

전력저장장치를 이용한 태양광주택의 최적부하제어기법

Optimal Load Control Method for Solar-Powered House with Energy Storage System

전 정 표* · 김 광 호†
(Jeong-Pyo Jeon · Kwang-Ho Kim)

Abstract - The renewable energy system and the real-time pricing can provide the significant economic advantage for end-user of residential house. However, according to recent studies, high initial cost of renewable energy system such as photovoltaic (PV) system and lack of suitable load control methods adjusting electric power consumption in response to time-varying price are regarded as the major obstruction for introduction of renewable energy system and real-time pricing in residential household. In this paper, we propose automated optimal load control strategy which aim to achieve not only minimizing the electricity cost but also the increase in the utilization rates of PV generation power of residential PV house in real-time pricing environment. Simulation results show that our proposed optimal load control strategy leads to significant reduction in the electricity costs and increase in the utilization rates of power generated by PV system in comparison with the conventional PV house. Therefore, the proposed optimal load control strategy can provide more economic benefit to end-user.

Key Words : Photovoltaic, Real-time pricing, Demand response, Load control, Energy storage system

1. 서 론

지난 수년간 전력사용량의 급증으로, 전력인프라는 많은 부담을 받고 있다. 이에 정부는 건물의 실내 냉방온도 및 옥외조명 제한 등의 전력수요 안정대책을 강구하고 있으며 보다 적극적인 해결책으로써 주택 수용가에서의 신재생 에너지시스템과 전력원가 기반의 실시간 전기요금의 도입을 추진하고 있다. 실제로 그린홈 보급사업과 같은 정부의 적극적인 지원을 통하여 주택에서의 신재생에너지, 특히 태양광주택의 보급률은 그림 1과 같이 매년 크게 증가하고 있으며, 계시별 실시간 전기요금의 경우 실제 적용을 위한 실증연구 및 인프라 확충이 추진되고 있다[1]. 주택에서의 신재생에너지 시스템의 도입은 전력사용량과 전기요금을 줄이기 위한 가장 적극적이고 효율적인 대안 중 하나이며, 원가기반의 계시별 전기요금은 최종 수용가에서의 전력소비를 전력시장의 상황에 따라 효율적으로 소비하도록 유도하는 등 상당한 장점을 갖는 것으로 평가되고 있다. 하지만 몇몇 연구에 따르면 전력수용가 특히 주택부분에서의 실시간 전기요금 및 태양광 발전시스템과 같은 신재생에너지 시스템의 도입이 장밋빛 미래만을 보장하지 않는다고 경고하고 있다[2][3].

실시간 전기요금 환경에서는 시간대별 상이한 전기요금 단가를 적용받기 때문에 전기요금 절감을 위하여 태양광주택의 사용자는 시간에 따라 변동하는 전기요금에 반응하여

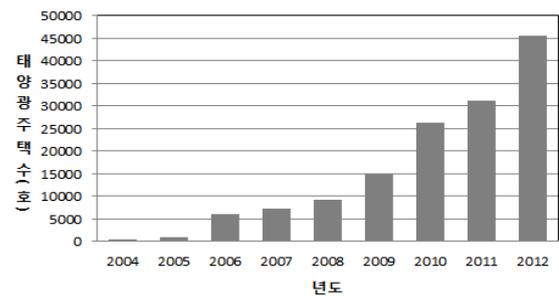


그림 1 태양광주택의 보급실적
Fig. 1 Penetration rate of PV houses

그들의 전력소비를 조정하거나 요금이 저렴한 시간대로 이전하는 부하제어와 함께 태양광 발전전력을 효율적으로 배치하는 행동이 중요하다. 그러나 대부분의 주택 사용자들이 모든 시간대에 걸쳐 변화하는 전기요금을 모니터링하고 이에 따라 적절한 부하제어를 한다는 것은 현실적으로 거의 불가능하며, 또한 간헐적 발전특성을 가지는 태양광 발전시스템의 경우 사용자에게 의해 제어하는 것이 거의 불가능하기 때문에 실시간요금의 단가변동에 효과적으로 대응하는 것은 쉬운 일이 아니다. 기존에는 일반 주택 수용가에서 제어가능한 냉·난방장치, 세탁기, 식기세척기, 조명, 전기자동차 등의 부하를 중심으로 실시간 요금제 환경에서 주택 수용가에 적용할 수 있는 부하제어 알고리즘에 대한 연구[4][5], 태양광 발전시스템과 전력저장장치의 연계 및 제어를 통하여 전력시장의 보조서비스 시장에 참여함으로써 이윤을 창출하고자 하는 연구[6]가 수행된 바 있다. 기존의 연구[4][5]에서는 태양광이나 전력저장장치 없이 순수히 부하제어만으로 전력절감으로 시도하였다. 그러나 제어 대상이 된 대부분의 부하는 사용시각이나 사용여부가 주거자의 편의와 직결되기

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

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

E-mail : khokim@kangwon.ac.kr

Received : December 30, 2013; Accepted : April 10, 2014

때문에 실제 부하를 임의로 제어하는 것에는 어려움이 있어서 이 방법을 실제 주택에 적용하기에는 개선의 필요성이 있다고 판단된다. 또한 참조문헌 [6]의 연구에서는 잉여전력 판매에 중점을 두고 전력저장장치와 부하제어를 수행하였기 때문에 판매이후 부하의 전력수요에 대한 고려가 미흡하다는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 태양광주택에 있어서 전력저장장치를 효과적으로 충방전하면서 태양광발전시간과 발전종료시간 전기간의 부하사용을 종합적으로 고려하여 최적의 전력사용 환경을 제공할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 실시간 전기요금을 적용받는 태양광주택에서의 최대한의 이윤 및 발전전력의 이용률의 극대화를 위한 최적부하제어 전략이 제시되었다. 제안된 최적부하제어 전략은 냉·난방장치 및 전력저장장치를 제어부하로 하여 태양광 발전 시스템의 출력 및 전기요금 변동에 따라 자동적으로 이들에 대한 최적 운행스케줄을 산출하고 제어함으로써, 태양광 발전전력을 최대한 효율적으로 사용하도록 제어하는 동시에 주택에서 발생하는 전기요금을 최대한 절감하도록 조절한다. 이를 통하여 주택 사용자 측면에서는 쾌적한 실내 환경을 유지하는 동시에 태양광 발전시스템 및 실시간 전기요금의 설치에 따른 경제적 잠재효과를 최대한 이끌어 내는 것이 가능하다. 또한 계통측면에서는 단가변동을 통한 전력수요관리라는 실시간 전기요금제의 본연의 순기능을 이끌어내는 것이 가능하며, 또한 발전전력의 이용률을 극대화하여 계통으로 유입되는 태양광 발전전력을 최소화함으로써 계통안정도를 유지하는데 도움을 주도록 설계하였다. 이를 통하여 태양광 발전시스템 및 실시간전기요금제의 성공적인 안착에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 태양광주택의 기본 구성 및 특성

2.1 태양광주택의 개요

다음 그림 2는 본 논문에서 제안된 최적부하제어 전략이 적용될 태양광주택의 기본적인 구성을 보여준다.

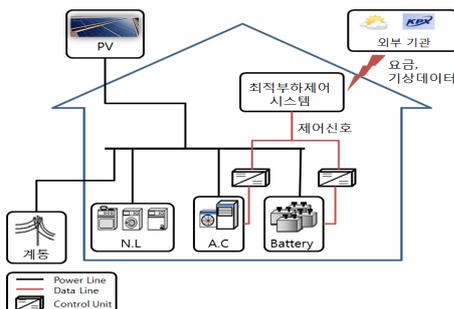


그림 2 제안된 태양광주택의 개요도
Fig. 2 Diagram of the proposed solar house

기존의 태양광주택과 달리 제안된 태양광주택에는 제어 가능한 전력저장장치와 에어컨과 함께 제안된 제어전략이 구현된 최적부하제어 시스템이 설치 되어있다. 주택에 설치된 최적부하제어 시스템은 전일 기상청과 전력거래소로부터 각각 다음날의 기상데이터와 실시간 전기요금 데이터를 전

송 받으며, 전송받은 데이터를 이용하여 다음날의 전력저장 장치 및 에어컨의 최적 운행스케줄을 수립하도록 한다.

2.2 태양광 발전시스템

다음날의 태양광 발전시스템의 예측 발전량은 기상으로부터 일사량, 일조시간 데이터를 전송받아 산출하게 된다. 일반적으로 태양광시스템의 발전량은 일사량($I(t)$)에 의해 결정되며, 일사량에 대한 태양전지 어레이의 변환효율(η_c)은 그림 3와 같이 근사하여 나타낼 수 있다[7][8]. 그림 3과 같이 태양전지 어레이의 변환효율은 일정한 값이 아니며, 일반적으로 일사량이 0인 지점부터 특정 일사량인 변곡점(K_C)까지 η_c/K_C 의 기울기를 가지며, 일사량이 K_C 인 이상에서는 일정한 변환효율 η_c 을 가진다.

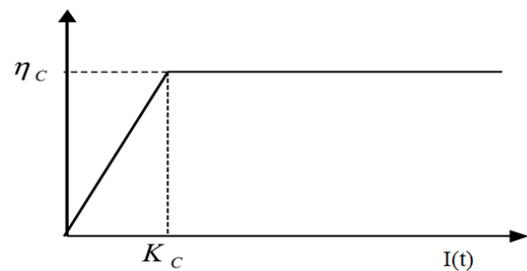


그림 3 일사량에 따른 태양전지 효율
Fig. 3 The approximation conversion efficiency of solar cell arrays

그림 3의 어레이 변환효율 특성에 따른 단위면적($1m^2$)당 태양전지 어레이의 출력($P_{Array}(t)$)은 다음과 같이 모델링 된다.

$$P_{array}(t) = \frac{\eta_c}{K_C} \times (I(t))^2 \quad \text{if } 0 \leq I(t) \leq K_C \quad (1)$$

$$P_{array}(t) = \eta_c \times I(t) \quad \text{if } I(t) \geq K_C \quad (2)$$

- 여기서,
 $P_{array}(t)$: 태양전지 어레이 출력(kW)
 $I(t)$: t 시간의 일사량(kW)
 η_c : 어레이 변환 효율
 K_C : 변환효율 변곡점(kW)

최종적으로 시간당 전체 태양광 발전시스템의 발전량은 다음과 같다.

$$P_{pv}(t) = P_{array}(t) \times Area \times Y(t) \times K_{pv} \quad (3)$$

- 여기서,
 $P_{pv}(t)$: t 시간의 태양광 발전량(kWh)
 $Area$: 어레이 면적(m^2)
 $Y(t)$: 시스템 가동시간
 K_{pv} : 태양전지 변환효율 보정계수

표 1 태양광 발전시스템의 파라미터

Table 1 Parameters in a PV Generation System

항목	단위	규격
용량	[kWp]	3
어레이 변환효율(η_c)	[%]	11.6
변곡점(K_C)	[kW/m ²]	1.2
어레이 면적(Area)	[m ²]	38.8
보정계수(K_{pv})	[%]	76

일반적으로 태양전지의 변환효율은 모듈온도, 오염 및 인버터 손실에 의하여 많은 변화를 보인다. 따라서 정확한 발전량의 산출을 위하여 변환효율 보정계수(K_{pv})을 도입하도록 하며, 본 논문에서는 [8]을 참조하여 표 1과 같이 3kWp 급 태양광 발전시스템에 대한 기본데이터를 이용하였다.

2.3 전력저장장치

제안된 태양광 주택에서의 시간당 충/방전량에 따른 전력 저장장치(ESS : Energy Storage System)의 잔존용량(SoC : State of Charge)은 다음 수식과 같다[6].

$$SoC(t) = SoC(t-1) + P_c(t-1)\eta_{ess} - \frac{P_d(t-1)}{\eta_{ess}} \quad (4)$$

Subject to:

$$0 \leq P_c(t) \leq ESS_{power} \quad (5)$$

$$0 \leq P_d(t) \leq ESS_{power} \quad (6)$$

$$P_c(t)P_d(t) = 0 \quad (7)$$

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \quad (8)$$

$$SoC_{min} = SoC_{max}(1 - D.O.D) \quad (9)$$

여기서,

- $SoC(t)$: t 시간의 ESS 잔존용량(kWh)
- $P_c(t)$: t 시간의 ESS 충전 전력량(kWh)
- $P_d(t)$: t 시간의 ESS 방전 전력량(kWh)
- η_{ess} : t 시간의 ESS 시스템 효율(%)
- ESS_{power} : ESS의 정격전력(kW)
- SoC_{max} : ESS의 용량(kWh)
- $D.O.D$: 방전심도(Depth of Discharge)

표 2 전력저장장치의 파라미터

Table 2 Parameters in a Energy Storage System

항목	단위	규격
타입	연축전지(Lead-Acid)	
정격전력(ESS_{power})	[kW]	2
용량(SoC_{max})	[kWh]	8
충/방전 효율(η_{ess})	[%]	80
방전심도(D.O.D)	[%]	80

각 시간의 전력저장장치의 잔존용량은 전시간의 잔존용량과 충/방전량으로 결정이 되며, 수식 (5)~(8)은 저장장치의 기술적 제약조건을 나타낸다. 전력저장장치의 효율성을 증

대하기 위하여 최대 방전전력량은 수식 (9)과 같이 전력저장장치 방전심도를 80%로 제한한다. 본 논문에서는 가정 보편적이고 저렴한 저장장치인 연축전지(Lead-Acid)형 배터리를 기본 전력저장장치로 선정하였으며, 표 2는 본 논문에서 사용된 연축전지의 기본 데이터를 보여준다[9].

2.4 에어컨 및 실내온도 변화

제안된 태양광주택에서 에어컨은 최적부하제어 시스템의 제어신호에 따른 설정온도의 조절로 시간당 소비전력량이 제어된다. 따라서 에어컨의 설정온도 변화에 따른 에어컨의 소비전력량을 수학적으로 모델링 할 필요가 있으며, 이번 파트에서는 에어컨에 대한 수식적 모델을 정의한다[10]. 우선, 다음 시간의 실내온도는 다음과 같이 결정된다.

$$T_{in}(t+1) = \epsilon T_{in}(t) + (1-\epsilon)(T_{out}(t) - \frac{\eta_{ac} \cdot P_{ac}(t)}{A}) \quad (10)$$

여기서,

- ϵ : 건물의 열 시간계수($e^{-A/C}$)
- $T_{in}(t)$: t 시간의 실내온도($^{\circ}C$)
- $T_{out}(t)$: t 시간의 외부 온도($^{\circ}C$)
- $P_{ac}(t)$: t 시간의 에어컨의 소비전력량(kWh)
- A : 주택의 열전도율($kW/^{\circ}C$)
- η_{ac} : 에어컨의 성능계수(COP)

식 (7)을 이용하여 에어컨의 설정온도와 소비전력간의 관계를 정의하는 에어컨 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{ac}(t) = \left[\frac{\epsilon T_{in}(t) - T_{set}(t)}{1-\epsilon} + T_{out}(t) \right] \frac{A}{\eta_{ac}} \quad (11)$$

여기서,

- $T_{set}(t)$: t 시간의 설정온도 ($^{\circ}C, = T_{in}(t+1)$)

여기서, η_{ac} 및 ϵ, A 는 각각 에어컨의 기계적 특성과 건물 실내 열 특성에 따른 상수이며, 본 논문에서는 [10]에서 제시된 ϵ, η_{ac} 을 이용하였으며, 주택의 열전도율(ϵ, A)의 경우 우리나라의 기후조건 및 건물의 특성을 반영하기 위하여 여름철 평균온도에서 “2006 가전기기 보급률 및 가정용전력 소비행태조사”[11]에서 명시된 우리나라의 평균적인 에어컨 전력량을 소비하도록 조정된 값을 사용하였다. 아래의 표 3은 본 논문에서 사용된 에어컨의 기본 데이터를 보여준다.

표 3 에어컨의 파라미터

Table 3 Parameters in a Air-Conditioner System

항목	단위	규격
열 시간계수(ϵ)		0.93
열전도율(A)	[kW/ $^{\circ}C$]	0.485
에어컨 성능계수(η_{ac})	[COP]	2.5

2.5 에어컨을 제외한 기기의 부하패턴

주택에서의 부하패턴은 사용자의 생활패턴 및 기후, 지역

적 특징에 따라 다양한 형태로 변화한다. 따라서 정확한 최적 운행스케줄 산출을 위해서는 특정 대상 주택에서의 축적된 부하사용 데이터를 이용하여 부하패턴이 예측 및 산출되어야 한다. 그러나 본 연구는 초점이 부하제어 전략에 있고, 특정주택의 부하패턴을 이용한 시뮬레이션은 객관적이지 못할 것이라는 판단 때문에 본 논문에서는 주택에서의 대표적인 부하곡선 산출하여 적용하였다. 에어컨을 제외한 제어가 되지 않는 기기에 대한 부하패턴을 산출하기 위하여 전력거래소의 “2006 가전기기 보급률 및 가정용전력 소비행태조사”[11]과 지식경제부의 “2008 조명기기보급·이용실태조사”[12]를 참조하여 보급률이 높은 대표 기기 및 조명을 선정하였으며, 이들의 통계적 하루 사용패턴을 통하여 위의 그림 4와 같이 에어컨을 제외한 기기에 대한 일반적인 일일 부하패턴($P_{nl}(t)$)을 모델링하였다.

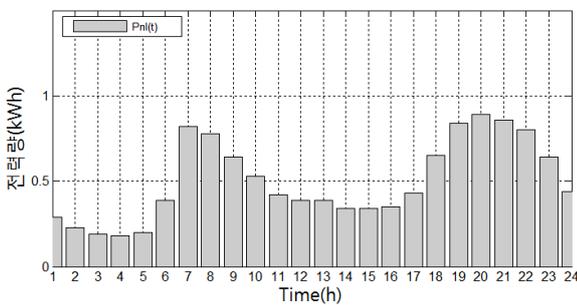


그림 4 에어컨을 제외한 기기의 부하곡선
Fig. 4 Daily load pattern for uncontrollable loads

2.6. 주택용 계시별 전기요금 모델

현재 주택에서 적용받는 전기요금은 누진율을 적용한 사용량기반의 전기요금이며, 실시간 전기요금은 아직 적용하기 이전이다. 따라서 본 논문에서는 제주 스마트그리드 실증단지에 적용중인 주택용 3단계 ToU(Time of Use) 전기요금을 적용하도록 한다.

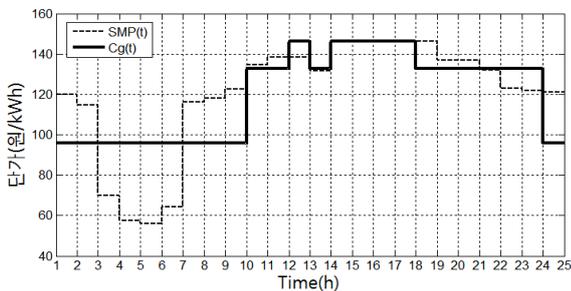


그림 5 8월 18일의 주택용 3단계 ToU 전기요금 곡선
Fig. 5 ToU electricity rate curve on August 18

주택용 계시별 전기요금은 전력도매시장에서 거래되는 계통한계가격(SMP: System Marginal Price)을 기반으로 산출되며 24시간 중 SMP단가 높은 5시간의 평균을 최대부하로, 다음 9시간의 평균을 중간부하, 그리고 나머지 시간의 평균

을 경부하 단가로 적용한다. 따라서 주택용 3단계 ToU 요금의 단가($C_g(t)$)는 $SMP(t)$ 에 따라 수시로 변경하지만, ToU 시간대는 기존과 동일하게 적용된다. 그림 5는 2011년 8월 18일의 SMP 데이터를 기반으로 산출된 주택용 3단계 ToU 요금 단가곡선($C_g(t)$)을 보여준다.

3. 최적부하제어 전략 모델링

3.1 목적 함수

본 논문에서 제안한 최적부하제어 전략은 다음과 같이 최적화 함수로 나타낼 수 있다.

Minimize Cost:

$$\sum_{t=1}^{24} C_g(t)P_{grid}(t) - C_g(t)P_{sale}(t) \tag{12}$$

여기서,

$$P_{grid}(t) = P_{load}(t) - (P_{out}(t) - P_{sale}(t))$$

$$P_{load}(t) = P_{nl}(t) + P_{ac}(t)$$

$$P_{out}(t) = P_{pv}(t) - P_c(t) + P_d(t)$$

$P_{grid}(t)$: 계통구입 전력량(kWh)

$P_{load}(t)$: 주택 부하 전력량(kWh)

$P_{out}(t)$: 주택 출력 전력량(kWh)

$P_{sale}(t)$: 계통 판매 전력량(kWh)

위의 최적화 식은 에어컨의 설정온도($T_{set}(t)$)의 제어를 통하여 에어컨의 소비전력량의 결정 및 주택에서의 시간당 발생하는 부하전력량($P_{load}(t)$)을 결정하게 된다. 또한 전력저장장치의 시간당 충/방전량($P_c(t), P_d(t)$) 제어를 통하여 태양광시스템의 발전량과 함께 시간당 발생하는 주택의 출력전력량($P_{out}(t)$)을 제어하여 최종적으로 실시간 전기요금의 변화에 따라 효율적으로 전력의 구입 및 판매를 가능하게 한다.

3.2 제약조건

3.2.1 에어컨제어 제약조건

실내온도는 쾌적한 실내 환경을 결정하는 변수중 하나로 적절하지 않은 에어컨 설정온도 제어는 사용자가 불쾌감을 초래할 가능성이 있다. 따라서 에어컨의 제어는 반드시 쾌적한 환경을 침해하지 않는 범위에서 제어가 이루어져야 한다.

Subject to

$$22 \leq T_{set}(t) \leq 24 \tag{13}$$

$$0 \leq P_{ac}(t) \leq 3 \tag{14}$$

이에 본 논문에서는 미국 냉난방 공조 기술자학회에서 지정한 쾌적온도 범위[13]와 우리나라의 평균적 냉방온도를 절충하여, 에어컨의 설정온도 제어범위를 22-24도로 제한하였으며, 에어컨의 기계적 특성과 일반적인 에어컨의 사양을 참조하여 에어컨의 시간당 최대 소비전력량을 3kWh로 제한하도록 하였다.

3.2.2 전력저장장치 및 계약전력 제약조건

저장장치의 운용 및 계약전력에 대한 제약 조건은 다음과 같다.

Subject to:
 $0 \leq P_c(t) \leq P_{pv}(t)$ (15)

$0 \leq P_{grid}(t) \leq P_{contract}$ (16)

여기서,
 $P_{contract}$: 계약전력량(kWh)

본 연구에서 전력저장장치는 주택에서의 태양광 발전전력을 능동적으로 조절하기 위한 태양광 발전시스템의 백업시스템으로 사용되었기 때문에 저장장치의 충전은 오직 태양광 발전시스템의 발전전력을 이용하여 충전이 이루어지도록 설정하였다. 따라서 식(5)와 달리 시간당 전력저장장치의 최대 충전가능 전력량을 시간당 발전전력량으로 제한하였으며 (15), 시간당 구입전력량은 주택의 계약전력으로 제한된다 (16).

3.2.3 판매 제약조건

일반적인 원 포인트 전력망에서는 주택에서의 출력이 부하수요를 만족하여 잉여전력이 발생하는 경우, 잉여전력이 계통으로 유입되어 전력의 판매가 이루어진다.

if $P_{out}(t) \geq P_{load}(t)$
 $\alpha(t) = 1$

else
 $\alpha(t) = 0$

Subject to:
 $P_{sale}(t) = (P_{out}(t) - P_{load}(t)) \times \alpha(t)$ (17)

여기서 $\alpha(t)$ 는 2진 변수로, 태양광주택에서 잉여전력이 발생하는 경우를 판단하여 판매 제약조건식을 조정하기 변수로 사용되었다. 주택에서의 출력전력량이 필요 부하전력량 보다 큰 경우 ($\alpha(t)=1$), 판매 전력량은 잉여전력량 ($P_{out}(t) - P_{load}(t)$)으로 제한되며, 잉여전력이 발생하지 않는 경우 ($\alpha(t)=0$), 태양광주택에서 전력판매는 이루어지지 않는다. 또한 일반적으로 태양광 발전시스템은 기상조건에 따라 간헐적인 발전특성을 가진다. 이러한 간헐적인 발전특성은 경우에 따라 부분별한 잉여전력의 유입을 일으켜 전압변동, 주파수 변동 등 계통측면에서 불안정적인 요소로 작용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 태양광 발전전력을 주택에서 최대한 사용하도록 하여 이용률을 높이고 동시에 전력계통으로의 부분별한 전력유입을 최소화하도록 제한하였다. 이를 위하여 태양광 발전시스템을 통하여 생산된 전력은 1차적으로 태양광 발전시스템의 발전시작 이후 발생하는 주택에서의 부하($\sum_{i+1}^{24} P_{load}(t)$)을 최대한 담당하도록 하며, 이를 위하여 태양광발전량이 미미한 시간이나 태양광 발전이 이루어지지 않는 야간시간의 부하의 경우 전력저장장치를 이

용하여 충족하도록 한다. 이를 통하여 최대한 주택에서의 부하를 충족시키고, 남은 전력의 경우 판매하여 계통으로 유입되는 전력을 최소화하도록 한다.

if $\sum P_{pv}(t) \geq \sum_{i+1}^{24} P_{load}(t)$
 $\beta = 1$
 else
 $\beta = 0$

Subject to:
 $\sum_1^{24} P_{sale}(t) \leq (\sum_1^{24} P_{pv}(t) - \sum_{i+1}^{24} P_{load}(t)) \times \beta$ (18)

여기서,
 i : 태양광시스템의 첫 발전 시작시각

여기서 β 는 $\alpha(t)$ 와 비슷한 기능으로 판매가 가능한 날 ($\beta=1$)과 가능하지 않은 날($\beta=0$)을 구분하기 위한 2진수 변수로 사용되었으며, 판매가 가능한 경우 태양광 발전전력은 우선적으로 주택의 부하전력을 충족한 후 판매 되도록 제어된다.

3.3 최적화 기법의 적용

본 연구에서는 위에서 정의한 부하제어 목적함수 최적화를 위해 비선형함수 최적화에 많이 사용되는 SQP (Sequential Quadratic Programming) 기법을 적용하였다. SQP법은 비선형 함수 형태의 목적함수와 제약조건을 테일러급수 전개를 통하여 목적함수는 2차식으로 제약조건은 1차식으로 근사하여 최적화 문제를 해결하는 방법이다. 본 연구에서는 Matlab의 Toolbox[14]를 활용하여 최적화 프로그램을 코딩하였고 다음 절에서 기술한 사례연구를 진행하였다.

4. 사례연구

4.1 사례연구 개요

이 절에서는 제안된 태양광주택의 최적부하제어전략의 효과를 입증하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 서울에 위치한 주거용 주택을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였으며, 2011년 8월의 서울지역의 실제 기상(기온, 일사량, 일조시간) 및, SMP 데이터를 이용하였다 [15][16]. 그 외 시뮬레이션 조건은 표 4와 같다.

표 4 시뮬레이션 조건
Table 4 Simulation conditions

제어방식	기존 태양광 주택	제안된 태양광 주택
지역	서울	
시뮬레이션 기간	2011년 8월	
태양광발전시스템 용량	3kWp	
전력저장장치 용량	0kWh	8kWh
에어컨 설정온도 범위	23℃	22~24℃

4.2 일간 운전결과

본 논문에서 제안한 최적부하제어 전략의 효과 검증하기 위해 먼저 2011년 8월 18일을 대상으로 일일 운행결과를 산출하였다. 18일은 그림 6과 같이 풍부한 태양광 발전량에 비하여 다소 낮은 외부온도를 보이는 날로 냉방기기의 운행 시간이 짧고, 그로인해 많은 판매량이 기대되는 날이다. 아래의 그림 8, 그림 9는 18일의 에어컨의 설정온도 및 소비전력량 변화를 보여준다.

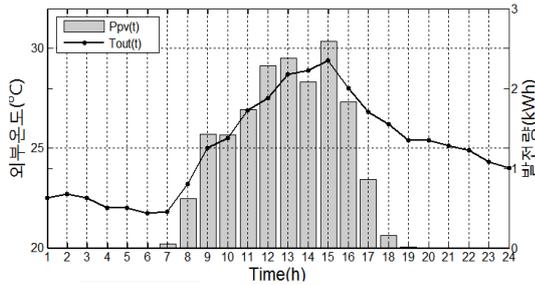


그림 6 실외온도 및 태양광 발전량
Fig. 6 Outdoor temperature and generated power

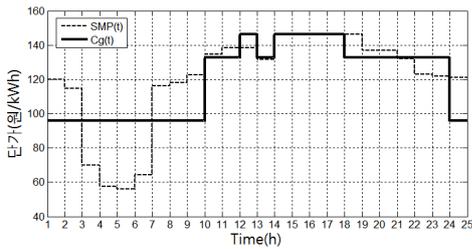


그림 7 주택용 3단계 ToU 전기요금 곡선
Fig. 7 ToU electricity rate curve

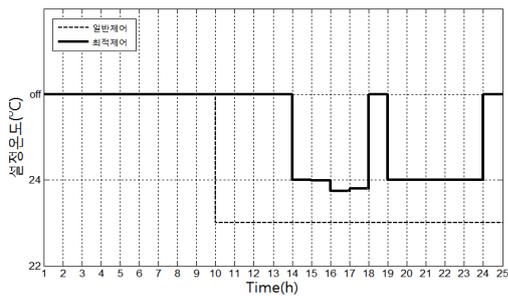
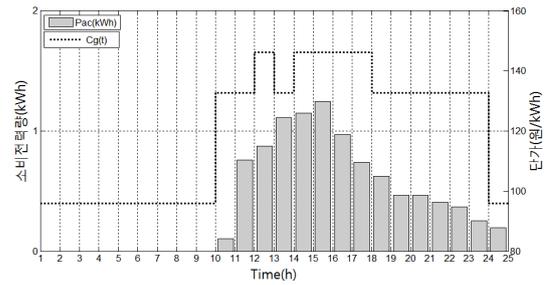


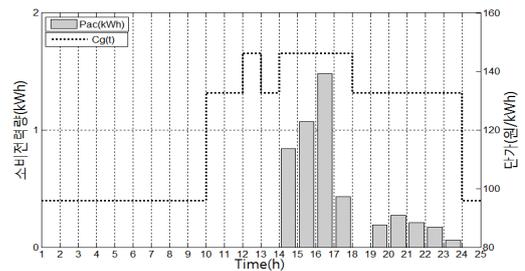
그림 8 설정온도 비교
Fig. 8 Comparison of the setting temperature

기존 태양광주택에서의 고정된 실내온도(23도)를 유지하기 위해 에어컨의 설정온도가 23도로 일정하게 유지되는 반면 제안된 최적부하제어 의한 에어컨 운행은 발전량이 풍부하거나 구입단가가 낮은 특정시간에 집중적인 냉방을 통하여 효율적인 전력소비가 이루어지도록 한다. 그림 10과 그림 11은 두 번째 제어요소인 전력저장장치의 제어결과를 보여준다.



(a) 일반제어방법

(a) the general load control method



(b) 최적부하제어 방법

(b) the optimum load control method

그림 9 에어컨의 소비전력량의 비교

Fig. 9 Comparison of the Air-conditioner power consumption

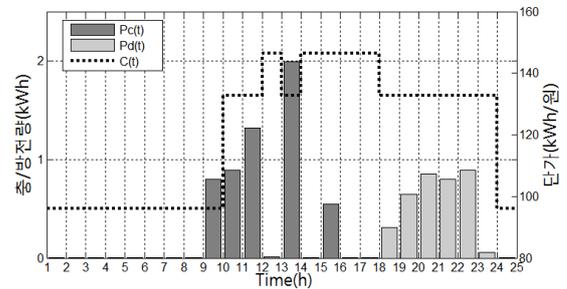
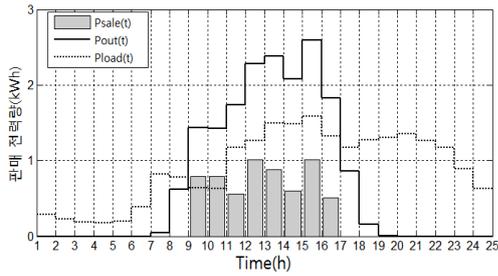


그림 10 전력저장장치 제어결과

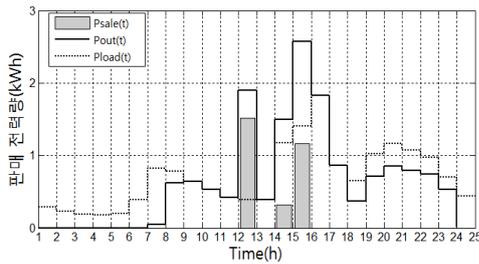
Fig. 10 Results of the control of energy storage system

전력저장시스템의 충/방전 제어를 통하여 최적부하제어 시스템은 그림 10과 같이 전기요금이 저렴한 시간대의 태양광 발전전력을 발전이 없는 야간시간으로 이전하며, 이를 통하여 제안된 최적 부하제어 전략은 주택에서의 태양광 발전전력을 최대한 사용하도록 제어한다. 또한 그림 11과 같이 최적부하제어 시스템은 저장장치의 충/방전량을 조절하여 시간당 출력 전력량을 조절하며, 조절된 출력 전력량 ($P_{out}(t)$)은 에어컨 제어에 의해 조정된 부하 사용량 ($P_{load}(t)$)과 함께 판매단가가 높은 시간대(12시)에 전력판매 ($P_{sale}(t)$)가 집중되는 효과를 불러온다. 결과적으로 제안된 최적 부하제어 전략은 전력저장장치 및 에어컨의 제어를 통하여 태양광 발전전력의 효율적으로 이용하도록 하는 동시에, 최적의 시간대에 전력구입 및 판매를 배치함으로써 최대한으로 전기요금이 절감되도록 제어한다.



(a) 일반제어방법

(a) the general load control method



(b) 최적부하제어 방법

(b) the optimum load control method

그림 11 판매 전력량의 비교

Fig. 11 Comparison of selling power

18일에 대한 기존의 태양광 주택과 최적부하제어 방법의 기반의 태양광주택에 대한 산술적 비교 결과는 표 5와 같다.

표 5 8월 1일의 시뮬레이션 결과 비교

Table 5 Comparison of the simulation results on August 18

		기존 태양광주택	제안된 태양광주택
구입	계통구입 전력량(kWh)	10.4	4.46
	구입요금(원)	1278.4	486.3
	평균 구입단가(원/kWh)	122.4	109.1
판매	계통판매 전력량(kWh)	6.15	2.99
	판매요금(원)	829.7	438.2
	평균 판매단가(원/kWh)	134.9	146.3
일일 전기요금(원)		449	48

본 논문에서 제시한 최적부하제어를 통하여 주택에서의 태양광발전 전력을 보다 많이 소비하는 동시에 보다 적은 비용으로 전력을 구매하고, 높은 비용으로 전력을 판매하는 (평균 구입, 판매단가 비교) 효율적 구입 및 판매를 통하여 일일 전기요금이 상당한 절감된 것을 확인할 수 있다.

4.3 월간 운전결과

이번 파트에서는 최적운영 제어를 통한 2011년 8월 한 달간의 운영 결과를 제시한다. 8월 기간의 운영결과는 23도의 에어컨 설정온도로 운영하는 일반제어 방법 외에 추가적으로 최소 설정온도인 24도로 운영하는 방법을 추가적으로 비

교하였다. 8월 기간 시뮬레이션의 비교결과는 아래 표 6과 같다.

표 6 8월의 시뮬레이션 결과 비교

Table 6 Results of the simulation for the month of August

제어 방식	기존 태양광주택		제안된 태양광주택
	설정온도	23도	24도
계통구입 전력량(kWh)	505.2	401.6	315.7
계통판매 전력량(kWh)	69.8	96.4	20.6
월 전기요금(원)	48,433	33,334	31,615
요금 절감율(%)	-		-34.7 ¹⁾ (-5.2 ²⁾)

참고: 1) 기존 태양광주택 23도 설정시와 비교, 2) 기존 태양광주택 24도 설정시와 비교

8월 한 달간의 최적 부하제어를 일반제어 방법과 비교한 결과 제안된 최적 부하제어 전략은 최적의 전력저장장치 및 에어컨 운행 스케줄을 통하여 기존의 태양광 주택의 일반제어 방법에 비하여 각각 8월 전기요금 비교에서 각각 34.7%, 5.2%의 요금절감 효과가 나타났다. 또한 제안된 전략은 전력저장장치의 운영을 통하여 태양광 발전전력의 효율적인 판매를 가능하게 했을 뿐만 아니라, 주택에서 발전전력을 최대한 이용하도록 제어함으로써 계통으로 유입되는 잉여전력을 상당히 절감한 것을 확인할 수 있다. 아래 그림 12은 8월 한 달간의 전기요금을 보여준다.

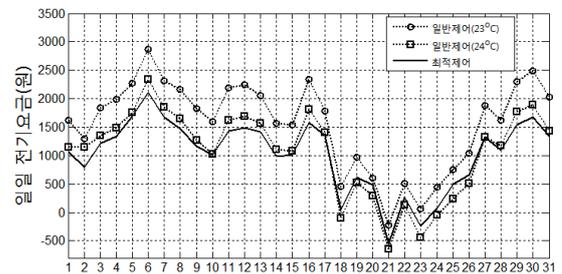


그림 12 8월 전기요금 비교

Fig. 12 Comparison of the daily electricity cost in August

5. 결 론

주택에서의 신재생에너지와 실시간전기요금의 도입은 전기요금 절감 및 효율적 소비유도등 많은 효과가 기대되는 요소이다. 그러나 실시간 전기요금 환경에서 신재생에너지의 간헐적인 출력 특성 및 적절한 부하제어 시스템의 부재는 이러한 이점을 상당부분 제한하였다. 본 논문에서는 전력저장장치 및 에어컨을 이용한 최적 부하제어 전략을 통하여 실시간 전기요금을 적용받는 태양광주택에서의 전기요금의 최소화함으로써 태양광 발전시스템 및 실시간 전기요금의 효율성을 높이고자 하였다. 제안된 최적부하제어 전략은 변동적인 실시간 전기요금 및 태양광 발전량에 따라 최적의 전력저장장치의 충/방전량 및 에어컨의 설정온도를 결정하고 제어함으로써, 효율적인 전력의 구입 및 판매가 이루어지도록 하며, 또한 태양광 전력을 주택 자체적으로 최대한 소

비하도록 조절한다. 2011년 8월의 서울지역의 기상데이터와 SMP 데이터를 이용한 운행상황을 모의한 결과, 제안된 최적부하제어 전략은 월 전기요금을 상당히 절감하였으며, 계통으로 유입되는 태양광 발전전력 또한 상당히 절감시킨 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 부하제어방법을 적용할 경우, 주택부분의 사용자는 신재생에너지 시스템 설치와 실시간 전기요금의 적용 하에서 최대한의 경제적 이득을 도모할 수 있을 것으로 생각되며 결과적으로는 실시간 전기요금의 성공적인 안착 및 신재생에너지와 전력저장장치의 보급에 큰 기여를 할 것으로 기대된다. 본 연구는 설치된 태양광시스템과 전력저장장치를 어떻게 가장 경제적으로 운영할 것인가에 대한 전략을 제시하는 것이 목표이기 때문에 태양광과 전력저장장치의 초기투자비용에 대해서는 고려하지 않았다. 신재생에너지시스템 및 전력저장장치의 설치를 고려하는 계획단계에서는 초기투자비용 및 운전비용을 고려하여서 전체적인 경제성을 평가하여야 할 것이다. 계획단계의 경제성 평가에서 본 연구에서 제시한 최적운전방법을 사용하여 운전비용을 산출한다면 보다 정확한 경제성 평가가 이루어질 것으로 판단된다.

References

[1] KEMCO [Online], available at <http://www.kemco.or.kr/>
 [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] Molderink. A, Bakker. V, Bosman. M.G.C, Hurink. J.L, Smit. G.J.M, "Management and Control of Domestic Smart Grid Technology", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1 no 2, pp.102-119, 2010
 [5] Mohsenian-Rad. A.-H, 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
 [6] C. Clastres, T.T. Ha Pham, F. Wurtz, S. Bacha "Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production" Energy, vol. 35, no 1, pp.55-64, 2010
 [7] M. Shahidehpour, M. Marwali, "Maintenance scheduling in restructured power system", Kluwer academic publishers norwell, Massachusetts, pp.183-187, 2000
 [8] Il-Ryong Lee, Chang-ho Jung, Jin-O Kim, Hun Shim, "Photovoltaic Generation System Output

Forecasting using Irradiance Probability Distribution Function", Proceedings of KIEE Summer Conference A, pp.548-550, 2004
 [9] "Benefit/Cost Framework for Evaluating Modular Energy Storage," Sandia 2008-0978 Unlimited Release.
 [10] P. Constantopoulos, F. Schweppe, and R. Larson, "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
 [11] Korea Power Exchange, "2006 Survey Report of Home Appliance Supply Rate and Electricity Consumption Behavior of Residential Customers", KPX, pp.43~73, 2006
 [12] Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea (MOTIE), "2008 Survey Report of Lighting Equipment Usage", 2008
 [13] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Standard: ANSI/ASHRAE 55-1992
 [14] The MathWorks™, "Optimization Toolbox™ 4 User's Guide"
 [15] KMA[Online], Available: <http://www.kma.go.kr/>
 [16] KPX[Online], Available: <http://www.kpx.or.kr/>

저 자 소 개



전 정 표 (全 鼎 杓)

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



김 광 호 (金 光 鎬)

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