

OpenADR 기반의 전력사용량 관리 알고리즘

Power Consumption Management Algorithm Based on OpenADR

김 정 욱*
(Jeong-Uk Kim^{1,*})

¹Department of Energy Grid, Sangmyung University

Abstract: This paper presents a load management method based on OpenADR of smart grid. Previous demand side algorithm is restricted on reducing peak power. But, in this paper we suggest a method of performing the energy-saving control according to the power price utilizing building automatic control system installed on the customer side in the case of hourly differential pricing signal is transmitted to the open automated demand response system. And, we showed the integrated demand management software for 3 buildings.

Keywords: demand response, load control, energy saving, building energy

I. 서론

에너지 다소비 사회로 진입한 우리나라는 비용 효과적인 수요반응 제도의 수립이 필요하다. 수요반응은 전력수요를 합리적으로 조절하여 부하율 향상을 통한 원가절감과 전력 공급안정을 도모함과 동시에 국가적인 에너지자원 절약에도 기여한다. 해외 선진국 전력시장은 중심으로 시간대별 차등요금제(time-based pricing)를 포함한 다양한 수요반응(Demand Response, DR) 제도와 이를 활성화하기 위한 정책적 수단들이 활발하게 개발되고 있다[1-3]. 우리나라의 전력요금 정책은 Time-Of-Use(TOU, 계시제)이며, 첨두부하 억제를 위한 심야전력활용, 최대수요전력제어, 원격제어에어컨, 지능형 수요반응[4,5] 등의 수요관리 정책을 채택하고 있다.

본 연구는 시간대별 차등요금제하에서 개방형 자동화된 수요반응(Open Automation Demand Response, Auto-DR) 시스템으로 가격 신호가 전달된 경우에 고객 사이트에 설치된 건물 자동제어 시스템을 활용하여 전력가격에 따라 에너지 절감제어를 수행하는 방법을 제시하였다. 3개 건물을 통합적으로 수요관리하는 사례를 제시하여 실제 현장에 적용이 가능함을 보였다.

II. OPEN ATUO-DR

자동화된 수요반응 시스템에서는 전력계통과 고객의 전기 시스템 사이의 동적인 협력을 통해 효율적인 에너지 사용을 가능하게 한다. 수요전력 피크가 예상되면 전력 계통은 수용가 장치에게 경보를 통지한다. 수용가 장치는 건물의 사용하지 않는 장소에서 조명을 끄거나 에어컨 사용을 줄이는 등 불필요한 전기 수요를 줄인다. Lawrence Berkeley

국립연구소에서 발간된 “Open Automated Demand Response Communications Specification(Open ADR)”에서는 DR의 자동화 수준을 다음과 같이 분류하고 있다[6].

- Manual Demand Response : DR 신호에 대하여 운영자가 수동으로 장비를 제어
- Semi-Automated Demand Response : 사전에 구현된 일련의 수요반응 동작을 운영자가 기동
- Fully-Automated Demand Response : 운영자의 개입 없이 DR 신호에 의해 자동으로 수요반응 동작 개시

Open ADR [5]의 Auto-DR은 개방형 표준에 의해 구현되어야 한다. 건물 자동제어 시스템 분야에는 ISO 16484-5 BACnet(Building Automation System, BAS)이 개방형 표준 프로토콜로 정의되어 있다. Open Auto-DR 구조는 개방형 시스템을 기준으로 두 가지 주요 요소로 구성된다.

첫째, 수요반응 자동화 서버(Demand Response Automation Server, DRAS)는 표준 신호로 DR 이벤트를 고객들에게 통보한다. 둘째, 수요반응 자동화 서버의 클라이언트는 고객 사이트에 설치되며, 자동으로 통보된 이벤트 신호를 고객의 수요반응 시스템에 전달한다. 개별 수용가를 위한 최적의 자동화된 수요반응 시스템을 구현하기 위해서 개별 건물에 설치된 건물 자동제어 시스템을 활용할 수 있다. 건물 자동제어 시스템은 수용가에 설치된 기계 및 전기설비의 상태 감시 및 제어를 통한 효과적인 운영을 지원한다. DR 이벤트가 발생한 경우에 Open Auto-DR이 수행할 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 DR2 프로그램을 결정한다.
- 5) DR 프로그램은 사전 프로그램된 부하제어를 실행한다.

* Corresponding Author

Manuscript received September 6, 2016 / revised October 4, 2016 / accepted October 12, 2016

김정욱: 상명대학교 에너지그리드학과(jukim@smu.ac.kr)

※ 본 연구는 2015학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

III. Open ADR을 지원하는 전력사용량 제어 알고리즘

1. 시간 제약하의 전력사용량 제어 알고리즘

전력사용량 제어 알고리즘[7]은 건물의 에너지사용량 예측을 토대로 하루에 사용하는 전력사용량 목표를 정하고 제어가능한 부하를 조정하여 건물의 전력 사용량을 관리한다. 건물 전력사용량 예측곡선 도출을 위해서는 일정 기간의 전력사용량 Profile을 이용한다. 전력사용량 제어의 기본 흐름은 그림 1과 같다. 자동화된 수요반응에서 중요한 업무 중의 하나는 제어 가능한 부하를 선정하는 일이다. 일반 업무용 건물이나 백화점, 대형 할인점등의 경우 조명설비 및 냉난방 설비, 공조설비 등이 주 제어 대상 부하이다.

그림 2의 전력사용량 곡선에서 전력사용량 목표 Q에 맞도록 전력사용 예측곡선 e(t)를 스케일링하여 목표전력 곡선 q₀(t)를 구한다. 여기에서 ∑q₀(t) = Q 이다.

$$q_0(t) = a \times e(t) \tag{1}$$

$$Q = \sum q_0(t) = a \times \sum e(t) \tag{2}$$

$$q_0(t) = \frac{Q}{\sum e(t)} \times e(t) \tag{3}$$

참여시간의 전력사용량을 제어하기 위하여 그림 3과 같이 15분 단위로 목표전력량을 설정하여 최대수요전력 제어를 수행하도록 한다. 수요시한 동안 부하제어가 수행된 경우에 수요시한의 경과 후에는 부하복귀를 수행한다.

수요시한 동안의 실제 전력사용량에 따라 다음 수요시한의 목표 전력량을 재설정한다. q_i(t)를 t > t_i 이후의 전력예

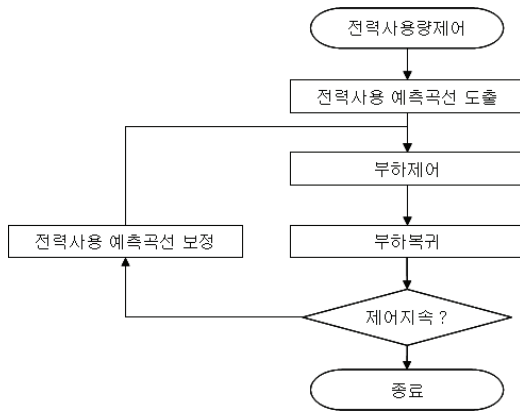


그림 1. 전력사용량제어 알고리즘.

Fig. 1. Control Algorithm for Reducing Power Consumption.

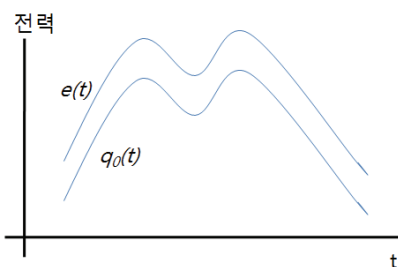


그림 2. 전력사용량 곡선.

Fig. 2. Power Consumption Curve.

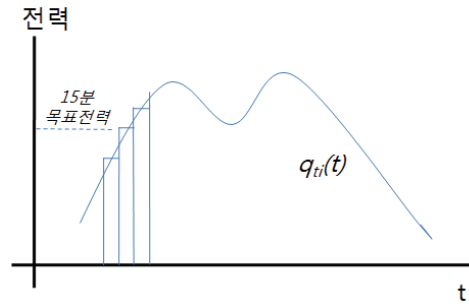


그림 3. 목표전력 곡선과 15분 목표전력.

Fig. 3. Expected Power Consumption Curve and 15 minutes Expected Power Consumption.

측 곡선, 실제 사용된 전력 곡선을 s(t)라 하자. 보정된 전력예측 곡선은 그림 4와 같이 당초의 예측 곡선에 비례한다. 전력사용 예측 곡선과 실제 사용된 전력 곡선, 보정된 전력 예측 곡선에 대한 관계는 선행 연구된 전력 사용량 알고리즘과 동일하다[7].

따라서 q_i(t) = a_i · q₀(t) 여기서, q₀(t) = a · e(t) 이다.

t = t_i 시점에서 Q = ∑_{t ≤ t_i} q₀(t) + ∑_{t > t_i} q₀(t) 이고, t = t_i 시점에서

$$Q = \sum_{t \leq t_i} s(t) + \sum_{t > t_i} q_{t_i}(t) \text{ 이다.}$$

$$\begin{aligned} \sum_{t \leq t_i} q_0(t) + \sum_{t > t_i} q_0(t) &= \sum_{t \leq t_i} s(t) + \sum_{t > t_i} q_{t_i}(t) \\ &= \sum_{t \leq t_i} s(t) + \sum_{t > t_i} a_{t_i} \cdot q_0(t) \\ \therefore a_{t_i} &= \frac{\sum_{t \leq t_i} q_0(t) + \sum_{t > t_i} q_0(t) - \sum_{t \leq t_i} s(t)}{\sum_{t > t_i} q_0(t)} \\ &= \frac{\sum_{t \leq t_i} q_0(t) - \sum_{t \leq t_i} s(t)}{\sum_{t > t_i} q_0(t)} + 1 \end{aligned} \tag{4}$$

전력사용량 제어를 Auto-DR에 적용하기 위하여 목표 전력곡선이 시간적인 제한을 갖도록 보완되어야 한다. Auto-DR에 참여하는 시작시간 t_s와 종료시간 t_e를 지정할 수 있도록 보정된 수식은 다음과 같다.

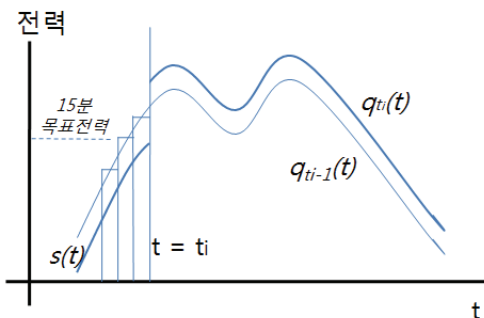


그림 4. 전력사용 예측곡선 보정.

Fig. 4. Modification of Expected Power Consumption Curve.

$$q_0(t) = \frac{Q}{\sum_{t_S}^{t_E} e(t)} \times e(t), \quad (t_S \leq t \leq t_E) \quad (3)$$

$$a_{t_i} = \frac{\sum_{t_S}^{t_i} q_0(t) + \sum_{t_i}^{t_E} q_0(t) - \sum_{t_S}^{t_i} s(t)}{\sum_{t_i}^{t_E} q_0(t)} = \frac{\sum_{t_i}^{t_E} q_0(t) - \sum_{t_S}^{t_i} s(t)}{\sum_{t_i}^{t_E} q_0(t)} + 1 \quad (4)$$

전력사용량제어 수행시간이 수요시한 15분보다 작은 경우에는 목표전력 Q 를 달성하기 위한 최대수요전력제어가 수행될 것이며, 수행시간이 24시간인 경우에는 최초의 전력사용량제어와 동일한 수행을 하게 된다.

2. 건물군 전력사용량 제어 알고리즘

클라우드 기반의 DR 적용 알고리즘[8]은 DR에 참여하는 많은 수의 수용가를 입찰에 의하여 결정하는 publisher/subscriber 아키텍처를 제시하였다. 본 논문은 입찰에 참여하는 건물군의 통합된 전력 수요를 조절할 때 유용하게 활용될 수 있다.

건물군에 전력사용량 제어 알고리즘을 적용하기 위하여 알고리즘의 보완이 필요하다. 건물군의 전력량의 합이 Q 이며, 건물 k 의 전력사용 예측곡선 $e^k(t)$ 에 비례하는 목표전력 곡선 $q_0^k(t)$ 를 구하기 위해서 a^k 를 결정하여야 한다.

$$q_0^k(t) = a^k \times e^k(t) \quad (1'')$$

$$Q = \sum_k \sum_t q_0^k(t) = \sum_k [a^k \times \sum_t e^k(t)] \quad (2'')$$

a^k 값은 선형함수의 해로 구할 수 있다. 모든 건물에 대하여 전력사용 예측곡선과 목표전력 곡선이 동일하게 스케일링된다고 가정하면, $a^1 = a^2 = \dots = a^k = a$ 가 된다.

$$Q = \sum_k [a^k \times \sum_t e^k(t)] = a \times \sum_k \sum_t e^k(t) \quad (2''')$$

$$q_0^k(t) = \frac{Q}{\sum_k \sum_t e^k(t)} \times e^k(t) \quad (3''')$$

시간제한 조건을 적용하면 OpenADR 환경하에 건물군에 대하여 적용이 가능하다.

IV. Auto-DR 하에서의 전력사용량 제어 알고리즘 활용

Open Auto-DR 시스템은 그림 5와 같이 DRAS 클라이언트는 이벤트 정보에 따라 사전에 정의된 DR 프로그램을 결정하고, 건물 자동제어 시스템에 사전에 프로그램되어진 부하제어를 실행하게 된다. 유틸리티의 가격 정책에 따라 우선순위 부하제어 및 전력사용량 기반의 부하제어를 활용할 수 있다. Open Auto-DR 시스템의 DRAS와 DRAS 클라이언트는 플랫폼 독립성과 공동 사용 가능한 시스템을 구축하기 위하여 Web Service Oriented Architecture(SOA)에 기반을 둔 XML를 사용한다. DRAS 클라이언트와 건물 자동제어 시스템 간의 인터페이스는 수용가의 개별적인 영역이라고 판단되나, BACnet 또는 Modbus 등의 표준 통신 프로



그림 5. 건물군 수요관리 소프트웨어.

Fig. 5. Demand Management Software for buildings.

토콜을 활용하여 개방성을 높일 수 있다.

Auto-DR 환경하에서 DRAS 클라이언트가 DRAS로부터 전력단가 정보를 입수하게 되면 전력단가 수준에 의하여 목표 전력사용량을 결정한다. 전력단가가 낮은 수준인 경우는 많은 전력사용량을 전력단가가 높은 수준인 경우는 낮은 전력사용량을 목표량으로 결정한다. 목표 전력사용량의 결정 로직은 전적으로 사용자의 선택적인 사항이다.

목표 전력사용량은 건물 특성에 따라 전력단가에 대한 종속 정도를 결정하여야 할 것이다. 전력단가의 차이에도 불구하고 동일한 전력사용요금을 지불하기를 원하는 경우에는 높은 전력단가 시간대에 낮은 목표 전력사용량을 결정하여야 하고, 이 경우에 건물의 근무 환경은 극히 열악해질 것이다. 낮은 전력단가에는 높은 목표 전력사용량이 결정될 것이나 높은 목표 전력사용량이 결정된다고 해도 일반적인 사용량보다 전력사용량을 높이지는 않는다.

DRAS 클라이언트는 결정된 목표 전력사용량 값을 건물 자동제어 시스템으로 전송한다. 건물 자동제어 시스템은 전력단가가 적용되는 시작시간과 종료시간 사이에 전력사용량 제어를 수행하게 된다. 유틸리티가 DRAS에게 주기적으로 가격신호를 전달하는 과정은 본 연구의 범위에서 제외하였다.

건물군의 수요반응 제어는 개별 건물의 수요반응 제어 알고리즘을 확장하여 활용할 수 있다[9]. 저자가 주관책임자로 참여한 연구과제에서 3개 건물에 대하여 java로 알고리즘을 구현하였다. 그림 5는 3개 건물에 대한 대쉬 보드(Dash Board) 화면으로 각 건물 및 합산 전력의 예측 및 실적 전력치와 절감량 정보를 간략히 보여주는 화면이다.

건물군 부하제어는 7단계의 부하제어 과정으로 구성된다.

- 1) 소비전력 수집 : 3개 건물의 15분 수요전력 자료를 I-Smart로부터 수집하였다.
- 2) 프로파일 작성 : 평일과 휴일(토요일, 일요일), 주중 휴일로 구분하여 작성하였다.
- 3) 전력 수요 예측 : 대상 건물의 평일, 휴일, 주중 휴일 프로파일을 이용하여 해당일의 전력소비 패턴을 추정한다. 건물군은 개별 건물의 합으로 전력소비 패턴을 추정하였다.
- 4) 전력사용 목표 설정 : 건물군에 대하여 누적전력 목표 Q_{total} 을 설정하고, 해당일의 개별 건물 j 의 예측 전력량 Q_j 에 비례하도록 개별 건물 j 의 전력사용 목표

