

실시간요금제하에서 산업용 수용가의 부하제어알고리즘 개발

Development of Industrial Load Control Algorithm for Factory Energy Management System (F-EMS) under Real Time Pricing Environment

전 정 표* · 장 성 일** · 김 광 호†
 (Jeong-Pyo Jeon · Sung-Il Jang · Kwang-Ho Kim)

Abstract - In real-time electricity price environment, the energy management system can provide the significant advantage to the residential, commercial and industrial customers since it can reduce the electricity charge by controlling the load operation effectively in response to time-varying price. However, the earlier studies for load management mainly focus on the residential and commercial customers except for the industrial customers because most of load operations in industrial sector are intimately related with production schedule. So, it is possible that the inappropriate control of loads in industrial sector causes huge economic loss. In this paper, therefore, we propose load control algorithm for factory energy management system(F-EMS) to achieve not only minimizing the electricity charges but also maintaining production efficiency by considering characteristics of load operation and production schedule. Considering characteristics of load operation and production schedule, the proposed load control algorithm can reflect the various characteristics of specific industrial customer and control their loads within the range that the production efficiency is maintained. Simulation results show that the proposed load control algorithm for F-EMS leads to significant reduction in the electricity charges and peak power in industrial sector.

Key Words : Real-time electricity pricing, Energy management system(EMS), Factory-EMS(F-EMS)

1. 서 론

최근 급격한 전력소비의 증가 및 발전설비의 노후화로 인하여 해마다 전력수급 문제가 심각한 문제로 대두되고 있으나, 그러나 이러한 상황에서도 아래 표1과 같이 각 수용가에서의 전력수요는 해마다 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 특히 산업용 수용가는 13년도 판매량 기준 전체 판매량의 60%를 차지하는 최대 전력소비 수용가로 나타났으며, 2009년-2013년도 기간 중 가장 높은 전력소비량 증가율 보여주고 있는 것으로 나타났다[1].

최근 정부는 반복되는 전력수급 불안정을 해소하고 전기요금 수준을 현실화하기 위해 지속적인 전기요금 단가의 인상 추진하고 있으며, 특히 타 수용가에 비하여 요금단가가 낮은 산업용 전기요금 개선에 요금정책을 집중하고 있다. 현행 산업용 수용가에서는 계절별, 시간대별 계시별요금제가 적용되고 있으나, 향후 전력수요 관리 효과를 증대시키기 위해 전력수급 상황에 따라 시간대별로 요금단가가 변동되는 실시간 전기요금제(RTP: Real Time electricity Price)의 도입이 고려되고 있는 상황이다.

표 1 2009-2013 전력판매량 추이 분석

Table 1 Analysis of electricity sale trend between 2009-2013 (단위 : GWh)

	주택용	일반용	교육용	산업용
2009	59,427	89,619	6,465	207,215
2010	63,199	97,410	7,452	232,672
2011	63,523	99,504	7,568	251,490
2012	65,483	101,592	7,860	258,101
2013	65,814	102,196	7,947	265,372
평균 증감률	2.49%	3.19%	4.90%	5.93%

실시간 전기요금제는 현행 계시별 요금제 보다 전력수급 상황을 적극 반영하여 전기요금단가를 조정함으로써 산업용 수용가로 하여금 최대부하 시간동안의 전력사용량을 절감하도록 유도하는 등의 전력 수요관리 기능을 수행할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 제조원가 중 전기요금이 차지하는 비중이 상대적으로 높은 철강, 중화학 같은 산업용 수용가는 급격한 전력요금 단가의 인상으로 인하여 가격경쟁력 저하 및 이득저감의 어려움을 호소하고 있으며, 대기업에 비하여 규모가 작은 중소기업 수용가 역시 지속적인 전력요금 단가의 인상에 따른 대책 마련에 고심하고 있으나 기술력 및 역량 부족 등으로 어려움을 겪고 있는 실정이다.

실시간 전기요금제하에서는 기존의 전기요금 환경과 달리 총 전력 사용량뿐만 아니라 시간대별 전력사용량 사용 비중 또한 전기요금을 결정하는 중요한 요소이므로 수용가는 변동요금에 따른 전기요금 상승요인을 최소화하기 위하여 그

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea.

** CTE Tech Co. Ltd, Korea.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University, Korea.

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr

Received : July 04, 2014; Accepted : October 29, 2014

들의 부하사용을 적절히 조절할 필요가 있다. 그러나 적절한 부하제어 전략이나 체계가 없이 관리자 또는 작업자의 수동적인 관리, 제어만으로 효율적인 부하제어를 수행한다는 것은 실질적으로 불가능하다고 판단된다[2-3].

따라서 향후 실시간 전기요금제하에서는 수용가내의 부하를 자동적으로 모니터링하고 적절히 제어할 수 있는 EMS(Energy Management System)의 중요성이 대단히 높다고 평가되고 있어서 지금까지 다양한 EMS 알고리즘 및 부하제어 방법에 대한 연구가 수행되었다. 하지만 산업용 수용가는 타 수용가와 달리 부하사용이 생산일정에 직접적인 영향을 주는 관계로 잘못된 부하제어는 막대한 경제적 손실을 초래할 가능성이 있으며, 때문에 지금까지의 EMS 및 부하제어는 산업용 수용가를 제외한 주택 및 사무용 수용가에 초점을 맞추고 연구가 진행되어 왔다. 지금까지의 수용가별 전기요금 단가 인상률 및 정부의 추진 방향을 고려할 때 앞으로도 산업용 전기요금의 인상률은 타 수용가의 인상률을 상회할 것으로 예상되기 때문에 산업용 수용가를 위한 EMS 및 부하제어 알고리즘의 개발은 다른 수용가에 비하여 더욱 시급한 문제로 다가오고 있다. 이에 본 연구에서는 향후 실시간 전기요금제 환경에서의 산업용 수용가의 최적의 부하제어 및 운전스케줄 산출을 위한 F-EMS(Factory Energy Management System)의 부하제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 F-EMS의 부하제어 알고리즘은 산업용 수용가에서의 부하를 제어방법에 따라 분류하고, 각각의 부하군의 특성 및 특정 수용가에서의 작업 스케줄을 포괄적으로 고려하여 산출된 최적 부하운전 스케줄을 관리자 및 작업자에게 제공하여 부하제어를 수행하게 함으로써 산업용 수용가에서의 생산효율을 저하하지 않는 범위에서 전기요금 최소화를 추구하게 된다.

2. 산업용 부하제어를 위한 주요 변수 모델링

2.1 산업용 부하의 운전 방식에 따른 분류

산업용 수용가에는 생산 활동에 필요한 다양한 부하가 존재하며 부하의 역할 및 기능에 따라 제어에 여러 가지 제약 조건이 존재한다. 따라서 효율적인 산업용 부하제어를 위해서는 부하들을 운전방식에 따라 분류하고 각각의 특성에 따라 차별화된 방식으로 제어하여야 한다. 본 연구에서는 공장내의 부하를 운전방식별로 부하군을 분류하였으며 작업자가 사전에 입력한 수용가의 작업스케줄을 고려하여 최적의 부하 운전 스케줄을 산출 및 제공함으로써 작업장 쾌적도 증진 및 작업 스케줄에 영향을 주지 않도록 하였다.

일반적으로 산업용 부하는 기기의 출력(소비전력) 및 기동시각을 조정함으로써 운전을 하기 때문에 운전방식에 따라 다음과 같이 3가지 형태로 분류가 가능하다[4].

2.1.1 Critical 부하군 - 제어 불가능

산업용 수용가의 부하 중에 사용시간이 정해져 있고, 출력의 조절을 할 수 없어서 소비전력이 고정되어 있는 부하가 해당된다. 컴퓨터, 정보기기 등이 그 대표적인 것으로서 보통 간헐적 사용패턴을 보여주며 임의로 출력 즉 소비전력을 제어할 수 없다. 이러한 부하를 Critical 부하로 규정하고 이들 부하에 대한 제어는 실시하지 않으며, 식 (1), (2)와 같

이 정해진 기동시각 및 소비전력량을 준수하며 사용된다.

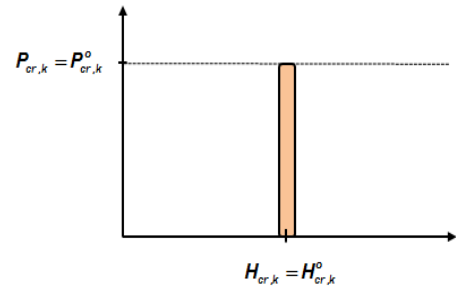


그림 1 Critical 부하군
Fig. 1 Critical Loads

$$H_{cr,k} = H_{cr,k}^o \tag{1}$$

$$P_{cr,k} = P_{cr,k}^o \tag{2}$$

여기서,

- $H_{cr,k}$: k번째, Critical 부하의 실제 기동시각
- $H_{cr,k}^o$: k번째, Critical 부하의 희망 기동시각
- $P_{cr,k}$: k번째, Critical 부하의 실제 소비전력량(kWh)
- $P_{cr,k}^o$: k번째, Critical 부하의 희망 소비전력량(kWh)
- k : 부하 Index

2.1.2 Interruptible 부하군 - 소비전력 제어가능

Interruptible 부하는 식(3),(4)와 같이 부하를 정해진 시간 동안 운전하여야 하지만 일정범위 내에서 출력, 즉 소비전력량을 조절할 수 있는 부하로 냉/난방장치가 대표적인 예이다.

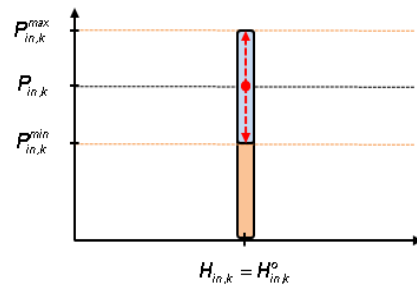


그림 2 Interruptible 부하군
Fig. 2 Interruptible Loads

$$H_{in,k} = H_{in,k}^o \tag{3}$$

$$P_{in,k}^{min}(\tau) \leq P_{in,k}(\tau) \leq P_{in,k}^{max}(\tau) \tag{4}$$

여기서,

- $H_{in,k}$: k번째, Interruptible 부하의 실제 기동시각
- $H_{in,k}^o$: k번째, Interruptible 부하의 희망 기동시각
- $P_{in,k}$: k번째, Interruptible 부하의 실제 소비전력량(kWh)
- $P_{in,k}^{min}$: k번째, Interruptible 부하의 최소 소비전력량(kWh)
- $P_{in,k}^{max}$: k번째, Interruptible 부하의 최대 소비전력량(kWh)

2.1.3 Deferable 부하군 - 기동시각 제어가능

산업용 수용가에서는 제품 생산과 전기 사용이 직결되어 있기 때문에 한번 가동하면 중간에 정지시킬 수 없는 부하가 일반적으로 많다. 따라서 이러한 부하의 운전은 해당 산업용 수용가의 작업 스케줄과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 경우에 따라서는 최초 기동을 위하여 장시간의 준비시간을 필요로 하는 경우도 있다. Deferable 부하군을 이와 같이 관리자가 작업스케줄 또는 필요에 의해 기동시간을 제어할 수 있도록 하고 출력은 고정시킨 부하로 정의하였다. 이 경우 사전에 정의한 범위내에서 기동시각만 조절 가능하도록 하며, 목표한 생산을 위해 정해진 운전시간($H_{de,k}^{duration}$)을 준수하여야 한다고 가정한다. 이를 식 (6),(7)과 같이 표현하였다.

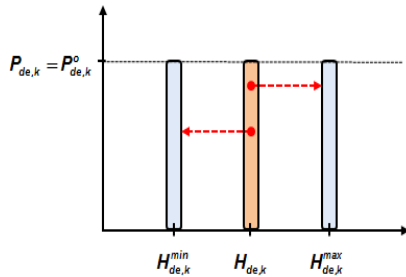


그림 3 Deferable 부하군

Fig. 3 Deferable Loads

$$H_{de,k}^{min} \leq H_{de,k} \leq H_{de,k}^{max} \tag{6}$$

$$P_{de,k} = P_{de,k}^0 \tag{7}$$

여기서,

- $H_{de,k}$: k번째, Deferable 부하의 실제 기동시각
- $H_{de,k}^{min}$: k번째, Deferable 부하의 최소 기동시각
- $H_{de,k}^{max}$: k번째, Deferable 부하의 최대 기동시각
- $P_{de,k}$: k번째, Deferable 부하의 실제 소비전력량(kWh)
- $P_{de,k}^0$: k번째, Deferable 부하의 희망 소비전력량(kWh)
- $H_{de,k}^{duration}$: k번째, Deferable 부하의 운전지속시간

2.2 산업용 수용가의 작업 환경에 대한 설정 모델

2.2.1 실내 쾌적도의 정의 및 모델링

자동화 설비로 생산공정이 진행되는 공장을 제외하고 대부분의 산업용 수용가에 대해서는 작업자의 환경에 대한 고려가 필수적이다. 특히 작업장의 적절한 실내온도의 유지는 효율적인 생산 활동이 이루어지도록 하는 중요 요소라 할 수 있겠다. 이에 본 연구에서 제안된 F-EMS 알고리즘은 최적의 실내온도 범위설정에서 냉/난방장치를 가동하도록 하여 전기요금을 최소화하는 동시에 작업 쾌적도를 최상으로 유지하도록 하는 부하제어를 실시한다.

이에 적절한 작업장의 실내온도를 결정하기 위하여 ISO-7730에서 규정한 PMV(Predicted Mean Vote)를 도입하도록 한다. PMV는 인간의 온열환경에 대한 반응의 평균치를 예측한 것으로 3(hot), 2(pleasantly warm), 1(warm),

0(neutral), -1(cool), -2(pleasantly cool), 3(cold)의 7단계로 다수의 사람들이 특정 실내온도에 대한 느끼는 온열감을 정량화한 것이다. PMV의 식은 다음과 같다[6].

$$PMV(\tau) = \frac{(0.303e^{-0.036M(\tau)} + 0.028) \times \left\{ \begin{aligned} & (M(\tau) - W(\tau)) - 0.305 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M(\tau) - W(\tau)) - P_a(\tau)] \\ & - 0.42 \times [(M(\tau) - W(\tau)) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(\tau)(5867 - P_a(\tau)) \\ & - 0.0014M(\tau)(34 - T_i(\tau)) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl}(\tau) + 237)^4 \\ & - (T_r(\tau) + 237)^4] - f_{cl} h_c(\tau)(T_{cl}(\tau) - T_i(\tau)) \end{aligned} \right\}}{8} \tag{8}$$

여기서,

- $M(\tau)$: τ 시점에서의 인체 활동량(W/m^2)
- $W(\tau)$: τ 시점에서의 외부 일 (W/m^2 , 0)
- $P_a(\tau)$: τ 시점에서의 수증기 분압(Pa), $= (rh(t)/100) \times P_{ws}(t)$
- $rh(\tau)$: τ 시점에서의 상대습도(%)
- $P_{ws}(\tau)$: τ 시점에서의 포화 수증기압(Pa)
- $T_{cl}(\tau)$: τ 시점에서의 의복 표면온도($^{\circ}C$)
- $T_i(\tau)$: τ 시점에서의 실내온도($^{\circ}C$)
- $T_r(\tau)$: τ 시점에서의 평균 복사온도($^{\circ}C$), $= T_i(t)$,
- $h_c(\tau)$: τ 시점에서의 인체 표면의 대류 열전달률($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)
- f_{cl} : 착의시 피부 노출 면적비
- I_{cl} : 의복의 단열값($m^2 \cdot ^{\circ}C/W$)

PMV로 대표되는 실내 쾌적도는 일반적으로 다양한 변수에 의하여 영향을 받으나, 본 연구에서는 PMV에 큰 영향을 주는 실내온도, 습도, 활동량 등을 변수로 PMV를 산출하였으며, 다른 값들은 참고문헌 [7]을 참조하여 표 2와 같이 설정하였다.

표 2 PMV의 파라미터

Table 2 Parameters in a PMV

항목	단위	규격	
		여름	겨울
평균 복사온도 (T_r)	[$^{\circ}C$]	T_i	
의복의 단열값 (I_{cl})	[$m^2 \cdot ^{\circ}C/W$]	0.094	0.11
실내 기류속도 (V_{ar})	[m/s]	0.2	0.1

의복의 열저항(I_{cl}) 0.094, 0.11는 각각 일반적인 여름/겨울철 의복의 단열값을 대표하는 값이며, 실내 기류속도의 경우 일반적으로 겨울철 0.1m/s, 여름철 0.2m/s를 적용한다. 아래의 그림 4는 의복 열저항 0.094 [$m^2 \cdot ^{\circ}C/W$], 실외온도 30 [$^{\circ}C$], 상대습도 [30%], 활동량 70 [W/m^2] 조건에서의 실내온도 변화에 따른 PMV 값을 보여준다.

일반적으로 PMV는 0에 근접한 값을 가질수록 거주자가 쾌적함을 느끼며, 0에서 멀어질수록 거주자는 불쾌감을 느끼게 된다. 따라서 본 연구에서의 F-EMS의 최적 부하제어 알고리즘은 관리자가 사전에 입력한 작업 스케줄 및 PMV의 제약조건인 PMV_{limit} 에 따라 단계별 적정 PMV를 유지하기 위한 냉/난방장치의 전력사용량 제어범위를 산출하고, 이를 만족하는 범위에서 요금최소화를 위한 냉/난방장치의 소비 전력량을 결정하게 된다.

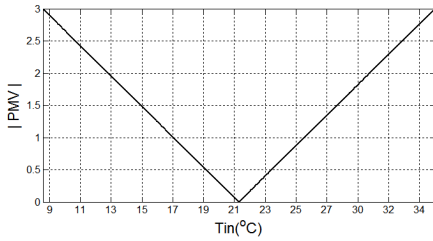


그림 4 실내온도와 |PMV|의 관계
Fig. 4 the |PMV| and the indoor temperature

2.2.2 실내 온도에 따른 전력소비량 모델링

본 연구에서는 작업환경의 쾌적함을 유지하기 위해서 냉난방 부하를 사용하여 작업장의 온도를 조절하도록 하였다. 전술한 바와 같이 냉난방장치는 일정범위에서 출력, 즉 소비 전력량을 조절할 수 있는 Interruptible 부하의 대표적인 기기이다. 따라서 본 연구에서는 Interruptible 부하로 냉난방 부하를 사용하고 실내 쾌적도 조절을 위해 필요한 시간에 적절히 출력제어가 가능하도록 하였다. 냉난방장치의 설정 온도에 따른 소비전력량은 다음과 같이 정의하였다[5].

$$P_{in,k}(\tau) = P_{a.c,k}(\tau) = \left[\frac{\epsilon_k T_i(\tau) - T_{set,k}(\tau)}{1 - \epsilon_k} + T_o(\tau) \right] \frac{A_k}{\eta_k} \quad (5)$$

여기서,

- $P_{a.c,k}(\tau)$: k번째, 냉/난방장치의 소비전력량(kWh)
- $T_{set,k}(\tau)$: τ 시점에서의 냉/난방장치의 설정온도($^{\circ}C$)
- $T_i(\tau)$: τ 시점에서의 실내온도($^{\circ}C$), $= T_{set,k}(\tau-1)$
- $T_o(\tau)$: τ 시점에서의 실외온도($^{\circ}C$)
- η_k : 냉방시스템의 성능계수(COP)
- A_k : 주택의 열전도율($kW/^{\circ}C$)
- ϵ_k : 건물의 열 시간계수
- τ : 부하제어 Time Slot 번호

냉/난방장치의 설정온도($T_{set,k}(\tau)$)는 τ 시점에서의 냉/난방 장치의 소비전력량($P_{a.c,k}(\tau)$) 및 $\tau+1$ 시점에서 실내온도($T_i(\tau+1)$)를 결정하는 요소이며, 따라서 각 단계별 소비 전력량($P_{a.c,k}(\tau)$)의 가변범위는 작업 쾌적도를 해치지 않는 실내온도($T_i(\tau)$) 범위에서 결정된다.

3. F-EMS를 위한 최적 부하제어 알고리즘의 제안

3.1 F-EMS 최적 부하제어 알고리즘 절차

다음 그림 5는 본 연구에서 제안된 F-EMS의 최적 부하제어 알고리즘의 진행순서를 보여준다.

3.1.1 기본 운영데이터 입력

1차적으로 관리자 및 작업자는 최적의 부하운전 스케줄을 결정하기 위하여 출/퇴근 시각 및 부하정보 등과 같은 F-EMS 부하제어를 위한 기본데이터를 입력한다.

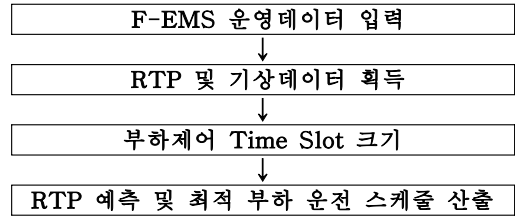


그림 5 제안된 F-EMS 알고리즘 절차
Fig. 5 Procedure of proposed F-EMS Algorithm

표 3 F-EMS 운영 파라미터

Table 3 Operation Parameters for the proposed F-EMS

항목	입력 데이터
작업스케줄 정보	H_{IN} : 출근시각(1~24h)
	H_{OUT} : 퇴근시각(1~24h)
	H_{REST} : 휴식 및 점심시각(1~24h)
부하정보	$H_{de,k}^{min}$: k번째, Deferable 부하의 최소 기동시간
	$H_{de,k}^{max}$: k번째, Deferable 부하의 최대 기동시간
	$H_{de,k}^{duration}$: k번째, Deferable 부하의 운전지속시간
	PMV_{limit} : 실내온도 제어범위

3.1.2 RTP 및 기상데이터 획득

F-EMS 시스템은 매일 RTP 공지시각(H_{RTP})에 최적 부하운전 스케줄 산출에 사용하기 위하여 외부기관으로부터 다음날의 RTP 및 기상 데이터를 전송받는다. 여기서, H_{RTP} 는 RTP 공지 시각을 말한다.

3.1.3 부하제어 Time Slot 크기 결정

수용가에서의 부하운전 스케줄의 크기는 해당 수용가의 작업 스케줄 및 부하사용 특성(가동시간, 운전지속시간)에 따라 달라지는 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서의 F-EMS 최적 부하제어 알고리즘은 작업자가 사전에 입력한 부하정보를 바탕으로 다음과 같이 RTP 공지시각(H_{RTP})을 기점으로 하여 다음과 같이 최적 부하운전 스케줄을 결정하기 위한 최대 부하제어 Time Slot의 크기(τ_{max})을 결정한다.



그림 6 부하제어 Time Slot의 개념도
Fig. 6 Diagram of load control Time Slot

여기서,

$$\tau_{max}: \text{최대 부하제어 Time Slot, } = \max\{\tau_{\alpha}, \tau_{\beta}\}$$

$$\tau_{\alpha} = 48 - (H_{RTP} - 1)$$

$$\tau_{\beta} = (H_{de,k}^{max} - H_{RTP}) + H_{de,k}^{duration}$$

일반적으로 Deferable 부하의 경우 한번 가동시 일정시간

($H_{de,k}^{duration}$) 동안 지속적으로 운전되어야 하는 특성을 가지고 있으므로, 최대 부하제어 Time Slot의 크기(τ_{max})는 1차적으로 Deferable 부하운전 스케줄에 따라 변동한다. 예를 들어, RTP가 16시에($H_{RTP}=16$) 공지되는 경우 전일 공지된 RTP와 해당 공지된 다음날 24시간 동안의 RTP, 총 33시간($\tau_\alpha = 48 - (16 - 1) = 33$) 동안의 RTP가 결정되게 된다. 그러나 Deferable 부하가 $H_{de,k}^{max} = 21$, $H_{de,k}^{duration} = 36$ 의 특성을 가진 경우 최대 Time Slot의 크기는 Deferable 부하의 운전시간을 보장하기 위하여 최소한 $\tau_\beta = (21 - 16) + 36 = 41$ 를 만족하여야 하며, 만약 Deferable 부하가 없거나, 가동지속시간이 짧은 경우 부하제어 Time Slot의 크기는 τ_α 로 결정되게 된다.

3.1.4 RTP 예측 및 최적 부하 운전 스케줄 산출

위에서 언급된 바와 같이 RTP 단가 공지시각을 기준으로 $1 \sim \tau_\alpha$ 에서의 RTP 단가정보를 알 수 있으나, Deferable 부하의 운전 특성에 따라 RTP 단가 정보를 알 수 없는 RTP 불확실 구간 $\tau_\alpha \sim \tau_\beta$ 이 발생한다. 따라서 제안된 F-EMS 알고리즘은 해당 구간에 대한 RTP 단가 예측을 수행하며, 이를 바탕으로 하여 최종적으로 최적의 부하운전 스케줄을 산출하게 된다. 따라서 본 알고리즘에서는 RTP가 정해지지 않은 구간에 대해 전기요금 예측이 필요하다. 현재 산업용 수용가에 대해서는 계약전력별로 계시별 요금제가 적용되고 있기 때문에 본 연구에서는 현재 제주 스마트그리드 실증단계에 대해 시범적용중인 산업용 실시간 전기요금(RTP : Real Time Pricing)을 활용하도록 한다[8]. 산업용 RTP는 다음 식(6)와 같이 전력 도매시장에서 거래되는 계통 한계가격(SMP: System Marginal Price)을 기반으로 결정된다.

$$C_g(\tau) = SMP(\tau) \pm \beta \tag{6}$$

여기서,

- $C_g(\tau)$: RTP 요금단가(원/kWh)
- $SMP(\tau)$: 시간대별 SMP 단가(원/kWh)
- β : 가감조정계수

가감조정계수(β)는 현행 적용중인 요금제와 SMP단가간의 차이발생에 따른 수용가별 전력판매 수입을 보상하기 위한 계수로 사용되었다. 또한 2.1절에서 언급된 바와 같이 Deferable 부하의 운전조건에 따라 RTP가 불확실한 구간 $\tau_\alpha \sim \tau_\beta$ 에서의 발생 부하운전 스케줄을 산출할 필요가 있으며, 이에 본 연구에서 제안된 F-EMS 부하제어 알고리즘은 이들 구간에서의 RTP 예측 작업을 수행하며, 이를 바탕으로 전기요금을 최소화하기 위한 최적 부하운전 스케줄을 산출한다. 참고문헌 [9]를 참조하여 과거 데이터를 기반으로 RTP 단가를 예측하는 방법을 도입하였으며, 현재 RTP 데이터가 존재하지 않는 관계로 SMP 데이터와 식(6)을 이용하여 과거의 RTP 단가를 산출하여 사용하였다. 지난 2009~2013년 5년간의 RTP 단가의 상관관계를 분석하여 본 결과 현재 RTP 단가와 1일전, 2일전, 7일전, 14일전의 RTP 단가간의 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이러한 분석결과를 토대로 D-1, D-2, D-7, D-14의 RTP 단가를 이용하여 현재 RTP가 불확실한 $\tau_\alpha \sim \tau_\beta$ 구간에 대한 RTP 단가

예측을 실시하였다.

$$C_g(\tau) = a_1 C_g^{D-1}(\tau) + a_2 C_g^{D-2}(\tau) + a_3 C_g^{D-7}(\tau) + a_4 C_g^{D-14}(\tau) + a_5 \tag{7}$$

$$\forall \tau \in [\tau_\beta : \tau_\alpha]$$

여기서,

- $C_g^{D-1}(\tau)$: 1일전의 τ 시점에서의 RTP 단가
- $C_g^{D-2}(\tau)$: 2일전의 τ 시점에서의 RTP 단가
- $C_g^{D-7}(\tau)$: 7일전의 τ 시점에서의 RTP 단가
- $C_g^{D-14}(\tau)$: 14일전의 τ 시점에서의 RTP 단가
- a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 : 회귀계수

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 는 과거 RTP 단가의 회귀분석을 통하여 산출이 가능하며, 본 연구에서는 지난 5년간의 RTP 단가를 이용하여 계절별, 요일별 회귀계수를 산출 이용하였다.

표 4 RTP 예측을 위한 회귀 계수(여름철)

Table 4 Coefficients for RTP Prediction(Summer)

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
월	0.88	0.09	0.22	-0.18	5.99
화	0.37	0.00	0.27	0.30	11.94
수	1.00	-0.11	0.05	0.06	-1.60
목	0.56	0.26	0.13	0.05	0.26
금	0.95	0.03	-0.06	0.07	1.19
토	0.37	0.17	0.36	0.05	1.75
일	0.23	-0.13	0.51	0.39	-2.33

3.2 F-EMS 최적부하제어를 위한 목적함수 및 제약조건의 정의

다음 식(8)~(13)는 산업용 수용가에서의 최적 부하운전 스케줄 산출을 위해 제안된 최적화 함수식 및 제약조건이다. 제안된 최적화 함수식은 RTP 환경에서 관리자 및 작업자에 의해 사전에 입력된 정보를 바탕으로 생산 효율성을 저하시키지 않는 범위에서 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 최적의 $P_{in,k}(\tau)$, $H_{de,k}$ 을 결정한다.

Minimize Cost :

$$\min \left\{ \sum_{\tau=1}^{\tau_{max}} \left[C_g(\tau) \left(\sum_{k=1}^{N_{cr}} P_{cr,k}(\tau) + \sum_{k=1}^{N_m} P_{in,k}(\tau) + \sum_{k=1}^{N_d} P_{de,k}(\tau) \right) \right] \right\} \tag{8}$$

Subject to:

$$0 \leq P_{in}(\tau) \leq P_{in,k}^{rated} \tag{9}$$

$$0 \leq P_{load}(\tau) \leq P_{construct} \tag{10}$$

$$0 \leq |PMV(\tau)| \leq PMV_{limit} \quad \forall \tau \in [H_{IN} : H_{OUT}] \tag{11}$$

$$0 \leq |PMV(\tau)| \leq PMV_{limit} + \gamma \quad \forall \tau \in [H_{REST}] \tag{12}$$

$$H_{de,k}^{min} \leq H_{de,k} \leq H_{de,k}^{max} \tag{13}$$

여기서,

$P_{load}(\tau)$: τ 시점에서의 부하전력량(kWh),

$$= \sum_{k=1}^{N_{cr}} P_{cr,k}(\tau) + \sum_{k=1}^{N_m} P_{in,k}(\tau) + \sum_{k=1}^{N_d} P_{de,k}(\tau)$$

$P_{in,k}^{rated}$: Interruptible 부하의 최대 정격 전력소비량(kWh)

- $P_{contract}$: 계약 전력량(kWh)
- γ : H_{REST} 시점에서의 PMV_{limit} 조정계수
- N_{cr} : Critical 부하대수
- N_{in} : Interruptible 부하대수
- N_{de} : Deferable 부하대수

최적화 변수 $P_{i,n,k}(\tau)$ 는 2.1절에서 언급되었듯이 설정온도 $T_{set,k}(\tau)$ 에 따라 결정되는 k번째 interruptible 부하의 소비 전력량을 의미하며, 이는 관리자에 의해 사전에 결정된 적정 실내온도 범위 PMV_{limit} 및 $P_{i,n,k}^{rated}$ 만족하는 범위에서 각 시점별로 최적의 값을 결정하게 된다. 또한 식 (12)와 같이 PMV_{limit} 조정계수(γ)을 도입하여, 점심시간 및 휴식시간에 PMV 의 제어범위를 보다 넓게 설정하여 냉/난방에 대한 유연한 제어가 이루어지도록 하였다.

최적화 변수 $H_{de,k}$ 는 k번째 Deferable 부하 최적 기동시각을 의미하며, 이는 사전에 관리자에 결정된 범위 $H_{de,k}^{min} \sim H_{de,k}^{max}$ 안에서 최적의 기동시각을 결정한다. 이를 통하여 Deferable 부하군의 최적 소비 전력량의 배치를 통하여 전기요금을 최소화할 수 있게 한다. 이를 통하여 제안된 F-EMS의 최적 부하 제어 알고리즘은 RTP환경에서 생산효율성을 적절히 유지하는 동시에 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 부하의 운전 스케줄을 결정할 수 있겠다.

3.3 최적화 프로그램

본 연구에서의 사용된 최적화 문제를 해결하기 위하여 다양한 형태의 최적화 문제를 풀 수 있는 기능을 제공하는 MATLAB의 Optimization Toolbox를 이용하였다. 현재 제안된 F-EMS의 최적화 식은 선형 목적함수와 비선형 제약조건이 혼합된 형태로 구성되어 본 논문에서는 제약조건을 가진 비선형최적화 문제에 적합한 “Fmincon” 풀이법을 적용하였다[10]. MATLAB의 “Fmincon” 풀이에서는 총 4가지의 최적화 풀이 알고리즘을 제공하고 있으나, 본 논문에서는 다른 비선형 기법에 비하여 해의 산출속도가 비교적 빠르고 효율적인 “SQP(Sequential Quadratic Programming)” 알고리즘을 1차적으로 적용 하였으며, 이후 최적해에 수렴하지 않는 경우에 한하여 2차적으로 해의 산출속도는 다소 느리지만 신뢰도가 높은 “Active-Set”알고리즘을 적용하여 최적해를 산출하였다. 본 연구에서 1차적으로 사용되는 SQP법에서의 최적해 산출 절차는 아래 그림 7과 같다[14].

SQP법은 최적값을 도출하기 위하여 최적화 정식화를 반복계산에 바탕을 두고 다음과 같이 각 반복에서 Taylor 근사에 의하여 목적함수는 2차식으로 제약조건은 1차식으로 근사시켜 해를 탐색하게 된다.

Minimize:

$$q(x) = \frac{1}{2} d^T H d + \nabla f(x_k)^T d \quad (14)$$

Subject to:

$$\nabla g_i^T + g_i^k \leq 0, i = m_e + 1, \dots, m \quad (15)$$

$$\nabla h_i^T + h_i^k = 0, i = 1, \dots, m_e \quad (16)$$

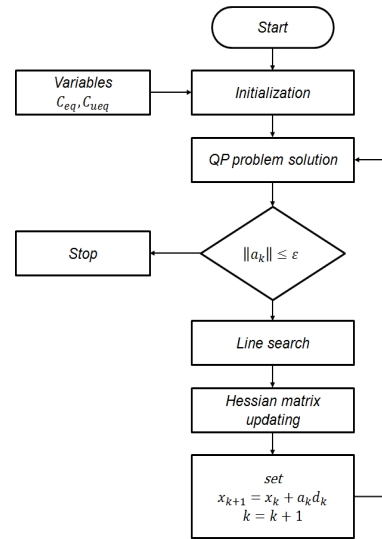


그림 7 SQP법을 이용한 최적화 절차
Fig. 7 The optimization flow chart using the SQP method

여기서, H는 Lagrange function의 Hessian 행렬을, x_k 는 현재 반복단계에서의 변수값, d_k 는 현재 반복단계에서 산출된 탐사방향 벡터 그리고 x_k 는 k는 반복단계에서 산출된 최적해를 의미한다. SQP법은 위의 순서도와 같이 각각의 초기 변수 x_0 와 equality 및 inequality 제약식 계수(C_{eq} , C_{ueq}) 초기치를 선정하고 초기 Hessian Matrix 값 H_0 값을 계산한다. 그리고 부분제를 계산하여 탐사방향 벡터 d 를 구한 후 아래의 식을 통하여 새로운 설계변수 x_{k+1} 를 계산한다.

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \quad (17)$$

위의 식에서 a_k 는 해를 산출하기 위한 이동거리를 의미하며, Line search를 통하여 얻을 수 있다. 만약 이동거리 a_k 가 수렴조건을 만족하면 계산이 종료되고 그렇지 못하면 Hessian Matrix가 BFGS(Broyden Fletcher Goldfarb Shanno Method)에 의해 개선되어 반복 계산을 수행한다. BFGS은 매 반복 때마다 Hessian 행렬을 수정하는 방법으로 정확한 Line search 방법이 사용되면, 양정의 근사 Hessian Matrix를 유지할 수 있게 된다.

“Active-Set” 알고리즘의 경우 일반적인 최적화기법과 달리 “Feasible sets” 구간에서만 최적해를 탐색하게 된다. Feasible sets란 여러 제약조건 중에서 최적해가 만족해야 하는 제약조건 구간으로 Active-Set 알고리즘은 이 구간에 한정된 값에 한하여 최적해를 탐색하므로 결과적으로 제약조건이 제거된 최적화 문제로 해를 산출하게 된다. Feasible sets은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \{j : g_j(x_k) \geq V(x_k) - \delta, j = 1, \dots, m\} \quad (18)$$

$$I_2 = \{j : h_j(x_k) \geq V(x_k) - \delta, j = 1, \dots, m\} \quad (19)$$

여기서,

δ : 사용자에게 의해 정의된 미소값

V : maximum violation, $V(x) = \max\{|h_j(x)|, g_i(x)\} \forall j=1, \dots, m$

“Active-Set” 알고리즘의 진행과정은 위에서 언급된 SQP 알고리즘과 동일하며, 최대위반 제약조건값 V_i 값과 이동거리 $\|a_k\|$ 이 주어진 기준보다 작으면 계산을 종료하게 된다.

4. 사례연구

4.1 사례연구의 개요

이번 절에서는 제안된 최적 부하제어 알고리즘의 효과를 검증하기 위한 사례연구 결과를 기술한다. 사례연구를 위해서 현재 서울에 위치한 전기장비 제조업체를 대상으로 선정하였으며 시뮬레이션 기간은 2013년 8월 한달로 하고, 서울 지역의 기상데이터 및 SMP 데이터를 활용하였다[11-12].

그 외 시뮬레이션 조건은 표 5와 같다.

표 5 시뮬레이션 산업용 수용가의 데이터

Table 5 Data of Simulation Industrial Customer

업종	전기장비 제조업
지역	서울
계약전력($P_{constract}$)	150kW
출근시간(H_{IN})	9시
퇴근시간(H_{IN})	18 or 21시
휴식 및 점심시간(H_{REST})	12~13시
RTP 공지시간(H_{RTP})	16시

제안된 최적 부하제어 알고리즘의 시뮬레이션을 위하여 대상 수용가의 부하정보를 설정할 필요가 있으며, 이에 본 연구에서는 다음과 같이 Critical, Interruptible, Deferable 부하정보를 결정하였다.

4.1.1 Critical 부하

대상 산업용 수용가는 전기장비 제조업체로서, 이에 대한 Critical 부하의 패턴은 통계청의 “전력소비행태분석 품질개선 컨설팅 보고서”[13] 및 설정된 계약전력의 크기를 고려하여 아래 그림 8과 같이 산출하였으며, 제안된 F-EMS에서는 Critical 부하에 대한 제어는 하지 않는 것으로 정하였기 때문에 알고리즘 상에서 부하사용량은 그림 8의 패턴을 고정적으로 적용하였다.

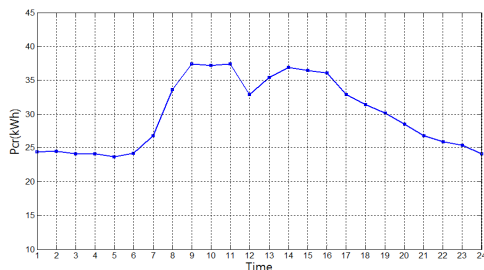


그림 8 Critical 부하 사용량 패턴
Fig. 8 Load pattern for Critical loads

4.1.2 Interruptible 부하

본 연구에서 소비 전력의 조절이 가능한 Interruptible 부하는 냉난방장치로 정하였다. 대상 업체의 냉난방기에 대한 데이터는 다음 표 6과 같다.

표 6 Interruptible 부하 정보(여름철)

Table 6 Data of Interruptible Load(Summer)

제어방식	기존방법	제안된 방법
형태		냉방장치
대수(N_{in})		1대
최대 정격소비전력($P_{in,k}^{rated}$)		14kW
성능계수(η_k)		3.0
수용가 열전도율(A_k)		1.93[kW/°C]
열 시간계수(ϵ_k)		0.96
설정온도($T_{set,k}(\tau)$)	22[°C]	$PMV_{limit} = 0.5$ $\gamma = 0.1$
사전냉방 가능여부	불가능	가능

위의 표에서 ϵ_k , A_k 및 η_k 는 각각 건물 실내 열 특성에 따른 상수값 및 냉/난방장치의 에어컨의 기계적 특성이며, 본 연구에서는 실제 제품에 명시된 η_k 를 사용하였으며, 참고 문헌[5]의 수치와 실제 제품의 η_k 를 함께 고려하여 ϵ_k , A_k 를 결정하였다. 또한 기존 제어방법에서의 여름철 실내 설정온도는 여름철 평균 냉방장치의 설정온도를 고려하여 22[°C]로 설정하였으며, 제안된 방법의 설정온도는 작업시간에서의 작업자의 활동량을 고려하여 $|PMV|$ 값은 0.5 이내로 제한하였으며, 이는 일반적으로 PMV 값이 0.5 이내로 유지되는 경우 대다수의 사용자가 현재 실내온도에 대하여 만족감을 느끼는 경우를 반영한 경우이며[7], 작업이 이루어지지 않는 점심시간 및 휴식시간에는 조정계수 $\gamma=0.1$ 로 설정하여 0.6이내에서 제어되도록 하였다.

4.1.3 Deferable 부하

본 연구에서 Deferable 부하는 전기기기내의 절연재료로 사용되는 EPOXY 수지를 단단히 굳게 만드는 장비인 경화기로 설정하였다. 경화기는 일반적으로 한번 가동될 경우 경화/후경화 과정을 30시간 이상 지속해야 하는 특성을 가진 부하로서, 대상업체에서 사용하고 있는 경화기에 대한 기본 데이터는 표 7과 그림 9과 같다.

본 연구에서 적용된 경화기는 그룹A(k=1,2), 그룹B(k=3,4,5) 총 5대의 경화기가 그룹별로 격일 운전하게 되며, 기존에는 지정

표 7 Deferable 부하정보(여름철)

Table 7 Data of Deferable Loads(Summer)

제어방식	기존방법	제안된 방법	
형태		경화기	
대수(N_{de})		5대	
기동지속시간($H_{i,k}^{duration}$)		36시간	
기동시간 ($H_{de,k}$)	k=1	19	18-20
	k=2	20	18-21
	k=3	19	18-20
	k=4	20	18-21
	k=5	20	18-21

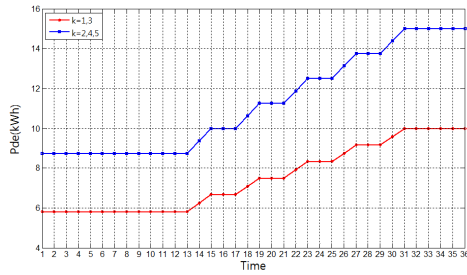


그림 9 Deferable 부하사용량 패턴
Fig. 9 Load pattern for Deferable loads

된 시각에 경화기가 기동되는 반면, 제안된 부하제어방법을 적용할 경우 사전에 관리자가 지정한 시간범위내($H_{de,k}^{min} \sim H_{de,k}^{max}$)에서 경화기의 기동시각을 변동시킬 수 있도록 하였다.

4.2 1일 부하제어결과

본 연구에서 제안된 부하제어전략의 효과를 검증하기 위하여 1차적으로 2013년 8월 20일 하루 운전결과를 산출하였다. 아래의 그림 10, 11은 각각 해당 일에 대한 기상데이터

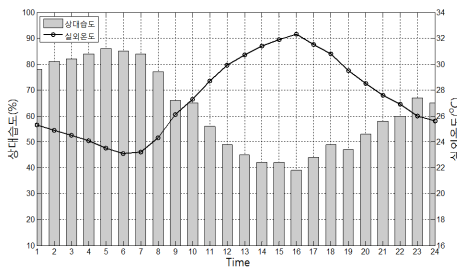


그림 10 실외온도 및 상대습도
Fig. 10 Outdoor temperature and Relative humidity

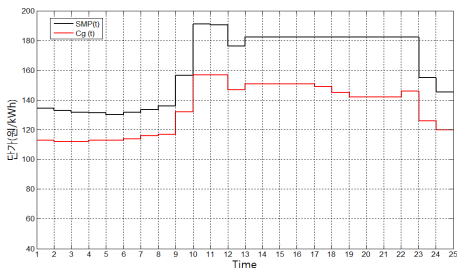


그림 11 실시간 전기요금 곡선
Fig. 11 Real time electricity charge curve

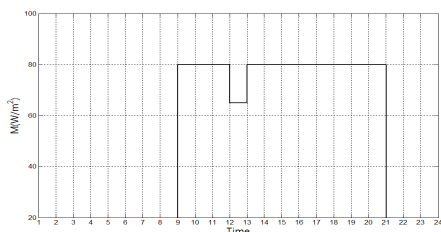


그림 12 작업자의 활동량 스케줄
Fig. 12 The schedule of user's metabolic rate

및 RTP 단가를 보여주며, 그림 12는 8월 20일의 작업 스케줄(9시 출근, 21시 퇴근)에 따라 모델링 된 활동량을 보여준다. 기존의 참고문헌[7]을 참조하여 작업시간에는 $80[W/m^2]$ 으로 설정하였으며, 휴식시간에는 $65[W/m^2]$ 로 설정하였다.

20일을 대상으로 한 부하제어 결과는 그림 14 및 표 8과 같다. 기존의 부하제어방법의 경우 일반적으로 냉방장치를 고정된 설정온도로 운전하는 점을 고려하여 표 6에서 언급된 바와 같이 냉방온도를 $22[^\circ C]$ 로 설정하고, 이를 유지하기 위하여 그림 13와 같이 근무시간 동안 냉방운전을 지속하도록 하였다. 반면, 제안된 부하제어 방법에서는 지정된 PMV_{limit} 을 만족하는 범위에서 냉방장치의 출력을 적절히 조절하고, 필요시 출근전 사전냉방 실시하여 냉방을 통하여 전기요금의 지출이 최소화되도록 제어한다.

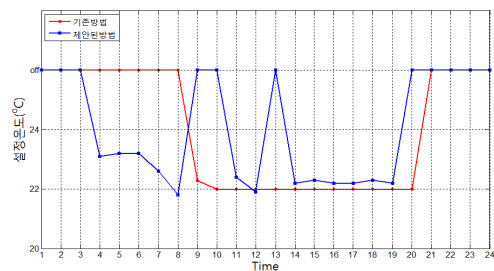


그림 13 설정온도 비교
Fig. 13 Comparison of the setting temperature

또한 Deferable 부하인 경화기의 경우 기존에 작업자가 설정한 기동시각에 운전하는 것을 기존 부하제어 방식으로 결정하였으며, 이에 기존 부하제어방식에서의 경화기는 표7에 언급된 기동시각에 고정적으로 운전을 시작하도록 설정하였다. 반면 제안된 부하제어 방법에서는 A그룹의 경화기($k=1,2$)는 19일에 기동을 시작하기 때문에 지속적으로 운전할 수밖에 없어서 20일에는 제어가 불가능한 Critical 부하로 분류되고, B그룹의 경화기($k=3,4,5$)에 대한 최적 기동시각만 결정하게 된다. 제안된 최적 부하제어에 의하여 B그룹의 경화기는 기존 기동시각 보다 1시간 이후 기동을 시작함으로써, RTP 단가 높은 시간대에 전력사용량이 집중되는 것을 막도록 제어됨을 볼 수 있다.

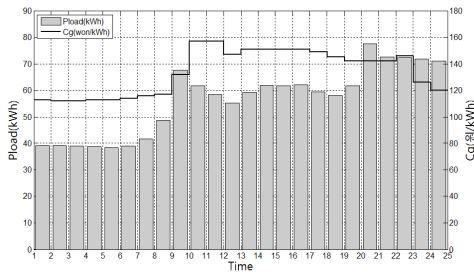
표 8 Deferable 부하 기동시각 비교(B그룹)

Table 8 Comparison of the starting time of Deferable loads

제어방식	지정시각($H_{de,k}^o$)	기존방법	제안된 방법
기동시각 ($H_{de,k}$)	k=1	19	-
	k=2	20	-
	k=3	19	20
	k=4	20	21
	k=5	20	21

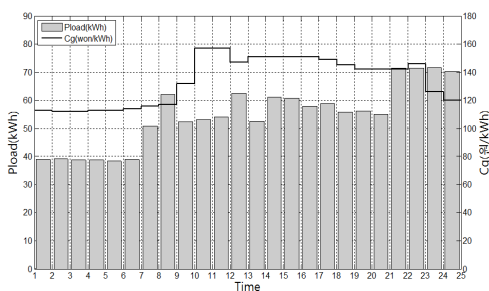
이와 같이 제안된 최적 부하제어 방법의 경우는 전기요금의 단가변동에 따라 유연하게 부하운전을 제어하여 그림 14의 (b)와 같이 RTP 단가가 높은 시간대에는 최대한 부하사용을 억제하고 단가가 저렴한 시간대에 부하사용이 집중하

도록 하는 등의 효율적 부하 사용 및 배치를 통하여 전기요금
 금이 최소화 되도록 제한한다.



(a) 기존 제어 방법

(a) The conventional load control method



(b) 제안된 최적 부하제어 방법

(b) The proposed load control method

그림 14 소비전력량과 설정온도의 비교

Fig. 14 temperature setting and power consumption

아래의 그림 15는 제어방법에 따른 작업장의 $PM10$ 곡선을 보여주고 있다. 앞 절에서 언급되었듯이 일반적으로 $PM10 \leq 0.5$ 인 경우 대다수의 주거자 및 작업자들이 쾌적함을 느끼게 되는 경우로 제안된 제어방법은 모든 대부분의 작업시간에서 $PM10 \leq 0.5$ 를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 기존제어 방법에서는 총 12시간의 작업시간 중 9시와 11시 사이에 적정 $PM10$ 수치를 초과하는 것으로 나타나 제안된 방법에 비하여 작업장 쾌적도가 적절히 유지되지 못한 것으로 분석되었다.

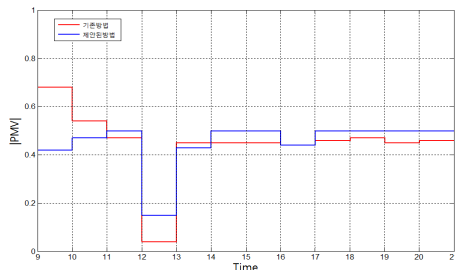


그림 15 $PM10$ 의 비교

Fig. 15 Comparison of the $PM10$

아래의 표 9는 8월 20일의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 본 연구에서 제안된 최적 부하제어 방법을 적용할 경우, 기존 부하운전방식에 비해 약 4.5%의 전기요금
 금이 절감되었다.

이와는 별도로 냉난방장치의 사전 운전 및 부하 운전시간의 조절을 통하여 피크시간대에 부하사용이 집중되는 것을 억제하여 기본요금 또한 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

표 9 8월 20일의 시뮬레이션 결과 비교

Table 9 Comparison of the simulation results on August 20

제어 방식	기존방법	제안된 방법
일일 전력사용량(kWh)	1,356	1,131
최대 부하사용량(kWh)	77.4	71.6
일일 전기요금(원)	185,304	176,935
요금 변화율(%)		-4.52%

4.3 1개월 부하제어결과

이번 절에서는 2013년 8월의 기상데이터 및 SMP 데이터를 이용하여 수행한 기존 부하운전방식과 제안된 부하제어 방법의 한 달간 시뮬레이션 결과를 보여준다. 8월 한 달간의 시뮬레이션 결과는 아래의 표 10 과 그림 16과 같다.

표 10 8월의 시뮬레이션 결과비교

Table 10 Comparison of the simulation results for August

제어 방식	기존 방법	제안된 방법
월 전력사용량(kWh)	42,899	42,883
평균 $PM10$	0.54	0.45
월 전기요금(원)	5,528,428	5,388,168
요금 변화율(%)		-2.54%

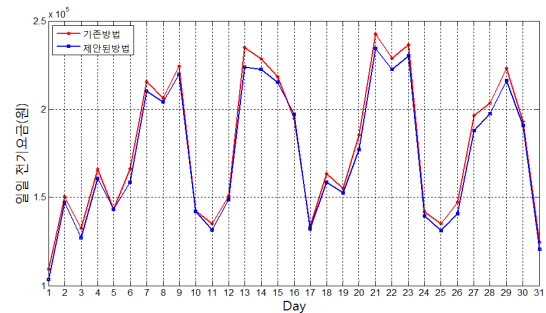


그림 16 8월 전기요금 비교

Fig. 16 Comparison of the Electricity Charges for August

본 연구에서 제안된 최적 부하제어 전략을 통하여 약 한 달간의 운행 시뮬레이션 결과 약 2.54%정도의 요금절감 효과 및 작업장의 쾌적도를 증진 시키는 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 F-EMS 최적부하제어 알고리즘을 산업용 수용가에 적용할 경우, 전력의 효율적인 사용에 따른 일정수준의 전력사용량 요금 절감과 함께 피크전력의 저감을 통한 기본요금의 절감을 얻을 수 있을 것으로 평가되었으며, 작업장의 쾌적도 또한 저하시키지 않고 오히려 적정수준을 유지할 수 있다는 가능성을 보였다. 그러나 8월 20일의 절감율 4.52%와 8월 한 달간의 절감율인 2.54%의 차이에서 볼 수 있듯이 대부분의 날에는 요금이 절감되었으나, 요금이 절감되지 않는 경우도 일부 발생하였다. 요금 절감이 크지 않은 날은 대부분 전기요금
 금이 공지되지 않

은 운전시간대 요금예측오차가 크게 발생한 날들로 이는 전체적인 최적화에 있어서 전기요금 예측모델의 정확성이 중요하다라는 결과를 보여주었다. 본 연구에서는 부하제어 최적 모델개발을 1차적인 목적으로 하였기 때문에 전기요금 예측 모델로써 일반적인 시계열모델을 사용하였으나, 향후에는 전기요금 예측정확도 개선에 대한 연구와 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 기온이 높을수록 요금 절감효과는 크게 나타났다. 이는 기온이 높을수록 냉방장치의 가동률이 증가하며, 가동률이 높을수록 제어를 통하여 요금절감 효과를 높일 수 있는 기회가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

지금까지 본 연구에서는 RTP를 적용받는 산업용 수용가에서의 생산효율 저하시키지 않는 범위에서 전력요금을 최소화하기 위한 F-EMS 부하제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 F-EMS 부하제어 알고리즘은 산업용 수용가에서의 부하를 제어방식에 따라 분류하여 각각의 부하특성에 따라 적합한 제어방식을 적용하도록 하였으며, 작업자가 사전에 입력한 수용가의 작업스케줄을 고려하여 최적의 부하 운전 스케줄을 산출 및 제공함으로써 작업장 폐적도 증진 및 작업 스케줄에 영향을 주지 않는 등 부하제어에 따른 생산효율을 저하시키지 않도록 모델링 하였다. 서울지역의 전기장비 제조업 수용가를 대상으로 한 사례연구 분석 결과 제안된 F-EMS 부하제어 알고리즘을 적용하여 기존 운전방식에 비해 일정수준의 전력요금 및 최대부하전력 절감효과를 확인할 수 있었으며, 추가적으로 작업장의 적정한 실내온도 유지를 통하여 작업자의 작업효율을 증진시키는데 이바지 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 수행된 연구 결과입니다. (과제번호-120131281).

Reference

[1] KEPCO, "Statics of Electric Power in Korea", 2014
 [2] LLC Working Group 2Measurement and Evaluation Committee, and California Edison Company, Apr, "Demand response program evaluation-Final report Quantum Consulting Inc. and Summit Blue Consulting", 2005
 [3] M. Ann-Piette, G. Ghatikar, S. Kiliccote, D. Watson, E. Koch, and D. Hennage, "Design and operation of an open, interoperable automated demand response infrastructure for commercial buildings," J. Comput. Inf. Sci. Eng., vol. 9, pp. 1 - 9, Jun. 2009.
 [4] Rongshan Yu, Wenxian Yang, Rahardja S, "A Statistical Demand-Price Model With Its Application in Optimal Real-Time Price", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3 no 4, pp.1734-1742 2012
 [5] Constantopoulos, "ESTIA: A Real-time Consumer

control Scheme for Space Conditioning Usage Under Spot Electricity Pricing." Computers Operations Research, vol 19, no. 8, pp 751-765, 1991

[6] ISO Standard 7730, "Ergonomics of the thermal environment Analytical calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.", 2005
 [7] Chenxu Duan, Xudong Ding, Fenggang Shi, Xianhua Xiao, Peiyong Duan, "PMV-based Fuzzy Algorithms for Controlling Indoor Temperature" Industrial Electronics and Applications, pp 1492-1496, 2011
 [8] KSGI[Online], Available: <http://www.smartgrid.or.kr/>
 [9] Mohsenian-Rad A, Leon-Garcia A, "Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1 no 2, pp.120-133, 2010
 [10] The MathWorks TM, "Optimization Toolbox TM 4 User's Guide"
 [11] KMA[Online], Available: <http://www.kma.go.kr/>
 [12] KPX[Online], Available: <http://www.kpx.or.kr/>
 [13] Statistics Korea, "Consulting Report for Power Consumption Behavior Analysis and Quality Improvement", 2012
 [14] R. B. Wilson, "A simplicial algorithm for concave programming," PhD thesis, Harvard University, Graduate School of Business Administration, Jan. 1963.

저 자 소 개



전 정 표(Jeong-Pyo Jeon)

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 강원대학교 IT 대학 전기전자공학부 졸업. 2011년 2월 동 대학원 전기전자공학 졸업(석사). 2011년 3월~현재 동 대학원 전기전자공학부 박사과정.
 E-mail : jeong823@kangwon.ac.kr



장 성 일(Sung-Il Jang)

1971년 8월 30일생. 1996년 2월 강원대학교 전기공학과 졸업. 2003년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2011년 5월~현재 (주)시티이텍 연구소장
 E-mail : sijang77@hanmail.net



김 광 호(Kwang-Ho Kim)

1966년 1월 17일생. 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1994년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~현재 강원대학교 IT대학 전기전자공학부 교수
 E-mail : khokim@kangwon.ac.kr