

사용자의 만족도를 고려한 주택 부하제어 방법에 관한 연구

전정표*, 김광호**
강원대*, 강원대**

A Study of Residential Load Control Method Based on User's Satisfaction

Jeong-Pyo Jeon*, Kwang-Ho Kim**
Kangwon National University*, Kangwon National University**

Abstract - 시간 가변적인 실시간 전기요금환경에서는 요금변화에 따라 적절한 부하제어를 필요로 한다. 하지만 부적절한 부하의 제어는 사용자의 불편을 초래할 가능성이 있기 때문에 본 논문에서는 사용자의 만족과 전기요금 절감을 동시에 고려하기 위한 주택 부하제어 방법을 제안하는 바이다.

1. 서 론

급격한 전력수요의 증가는 에너지문제 및 환경적인 문제와 함께 맞물려 큰 이슈로 대두되고 있다. 이에 전력사용량을 효율적으로 개선하기 위한 대안의 하나로 전력 수용가에 실시간 전기요금의 적용이 거론되고 있으며, 주택의 경우 3단계 ToU 형태의 실시간 전기요금이 예상되고 있다. 시간 가변적인 실시간 전기요금의 변화를 통하여 수용가의 전력수요를 off-peak 시간대로 유도함으로써 효율적인 전력사용을 가능하게 하지만, 사용자들이 전시간적인 노력이 불가능한 현실에서는 효율적인 사용을 위하여 전력 수용가는 자동적으로 가변적인 전기요금을 모니터링하고 요금변화에 따라 부하를 적절히 제어할 수 있는 방법의 도입이 필요로 한다. 실제로 가변적인 전기요금 환경 환경에서 에너지 절감 및 경제성을 증대시키기 위한 수용가의 부하제어에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있지만 지금까지의 부하제어 연구는 전력사용량 및 요금 절감을 최우선적인 목적으로 두고 있다. 하지만 수용가의 부하제어는 사용자의 편의나 불편함을 초래하지 않는 범위에서 제어가 이루어져야 한다는 원칙 또한 반드시 준수해야 하는 사항이다. 따라서 본 논문에서는 3단계 ToU 실시간 전기요금을 적용받는 주택에서 사용자의 만족도와 요금절감의 동시에 고려하기 위한 최적화 기반의 부하제어 전략을 제안하는 바이다.

2. 본 론

2.1 최적 부하제어의 개요

주택 부하제어는 에어컨 및 난방기기의 설정온도 제어, 단속적 부하의 사용시간의 제어, 조명의 밝기조절 등으로 나눌 수 있다. 본 논문의 부하제어는 에어컨의 설정온도의 조절과 단속적 부하의 사용시간의 제어를 대상으로 한다.

▶ 제어절차:

(1) 사용자는 전일, 다음날의 부하운용을 위하여 단속적 부하의 원하는 사용시간 및 사용자 만족도계수를 결정한다.

t_{ost} : 단속적 부하의 지정 사용시간(0~24, 사용자 지정)
 λ_{user} : 사용자 만족도계수(0~1)

사용자 만족도계수(λ_{user})는 사용자가 필요로 하는 만족도 수준을 결정하는 계수로, 0~1의 값을 가지며, 만약 요금절감보다는 실내 쾌적함이나 만족도를 중시하는 사용자의 경우 1에 근접한 값을 설정하며, 조금의 불편함을 감수하고 보다 많은 요금절감을 희망하는 사용자의 경우 0에 근접한 값을 설정하도록 한다.

(2) 외부기관에서 전송받는 기상데이터 및 요금데이터를 기반으로 사용자 만족도계수를 통하여 결정된 제어범위에서 2.3절의 최적화 함수식에 따라 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 시간당 최적의 에어컨 설정온도 및 단속적 부하의 사용시간을 산출한다.

2.2 사용자 만족도

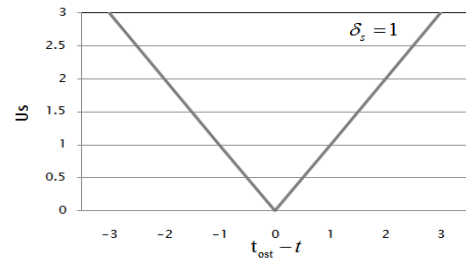
단속적 부하에 대한 사용자 만족도($U_s(t)$)는 그림1과 같이 미리 설정해둔 사용시간(t_{ost})과 실제 사용시간 차이가 커질수록 따라 사용자는 불만족도가 선형적으로 증가하도록 모델링 하였다.(1)

$$U_s(t) = \delta_s(|t_{ost} - t|) \tag{1}$$

여기서,

$U_s(t)$: 단속적 부하의 사용시간에 따른 불만족도
 δ_s : 기기에 따른 민감도 계수

δ_s 는 부하종류에 따른 불만족도(U_s)의 민감도를 조정하기 위한 계수이며, 커질수록 해당 부하의 사용자의 만족도에 민감하게 반응한다.



〈그림 1〉 부하 사용시간에 따른 사용자 불만족도

실내온도에 대한 사용자의 만족도의 척도로는 ISO-7730에서 규정된 PMV(Predicted Mean Vote)를 사용하였다. PMV는 인간의 온열환경에 대한 반응의 평균치를 예측한 것으로 3(hot), 2(slightly warm), 1(warm), 0(neutral), -1(cool), -2(slightly cool), -3(cold)의 7단계로 정량화된다.[1]

$$U_{PMV}(t) = \frac{1}{|aT_i(t) + e|M(t)^3 + (bT_i(t) + f)M(t)^2 + (cT_i(t) + g)M(t) + dT_i(t) + h|} \tag{2}$$

여기서,

$U_{PMV}(t)$: 실내온도에 따른 사용자의 불만족도
 $T_i(t)$: 실내온도(= 에어컨 설정온도, °C)
 $M(t)$: 사용자의 활동량
a, b, c, d, e, f, g, h : PMV 근사화 계수

PMV는 실내온도, 사용자의 활동량, 착의량, 기류속도 등의 변수에 의해 결정된다. 하지만 본 논문에서는 에어컨의 설정온도 제어와 단속적 부하의 사용에 따른 사용자의 활동량 증가에 초점을 맞추었기 때문에 실내온도와 활동량을 제외한 변수를 일반적인 값으로 고정하고 실내온도와 사용자의 활동량을 변수로 가지는 식(2)과 같이 근사화된 PMV 식을 모델링하여 사용하였다.

2.3 최적화 기반 부하제어 함수

다음 식(3)은 주택에서의 부하제어를 위한 최적화 함수식이다. 제한된 최적화 함수식은 ToU기반의 실시간 전기요금 환경에서 사용자 만족도계수를 통하여 결정된 제어범위에서 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 시간당 최적의 에어컨 설정온도($T_i(t)$) 및 단속적 부하의 사용시간($s(t)$)을 결정한다.

Minimize Cost:

$$C = \sum_{t=1}^{24} C_g(t)P_{load}(t) + \lambda_{user} \sum_{t=1}^{24} U_s(t)(C_{ost} - C_i)P_s(t) \tag{3}$$

Subject to:

$$0 \leq P_{load}(t) \leq 3 \tag{4}$$

$$0 \leq P_{a.c}(t) \leq 3 \tag{5}$$

$$0 \leq U_{PMV}(t) \leq \delta_{pmv}(-0.8\lambda_{user} + 0.8) \quad (6)$$

$$M(t) = Mi + 20s(t) \quad (7)$$

for $i = 1:24$ (8)

for $j = i+1:24$

$s(i)s(j) = 0$

end

end

$$\sum_{t=1}^{24} s(t) = 1 \quad (9)$$

여기서,

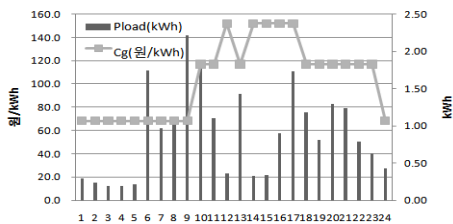
- C_g : 시간당 전기요금단가(원/kWh)
- $P_{load}(t)$: 시간당 부하전력량(kWh), $= P_n(t) + P_{a.c.}(t) + P_s(t)$
- $P_n(t)$: 비-제어 부하의 소비전력량(kWh)
- $P_s(t)$: 단속적 부하 소비전력량(kWh), $= s(t)P_s$
- P_s : 단속적 부하의 정격소비전력(kW)
- $s(t)$: 단속적 부하의 사용시간 최적화 변수
- $P_{a.c.}(t)$: 에어컨 소비전력량(kWh), $= \left[\frac{\epsilon T_i(t) - T_o(t+1)}{1-\epsilon} + T_o(t) \right] \frac{A}{\eta}$
- $T_o(t)$: 실내온도 ($^{\circ}C$)
- η : 에어컨의 성능계수(COP)
- A : 열전도율($kW/^{\circ}C$)
- ϵ : system inertia
- δ_{pmv} : 사용시간에 따른 PMV 민감도 계수
- C_{ost} : t_{ost} 에서의 전기요금 단가(원/kWh)
- $C_l(t)$: off-peak대 전기요금 단가(원/kWh)

목적함수(3)의 첫 번째 부분은 부하사용량에 따른 시간당 전기요금을 의미하며, 두 번째 부분은 단속적 부하의 지정된 사용시간과 실제 사용시간의 차이에 따른 페널티요금을 의미하는 부분이다. 제약식(4),(5)는 시간당 전력사용량과 에어컨 소비전력을 각각 계약전력과 최대 소비전력으로 제한하기 위한 조건이며, 식 (6)은 사용자 만족도계수에 따라 시간당 PMV를 0 ~ 0.8으로 제한하기 위한 식이다. 식(7)은 단속적 부하의 사용에 따른 활동량 증가를 정의하기 위한 식이며, 식 (8),(9)는 24개의 $s(t)$ 값 중 하나의 값만 1을 상환하고 나머지 값은 0으로 만들기 위한 제약식이다.

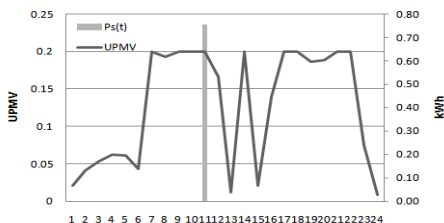
2.4 시뮬레이션

다음 절에서, 우리는 제안된 제어전략의 효과를 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 본 논문의 시뮬레이션은 서울에 위치한 주거용 주택을 대상으로 하였으며, 시뮬레이션 기간은 여름철 평균 기온을 보여준 2010년 07월 20일로 선정하였다. 그리고 이날의 SMP 데이터를 이용하여 주택에 적용 예정인 3단계 ToU 실시간요금을 모델링하여 시뮬레이션에 적용하였다. 또한 단속적 부하로는 세탁기($P_s=0.755kW$)를 선정하였으며, 사용자 지정 사용시간(t_{ost})은 오전 11시로 설정하였다.

▶ CASE 1 $\lambda_{user} = 0.75$



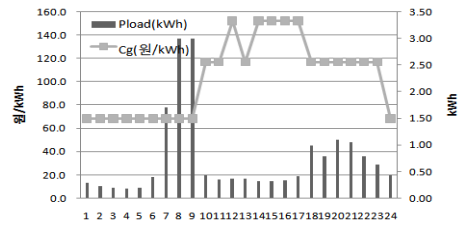
<그림 2> 시간대별 전력사용량



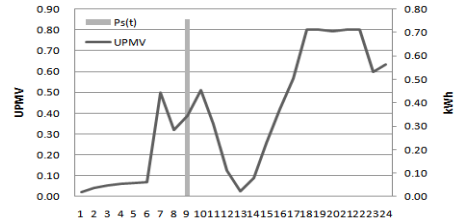
<그림 3> PMV 및 세탁기 사용시간

Case 1은 사용자 만족도계수가 0.75인 경우로 사용자가 요금절감보다는 사용자의 만족도를 중요시하는 경우이다. 이에 실내온도는 PMV 0.2 이내로 유지되며, 세탁기의 경우 사용자가 설정한 오전 11시에 가동이 된다.

▶ CASE 2 $\lambda_{user} = 0$



<그림 4> 시간대별 전력사용량



<그림 5> PMV 및 세탁기 사용시간

Case 2는 사용자 만족도계수가 0으로 만족도를 어느 정도 양보하고 요금절감을 중요시하는 경우이다. 이 경우 실내온도는 PMV는 최대 0.8 범위까지 유동적으로 변화하며, 세탁기의 경우 2시간 앞당겨 요금이 저렴한 시간 오전 9시에 가동이 된다. 표1은 설정온도를 24 $^{\circ}C$ 로 운영하는 일반적인 운행방식과 제안된 부하제어 결과를 비교한 표이다.

<표 1> 운행제어 비교결과

	일반	제안된 방법	
		Case1	Case2
전력사용량(kWh)	20.3	21.5	17.8
일일 전기요금(원)	2286.1	2279.5	1677.6
평균 PMV	0.28	0.13	0.38
요금 절감율(%)		0.29%	26.62%

Case2의 경우 일반적인 제어방법에 비하여 26%정도의 요금이 절감된 것을 확인할 수 있었으며, Case 1의 경우 0.3% 절감을 보여 Case2에 비하여 절감율이 미미한 것으로 나타났지만 일반적인 에어컨의 운행의 경우 PMV이 평균 0.28를 보인 반면, Case1의 경우 평균적으로 0.13을 유지하는 것으로 나타나 사용자의 만족도를 높게 유지하면서도 전기요금을 절감한 효과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 3단계 ToU 실시간 전기요금을 적용받는 주택에서의 사용자의 만족도와 요금절감의 동시에 고려한 부하제어 전략을 제안하였다. 제안된 제어전략은 사용자 만족도계수를 통하여 사용자의 성향에 따라 결정된 제어 범위에서 최소한의 전기요금을 산출하기 위한 에어컨의 설정온도 및 단속적 부하의 사용시간을 결정한다.

2.4의 시뮬레이션 결과 일반적인 운행에 비하여 최대 26%의 일일 전기요금에 가능함을 보여주었으며, Case 1과 같이 사용자의 만족도는 높은 반면, 효율적인 전력사용의 배치로 전기요금은 절감된 것 또한 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

[참 고 문 헌]

[1] ISO Standard 7730, "Ergonomics of the thermal environment Analytical calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.", 2005

[2] Constantopoulos, 외 2명, "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