

Building AHU Load Control Algorithm based on Demand Response

김 정 옥*
(Jeong-Uk Kim)

Abstract - This paper presents an advanced energy saving algorithm in building. It is important to aggregate a various demand side resource which is controllable on demand response environment. Previous demand side algorithm for building is restricted on peak power. In this paper, we suggest duty cycle algorithm for AHU on demand response to reduce the quantity of building power consumption. The test results show that the proposed algorithm is very effective.

Key Words : Demand response, Load control, Energy saving, Building energy, Building automation system

1. 서 론

해외 선진국 전력시장을 중심으로 시간대별 차등요금제(Time-based Pricing)를 포함한 다양한 수요반응(Demand Response, DR) 제도와 이를 활성화하기 위한 정책적 수단들이 활발하게 개발되고 있다.[1][2] 에너지다소비 사회로 진입한 우리나라도 비용효과적인 수요반응 제도의 수립이 필요하다. 수요반응은 전력수요를 합리적으로 조절하여 부하율 향상을 통한 원가절감과 전력 수급안정을 도모함과 동시에 국가적인 에너지자원 절약에도 기여한다. 우리나라에서의 수요관리 정책은 침투부하 억제를 위한 심야전력활용, 최대수요전력제어, 직접부하제어, 원격제어에어컨 등의 방법이 제시되어 왔다.[3][4][5] 개별 수용가를 위한 최적의 자동화된 수요반응 시스템을 구현하기 위해서는 개별 건물에 설치된 빌딩 자동제어 시스템(Building Automation System, BAS)을 활용할 수 있다. 빌딩 자동제어 시스템은 수용가에 설치된 기계 및 전기설비의 상태 감시 및 제어를 통한 효과적인 운영을 지원한다.

본 연구에서는 수요반응 시스템에서 가격 신호가 전달된 경우에 고객 사이트에 설치된 빌딩 자동제어 시스템을 활용하여 전력가격에 따라 공조부하의 에너지 절감제어를 수행하는 방법을 제시한다. 또한, 실제 현장의 적용을 통하여 제시된 방법의 효율성을 검증한다.

2. Open ADR

수요반응은 전력계통과 고객의 전기 시스템 사이의 동적인 협력을 통해 효율적인 에너지 사용을 가능하게 한다. 무더운 여름에 많은 에어컨들이 사용되는 경우에 전기적 그리

드가 전기 용량에 근접할 때 전력시스템 운영자 장치는 문제가 되는 수용가 장치에게 경보를 통지한다. 수용가 장치의 DR 프로그램으로부터 통보받은 수용가는 건물의 사용하지 않는 장소에서 조명을 끄거나 에어컨 사용을 줄이는 등 불필요한 전기 수요를 줄여야 한다. 이렇게 함으로써 그리드 위기를 피하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 피크 기간의 전기 요금을 절감할 수 있다.

Open Automated Demand Response(Open Auto-DR)은 외부의 표준 신호에 의해 시작되는 완전히 자동화된 수요반응으로 정의될 수 있다. Open Auto-DR은 자동제어 시스템을 활용하여 사전에 프로그램하여 구현할 수 있다. Open Auto-DR의 중요한 특징은 다음과 같다

- **신호** - Auto-DR은 안전하고 신뢰성 있는 DR 신호의 수신 및 통보를 수행할 수 있는 통신 방법을 제공해야 한다.
- **개방시스템** - Auto-DR은 개방형 기준에 의해 구현되어야 한다. 빌딩 자동제어 시스템 분야에는 BACnet이 개방형 표준 프로토콜로 정의되어 있다.
- **통지 시기** - DR 신호는 주말과 공휴일을 포함하여 지속적으로 제공되어야 한다.

DR의 자동화 수준은 아래와 같이 정의될 수 있다.

- **Manual Demand Response**는 DR 신호에 대하여 수동으로 각 장비의 스위치나 제어 장치를 제어하는 것을 의미한다.
- **Semi-Automated Demand Response**는 중앙제어 시스템에 사전에 구현된 일련의 수요반응 동작을 조작자가 기동시키는 것을 의미한다.
- **Fully-Automated Demand Response**는 조작자의 개입 없이 외부의 통신 신호에 의해 자동으로 수요반응 동작이 시작되는 것을 의미한다.

Open Auto-DR 구조는 개방형 시스템을 기준으로 두 가지 주요 요소로 구성된다. 첫째, 수요반응 자동화 서버

* 정 회 원 : 상명대학교 에너지그리드학과 조교수

E-mail : jukim@smu.ac.kr

접수일자 : 2011년 2월 16일

최종완료 : 2011년 5월 11일

(Demand Response Automation Server)는 DR 이벤트를 고객들에게 통보하는 표준 신호를 제공한다. 둘째, 수요반응 자동화 서버의 클라이언트는 고객 사이트에 설치되며, 자동으로 통보된 이벤트 신호를 기 구축된 자동제어 시스템에 전달한다.

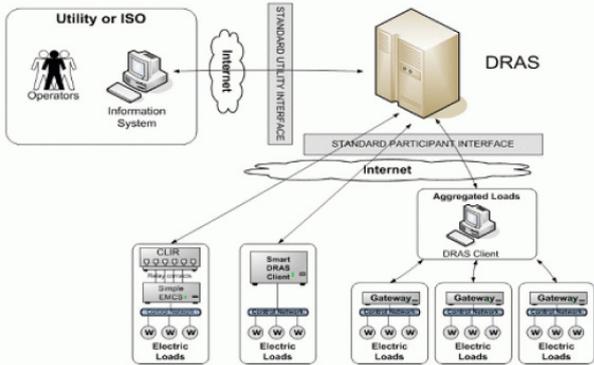


그림 1 Open ADR 구조
Fig. 1 Open ADR Architecture

DR 이벤트가 발생하면 Open Auto-DR이 수행하는 단계들은 다음과 같다.

1. 유틸리티가 DR 이벤트와 비용 신호를 DRAS로 보낸다.
2. DRAS는 DR 이벤트와 비용 신호를 DRAS에 저장한다.
3. DRAS 클라이언트는 정기적으로 DRAS에게 이벤트 정보를 요청한다.
4. DRAS 클라이언트는 이벤트 정보에 따라 사전 정의된 DR 프로그램을 결정한다.
5. DR 프로그램은 사전 프로그램된 부하제어를 실행한다.

3. DR 기반의 공조 부하제어

자동화된 수요반응에서 가장 중요한 일종의 하나는 제어 가능한 부하를 선정하는 일이다. 일반 업무용 빌딩이나 백화점, 대형 할인점등의 경우 조명설비 및 냉난방 설비, 공조 설비 등이 주 제어 대상 부하이며 제조업체의 공장에서는 생산에 영향을 주지않기 위하여 공조설비나 생산과 관계없이 독립적으로 동작하는 설비나 안전과 품질에 영향을 주지 않는 부하기기를 대상으로 한다. 공장의 제어 가능한 부하로는 단시간 정지 가능한 건조로, 전기로, 압축기, 공조설비, 급수펌프, 순환펌프 등이 있다.

DR의 원활한 운영을 위하여는 고객 사이트에 최종 사용장비를 제어하는 자동화된 시스템이 존재하여야 한다. 현실적으로는 빌딩에 설치된 자동제어 시스템이 그 역할을 수행하게 된다. 고객의 입장에서 수요반응 동작의 예들은 중요하지 않은 조명을 끄거나 조도를 줄이고 자동 온도 조절 장치의 설정치를 조정하거나 중요하지 않은 장비를 중지시키는 것이다.

공조 부하는 외기 온도 및 건물 특성에 따라 비선형적으로 동작하므로 가동 시간에 비례한 전력 소비를 보이는 조명 부하보다 적용이 어려워서, 공조 부하에 대한 연구가 활

발하지 않았다. 본 논문에서는 Auto-DR에 공조 부하의 에너지 절감 알고리즘(Energy Saving Algorithm)을 적용하는 방법을 제시하였다. 공조기 팬의 에너지 소비를 줄이기 위하여 건물에 설치된 자동제어 시스템을 활용하여 절전운전, 최적기동/정지, 엔탈피제어 알고리즘을 적용할 수 있다.

표 1 에너지절감 알고리즘
Table 1 Energy Saving Algorithm

구분	내용	제어 부하
절전운전 (Duty Cycle)	최적 기동/정지 구간내에서 실내부하에 따라 공조기가 자동으로 기동/정지하여 실내온도를 유지하면서 공조기 가동시간 감소	공조기 급기, 배기팬 제어
최적기동/정지 (Optimal Start/Stop)	외기온도에 따라 공조기를 최적 시간에 기동/정지하여 공조기의 가동시간 감소	공조기 기동/정지
엔탈피제어 (Enthalpy Control)	냉방시기에 외기와 환기의 엔탈피를 비교하여 외기의 엔탈피가 낮을 경우에는 외기를 받아들여 냉방에 이용	환기 뎀퍼

Open ADR 시스템에서 DRAS 클라이언트는 이벤트 정보에 따라 사전에 프로그램되어진 부하제어를 실행하게 된다. BAS를 활용한 절전 운전제어(Duty Cycle Control)는 한 사이클 동안에 최대 정지 가능시간, 최소 정지시간과 실내 쾌적 온도의 상한·하한 설정온도 등에 의하여 정지시간이 정하여지고, 현재의 실내온도에 따라 해당 공조기의 정지시간이 그림 2와 같이 결정된다.

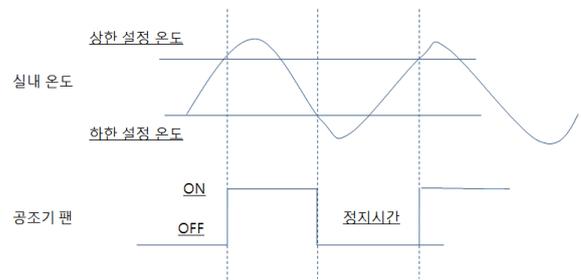


그림 2 절전운전 알고리즘
Fig. 2 Duty Cycle Algorithm

이 알고리즘의 사이클 패턴, 시간 배분 등은 다양하게 구성이 가능하므로 건물의 사용특성에 맞추어 효율이 높은 절전운전의 적용이 가능하다. 또한 하나의 알고리즘으로 다수의 공조기를 제어가능하며, 이 때 각 공조기의 정지시간을 서로 상이하게 설정함으로써 부하의 균등화를 통하여 공조기의 가동시간을 줄임으로써 전력량을 줄일 수 있다. 최적기동/정지나 엔탈피제어는 설정치에 의한 동작 변동 요소가 없으므로 단순히 알고리즘 가동 여부를 결정하면 된다.

스마트그리드 요금제는 다양한 형태이므로, 가격 정책에 적합한 부하제어를 적용하여야 한다. 우리나라의 요금 정책은 Time-Of-Use(TOU, 계시제)를 채택하고 있으나, 장래에는 Critical Peak Pricing(CPP, 피크요금제)이나 Realtime Pricing(RTP, 실시간 요금제)을 채택하게 될 것이다. 가격기

반의 요금제 하에서 전력가격은 변경의 정도 및 시차에 차이가 있을 뿐 시간에 따라 전력가격이 변하게 된다. 본 논문에서는 실시간으로 변경되는 전력단가에 따라 전력단가 수준을 High(고), Middle(중), Low(저)로 구분하고 각 수준에 따라 공조기의 상한 설정온도, 하한 설정온도, 정지시간을 설정한다. 전력단가 수준이 높을수록 표 2와 같이 상한 설정온도와 하한 설정온도가 높아지고 정지시간이 길어진다.

표 2 에너지절감 알고리즘

Table 2 Energy Saving Algorithm

전력 단가	수준	상한 설정 온도 (T _U)	하한 설정 온도 (T _L)	정지 시간 (D)
	H	T _U ^H	T _L ^H	D _H
	M	T _U ^M	T _L ^M	D _M
	L	T _U ^L	T _L ^L	D _L

DRAS 클라이언트가 DRAS로부터 전력단가 정보를 입수하게 되면, 전력단가 수준과 그에 따른 상한 설정 온도 값과 하한 설정온도, 정지 시간을 결정하게 된다. 이러한 설정 값은 전력단가가 적용되는 시작시간과 종료시간 사이에만 적용된다. DRAS 클라이언트는 이 설정 값을 빌딩 자동제어 시스템으로 전송하고, 빌딩 자동제어 시스템은 설정 값에 따라 에너지절감 알고리즘을 수행하게 된다.

Open Auto-DR 시스템의 DRAS와 DRAS 클라이언트는 플랫폼 독립성과 개방형 시스템을 구축하기 위하여 Web Service Oriented Architecture(SOA)에 기반을 둔 XML를 사용한다. DRAS 클라이언트와 빌딩 자동제어 시스템 간은 사적인 영역이라고 판단되나, BACnet 또는 Modbus 등의 표준 통신 프로토콜을 활용하여 개방성을 높일 수 있다.

4. 현장 실증

Open Auto-DR에서 BAS를 활용한 에너지절감 알고리즘의 적용 효과를 산정하기 위하여 실증 실험을 수행하였다. 건물을 대상으로 하는 실증 실험은 입주자의 근무환경에 영향을 미치므로 다양한 형태의 실험이 어렵다는 난점이 존재한다. 따라서, 입주자의 근무 환경에 영향을 미치지 않는 범위로 실증 실험의 범위를 제한하였다.

실증 실험은 광주에 소재한 20층 건물에 2010년 11월1일(월)부터 11월30일(화)에 오전 4시부터 오후 6시까지 진행되었다. 기존 운영방식과의 비교를 위하여 제어층과 비제어층을 설정하여 시간대별로 아래와 같이 운영하고 공조기의 가동시간으로 결과를 비교하였다. 절전운전에서 상한 설정온도는 25.5℃, 하한 설정온도는 25.0℃, 정지시간은 3분이었다. 절전 운전과 함께 최적기동/정지 및 엔탈피 알고리즘도 동시에 수행하였다. 전체 공조기 19대 중에 17대에 에너지절감 알고리즘이 적용되었다.

표 3 공조기 가동시간

Table 3 AHU Operation Time

시간대	공조기		제어방법
	제어층	비제어층	
04:00~06:00	-	-	외기 도입 냉방
06:00~07:30	제어대기 후 ON	상시 ON	최적 기동 제어
07:30~17:30	설정온도에 따른 ON/OFF	상시 ON	절전 운전 제어
17:30~18:30	제어대기 후 OFF	순차 OFF	최적 정지 제어
07:30~18:00	댐퍼제어	-	엔탈피 제어 외기 도입 냉방

실험을 위하여 DRAS 클라이언트와 BAS로만 시스템을 구성하였다. DRAS 클라이언트는 DRAS 없이 Stand-Alone으로 구성하였으며, DRAS 클라이언트와 기 설치된 빌딩 자동제어 시스템 간은 기존 BAS가 제공하는 독자적인 프로토콜을 이용하여 인터페이스하였다.

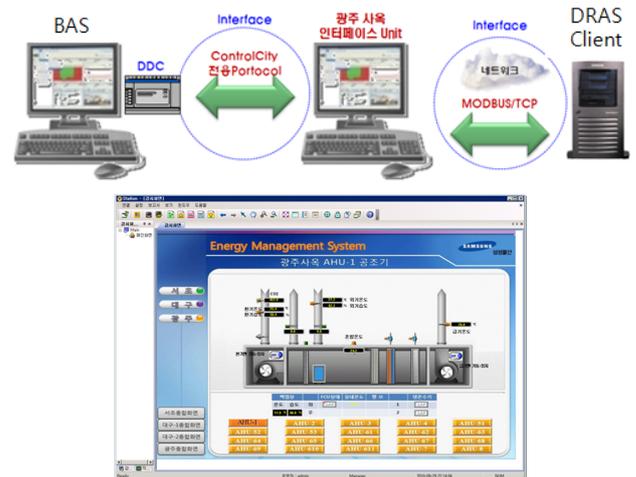


그림 3 EMS 시스템 구성

Fig. 3 EMS System Architecture

에너지절감 알고리즘 적용 결과 아래 표와 같이 공조기 가동시간의 52.3%가 감소되었다. 공조기 소비전력은 건물 소비전력의 13.6%이므로, 건물 전체 에너지의 4.76%에 해당하는 에너지를 절감하였다.

표 4 에너지 절감량

Table 4 Energy Saving

	제어층(17개층)	비제어층(2개층)
총 가동시간(분)	135,740	30,520
평균 가동시간(분)	7,985	15,260
비율	52.3%	100%

이 실증 실험은 입주자의 민원이 발생하지 않은 범위 내에서 운전한 결과이므로, 본 실증 실험에 이용된 설정 값은

전력단가 수준이 중(Middle) 또는 저(Low)인 경우에 적용이 가능하다. 이 경우 Auto-DR에 공조기의 에너지 절감 알고리즘을 적용하면 4.76% 이상 에너지를 절감할 수 있다. 건물을 실제 운영하는 경우에는 건물의 쾌적성을 유지할 수 있도록 입주자 특성 및 근무 특성에 맞추어 적절한 설정 값을 선정하여야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 건물에 설치된 자동제어 시스템을 활용하여 스마트그리드 기반의 부하관리를 구현하기 위한 방법을 제시하였고, 실증 실험을 통하여 그 효과를 검증하였다. 최근 고유가로 인하여 스마트그리드의 운용 필요성이 커져가고 있으며, 전력 요금제의 변동도 필연적일 것이다. 본 논문에서 제시한 공조 부하관리 알고리즘은 전력 요금제별로 적용 가능하므로 빌딩의 효율적인 운영에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20101020300620)

참 고 문 헌

- [1] Piette, M.A., et al., 'Development and Evaluation of Fully Automated Demand Response in Large Facilities', CEC-500-2005-013. LBNL-55085. Berkeley CA, 2005.
- [2] H.A. Aalami, et al., "Demand response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs", Applied Energy, pp.243-250, 2010.
- [3] 김형중, et al., "직접부하제어 시스템의 운영 및 구성방안", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 627-629, 2003.
- [4] 김정욱, "직접부하제어 시스템의 새로운 부하 배분 알고리즘", 대한전기학회 논문지, pp. 407-410, 2010.
- [5] 김정욱. "전력사용량 기반의 새로운 부하제어 알고리즘". 대한전기학회지, pp. 1658~1662, 2010.

저 자 소 개



김 정 욱 (金 政 郁)

1993년 2월 한국과학기술원 전기전자공학(공학박사), 1989년 2월 한국과학기술원 전기전자공학(공학석사), 2010년 3월-현재 상명대학교 에너지그리드학과 교수, 정보관리기술사/정보통신기술사/정보시스템감리사
<관심분야> : DR, 신재생에너지