

스마트 그리드에 있어서 저장 장치를 고려한 최적 에너지 소비 스케줄링 : 게임 이론적 접근

여상민¹ · 이덕주^{2*} · 김태구³ · 오형식¹

¹서울대학교 산업공학과/²경희대학교 산업경영공학과/³한밭대학교 산업경영공학과

Optimal Energy Consumption Scheduling in Smart-Grid Considering Storage Appliance : A Game-Theoretic Approach

Sangmin Yeo¹ · Deok-Joo Lee² · Taegu Kim³ · Hyung-Sik Oh¹

¹Department of Industrial Engineering, Seoul National University

²Department of Industrial and Management Systems Engineering, Kyung Hee University

³Department of Industrial and Management Engineering, Hanbat National University

In this research, we consider a smart grid network of electricity with multiple consumers connected to a monopolistic provider. Each consumer can be informed the real time price changes through the smart meter and updates his consumption schedule to minimize the energy consumption expenditures by which the required power demand should be satisfied under the given real time pricing scheme. This real-time decision making problem has been recently studied through game-theoretic approach. The present paper contributes to the existing literature by incorporating storage appliance into the set of available household appliances which has somewhat distinctive functions compared to other types of appliances and would be regarded to play a significant role in energy consumption scheduling for the future smart grid. We propose a game-theoretic algorithm which could draw the optimal energy consumption scheduling for each household appliances including storage. Results on simulation data showed that the storage contributed to increase the efficiency of energy consumption pattern in the viewpoint of not only individual consumer but also whole system.

Keywords: Smart grid, Energy consumption schedule, Storage appliance, Game theory

1. 서론

경제 발전에 따른 산업 규모의 성장과 일상생활에서 다양한 편의 시설의 사용이 증가함에 따라 에너지 사용량은 해마다 큰 폭으로 증가하고 있다. 특히 에너지 사용이 급증하는 여름과 겨울에는 여유 에너지량이 급격히 줄어들어 대규모 정전 사태인 블랙아웃(Black Out)을 우려하는 목소리가 커지고 있다. 실제로 한국정력 발표에 의하면 2009년 에너지 공급 예비율이 7.9%를 보인 이후 매년 최저 6% 이하의 에너지 공급 예비

율을 보이다가, 2013년 여름 급기야 최저 5.1%에까지 이른 바가 있다. 또한 2011년 9월 15일, 이상기후로 인한 무더위로 인해 예비 에너지가 안정유지수준 400만 KW 미만으로 떨어지면서 지역별 단전을 실시하여 수도권을 포함한 서울 일대에 정전 사태가 발생한 적도 있다.

이처럼 에너지 부족 상황에 대응하기 위해 기술 개발 발전 소 설립 등의 여러 가지 방안들이 제시되고 있는 가운데 스마트 그리드(Smart Grid)는 기술적으로 가장 주목 받는 대응책으로 대두되고 있다. 스마트 그리드란 에너지 네트워크와 통신

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2012R1A1A2007445).

* 연락저자 : 이덕주 교수, 17104, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 경희대학교 산업경영공학과 Tel : 031-201-2911, Fax : 031-203-4004,

E-mail : ldj@khu.ac.kr

2015년 3월 1일 접수, 2015년 6월 12일 수정본 접수, 2015년 7월 14일 게재 확정.

네트워크가 합쳐진 지능형 에너지망으로서 기존의 에너지망에 정보기술(IT)을 도입하여 에너지 공급자와 소비자가 양방향으로 사용 정보를 교환하는 과정을 통해서 에너지 효율을 최적화하고자 하는 기술이다. 세계 원자재 가격의 변화에 민감할 수밖에 없고 에너지 사용의 계절적 변동성이 큰 우리나라로서는 스마트 그리드가 에너지 사용 효율의 극대화를 통해서 에너지 수급관련 문제들에 유연하게 대처할 수 있는 역할을 해 줄 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 그에 따라 국내 스마트 그리드 사업은 2030년까지 약 68조 원의 시장으로 성장할 것으로 전망되고 있다(Lee, 2012).

우리나라는 세계 최고수준의 스마트 그리드 구현을 위해 정부를 비롯해 한국 에너지를 포함한 총 168개의 관련 기업들이 총 2465억 원을 투자하여 현재 제주도에 스마트 그리드 실증 단지를 조성하여 운영하고 있다. 이를 토대로 2030년까지 민관 공동분담을 통해 27조 5000억 원을 투자하여 제주도를 포함한 7대 광역 별 거점 도시에 국가 차원의 스마트 그리드 구축을 추진하고 있다. 만약 이러한 계획이 성공적으로 추진된다면 총 2억 3000만 톤의 온실가스 감축, 연평균 5만개의 일자리 창출 그리고 74조 원의 내수 창출이 가능할 것으로 전망되고 있다(<http://smartgrid.jeju.go.kr/>).

스마트 그리드의 성공적인 구축을 위해서는 기술적 문제는 물론 비용과 같은 경제적인 관점을 포함하는 다양한 분야의 해결과제가 수행되어야 한다. 그 중에서도 핵심적인 기술 부분인 에너지 공급자와 소비자 간의 정보 공유를 위한 소프트웨어와 하드웨어에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다. 또한 소비자 측면에서 스마트 관련 기기들이 고가일 것으로 예상되고 있어 기기들에 대한 개발과 보급에 추가적인 노력이 필요할 것으로 보인다. 경제적인 관점에서는 스마트 그리드 네트워크의 운용과 관련된 분야의 연구가 중요한 과제이다. 특히 에너지 공급자와 소비자 간의 실시간 정보 교환을 통한 합리적인 가격 도출 메커니즘을 기반으로 소비자 입장에서 최소의 에너지 비용 발생을 위한 전기 기기별 사용 스케줄링 문제는 스마트 그리드 네트워크상의 공급자 및 소비자들의 최적 행동을 결정하는 의사결정 문제라는 점에서 산업공학이나 경영과학 관점에서의 연구에 대한 필요성과 중요성이 대두되고 있으며, 최근 들어 관련 연구들이 발표되고 있다.

Samadi *et al.*(2010)은 각 소비자들이 스마트 그리드를 통해 에너지 사용 정보를 에너지 공급자와 실시간으로 교환하면서 소비자들의 효율을 극대화할 수 있는 최적 실시간 가격 알고리즘을 제시하였다. Conejo *et al.*(2010)은 에너지 가격 불완전성의 문제점을 robust optimization 기법을 이용하여 소비자들의 효율을 최대화 하는 최적화 모델을 제안하였다. Mohsenian-Rad *et al.*(2010)은 각각의 에너지 소비자가 비용을 극소화할 수 있는 가장 효율적인 전기 기구들의 사용 스케줄을 배치하는 분배 알고리즘을 제시하였다. Choi *et al.*(2010)은 스마트 그리드 환경에서 실시간 가격 요금제가 아닌 시간 변동형 요금제(Time-varying Tariff) 조건 하에서 에너지 사용 비용 최적화 전략을 제시하였

다. Kim *et al.*(2010)은 에너지 사용의 양에 따라 가격을 실시간으로 결정하여 소비자들에게 제공하는 스마트 그리드 하에서 실생활에서 사용하는 전기 기구들을 고려한 에너지 소비 스케줄링 기법을 제시하고 있다. Bu *et al.*(2011)은 Samadi *et al.*(2010)과 달리 에너지 공급자(전기 소매자) 입장에서 스마트 그리드를 이용하여 소비자들에게 효과적인 에너지 조달과 가격 결정을 할 수 있는 전략을 제안하였다. Saad *et al.*(2012)은 스마트 그리드의 가격 결정 모델에 게임 이론적 방법을 도입했을 때 기대할 수 있는 효과를 제시하였고 이 방법을 통해 소비자 입장에서의 스케줄링 문제와 공급자와 소비자 간의 상호소통의 문제점을 극복할 수 있다고 주장하였다. 예를 들어 시장과 실시간 가격 결정과 같은 경제적 요소는 비협력 게임의 상황과 유사하므로 이를 이용하여 가격을 결정하면 보다 합리적인 가격을 도출할 수 있다고 설명하였다. Park *et al.*(2012)은 각각의 주택과 더욱 확장된 범위인 단지에서 에너지 효율 최적화를 위한 에너지 스케줄링 모형을 설계하였다. 가장 최근 Moon(2014)은 소비자의 심리적인 행동에 의해서 에너지의 사용 효율이 크게 좌우된다는 것을 강조하여 현실에서의 소비자의 행동과 가격탄력성 및 소비자의 행동에 영향을 줄 수 있는 외부 환경을 고려한 수요반응 요금제의 실시간 가격 정책을 제시하였다.

한편 실시간 가격체제로 운용되는 스마트 그리드 하에서 에너지 소비 스케줄링의 대상이 되는 전기기기 중 에너지 저장장치(ESS : energy storage system)의 개발은 에너지 사용 효율을 극대화하기 위한 에너지 소비 분배에 있어서 매우 중요한 역할을 담당할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 소비자는 스마트 그리드를 통해 공급자와 시간대별 에너지 가격과 에너지 사용 정보를 교환하면서 에너지 저장장치의 도입 및 운영을 통해 에너지 사용량이 적은 시간대의 에너지를 장치에 저장하여 사용량이 많은 시간대에 저장장치에 축전되어 있는 에너지를 사용함으로써 비용 관점에서 에너지 사용의 효율성을 높일 수 있는 에너지 소비 스케줄링을 가능하게 할 수 있게 되는 것이다. 최근 들어 스마트 그리드 내에서 저장 장치의 효율을 체계적으로 연구한 결과들이 발표되고 있는데, 그 중 Wade *et al.*(2010)은 스마트 그리드에 에너지 저장 장치를 도입함으로써 가질 수 있는 14가지의 장점을 제시하면서 저장 장치 도입은 소비자뿐만 아니라 공급자와 네트워크 사업자에게도 큰 이익을 될 수 있음을 설명하고 다양한 상황에서 에너지 저장 장치를 작동함으로써 가질 수 있는 이익을 평가하고 있다. 또한 Vytelingum *et al.*(2010)은 스마트 그리드의 저장 장치 도입을 통해 사용량이 많은 시간대의 전기 수요를 분산함으로써 이산화탄소 배출과 에너지 비용을 줄일 수 있는 메커니즘을 설명하고 있다.

이처럼 스마트 그리드의 운용에 있어서 에너지 저장장치의 중요성에 대한 인식은 확산되고 있으나 아직 에너지 소비 스케줄링 문제에 있어서 저장 장치 도입의 효과를 본격적으로 다루고 있는 연구는 부족한 실정이다. 본 연구의 목적은 실시간 가격체계 하에 있는 스마트 그리드에서 에너지 사용자가

에너지 저장장치를 포함한 전기기기들을 사용하기 위하여 에너지비용을 최소화하기 위한 최적 에너지 소비 스케줄링 알고리즘을 게임이론을 응용하여 개발하고 분석하는 것이다. 본 연구가 기존의 에너지 소비 스케줄링 문헌과 비교해서 가지는 핵심적인 차별성은 에너지 최적 소비 스케줄링의 대상이 되는 전기기기 중에 하나로 에너지 저장장치를 명시적으로 포함시킨 모형을 개발하고 이에 대한 분석을 실시하고자 하는 것이다 이를 위하여 본 논문에서는 기존의Mohsenin-Rad *et al.*(2010)와 동일한 구조의 최적 에너지 스케줄링 모형을 도입하되 이 논문이 고려하지 않고 있는 저장장치라는 기기를 고려하여 최적 에너지 스케줄링 알고리즘을 제시하고자 한다 또한 본 연구에서 제시하는 최적 에너지 소비 스케줄링 알고리즘에 의한 에너지 소비가 저장 장치의 도입으로 더욱 효율적으로 분배되는지를 시뮬레이션을 이용한 첨두대 평균비(Peak to Average Ratio; PAR) 분석을 통하여 평가해 보고 소비자의 에너지 요금에 대한 저장장치 도입 전후의 비교분석도 실시하여 저장장치의 도입이 소비자의 에너지 비용 지출에 미치는 영향을 규명해 보고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다 제 2장에서는 본 연구에서 다루고자 하는 스마트 그리드 에너지 시스템 모델에 대한 개요를 설명하고 분석의 주요 개념인 에너지 비용과 에너지 스케줄링에 대한 모델링을 제시한다 제 3장에서는 저장장치를 고려한 스마트 그리드 에너지소비 스케줄링 문제를 게임이론을 적용하여 모형화하고 최적 스케줄링 알고리즘을 도출하였다. 제 4장에서는 시뮬레이션 분석 모형에 대한 설명과 함께 앞에서 제시한 알고리즘을 적용한 스케줄링 결과에 대한 시뮬레이션 분석을 실시하였고 마지막 제 5장에 결론과 향후 연구 방향을 정리하였다.

2. 시스템 모형

2.1 스마트 그리드 에너지 시스템

본 연구에서 다루고자 하는 스마트 그리드 에너지 시스템은 <Figure 1>과 같이 여러 명의 에너지 소비자와 하나의 에너지 공급원으로 이루어져 있다.

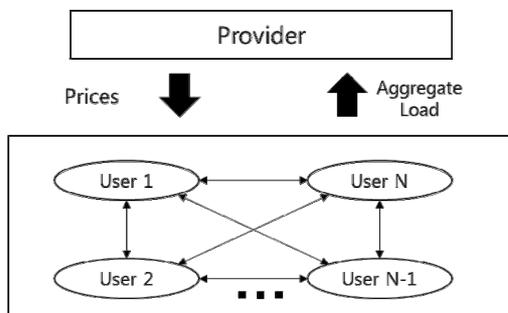


Figure 1. Smart Grid System

본 논문에서는 기존의 연구에서와 같이 각각의 소비자가 다른 소비자들과의 상호 작용은 고려하지 않고 단지 공급자와의 상호관계에만 초점을 맞추어 자신의 에너지 소비 스케줄링을 결정하는 상황(Gomes *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2009; Triki *et al.*, 2009; Centorella, 2010)에서 벗어나 보다 스마트 그리드에 적합한 상황이라 할 수 있는, <Figure 1>에서 보여주는 바와 같이 소비자들 간에 정보교환이 이루어지면서 각각의 의사결정에 상호 작용을 미치는 경우를 대상으로 분석하고자 한다

우선 각 소비자는 자신이 사용하고 있는 전기기기에 대한 에너지 공급을 조절할 수 있는 에너지 소비 스케줄러(ECS : energy consumption scheduler)를 내장하고 있는 스마트 미터기를 보유하고 있다. 스마트 미터기는 에너지 공급라인과 근거리 통신망에 동시에 연결이 되어 있으며 각 소비자는 스마트 미터기를 통해 에너지 공급자와 다른 에너지 소비자들과 에너지 소비 관련 정보를 교환 할 수 있고또한 공급자는 시간대별 에너지 요금체계에 대한 정보를 스마트미터기를 통해 각 소비자들에게 공지할 수 있다 본 연구에서는 공급자가 책정하고 있는 에너지 요금체계가 기본적으로 소비자들의 에너지 총 수요량에 따라 실시간으로 변경되는 실시간 요금체계(RTP : real-time pricing)를 적용하고 있다고 가정한다.

그러면 개별 소비자들은 공급자의 에너지 요금 정보와 다른 소비자들의 에너지 수요 정보를 고려하여 자신의 효용을 극대화하는 에너지 소비 스케줄링을 결정하게 된다 이때 소비자의 효용을 에너지 소비에 따른 지출비용에 비례하는 것으로 가정하면, 자신의 효용이 나만의 에너지 소비에만 영향을 받는 것이 아니라 다른 소비자들의 시간대별 에너지 소비량에 따라 영향을 받게 됨을 주목할 필요가 있으며, 이러한 상황적 특성에 의해 본 연구에서는 게임이론적 접근방법이 필요하게 됨을 알 수 있다. 마지막으로 각 소비자들의 에너지 소비 스케줄링이 결정되어지면 스마트 미터기에 내장되어 있는 에너지 소비 스케줄러(ECS)에 의해 각 전기기기에 대한 시간대별 에너지 공급이 자동적으로 작동되어지는 것이다 개략적으로 설명된 스마트 그리드 에너지 시스템을 엄밀하게 모형화하면 다음과 같다.

<Figure 1>의 그리드 시스템에 있는 전체 소비자 집합을 $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 이라 하자. 그리고 분석의 편의를 위하여 하루 전체가 에너지사용량이 많은 시간대(peak time)와 평상 시간대(non-peak time)로 구분하여 두 종류의 시간대로 구성되어 있다고 가정하자. 그러면 시간대 집합 H 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h \in H = \{p, n\} \tag{1}$$

where $h = p$ is peak time, and $h = n$ is non-peak time

에너지 공급자는 에너지 사용량이 많은 시간대와 그렇지 않은 시간대에 각각 다른 요금 수준을 적용하게 된다 시간대별

다른 에너지 요금 하에서 소비자 $j \in N$ 이 시간대 $h \in H$ 에 자신이 가지고 있는 모든 전기기기에 사용하는 에너지량의 합을 L_j^h 로 표시하자. 그러면 각 소비자들은 자신의 스마트 미터기를 통해 이 정보를 공개하게 되고 모든 소비자와 공급자는 이러한 정보를 공유하게 된다. 그러면 아래 식 (2)와 같이 각 시간대별 시스템 전체 소비자의 에너지 사용량 합 L^h 을 계산할 수 있고, 이 정보가 에너지 공급자에게 알려지게 된다.

$$L^h = \sum_{j \in N} L_j^h \quad (2)$$

한편 에너지 공급자가 시간대 h 에 공급하기 위한 에너지량 L^h 를 생산하는데 소요되는 비용을 나타내는 비용함수를 $C^h(L^h)$ 로 표시하자. 그러면 이 정보 역시 개별 소비자들의 스마트 미터기에 공개되고, 그에 따라 개별 소비자들이 지출하여야 하는 에너지 지출비용을 알 수 있게 된다. 지금까지 설명한 스마트 미터기를 통한 정보 공유의 시스템 구성도를 개략적으로 그리면 다음 <Figure 2>와 같다.

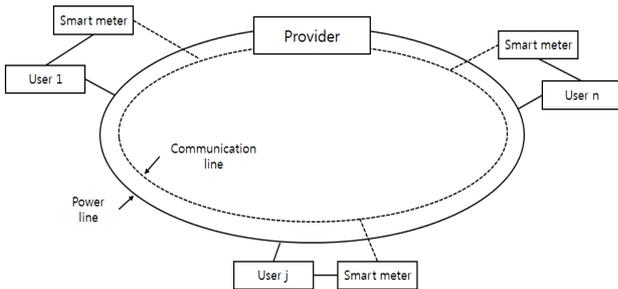


Figure 2. System configuration of smart meter communication

한편 본 연구에서 정의하는 에너지 생산 비용함수 $C^h(L^h)$ 는 다음과 같은 세 가지의 조건을 만족하는 함수로 가정한다.

- (1) 에너지 생산 비용함수는 증가함수이다. 이 가정은 일반적으로 에너지 생산량이 많아질수록 생산비용이 늘어나는 성질을 반영하는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C^h(L^h) \leq C^h(\hat{L}^h), \text{ if } L^h \leq \hat{L}^h \quad (3)$$

- (2) 에너지 생산 비용함수는 강볼록함수(strictly convex function)이다. 이 가정은 에너지 생산 비용은 생산량이 늘어날수록 한계비용(marginal cost)이 높아진다는 성질을 반영한 것이다(Boyd et al., 2004). 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C^h(\theta L^h + (1-\theta)\hat{L}^h) < \theta C^h(L^h) + (1-\theta)C^h(\hat{L}^h) \quad (4)$$

for any $0 < \theta < 1$ and $L^h \neq \hat{L}^h$

- (3) 동일한 에너지량을 생산할 때 피크 시간대에 생산하는 경우가 그렇지 않은 시간대에 생산하는 경우보다 에너지 생산 비용이 더 많이 소요된다. 이 가정은 일반적으로 에너지 사용량이 많은 피크 타임에는 더 많은 발전소가 필요하기 때문에 단위 에너지당 생산비용이 더 높아진다는 성질을 반영한 것이다.

$$C^m(L^n) < C^p(L^p) \text{ for } \forall L^p = L^n \quad (5)$$

2.2 에너지 소비 스케줄링

분석의 편의를 위하여 소비자 $j \in N$ 이 사용하고 있는 전기기기는 에너지 사용의 특성에 따라 세 가지의 기기로 이루어져 있으며, 그 집합을 $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ 로 표시하자. 한편 소비자 j 의 전기기기 a_i 에 대한 최소한의 하루 에너지 수요량을 E_{j, a_i} 라 하고, 이 중 반드시 피크 시간대에 사용되어야 하는 에너지 수요량을 E_{j, a_i}^p 으로 표시하자. 그러면 시간대별 에너지 수요량의 특성에 따라 세 가지 전기기기들을 구분할 수 있는데, 첫째 냉장고와 같이 하루 종일 일정하게 써야 하는 기기를 a_1 , 둘째 피크 타임에 하루 전체 에너지 수요량 중 일정량 이상을 반드시 사용해야 하는 기기를 a_2 , 마지막으로 사용 시간대에 제약이 없이 하루 전체 에너지 수요량을 아무 때나 사용해도 무방한 기기를 a_3 로 표시하기로 한다. 만일 피크 시간대에 해당되는 시간이 하루 전체의 $1/k$ 이고, 또한 일반적으로 피크 시간대의 에너지 요금이 다른 시간대보다 높기 때문에 에너지 수요량을 아무 때나 사용해도 무방한 경우에는 합리적인 소비자라면 피크 시간대에 소비하지 않을 것이라는 가정을 적용한다면 전기기기 종류별 피크 시간대 에너지 수요량은 다음과 같은 조건을 만족하게 될 것이다.

$$E_{j, a_1}^p = \frac{E_{j, a_1}}{k}, E_{j, a_2}^p > 0, E_{j, a_3}^p = 0 \quad (6)$$

모든 소비자는 각 기기에 대해서 전체 에너지 수요량과 시간대별 에너지 수요량에 대한 제약조건을 만족시키는 범위 내에서 기기별 에너지 소비 스케줄을 조절할 것이다. 이때 소비자 j 의 전기기기 a_i 에 대한 에너지 소비 스케줄 벡터는 다음과 같이 나타내기로 한다.

$$\bar{x}_{j, a_i} = [x_{j, a_i}^p, x_{j, a_i}^n] \quad (7)$$

위 식 (7) 에너지 소비 스케줄 벡터의 각 스칼라 값은 시간대별 실제 에너지 사용량을 의미한다. 한편 소비자의 에너지 소비 스케줄링을 결정하기 위해서 구하고자 하는 기기별 실제 에너지 사용량은 소비자의 에너지 사용 수요량을 충족시켜줘야 할 것이고, 이는 다음과 같은 에너지 사용 수요량과 실제 에너지 사용량과의 제약조건으로 모형화 할 수 있다.

$$E_{j,a_i} \leq x_{j,a_i}^p + x_{j,a_i}^n \text{ and } E_{j,a_i}^p \leq x_{j,a_i}^p \quad (8)$$

한편, 본 연구에서는 소비자가 전기기기 이외에 에너지 저장장치 s 를 보유하고 있는 상황을 고려하고자 한다. 그러면 저장장치의 에너지 소비 스케줄 벡터는 $\bar{x}_{j,s} = [x_{j,s}^p, x_{j,s}^n]$ 로 표시할 수 있다. 여기에서 저장장치와 다른 기기와의 근본적인 차이는 에너지 저장장치의 경우 필요할 때 저장된 에너지를 여타 전기기기에 공급시켜 줄 수 있다는 것이다. 공급과 소비는 서로 상보의 관계에 있다고 볼 수 있으므로 본 연구에서는 저장장치의 에너지 공급량은 기존의 에너지 사용량 변수가 음의 값을 가지는 것으로 처리한다. 따라서 에너지 소비 스케줄 벡터에서 일반 전기기기의 에너지 사용량 변수는 항상 비음(non-negative)의 값을 가지나 ($x_{j,a_i} \geq 0$), 저장장치의 경우에는 음의 값을 가질 수도 있다는 사실($x_{j,s} < 0$)에 주목을 요한다. 일반적으로 저장장치는 하루에 저장 가능한 에너지의 용량이 정해져 있다. 소비자 j 가 보유하고 있는 저장장치의 용량을 Q_j 이라고 표시하자. 그리고 일반적으로 피크 시간대의 에너지 요금이 평상시 때보다 높을 것이므로 합리적인 소비자라면 저장장치를 이용하여 평상시에 에너지를 저장한 후 피크 시간대에 저장된 에너지를 다른 전기기기에 공급해 줄 것이라고 가정해도 무방할 것이다. 또한 저장장치가 공급할 수 있는 에너지량은 당연히 저장된 에너지량을 넘어갈 수 없는데 본 연구에서는 하루 동안 항상 저장된 에너지량과 공급한 에너지량이 동일하다고 가정한다. 이 두 가정을 수식으로 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$0 \leq x_{j,s}^p \leq Q_j \quad (9)$$

$$x_{j,s}^p + x_{j,s}^n = 0 \quad (10)$$

그러면 저장장치를 가지고 있는 소비자 j 가 시간대 h 에 사용하는 에너지 소비 스케줄 벡터 \bar{x}_j^h 와 그에 따른 에너지 소비량 l_j^h 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{x}_j^h = [x_{j,s}^h, x_{j,a_1}^h, x_{j,a_2}^h, x_{j,a_3}^h] \quad (11)$$

$$l_j^h = x_{j,s}^h + \sum_{a \in A} x_{j,a}^h \quad (12)$$

마지막으로 소비자 j 의 하루 동안 에너지 소비 스케줄 벡터 \bar{x}_j 는 다음 식 (13)과 같이 표현되고, 이는 에너지 소비 스케줄링 문제의 의사결정변수가 된다.

$$\bar{x}_j = (\bar{x}_j^p, \bar{x}_j^n) \quad (13)$$

에너지 소비 스케줄 벡터 \bar{x}_j 가 결정되어지면 해당 정보가 에너지 소비 스케줄러(ECS)에 입력이 되고, 아래 <Figure 3>의 시스템 구성도와 같이 에너지 소비 스케줄러(ECS)가 작동하여 개별 전기기기에 대한 에너지 공급이 이루어지게 된다.

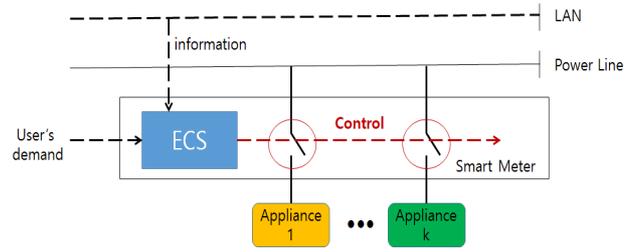


Figure 3. Operation of energy consumption scheduler(ECS)

3. 최적 에너지 소비 스케줄링

3.1 게임 모형

소비자들이 자신의 에너지 소비 스케줄을 결정하고 그에 따라 에너지를 소비하게 되면, 에너지의 공급자 입장에서는 이러한 에너지 수요를 충족시켜주기 위해서 어느 시간대에 얼마만큼의 에너지를 생산하여야 하는지를 알 수 있게 되고, 공급자의 비용함수에 의해서 그만큼의 에너지를 생산하기 위한 비용이 결정된다.

즉, 모든 소비자들이 시간대 h 에 소비하고자 하는 에너지 소비 스케줄이 식 (11)과 같이 결정되면, 공급자가 시간대 h 에 공급하여야 하는 에너지 양과 이를 생산하기 위한 비용은 식 (2)와 식 (12)에 의해 다음과 같이 계산됨을 알 수 있다.

$$L^h = \sum_{j \in N} l_j^h = \sum_{j \in N} (x_{j,s}^h + x_{j,a}^h) \quad (14)$$

$$C^h(L^h) = C^h\left(\sum_{j \in N} (x_{j,s}^h + x_{j,a}^h)\right) \quad (15)$$

한편, 공급자가 책정하는 에너지 가격은 시간대에 따라 달라지는 실시간 요금제에 의해 결정된다고 가정하자. 그리고 구체적인 가격수준은 해당 시간대에 공급하여야 하는 에너지를 생산하는데 소요되는 비용에 근거해서 일정 수준의 마진을 고려하여 결정될 것이다. 이에 본 연구에서는 분석의 편의를 위하여 공급자의 에너지 가격이 에너지 생산비용을 기반으로 하는 원가기반 가격제(cost-based pricing)를 채택한다고 가정한다. 그리고 에너지 가격은 소비자의 에너지 사용량이 증가할수록 높은 가격이 책정되고, 또한 현재 우리나라를 비롯한 많은 국가에서 에너지요금체제로 채택하고 있는 누진 요금제를 반영하여 가격이 상승하는 비율도 에너지 사용량이 많아질수록 증가한다고 가정한다. 이와 같은 가정 하에서 식 (11)과 같은 에너지 소비 스케줄을 결정한 소비자 j 가 하루에 부담하여야 하는 에너지 지출비용 함수는 다음과 같이 생산비용의 함수가 되고, 에너지 소비량에 대해서 증가함수이면서 강볼록함수의 성질을 만족하게 된다. 분석의 편의를 위하여 함수 f 는 이계미분가능(twice differentiable)하다고 가정한다. 아래 식 (16)에서 \bar{x}_{-j} 는 소비자 j , 즉 자신을 제외한 모든 다른 소비자

들의 에너지 소비 스케줄 벡터를 나타낸다

$$\Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j}) = f[C^h(L^h)] \text{ where } f' > 0, f'' > 0 \quad (16)$$

합리적인 소비자라면 자신의 전기기기 별 에너지 수요를 충족시키면서 가능한 에너지 지출비용을 최소화하기 위한 의사결정을 내릴 것이다. 따라서 소비자 개인별 최적 에너지 소비 스케줄링 문제는 다음과 같이 모형화 된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j}) & (17) \\ \text{s.t. } & x_{j,a_i}^p + x_{j,a_i}^n \geq E_{j,a_i} & \text{for } \forall_i \\ & x_{j,a_i}^p \geq E_{j,a_i}^p & \text{for } \forall_i \\ & 0 \leq x_{j,s}^p \leq Q_j \\ & x_{j,s}^p + x_{j,s}^n = 0 \\ & x_{j,a_i} \geq 0, x_{j,s} : \text{unres.} \end{aligned}$$

본 연구가 가정한 바와 같이 비용함수를 강볼록함수를 만족하는 형태로 설정하게 되면, 최소화 문제인 식(17)은 유일한 최적해를 가지고 있다는 사실이 알려져 있다(Boyd, 2004). 또한 최적화 문제 식(17)은 볼록 최적화(convex optimization) 문제의 범주에 들어가기 때문에 IPM(interior-point methods)와 같은 볼록계획법(convex programming) 기법을 이용해서 그 해를 구할 수 있다. 사실 본 연구에서 제시하는 최적 에너지 소비 스케줄링 문제는 기존의 Mohsenin-Rad *et al.*(2010)의 모형과 구조가 동일하나, 기존 연구에서는 고려하지 않고 있는 저장장치라는 기기를 고려하여 있다는 점이 핵심적인 차별성이다. 특히 식(17)의 세 번째부터 다섯 번째 제약식의 특성을 가지고 있는 저장장치 에너지 소비 스케줄 변수를 새롭게 모형에 도입하여 분석을 시도하는 것이 관련 연구 분야에 본 연구가 기여하는 중요한 부분이라고 말할 수 있겠다.

최적화 모형(17)에 제시된 최적 에너지 소비 스케줄링 문제의 목적함수 $\Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j})$ 를 보면, 목적함수의 값이 전기기기 별 에너지 소비에 대한 본인의 의사결정(\bar{x}_j)에만 영향을 받는 것이 아니라 다른 소비자들의 의사결정(\bar{x}_{-j})에도 영향을 받는 사실을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 다루고자 하는 문제는 단순한 개별 최적화 의사결정 문제가 아니라 상대방의 의사결정에 관한 영향을 고려하는 게임이론적 의사결정 문제 상황임을 알 수 있다(Fudenberg, 2001). 표현의 편의성을 위하여 최적화 모형 식(17)의 제약식으로 이루어지는 가능해 집합(feasible set)을 Ω_j 로 표시하자. 본 연구에서는 스마트 그리드의 최적 에너지 소비 스케줄링 문제를 해결하기 위하여 다음과 같이 게임 모형을 수립하였다.

<에너지 소비 스케줄링 게임>

- 참가자(Player) : 에너지 소비자 집합 (N)
- 전략(Stratgy) : 각 소비자의 에너지 소비 스케줄 벡터 ($\bar{x}_j \in \Omega_j, j \in N$)
- 이득함수(Payoff) : 각 소비자의 에너지 지출비용의 (-) 값 ($-\Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j})$)

3.2 내쉬 균형 에너지 소비 스케줄링

앞 절에서 제시한 에너지 소비 스케줄링 게임의 균형해는 게임이론의 내쉬균형(Nash equilibrium) 개념을 이용하여 정의할 수 있다(Fudenberg, 2001). 즉, 모든 소비자들의 에너지 소비 스케줄 벡터집합 $[\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_n^*]$ 가 내쉬균형이 되기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\Pi_j(\bar{x}_j^*, \bar{x}_{-j}^*) \geq \Pi_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j}^*) \text{ for any } \bar{x}_j \in \Omega_j \text{ and } \forall_j \in N \quad (18)$$

[정리 1] 비용함수가 증가함수(식(3))와 강볼록함수(식(4))의 조건을 만족한다면, 에너지 소비 스케줄링 게임의 내쉬균형이 항상 존재하며 유일하다.

(증명) 식(16)에서 함수 f 가 증가함수이면서 강볼록함수이고 $C^h(L^h)$ 가 강볼록함수이면 $\Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j})$ 도 \bar{x}_j 에 대해서 강볼록 함수가 된다는 사실이 증명되어져 있다(Boyd *et al.*, 2004). 그러면 에너지 소비 스케줄링 게임의 이득함수인 $\Pi_j = -\Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j})$ 는 강오목함수가 됨을 쉽게 알 수 있으며, 이는 에너지 소비 스케줄링 게임이 Rosen(1965)에서 정의하는 n -명 오목게임의 범주에 들어간다는 사실을 의미하게 된다. 따라서 Rosen(1965)의 <Theorem 1>에 의해 에너지 소비 스케줄링 게임의 내쉬균형이 존재하게 된다. (증명 끝)

[정리 2] 에너지 소비 스케줄링 게임의 내쉬균형은 최적화 문제(17)의 소비자 개인별 최적 에너지 소비 스케줄링 문제의 최적해이다.

(증명) $(\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_n^*)$ 를 에너지 소비 스케줄링 게임의 내쉬균형이라 하자. 그러면 내쉬균형의 조건인 식(18)을 만족할 것이다. 그리고 식(18)의 양변에 (-)를 붙이면 다음과 같은 식(19)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \Gamma_j(\bar{x}_j^*, \bar{x}_{-j}^*) & \leq \Gamma_j(\bar{x}_j, \bar{x}_{-j}^*) & (19) \\ \text{for any } \bar{x}_j^* & \neq \bar{x}_j \in \Omega_j \text{ and } \forall_j \in N \end{aligned}$$

식(19)는 \bar{x}_j^* 가 식(17)의 목적함수를 최소화하는 소비자 j 의 최적해임을 의미한다. 또한 모든 소비자에 대해서 이 조건이 만족하므로 내쉬균형 $(\bar{x}_1^*, \bar{x}_2^*, \dots, \bar{x}_n^*)$ 이 모든 소비자에

대해서 개인별 최적 에너지 소비 스케줄이 된다(증명 끝)

[정리 1]과 [정리 2]에 의하면 에너지 소비 스케줄링 게임의 내쉬균형이 존재하고 유일하며, 이 값이 개인별 최적 에너지 소비 스케줄이 되므로, 내쉬균형을 구하면 최적 에너지 소비 스케줄 문제가 해결되어짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 최적 에너지 소비 스케줄을 구하기 위하여 다음과 같은 알고리즘을 제시한다.

다른 소비자들의 스케줄이 알려져 있을 때 특정 소비자는 자신을 위한 최적 스케줄을 도출해 낼 수 있다 이를 모든 소비자들에 대해 반복할 경우, 전체 소비자들의 전력 사용은 하나의 최적해에 수렴하게 된다. 다음의 Pseudo code를 통해 최적해를 도출하기 위한 알고리즘을 정리하였다

Table 1. Iterative Algorithm for Optimal Solution

1	: Initialize consumption schedule \bar{x}_j for every user $j \in N$
2	: Do until no user update his/her schedule
3	: Select a user j
4	: Solve local problem (19) using IPM to obtain new optimal schedule \bar{x}_j , given schedules of other users, \bar{x}_{-j} .
5	: If \bar{x}_j changed, then
6	: User j updates \bar{x}_j and the provider announces the change to others
7	: End if
8	: Repeat 3~7 lines for another user
9	: Repeat 2~8 lines

최적해 과정은 각 개인 별로 최적화를 반복하는 형태로 이루어져 있다. 각 소비자(j)는 다른 소비자의 전력 소비 스케줄(\bar{x}_{-j})을 통보 받고, 비용 함수를 고려하여 자신의 최적 소비 스케줄(\bar{x}_j)을 결정하게 된다. 각 소비자의 최적화 문제는 식(19)에 나타난 바와 같이 개인의 전력 사용에 따른 지출비용을 최소화하기 위한 목적함수를 갖는다

이때, 새로 구한 소비 스케줄이 기존과 다를 경우, 변화를 공급자에게 통보하여 다른 소비자들도 알 수 있게 한다 이 과정을 개인 별로 반복하여 더 이상 모든 개인의 스케줄이 변화하지 않을 때까지 반복하게 된다 본 논문에서 제시하는 알고리즘의 내쉬 균형점에 대한 수렴성을 담보하기 위한 충분조건은 모든 소비자들이 매번 시차를 두고 스케줄링 개선을 시행하면 된다. 따라서 에너지 공급자가 소비자들에게 동시에 스케줄링 개선을 하지 않도록 하는 적절한 장치를 부과하면 위 알고리즘은 임의의 초기 스케줄링에 대해서 항상 내쉬 균형점에 수렴하게 되며, 이에 대한 증명은 Mohsenin-Rad *et al.*(2010)의 <Theorem 3>과 동일하므로 본 논문에서는 생략한다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 실험 설계

시뮬레이션에 사용된 전체 소비자의 수 $|N|=10$ 이다. 각각의 소비자는 기본적으로 $A=\{a_1, a_2, a_3\}$ 의 세 가지 전기기기를 사용하고 있고, 각각의 하루 에너지 수요량 E_{j,a_i} 과 피크 시간대 에너지 수요량 E_{j,a_i}^p 값이 주어진다. 저장장치를 사용하는 소비자의 경우에는 $A_j=\{a_1, a_2, a_3\}$ 의 네 가지 기기를 사용하는 것이고 저장장치의 용량 Q_j 값이 주어진다.

분석의 편의를 위하여 피크 시간대는 하루의 절반으로 ($k=2$) 가정하였다. 그리고 피크 시간대에 반드시 사용되어야 하는 기기유형의 특성을 강조하기 위하여 기기 a_2 의 피크 시간대 에너지 수요량은 하루 전체 에너지 수요량의 절반보다 크다고 가정하였으며 ($E_{j,a_2}^p > E_{j,a_2}/2$), 기기 유형 a_3 의 전체 에너지 수요량은 a_2 의 전체 에너지 수요량보다 적다고 가정하였다 ($E_{j,a_2}^p > E_{j,a_3}$).

이러한 가정을 만족하는 시뮬레이션 파라미터 값이 주어지면, 모든 소비자에 대해서 식(17)의 제약 조건(Ω_j)을 만족하는 무작위의 에너지 소비 스케줄을 생성한다 먼저 모든 소비자가 저장 장치가 없는 경우에 대해서 다른 소비자들의 에너지 소비 스케줄을 주어진 값으로 한 후 식(17)의 목적함수를 최소화하는 에너지 소비 스케줄을 앞 절에서 제시한 알고리즘을 이용하여 모든 소비자에 대해서 구한다 이러한 과정을 반복하다가 모든 소비자가 더 이상 자신의 에너지 소비 스케줄을 변경하지 않으면, 즉 모든 소비자가 현재의 에너지 소비 스케줄에서 더 이상 에너지 지출비용을 줄일 수 있는 스케줄이 존재하지 않으면 시뮬레이션이 종료되고, 이때의 소비자 별 에너지 소비 스케줄 값이 내쉬 균형 에너지 소비 스케줄이 되며 이 스케줄이 [정리 2]에 의하여 최적 에너지 소비 스케줄이 된다 다음으로 모든 소비자가 저장장치를 사용하는 경우에 대해서 저장장치가 없는 경우와 동일한 시뮬레이션 파라미터 값과 주어진 저장용량에 대해서 마찬가지로 소비자를 개인 별 균형 에너지 소비 스케줄을 구한 후, 두 가지 균형 값을 비교 분석한다

4.2 실험 결과

먼저 각 시간대별로 개별 소비자의 최적 에너지 스케줄링에 따른 에너지 소비량을 구분하여 시뮬레이션을 실시한 결과를 정리하면 다음 <Figure 4>와 <Figure 5> 와 같다.

<Figure 4>를 살펴보면, 에너지 비용이 비싼 피크타임 시간대의 경우에는 모든 소비자에게 대해서 에너지 저장장치가 있는 경우 에너지 사용량이 감소하고 있음을 알 수 있다 반면에 <Figure 5>에 의하면 에너지 비용이 저렴한 평상 시간대의 에너지 소비량은 에너지 저장장치가 있는 경우 최적 에너지 소비량이 증가하게 됨을 확인할 수 있다 이와 같은 결과는 에너지 저장장치로부터 기대할 수 있는 일반적인 활용성을 보여주

고 있는 결과라고 해석 할 수 있다. 즉, 에너지 비용이 저렴한 시간대에 에너지 저장장치에 에너지를 저장한 후 에너지 비용이 비싼 피크타임에 필요한 에너지를 에너지 저장장치로부터 공급받을 수 있다는 에너지 저장장치의 기능이 시뮬레이션 결과 실제로 작동되고 있다는 사실을 확인 할 수 있는 것이다 따라서 본 연구에서 제시하고 있는 최적 에너지 소비 스케줄링 알고리즘이 저장장치의 기능을 올바르게 작용시키고 있다고 해석 가능한 결과라 할 수 있겠다.

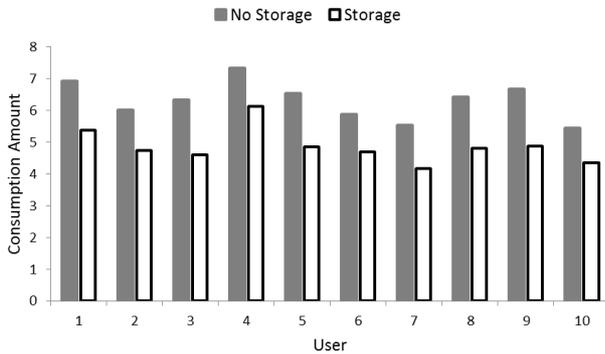


Figure 4. Changes in energy consumption of each consumer in peak time

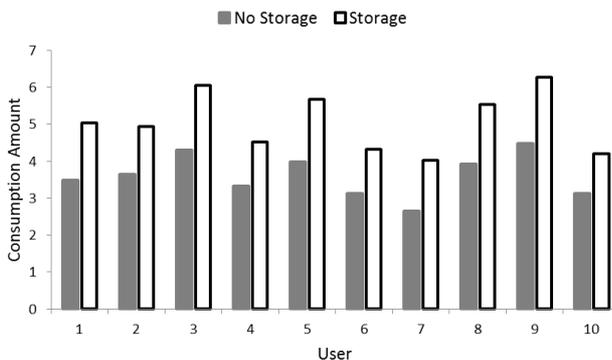


Figure 5. Changes in energy consumption of each consumer in non-peak time

위 결과는 스마트 그리드 시스템 내에서 에너지 저장장치의 도입이 에너지 비용이 비싼 시간대에서 저렴한 시간대로 소비량을 이전시켰음을 보여주고 있는 것이며 따라서 에너지 저장장치가 개별 소비자들의 에너지 소비 패턴을 보다 효율적인 방향으로 유도하고 있음을 보여주는 결과라고도 말할 수 있다. 그러나 저장장치의 도입으로 인한 에너지 소비 패턴의 변화가 실제로 효율적인지, 효율적이라면 얼마나 효율적인가를 평가하기 위해서는 본 연구에서 제시한 최적 에너지 소비 스케줄링 문제의 목적함수인 개별 소비자의 에너지 소비 지출비용의 변화에 대한 분석이 실시되어야 할 것이다 아래 <Figure 6>은 저장장치 도입 전후에 있어서 개별 소비자들의 에너지 소비 지출비용에 관한 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다

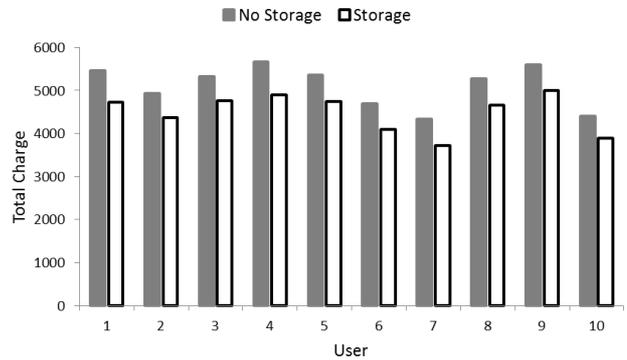


Figure 6. Changes in energy consumption expenditure of each consumer

<Figure 6>에 나타난 시뮬레이션 결과에 의하면 모든 소비자가 저장장치의 도입 이후 에너지 소비 지출비용이 줄어든 것을 알 수 있다. 즉, 저장장치의 도입으로 인해 소비자들의 에너지 소비 패턴이 실제로 효율적으로 바뀌었다는 사실을 알 수 있는 것이다. 또 다른 관점에서 보면, <Figure 6>에 나타난 저장장치 도입 전과 후의 에너지 소비지출의 차이가 곧 저장장치의 경제적 편익(benefit)으로 해석할 수 있는 값이다. 예를 들어 <Figure 6>에서 에너지 소비지출이 계산된 기간이 한 달이라고 하면, 저장장치의 도입으로 인해서 매달 그래프의 차이 값만큼 에너지 비용을 절감할 수 있음을 의미하는 것이고 에너지 저장장치의 사용수명 기간만큼 절감할 수 있는 총액 또는 화폐의 시간적 가치를 고려한다면 적당한 할인율을 적용한 순현재가(net present value)의 총합이 저장장치가 가져다주는 총 경제적 편익이 되는 것이다. 따라서 이와 같이 계산할 수 있는 경제적 편익이 저장장치를 도입하고 유지보수 하는데 필요한 비용보다 크다면 에너지 저장장치를 투자하는데 있어서 경제적 타당성이 있다고 평가할 수 있다.

다음은 소비자들의 에너지 소비를 합계한 시스템 전체 관점에서의 시뮬레이션 결과를 살펴보자 우선 저장장치의 도입 전후에 있어서 시스템 전체의 시간대별 에너지 소비 패턴 변화를 정리하면 다음<Figure 7>과 같다.

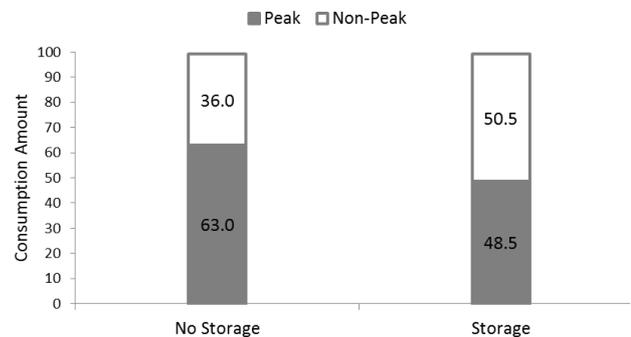


Figure 7. Changes in total energy consumption pattern

<Figure 7>에서 알 수 있듯이 저장장치가 없는 경우에는 전체 에너지 소비량의 약63%가 피크타임 시간대에 소비되었으나,

저장장치 도입 이후에는 최적 에너지 소비 스케줄링이 피크타임 시간대의 에너지 소비를 대폭 정상 시간대로 유도한 결과 피크시간대 에너지 소비 비율이 48.5% 수준으로 감소시킴으로써 시간대별 에너지 소비를 거의 평준화시키는 결과를 초래하고 있다.

에너지 사용의 시간대별 배분 정도를 나타내는 척도로서 시간대별 평균 에너지 사용량과 피크 타임에서의 에너지 사용량의 비를 나타내는 첨두대평균비(PAR : peak to average ratio)라는 척도가 있다. 일반적으로 PAR가 높으면 높을수록 에너지 사용이 피크 타임에 몰려 있다는 것을 의미하며, 이런 경우 피크타임에 소비되는 에너지를 공급하기 위해서는 평상시에 공급하는 에너지량보다 훨씬 많은 에너지 생산 용량을 가지고 있어야 하고, 그렇게 되면 평상시에는 유휴용량이 많아질 수밖에 없기 때문에 에너지 생산에 있어서 효율성이 많이 떨어지게 됨을 알 수 있게 된다. 따라서 PAR 척도값이 '1'에 가까울수록 시간대별 에너지사용량이 골고루 분배되어 있기 때문에 상대적으로 적은 에너지 최대 생산용량으로 소비자들의 수요를 모두 충족시켜줄 수 있음으로서, 에너지 생산의 효율성을 높일 수 있는 것이다. 본 연구의 경우 첨두대평균비(PAR)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$PAR = \frac{L^p}{(L^p + L^n) / 2} \quad (20)$$

다음 <Figure 8>은 저장장치가 없는 경우와 있는 경우의 첨두대평균비(PAR)를 계산하여 비교한 것이다

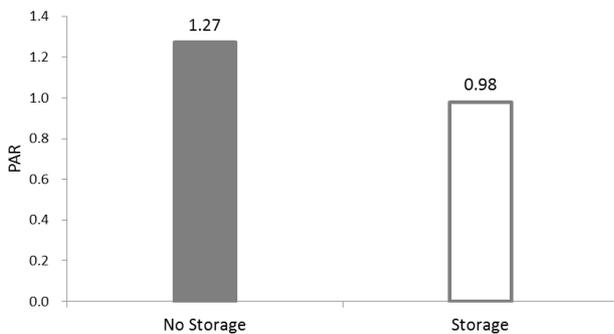


Figure 8. Comparison of PAR

<Figure 8>을 보면 저장장치가 없는 경우 1.2를 상회하던 PAR 값이 저장장치의 도입으로 인해서 거의 1에 가까운 값으로 변화되었음을 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 시스템 전체의 에너지 공급비용 효율성 관점에서 보면 PAR 값이 1에 가까울수록 바람직하다고 볼 수 있는데, 본 연구의 시뮬레이션 결과에 의하면 저장장치의 도입을 통해 시스템 전체의 에너지 공급 관점에서도 효율성을 제고시킬 수 있는 방향으로 에너지 소비 패턴을 변화시킬 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

4.3 민감도 분석

본 절에서는 저장장치 도입에 최적 에너지 스케줄링에 있어서 몇 가지 중요한 변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 우선 도입하는 저장장치의 용량에 따라 비용 절감 효과가 어떻게 변화하는지를 살펴보기 위하여 각 사용자의 저장장치 용량과 그에 따른 지출비용의 변화량을 계산하여 다음 그림에 나타내었다.

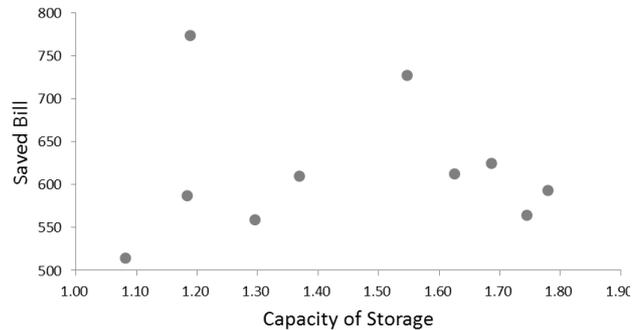


Figure 9. Relationship between storage capacity and saved expenditure

<Figure 9>에 나타난 결과는 일반적인 예측과는 달리 저장장치의 용량과 비용 절감 효과간에 일정한 관계가 존재하지 않는다는 사실을 보여준다. 이는 각 개인별 전체 전력 소비 요구량 및 피크타임 요구량이 달라짐에 따라 저장장치의 도입이 개인의 최적 전력 소비 스케줄링에 영향을 미치는 정도가 달라지기 때문인 것으로 해석된다.

한편, 각 사용자 별로 다른 저장장치 용량을 각각 1%씩 증가시켰을 때의 지출비용의 절감 변화를 살펴보았다. 다른 사용자의 저장장치 용량은 그대로 두고 실험을 하였으며 그 결과는 <Figure 10>과 같다.

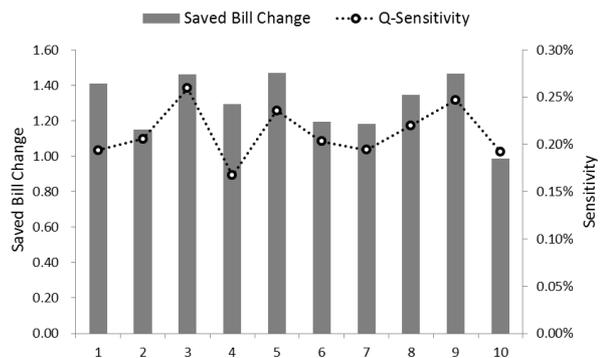


Figure 10. Sensitivity analysis on storage capacity

<Figure 10>에 나타난 결과는 저장장치 용량 1%의 증가가 사용자에게 가져오는 경제적 이득은 1에서 1.5 정도의 추가적인 비용 감소로서 그 크기가 각기 다르다는 것을 보여준다. 한편 소비자별 경제적 이득을 기존 에너지 비용 대비 비율값으로

나타내 보면 저장장치 용량이 1% 증가함에 따라 추가로 절감되는 비용은 대략적으로 0.15~0.25% 수준인 것으로 나타났다.

다음으로 전력요구량의 변화에 따른 에너지비용의 변화를 살펴보기 위하여 전체전력요구량의 1% 증가에 따른 에너지사용 비용의 변화를 분석해보았다

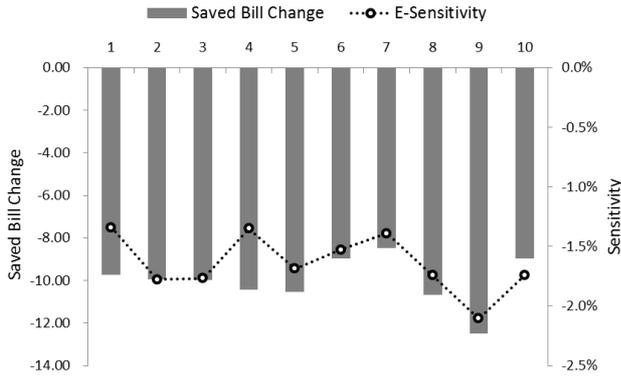


Figure 11. Sensitivity analysis on required consumption

저장장치의 용량과 달리 전체 전력 요구량의 1% 증가는 큰 폭의 비용 상승, 즉 비용 절감의 감소를 가져왔다. <Figure 11>에 나타나듯이 평균적으로 10정도의 추가 비용 요인이 되고 있다. 이는 각 소비자 별로 기존 비용 절감량의 1.3%에서 2%의 비용 증가에 해당하는 것으로 개인의 사용 장치 중 하나인 저장장치의 변화량에 비해 모든 장비가 일제히 전력 요구량이 증가하는 상황인 점 때문에 변화 비율이 커진 것으로 보인다

또한 피크타임 전력 요구량에 대한 민감도 분석을 실시하였다

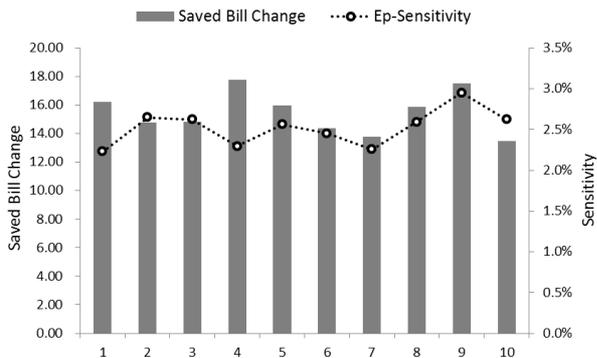


Figure 12. Sensitivity analysis on required consumption on peak time

위의 두 요인과 비교할 때 피크타임의 전력 요구량이 가장 큰 영향을 미치고 있다. 피크 타임의 전력 요구량이 증가함에 따라, 저장장치 도입의 효용이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 각 개인별로 최대 17.75%까지 추가로 비용이 절감되었는데, 이는 기존 비용 절감량의 2.5%를 상회하는 효과이다. 앞서 저장장치만의 변화에 비해 전체 전력 사용량의 변화가 더 큰 차이를 일으킨 것을 확인한 바 있듯이, 모든 장비에 대해 전력

요구량이 증가했다는 점에서 변화량이 커진 원인을 찾을 수 있다. 또한, 요구량 증가가 피크타임에만 집중되었다는 점에서 저장장치 도입의 효용이 한층 더 가중되었다고 볼 수 있다

마지막으로 전력 공급자의 가격 정책에 따른 변화를 살펴보기 위하여, 2차 함수 형태의 누진 가격 정책을 반영하는 가격 도출 함수의 계수값을 1.5배로 변화시켰다. 즉, 가격 함수의 곡률이 증가한 경우에 대하여 같은 실험을 실시하여 비교하고자 하였다.

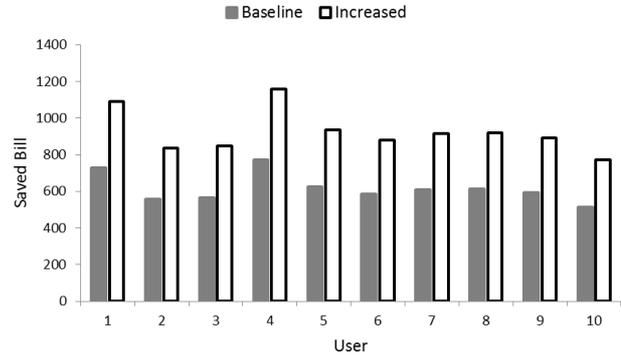


Figure 13. Effect of price increase on saved bill

<Figure 13>은 가격 함수의 곡률 증가가 가격 증가로 이어지면서 결국 저장장치의 도입이 더 큰 효용을 가져오게 되었다는 것을 보여준다. 모든 사용자에게 있어서 비용 절감 효과는 가격 함수의 계수 증가 폭과 같은 1.5배로 나타났다.

가격의 증가가 전체 시스템에 가져온 변화는 PAR을 통해 살펴볼 수 있는데, <Figure 14>를 보면 <Figure 8>과 동일한 결과가 도출되었을 알 수 있다. 이는 개인의 입장에서의 효용 증가와는 달리, 전체 시스템에 있어서는 가격 정책의 일정한 증가는 저장장치 도입 전후의 PAR를 변화시키지 않는다는 사실을 나타내는 결과이다.

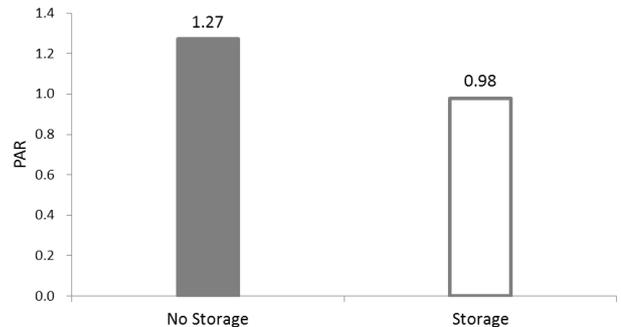


Figure 14. Effect of price increase on PAR

5. 결론

본 연구는 스마트 그리드 시스템에 있어서 최적 에너지 소비 스케줄링을 찾을 수 있는 알고리즘을 제안하고, 특히 기존의

연구에서 다루지 못했던 저장 장치의 도입을 고려한 최적 에너지 소비 스케줄링 결과를 분석하고자 하였다. 저장장치의 도입은 각사용자들의 피크 타임 에너지 사용량을 평상 시간대로 이동시키는 효과를 가질 것으로 기대되는 바 이를 분석적으로 확인하기 위하여 1명의 공급자와 다수의 소비자로 구성되는 스마트 그리드 시스템에 있어서 개별 소비자의 최적 에너지 소비 스케줄링 문제를 게임이론으로 모형화하고 게임모형의 내쉬 균형 해를 구하는 알고리즘을 통해 시뮬레이션 실험을 수행하였다.

실험 결과는 예상한 바와 같이 저장 장치의 도입으로 인해 피크 타임의 에너지 사용량이 감소하고 평상 시간대의 에너지 사용량이 증가한다는 사실을 보여주었다 또한 이러한 에너지 소비 패턴의 변화는 결국 소비자와 공급자 즉 전체 시스템 측면에서 모두 효율성을 증대시켜 준다는 사실을 확인할 수 있었다. 즉, 개인적인 측면에서의 효율성 증대효과는 소비자들의 에너지 지출비용의 변화를 통해 알 수 있는데 평상 시간대의 저렴한 에너지를 피크 타임으로 이동시키는 에너지 소비 스케줄의 변화는 모든 소비자들에게 있어서 에너지 비용 지출의 절감으로 이어졌다. 시스템 전체의 에너지 공급 측면에서의 효율성은 PAR의 변화를 통해 측정된다 본 연구에서 보여준 PAR 값의 1 값에 가까운 방향으로의 감소 효과는 피크 타임에 상대적으로 집중된 에너지 공급 부담을 줄여 최대 요구 생산량의 절감 혹은 예비 에너지의 확보를 가져올 수 있으며 결과적으로 설비의 추가 투자를 막고 단위 에너지 생산 비용의 하락을 가져온다.

본 연구는 스마트 그리드 시스템 하에서 최적 에너지 스케줄링에 따른 저장장치의 효과를 게임 모형을 통해 확인하였다는 점에서 의의를 가지고 있지만 다음과 같은 몇 가지 부분에서 추후 연구의 단서가 되는 한계를 내포하고 있다 우선 게임 모형에 있어서의 단순화 문제이다 피크와 평상 시간대로 이분화 된 시간과 세 가지 종류로 단순화 된 기기들의 분류를 다양화 하는 것은 더욱 현실적인 접근을 가능하게 할 것이다 또한 저장장치의 용량과 가격에 따른 비용 절감효과의 순이익을 분석하는 것 역시 저장장치 도입을 고려하는 개인의 입장에서 유의미한 경제적 관점을 제공할 것이다.

참고문헌

- Boyd, S. and Vandenberghe, L. (2004), *Convex Optimization*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bu, S., Yu, F. R., and Liu, P. X. (2011), A game-theoretical decision-making scheme for electricity retailers in the smart grid with demand-side management, *Proc. of 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 387-391.
- Centolella, P. (2010), The integration of price responsive demand into regional transmission organization (RTO) wholesale power markets and system operations, *Energy*, **35**(4), 1568-1574.
- Choi, T., Ko, K., Park, S., Kim, H., and Yoon, Y. (2010), A Study on Energy Cost Saving Strategy in the Smart Grid Environment, *Proc. of Summer Conf. of Korean Institute of Electrical Engineers*, 517-518.
- Conejo, A. J., Morales, J. M., and Baringo, L. (2010), Real-time demand response model, *IEEE Trans. Smart Grid*, **1**(3), 236-242.
- Fudenberg, D. and Tirole, J. (1991), *Game Theory*, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Gomes, A., Antunes, C. H., and Martins, A. G. (2007), A multiple objective approach to direct load control using an interactive evolutionary algorithm, *IEEE Trans. Power System*, **22**(3), 1004-1011.
- Kim, T., Lee, S., and Lee, S. (2010), Optimization of Home Loads scheduling in Demand Response, *J. of Korean Institute of Communication and Information Sciences*, **35**, 1407-1415.
- Lee, M. (2012), The current state and the prospect of smart grid market, *Research Report of Industry Risk*, **2012-G-09**, The Export-Import Bank of Korea.
- Mohsenian-Rad, A. H., Wong, V. W. S., Jatskevich, J., and Leon-Garcia, A. (2010), Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid, *IEEE Trans. Smart Grid*, **1**(3), 320-331.
- Moon, Y. (2014), Demand Response Real Time Pricing Model for Smart Grid Considering Consumer Behavior and Price Elasticity, *J. of KORMS*, **39**(1), 49-67.
- Park, K., Lee, Y., Doh, G., and Yoo, J. (2012), Scheduling problem for energy efficiency optimization in smart grid, *Proc. of Spring Joint Con. of KIIIE/KORMS*, 1187-1206.
- Ruiz, N., Cobelo, I., and Oyarzabal, J. (2009), A direct load control model for virtual power plant management, *IEEE Trans. Power System*, **24**(2), 959-966.
- Rosen, J. B. (1965), Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games, *Econometrica*, **33**, 347-351.
- Saad, W., Han, Z., Poor, H. V., and Basar, T. (2012), Game-Theoretic Methods for the Smart Grid : An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications, *IEEE Signal Processing Magazine*, **29**(5), 86-105.
- Samadi, P., Mohsenian-Rad, A.-H., Schober, R., Wong, V. W. S., and Jatskevich, J. (2010), Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid, *Proc. of 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 415-420.
- Triki, C. and Violi, A. (2009), Dynamic pricing of electricity in retail markets, *Quarterly. J. of Oper. Res.*, **7**(1), 21-S36.
- Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S. D., Rogers, A., and Jennings, N. R. (2010), Agent-based Micro-Storage Management for the Smart Grid, *Proc. of the 8th Conference on Autonomous Agents And Multi-Agent Systems*, 39-46.
- Wade, N. S., Taylor, P. C., Lang, P. D., and Jones, P. R. (2010), Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid, *Energy Policy*, **38**, 7180-7188.