트 그리드 기반의 요금제를 조명 제어 시스템에 적용시켜 보았다. 에너지 요금제는 시간에 따라 변화한다고 가정하고 이에 따른 조명의 전원을 차단함으로써 에너지의 사용을 절약한다.

5. 결 론

본 논문에서는 스마트 그리드를 가정에 적용하기 위한 스마트 컨트롤러를 개발하고 이를 적용한 조명 제어 시스템을 개발하였다. 본 스마트 컨트롤러는 스마트 그리드 기능이 없는 전기 제품의 외부에 설치가 가능하고, AMI에 연결되도록 유선 또는 무선 네트워크 모듈을 연결시키도록 되어 있으나, 본 논문에서는 ZigBee 통신만을 사용하여 HAN을 구성하였다. 또한 스마트 그리드 기반의 요금체계에 따른 조명의 전기 에너지 가용을 제어할 수 있도록 설치하여, 사용자 부하에 따른 요금 환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있도록 하였다.

본 스마트 그리드 컨트롤러를 이용한 스마트 그리드 기반의 조명 제어 시스템의 성능 평가는 동작 검증 시험과 요금 변화에 따른 에너지 절약효과를 스마트 그리드 적용되지 않는 조명 제어 시스템과 나누어 진행하였다. 실험 결과는 스마트 그리드 환경에 대해 요금 변화에 따른 조명 제어가 가능함을 보였으며, 스마트 그리드가 적용되지 않은 경우보다 에너지를 적게 사용한다. 또한 각 요금제에 따른 환경을 실험적으로 구현하고 이에 따른 에너지 소비 현황을 조사함으로써, 본 시스템은 직접 부하 제어 시스템, 에너지 관리 시스템으로의 활용이 가능하며, 효율적인 에너지 관리 시스템의 필요성이 절실히 요구되고 있는 현시점에서 본 시스템의 적용은 에너지를 효율적 사용함으로써, 에너지 절약 효과 활성화를 기대할 수 있다.

차후 연구로는 현 실험 장치 환경에서 단순히 조명의 전원을 ON/OFF 시키는 수준으로 결과를 도출하였으나, Dimming 제어를 통한 보다 정밀한 고수준의 조명제어 알고리즘을 개발하여 스마트 컨트롤러에 적용시키고자 한다.

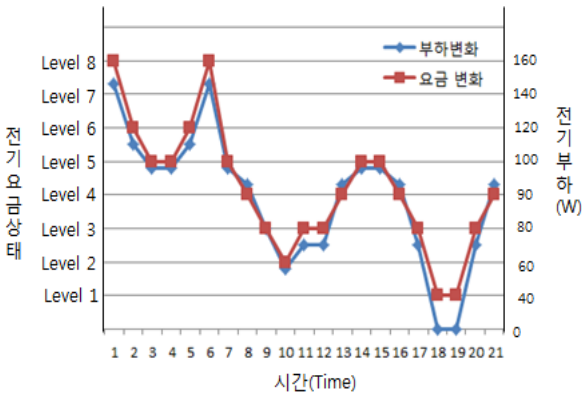


그림 11 조명의 에너지 사용에 따른 요금 변화
 Fig. 11 The price variance according to the change of lighting energy

본 실험에서는 AMI 역할을 하는 PC를 통해 요금의 상태를 인위적으로 가변적 변화를 주었다. 실험에서 요금이 변화하면 표 4에 의해 사용되는 조명이 결정된다. 조명에 설치된 SC는 EMS를 통해 해당 요금 단계에 맞는 조명의 전원을 “ON/OFF” 시킨다. 그리고 조명의 전원 상태가 변화하면 스마트 컨트롤러는 조명에서 사용되는 전기 에너지를 측정하여 EMS에 전달한다. EMS는 각 스마트 컨트롤러로부터 전달받은 현재 소모되고 있는 전기 에너지량을 합산하여 AMI 역할을 하는 PC에 전달하고 PC는 이에 따른 전력 소비량의 변화를 사용자에게 보여준다. 실험에서는 스마트 컨트롤러를 이용한 스마트 그리드 조명 제어 시스템에 대한 에너지 효율을 분석하고자 그림 10에서 제시한 요금 변화에 대한 스마트 그리드 기술을 적용시킨 경우와 조명을 각각 1개, 2개, 3개를 사용했을 경우의 에너지 사용량을 측정하였다.

표 6 실험에서 사용된 에너지의 사용량 비교
 Table 6 Comparison of energy usage in the experiment

| 구 분 | | 전력 소모량 (Wh) | 연간 사용량(KW) (5시간/1일 사용) |
|--------|----------|-------------|------------------------|
| SG 적용 | | 76.2 | 139 |
| SG 미적용 | 조명 3개 사용 | 146 | 266.5 |
| | 조명 2개 사용 | 96 | 175.2 |
| | 조명 1개 사용 | 50 | 91.2 |

표 6은 스마트 그리드 기술을 적용시켰을 경우와 그렇지 않고 일률적으로 조명을 사용했을 경우의 에너지 소모량을 비교하였다. 형광등, 할로겐 조명, 백열등에 스마트 컨트롤러를 부착시키고 스마트 그리드기반의 요금제를 적용한 제어 시스템의 경우 조명을 단순히 3개 사용했을 경우보다 에너지 일일 에너지 소비가 적은 것을 알 수 있다. 이를 기반으로 연간 사용되는 조명의 전기 에너지 사용량을 비교했을 때, 스마트 그리드 기반의 조명 제어 시스템이 에너지를 효율적으로 관리하는 것을 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 경기도에서 지원하는 경기도지역협력 연구센터 사업의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이일우, 한동원, “IT기반의 스마트 그리드 기술”, 한국 정보 기술 학회지, 제7권, 1호, pp.25-30, 2009.
- [2] 이근철, 오재영, 김윤기 “스마트 그리드 홈 서비스”, 정보와 통신, pp.38-42, 2009.
- [3] <http://www.zigbee.org>
- [4] 정영선, 최경석, 김경우, 강재식, 이승연 “고유가시대에 대비한 건축물의 에너지 효율화 관련 시책 현황”, 대한 설비공학회, pp.959-964, 2006.
- [5] 조성훈, 송영섭, 이동우, “효율적인 에너지 절감을 위한 조명 제어 관리 시스템, 한국 정보 기술 학회 하계 학술 대회, 2009.
- [6] <http://www.bacnet.org/WG/SG/>
- [7] Nancy Brockway, “Advanced Metering Infrastructure: What Regulators Need to Know About Its Value to

Residential Customers” National Regulatory Research Institute, 2008.

- [8] STAFF REPORT, “Demand Response & Advanced Metering”, Federal Energy Regulatory Commission(FERC), 2007.
- [9] <http://www.google.com/powermeter>.
- [10] <http://www.getgreenbox.com/>
- [11] NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards Release 1.0.
- [12] 이진, "Demand Response 및 Smart Metering/AMI", 전기설비. pp.51-58, 10/2008.
- [13] 김성진, 서정해, 전종암, 표철식, “USN 기반 AMI 서비스 및 기술동향: 전력 산업과 USN 산업의 융합기술”, ETRI, 전자통신동향분석 제 23권 제 5호 2008년 10월
- [14] 이정준, “AMI의 구조”, 정보와 통신, pp.17-22.2010
- [15] UtilityAMI 2008 Home Area Network System Requirements Specification, 2008.
- [16] 한재용, 이순홍 “전력선 통신을 이용한 에어컨 피크 전력 시스템 개발”, 대한전자공학회, 제 46 권, SC 편 제 5 호, pp.44-51, 2009.
- [17] ZigBee alliance “ZigBee Smart Energy Profile Specification” 2008.
- [18] 계약중별, 계절별, 요일별, 부하곡선 분석”, 전력 거래소.



홍 승 호 (洪 承 鎬)

1956년 5월 31일생. 1982년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1985년 텍사스테크 대학원 기계공학과(공학석사). 1989년 펜실베이니아 주립대학원 기계공학과(공학박사). 1992년~현재 한양대학교 전자시스템공학과 교수, 관심 분야는 필드버스, 산업 통신망, 빌딩 통신망, 스마트 그리드

저 자 소 개



최 인 호 (崔 仁 鎬)

2001년 한양대학교 제어계측공학과 공학석사. 2001년~2010년 삼성전자(주) 생산기술연구소 책임연구원. 2008년~현재 한양대학교 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정 재학 중. 2011년 현재 LG CNS Smart Device 3팀 과장. 관심 분야는 IEEE1451, 스마트 그리드, Wireless 필드버스, USN 등



이 정 한 (李 定 漢)

2001년 대진대 통신공학과 졸업. 2003년 광운대학교 대학원 제어계측과 석사. 2003년~현재 한양대학교 대학원 제어계측공학과 박사과정 재학 중. 2011년 현재 현대제철(주) 과장. 관심분야는 IEEE 1451, UML, 스마트 그리드 등.