



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

저장 장치를 고려한 차세대
스마트 그리드 에너지 소비 최적
스케줄링: 게임 이론적 접근

2014 년 8 월

서울대학교 대학원

산업공학과

여 상 민

저장 장치를 고려한 차세대
스마트 그리드 에너지 소비 최적
스케줄링: 게임 이론적 접근

지도 교수 오 형 식

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2014 년 8 월

서울대학교 대학원
산업공학과
여상민

여상민의 공학석사 학위논문을 인준함
2014 년 8 월

위 원 장 박 진 우 (인)

부위원장 오 형 식 (인)

위 원 박 용 태 (인)

초 록

본 연구에서는 한 개의 전력 공급자와 여러 명의 전력 소비자가 존재하는 스마트 그리드 시스템을 다룬다. 각 소비자는 에너지 소비 스케줄러(Energy Consumption Scheduler; ECS)를 포함한 스마트 미터를 통해 실시간 전력 요금을 제공 받는다. 스마트 미터를 통해 제공받은 전력 요금 상황하에 소비자는 요구 사용량을 만족시키는 범위에서 요금을 최소화 하는 최적화 문제의 해를 도출해 소비자의 최적 소비 스케줄을 선택한다. 이러한 실시간 의사 결정 문제는 최근에 게임 이론적 접근을 통해 연구되고 있다. 본 논문은 현재 존재하는 방법에 쓰이는 기기들에 추가로 이러한 기기들과 다른 특징을 갖는 저장 장치를 고려함으로써 이것이 차세대 스마트 그리드 시스템에서 최적 에너지 소비 스케줄을 정할 때 미치는 영향에 대해 연구한다. 저장 장치를 포함한 기기들의 최적 에너지 소비 스케줄은 게임 이론적 접근을 통해 도출해 낸다. 시뮬레이션 결과는 각 개인의 요금 절약뿐만 아니라 전체 에너지 사용의 첨두대평균비(Peak to average ratio; PAR)가 감소하는 것을 보여준다.

주요어 : 스마트 그리드, ECS, 저장 장치, 실시간 의사 결정, 게임이론, 최적화
학 번 : 2012-23311

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경 및 필요성	1
제 2 절 연구의 목적	5
제 2 장 시스템 모델	8
제 1 절 전력 시스템	8
제 2 절 전력 생산 비용	11
제 3 절 전력 사용량 조절	12
제 3 장 에너지 소비 게임	17
제 1 절 요금 최소화	17
제 2 절 게임 모델	20
제 4 장 분산 알고리즘	23
제 1 절 분산 원칙	23
제 2 절 알고리즘	25
제 3 절 수렴과 최적화	27
제 5 장 시뮬레이션	28

제 1 절 시뮬레이션 과정.....	28
제 2 절 사용량 최소화.....	30
제 3 절 요금.....	34
제 6 장 결론 및 추후 연구 과제.....	39
제 1 절 결론.....	39
제 2 절 추후 연구 과제.....	41
참고 문헌.....	42
Abstract.....	44

표 목차

[표 1] 소비자간의 에너지 소비 게임.....	20
[표 2] 소비자 별 요금 변화	38

그림 목차

[그림 1] 스마트 그리드 시스템	8
[그림 2] 전기 생산 비용 그래프.....	12
[그림 3] 전체 사용량 중 피크 타임 비율	30
[그림 4] PAR 비교.....	31
[그림 5] 피크 타임 사용량 비교.....	32
[그림 6] 논-피크 타임 사용량 비교	33
[그림 7] 피크 타임 요금 비교.....	34
[그림 8] 논-피크 타임 요금 비교.....	35
[그림 9] 전체 시간 요금 비교.....	35
[그림 10] 저장 장치 용량에 따른 요금 변화..	36

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 필요성

캘리포니아 주가 1990년대에 전기 시장에 대한 규제를 완화한 후로, 2001년 심각한 에너지 부족으로 인해 전기가격이 급등했고 대규모 정전 사태가 발생하였다. 이는 막대한 금전적인 손실과 많은 기업들의 파산을 초래하였다. 국내도 마찬가지로 전력 사용이 급증하는 여름과 겨울에는 여유전력량이 급격히 줄어들어 캘리포니아 주와 같은 대규모 정전사태를 우려하고 있다. 2013년 여름, 전력 공급 예비율은 최저 5.1%에 도달했으며 2009년부터 예비율이 7.9%를 비롯하여 매년 최저 5~6%의 전력 공급 예비율을 보이고 있다.^① 2011년 9월 15일, 이상기후로 인한 무더위로 인해 예비 전력이 안정유지수준 400만KW 미만으로 떨어지면서 지역별 단전을 실시하여 수도권을 포함한 서울 일대에 정전 사태가 발생한 적이 있다. 이처럼 전력 부족 상황에 대응하기 위해 기술 개발, 발전소 설립 등의 많은 방안들이 제시되고 있다.

스마트 그리드 (Smart Grid)는 촉망 받는 하나의 대응책으로 에너지 네트워크와 통신 네트워크가 합쳐진 지능형 전력망으로써 기존의 전력망에 IT를 도입하여 에너지 공급자와 소비자가

^① 한국전력

양방향으로 사용 정보를 교환함으로써 에너지 효율을 최적화 할 수 있는 기술이다. 스마트 그리드 사업은 2030년까지 미국은 500조원, 국내는 약 68조원의 시장으로 성장할 것으로 전망하고 있다.^② 전력 전문가들은 스마트 그리드가 스마트폰과 같이 전세계에 큰 영향을 미칠 수 있는 사업으로 성장할 것이라 예상하고 있다. 또한 스마트 그리드의 발전에 따른 관련 기업의 시너지 효과를 기대할 수 있으며 이를 통해 전력, 건설, 자동차 등의 주력 산업에 큰 변화와 발전이 예상된다. 우리나라는 에너지 의존 국가로써 세계 원자재 가격의 변화, 전력 사용의 계절성 등과 같은 큰 문제에 직면해 있다. 스마트 그리드를 이용한 전력 사용 효율의 극대화는 이러한 고질적인 문제를 유연하게 대처할 수 있는 역할을 할 것이다. 현재 제주도에 스마트 그리드 실증 단지를 조성하여 세계 최고수준의 스마트 그리드 구현을 위해 정부를 비롯해 KEPCO, 총 168개의 관련 기업들이 총 2465억원을 투자하여 스마트 그리드 실증단지를 구축하였다. 대다수의 국가에서 2015년까지 국내와 같이 실증사업을 완료한 후 2030년까지 국가단위 스마트 그리드 구축 확대를 목표로 하고 있다. 국내에서도 2030년까지 민관 공동분담을 통해 27조 5000억원을 투자하여 국가단위 스마트 그리드 구축을 목표로 하고 있으며 제주도를 포함한 7대 광역 별 거점 도시 구축 등을 추진하고 있다. 만약 성공적으로 구축된다면, 총 2억

^② 지식경제부

3000만톤의 온실가스가 감축, 연평균 5만개의 일자리와 74조원의 내수 창출이 가능할 것으로 전망하고 있다.^③

스마트 그리드가 성공적으로 구축되려면 기술적 문제, 비용 문제 등 많은 문제점이 해결되어야 한다. 현재 스마트 그리드의 핵심인 전력 공급자와 소비자간의 정보 공유를 위한 소프트웨어와 하드웨어에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다. 소비자 측면에서 스마트 관련 기기들이 고가일 것으로 예상되고 있어 기기들에 대한 개발과 보급에 더욱 힘써야 할 것이다. 또한 시장의 관점에서는 전력 공급자와 소비자간의 실시간 정보 교환을 통한 합리적인 가격 도출과 전력 비용 발생을 최소화 하기 위한 소비자의 전기 기기들 이용에 대한 최적 스케줄링 문제가 제기되고 있다. 가격 관련 문제는 공급자와 소비자에게 가장 민감한 문제이기도 하며 전력 사용에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

스마트 그리드는 1990년 이후부터 활발한 투자가 시작되어 아직까지도 많은 연구들이 진행되고 있다. 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 소비자간의 상호소통의 문제점을 극복할 수 있다고 주장하였다. 예를 들어 시장과 실시간

^③ <http://smartgrid.jeju.go.kr/>

가격 결정과 같은 경제적 요소는 비협력 게임의 상황과 유사하므로 이를 이용하여 가격을 결정하면 보다 합리적인 가격을 도출할 수 있다고 설명하였다. Samadi et al. (2010)은 각 소비자들이 스마트 그리드를 통해 전력 사용 정보를 전력 공급자와 실시간으로 교환하면서 소비자들의 효용을 극대화할 수 있는 최적 실시간 가격 알고리즘을 제시하였다. Conejo et al. (2010)은 전력 가격 불완전성의 문제점을 최적화 기술들을 이용하여 소비자들의 효용을 최대로 하는 최적화 모델을 제안하였다. Bu et al. (2011)은 Samadi와 달리 전력 공급자(전기 소매자) 입장에서 스마트 그리드를 이용하여 소비자들에게 효과적인 전력 조달과 가격 결정을 할 수 있는 전략을 제안하였다. 문용마 (2014)는 소비자의 심리적인 행동에 의해서 전력의 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. 최태섭(2010)은 스마트 그리드 환경에서 실시간 가격 요금제가 아닌 시간 변동형 요금제(Time-varying Tariff) 조건 하에서 에너지 사용 비용 최적화 전략을 제시하였다.

제 2 절 연구의 목적

에너지 소비 스케줄러(Energy Consumption Scheduler; ECS)는 스마트 그리드의 핵심인 소비자와 공급자 사이의 정보 교환에 있어서 핵심적인 기술이다. ECS 도입을 통해 소비자의 에너지 소비 스케줄을 공급자에게 자동으로 제공함으로써 스마트 그리드의 쌍방향 커뮤니케이션을 효과적으로 다룰 수 있다. Mohsenian-Rad et al. (2010)은 ECS 게임에서 각각의 전력 소비자가 비용을 극소화할 수 있는 가장 효율적인 전기 기구들의 사용 스케줄을 배치하는 분배 알고리즘을 제시하였다. 김태완 (2010)은 전력 사용의 양에 따라 가격을 실시간으로 결정하여 소비자들에게 제공하는 스마트 그리드 하에서 실생활에서 사용하는 전기 기구들을 고려한 에너지 소비 스케줄링 기법을 제시하고 있다. 박기경(2012)은 각각의 주택과 더욱 확장된 범위인 단지에서, 에너지 효율 최적화를 위한 에너지 스케줄링 모형을 설계하였다.

저장 장치 도입은 스마트 그리드의 목적인 전력 사용 효율을 극대화할 수 있는 요소가 될 수 있다. 소비자는 스마트 그리드를 통해 공급자와 전력 사용 정보를 교환함과 동시에, 전력 사용량이 적은 시간대의 전력을 장치에 저장하여 사용량이 많은 시간대에 사용함으로써 전력 사용을 효과적으로 분배할 수 있다. Wade et al. (2010)은 스마트 그리드에 에너지 저장 장치를 도입함으로써 가질

수 있는 14가지의 장점을 제시하였다. Wade는 저장 장치 도입은 소비자뿐만 아니라 공급자와 네트워크 사업자에게도 큰 이익을 될 수 있다고 설명하고 다양한 상황에서 에너지 저장 장치를 작동함으로써 가질 수 있는 이익을 평가했다. Vytelingum et al. (2010)은 스마트 그리드의 저장 장치 도입은 사용량이 많은 시간대의 전기 수요를 분산함으로써 이산화탄소 배출과 에너지 비용을 줄일 수 있다고 설명하고 있다.

이처럼 스마트 그리드와 저장 장치에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만 아직 ECS의 저장 장치 도입에 대한 연구는 부족한 실정이다. ECS에 저장 장치 도입이 가능해 진다면 각각의 가정에 저장 장치를 설치하여 작동함으로써 에너지 효율 증대뿐만 아니라, 에너지 이용 관리가 가능해지고 소비자들이 전력을 사용하는 데에 최적의 환경을 제공할 수 있다.

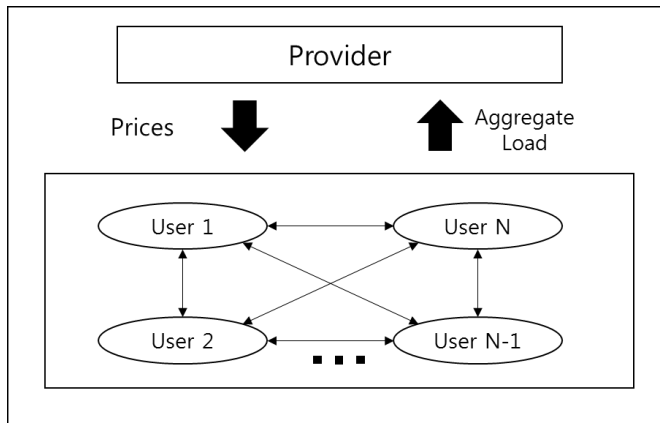
본 논문은 각각의 소비자들이 ECS와 함께, 사용하는 전기 장치의 전력 분배가 저장 장치의 도입으로 더욱 효율적으로 분배되는지를 첨두대평균비(Peak to Average Ratio; PAR) 분석을 통하여 확인할 것이다. 또한 소비자의 요금 비교를 통해 소비자에게 미치는 영향을 알아볼 것이다. 시간대별 전력 사용량을 재분배 된다는 것은 개인의 요금 절약뿐만 아니라 전기 생산 비용에도 영향을 미치는 것이다. 앞서서도 언급했듯이 에너지 부족으로 정전이 일어날 경우에는 개인적이나 사회적으로 많은 손해가

일어나게 되는 것과 같은 위험성을 저장 장치 도입을 통해 낮출 수 있다. 그렇게 된다면 모두에게 이익이 될 것이다. 이러한 저장 장치의 효율성을 계산하게 된다면 저장 장치의 가치를 평가할 수 있을 것이고 저장 장치 도입에 대한 의사결정에 도움이 된다.

제 2 장 시스템 모델

제 1 절 전력 시스템

본 논문에서 다루는 전력 시스템은 [그림 1]과 같이 여러 명의 전력 소비자와 하나의 에너지 공급원으로 이루어져 있다.



[그림 1] 스마트 그리드 시스템

각 소비자는 각 기기에 대한 전력 사용량을 공유하고 조절할 수 있는 에너지 소비 스케줄러(Energy Consumption Scheduler; ECS)를 포함하고 있는 스마트 미터를 소유하고 있다. 모든 스마트 미터는 에너지 공급자의 전력선과 연결이 되어 있다. 모든 전력 소비자는 에너지 공급자와 다른 전력 소비자들과 근거리통신망(Local Area Network; LAN)를 통해 연결이 되어 있다. 각 소비자는 자신의 에너지 소비 요구 정보를 다른 모든 소비자들과

공유를 한다. 전력 소비자들의 전체 전력 사용량은 공급자에게 전달되고 공급자는 그에 따른 요금을 소비자들에게 공지한다.

본 논문에서 다루는 스마트 그리드 시스템 모델에 있는 전체 소비자 집합은 \mathcal{N} 이다. 전체 소비자 수는 $N \triangleq |\mathcal{N}|$ 명으로 나타낸다. 또한 하루는 두 개의 시간대로 구성되어 있다고 가정한다.

$$h \in \mathcal{H} = \{1, 2\} \quad (2-1)$$

각각의 시간대는 전력 사용량이 많은 피크 타임 $h=1$ 과 그렇지 않은 논-피크 타임 $h=2$ 이다. 소비자는 피크 타임과 논-피크 타임에서 각각 다른 요금제가 적용 될 것이다.

이러한 시스템에 있는 각 소비자 $n \in \mathcal{N}$ 가 각 시간대 $h \in \mathcal{H}$ 에 사용하는 모든 기기에 대한 전력량은 l_n^h 이다. L_h 는 각 시간대 시스템에 있는 전체 소비자의 전력사용량을 나타내고 다음과 같이 계산된다.

$$L_h \triangleq \sum_{n \in \mathcal{N}} l_n^h \quad (2-2)$$

따라서 모든 소비자들에 대한 시간대별 평균 사용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{avg} = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (2-3)$$

시간대별 평균 전력 사용량과 피크 타임에서의 전력 사용량의 비를 나타내는 첨두대평균비(Peak to average ratio; PAR)는 다음과 같이 나타난다.

$$PAR = \frac{L_1}{L_{avg}} = \frac{L_1}{(L_1 + L_2)/2} \quad (2-4)$$

PAR가 높으면 높을수록 전력 사용이 피크 타임에 몰려 있다는 것을 뜻한다. 그렇기 때문에 이것은 전력사용량이 시간대별 효과적인 분배가 되었는지를 평가할 수 있는 요소이다. 전력사용량이 시간대별로 효과적인 분배가 되었을 경우 전력 최대 생산량을 낮출 수 있게 된다.

제 2 절 전력 생산 비용

$C_h(L_h)$ 는 전력량에 따른 전기 생산 비용 함수이다. 전기 생산이 많을수록 비용이 많이 들기 때문에 비용 함수는 전체 사용량이 늘어나면 비용이 늘어나는 증가 함수 이다.

$$C_h(\tilde{L}_h) < C_h(\hat{L}_h), \forall \tilde{L}_h < \hat{L}_h \quad (2-5)$$

또한 전기 생산 비용은 생산량이 커질수록 단위 전력 당 생산비용이 많이 들게 된다. 그렇기 때문에 비용 함수를 순볼록 함수(Strictly convex function)로 가정하였다. 이것은 모든 실수와 모든 실수에 대해 다음을 만족한다.

$$C_h(\theta \tilde{L}_h + (1-\theta)\hat{L}_h) < \theta C_h(\tilde{L}_h) + (1-\theta)C_h(\hat{L}_h) \quad (2-6)$$

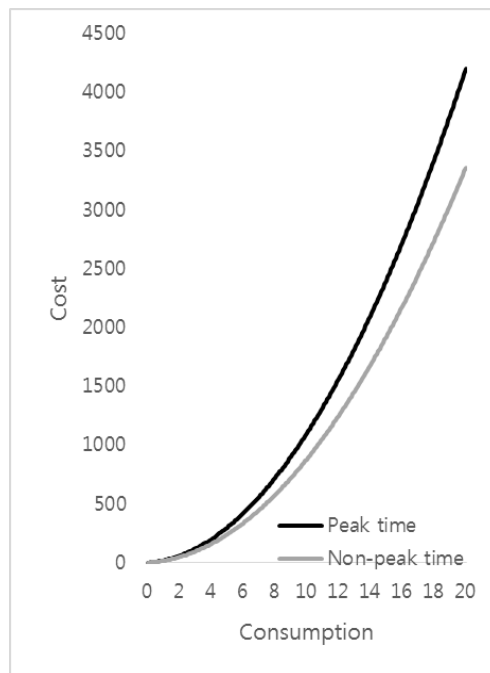
시간대가 다르다면 같은 생산량에 대해서도 가격이 다르다. 일반적으로 전력 사용량이 많은 피크 타임에는 더 많은 발전소가 필요하기 때문에 단위 사용량에 따른 비용이 더 크게 된다. 이 말은 같은 전력을 생산하게 되더라도 피크 타임에는 더 많은 비용이 든다는 것이다.

$$C_2(L_2) < C_1(L_1), \forall L_2 = L_1 \quad (2-7)$$

이러한 모든 조건을 만족하는 비용 함수로 다음과 같은 2차 함수를 선택하였다.

$$\begin{aligned} C_1(L_1) &= 10(L_1)^2 + 10(L_1) \\ C_2(L_2) &= 8(L_2)^2 + 8(L_2) \end{aligned} \quad (2-8)$$

피크 타임과 논-피크 타임에서 소비에 대한 전기 생산 비용에 대한 그래프는 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 전기 생산 비용 그래프

제 3 절 전력 사용량 조절

\mathcal{A}_n 은 각 소비자 $n \in \mathcal{N}$ 가 소유하고 있는 모든 기기의 집합이다. \mathcal{A}_n 은 다음과 같이 3개의 기기로 이루어져 있다.

$$\mathcal{A}_n \triangleq \{a_1, a_2, a_3\} \quad (2-9)$$

모든 기기들은 하루 전체 요구사용량 $E_{n,a}$ 과 피크 타임 요구 사용량 $E_{n,a}^p$ 이 있다. 기기 a_1 은 냉장고와 같이 하루 종일 일정하게 써야 하는 기기이다. 그렇기 때문에 피크 타임 요구 사용량은 전체 요구 사용량의 절반이다. 기기 a_2 는 반드시 피크 타임에 일정량 이상 사용해야 하는 기기이다. 그렇기 때문에 피크 타임 요구 사용량이 존재하고 전체 요구 사용량 중 피크 타임 요구 사용량 이외의 전력은 어느 시간대에 사용해도 무관하다. 기기 a_3 는 언제 사용해도 무관한 기기이다. 그렇기 때문에 전체 요구 사용량만이 존재하고 피크 타임 요구 사용량은 0이다.

모든 소비자는 각 기기에 대한 제약을 만족시키는 범위 내에서 에너지 소비 스케줄을 조절할 것이다. 이러한 각 소비자 $n \in \mathcal{N}$ 가 소유한 각 기기 $a \in \mathcal{A}_n$ 에 대한 각 소비자의 에너지 소비 스케줄 벡터는 다음과 같이 나타난다.

$$x_{n,a} \triangleq [x_{n,a}^1, x_{n,a}^2] \quad (2-10)$$

소비 스케줄 벡터의 각 스칼라 값은 각 시간대별 사용량을 뜻한다. 하루 전체 요구사용량과 피크 타임 요구사용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_{n,a} &\leq x_{n,a}^1 + x_{n,a}^2 \\
 E_{n,a}^p &\leq x_{n,a}^1 \\
 E_{n,a_1}^p &= \frac{E_{n,a_1}}{2} \\
 E_{n,a_2}^p &> 0 \\
 E_{n,a_3}^p &= 0
 \end{aligned} \tag{2-11}$$

본 논문에서는 각 소비자는 이러한 3개의 기기 이외에도 에너지 저장 장치를 갖고 있을 경우를 가정한다. 이 저장 장치는 피크 타임이나 논-피크 타임에 전력을 저장하고 이를 다른 시간대에 쓸 수 있는 장치이다. 저장 장치 역시 시간대에 따른 저장 스케줄 벡터가 있다.

$$s_n \triangleq [s_n^1, s_n^2] \tag{2-12}$$

저장 스케줄 벡터의 각 스칼라 값은 저장 장치의 전력 사용량을 뜻한다. 저장 장치의 사용량이 다른 기기들의 사용량과 다른 점은 음수를 가질 수 있다는 점이다. 저장 장치의 사용량이 양수인 경우는 저장 장치에 전력을 저장하는 경우이다. 저장 장치의

사용량이 음수인 경우는 저장 장치에 있는 전력을 다른 기기에 이용하는 경우이다.

모든 소비자는 각각 다른 저장 장치를 소유하고 있고 각자의 저장 장치의 저장 한계가 존재할 것이다. 이를 Q_n 이라 하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-Q_n \leq s_n^h \leq Q_n \quad (2-13)$$

본 논문에서는 그날 저장된 양은 그날 사용한다는 가정을 하였다. 그렇기 때문에 s_n^1 과 s_n^2 의 합은 항상 0이 되어야 한다.

$$s_n^1 + s_n^2 = 0 \quad (2-14)$$

이것을 이용해 각 소비자의 각 시간대별 사용량을 계산할 경우 다음과 같이 된다.

$$l_n^h \triangleq s_n^h + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h \quad (2-15)$$

저장 장치에 저장을 하게 되면 s_n^h 값은 양수가 된다고 하였는데 저장한다는 것 역시 전력 공급자로부터 전력을 공급받는 것이기 때문이다. 저장 장치에서 전력을 사용하게 된다면 s_n^h 값은 음수가 되는데 이것은 그만큼의 양을 전력 공급자로부터 제공 받을 필요가

없기 때문이다. 그러므로 저장 장치에서 전력을 사용하게 될 경우 I_{eff} 는 저장 장치가 없을 경우보다 감소하게 된다. 즉 시간대에 쓰는 전력이 감소하게 된다.

제 3 장 에너지 소비 게임

제 1 절 요금 최소화

각 소비자 $n \in \mathcal{N}$ 는 자신의 전력 스케줄에 따른 전력 사용량에 대한 요금을 매일 지불해야 한다. 공급자는 전력 생산 비용만큼을 전체 소비자에게 요금으로 부과한다고 가정한다. 전력 생산 비용은 각 시간대 $h \in \mathcal{H}$ 별 전체 소비자의 전력 사용량에 따라 달라진다. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} b_n^h = C_h \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} l_n^h \right) \quad (3-1)$$

좌변은 각 소비자의 요금의 합이고 우변은 각 시간대별 전력 생산 비용을 뜻한다. 또한 각 소비자는 각 시간대의 전체 요금 중 각 시간대별 전체 사용량에서 자신이 사용하는 전력의 비율만큼의 요금을 부담한다. 이것은 어떠한 소비자가 다른 한 소비자보다 같은 시간대에 2배의 전력을 사용한다면 요금 역시 2배만큼을 부담한다는 것을 뜻한다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{b_n^h}{b_m^h} = \frac{l_n^h}{l_m^h} \quad (3-2)$$

$$b_n^h = \sum_{m \in \mathcal{N}} b_m^h \times \frac{l_n^h}{L_h}$$

이 것은 전체 요금의 합 전력 생산 비용과 같다는 것을 적용시키면 각 소비자의 요금은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b_n^h = C_h(L_h) \times \frac{l_n^h}{L_h} \quad (3-3)$$

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} b_n^h = C_1(L_1) \times (l_n^1 / L_1) + C_2(L_2) \times (l_n^2 / L_2)$$

전력 소비자 각 개인의 효용을 극대화 하는 방안은 자신의 요금을 최소화하는 것이다. 그렇기 때문에 각 소비자에게 자신의 요금을 최소화하는 에너지 소비 스케줄을 선택할 것이다. 그것은 다음과 같은 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\underset{x_{n,a} \in \mathcal{X}_n, \forall n \in \mathcal{N}}{\text{minimize}} C_1(L_1) \times (l_n^1 / L_1) + C_2(L_2) \times (l_n^2 / L_2) \quad (3-4)$$

이는 또한 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underset{s_n, x_{n,a}, \forall n \in \mathcal{N}}{\text{minimize}} \sum_{h=1}^2 C_h \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} \left(s_n^h + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h \right) \right) \times \left(\frac{\left(s_n^h + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h \right)}{\sum_{n \in \mathcal{N}} \left(s_n^h + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h \right)} \right) \quad (3-5)$$

최적화 문제 식(3-4)는 순볼록 함수 이기 때문에 내점 방법(Interior point method; IPM)과 같은 방법을 통해 해를 구할 수 있을 것이다. 또한 순볼록 함수 이기 때문에 이 해는 유일해가 된다.

제 2 절 게임 모델

개개인의 비용은 자신의 에너지 소비 스케줄뿐만 아니라 다른 소비자의 에너지 소비 스케줄에 따라 달라진다. 이러한 상황은 자연스럽게 소비자들 간의 게임 상황이다.

[표 1] 소비자간의 에너지 소비 게임

<ul style="list-style-type: none">• 경기자: N 에 속하는 소비자• 전략: 각 소비자는 자신의 보수를 최대화 시키는 에너지 소비 스케줄을 선택• 보수: $P_n(x_n, s_n; x_{-n}, s_{-n}) = -(C_1(L_1) \times (l_n^1 / L_1) + C_2(L_2) \times (l_n^2 / L_2))$ 여기서 $x_{-n} \triangleq [x_1, \dots, x_{n-1}, x_{n+1}, \dots, x_N]$ 은 자신을 제외한 다른 모든 소비자들의 에너지 소비 스케줄 벡터를 의미하고, $s_{-n} \triangleq [s_1, \dots, s_{n-1}, s_{n+1}, \dots, s_N]$ 는 자신을 제외한 다른 모든 소비자들의 저장 장치 스케줄 벡터를 의미한다.
--

이와 같은 게임의 전략과 보수의 정의에 의해서 각 소비자는 자신의 요금을 최소화 하는 에너지 소비 스케줄을 정하려고 한다. Fudenberg(1991)에 따라 다음과 같은 Theorem들을 보일 수 있다.

Theorem 1: 본 게임은 비용 함수 $C_h(\bullet)$ 가 순볼록 함수이고 증가 함수이라는 조건을 만족시킨다면 항상 유일한 내시 균형이 존재한다.

$C_h(\bullet)$ 가 순볼록 함수이기 때문에 $P_n(x_n, s_n; x_{-n}, s_{-n})$ 는 x_n 에 대해 순오목 함수이다. 소비자간의 에너지 소비 게임은 N명에 대한 순오목 게임이다. 그렇기 때문에 Theorem 1이 성립하게 된다.(Rosen, 1965)

내시 균형은 소비자들이 어떻게 게임에 참여하는지에 대한 답이다. 에너지 소비 스케줄과 저장 장치 스케줄 $(x_n^*, s_n^*, \forall n \in \mathcal{N})$ 은 다음과 같을 때만 내시 균형에 대한 필요충분조건을 만족한다.

$$P_n(x_n^*, s_n^*; x_{-n}^*, s_{-n}^*) \geq P_n(x_n, s_n; x_{-n}^*, s_{-n}^*), \quad \forall n \in \mathcal{N}, x_n \geq 0 \quad (3-6)$$

Theorem 2: 본 게임 상황에서의 유일한 내시 균형은 최적화 문제의 최적해이다.

식(3-4)에 대한 최적해가 x_n^*, s_n^* 일 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C^* \triangleq \sum_{h=1}^2 C_h \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} \left(s_n^{h*} + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^{h*} \right) \right) \times \left(\frac{\left(s_n^{h*} + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^{h*} \right)}{\left(\sum_{n \in \mathcal{N}} \left(s_n^{h*} + \sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^{h*} \right) \right)} \right) \quad (3-7)$$

최적성의 정의에 의하면 다음과 같은 식을 도출 할 수 있다.

$$P_n(x_n^*, s_n^*; x_{-n}^*, s_{-n}^*) \geq P_n(x_n, s_n; x_{-n}^*, s_{-n}^*) \quad (3-8)$$

이는 위에서 도출한 내시 균형에 관한 식과 같고 이를 통해 최적해를 구하는 것이 내시 균형이라는 것을 알 수 있다.

Theorem1과 Theorem2를 통해 각 소비자는 자신의 요금을 최소화하기 위해 다른 소비자들과 협력을 하는 방안으로 에너지 소비 스케줄을 선택했을 경우 모든 소비자가 더 이상 변화가 없는 상태가 되고 이 때 모든 소비자가 이득을 얻을 수 있다.

제 4 장 분산 알고리즘

제 1 절 분산 원칙

3장에서 볼 수 있듯이 모든 소비자는 서로 협력을 하여 각자의 비용을 최소화 할 것이다. 각 소비자 $n \in \mathcal{N}$ 에게 다른 모든 소비자의 에너지 소비 스케줄이 주어지고 이것이 고정되어 있다고 가정하면, 소비자의 최적 대응은 다음과 같은 최적화 문제의 해와 같다.

$$\underset{x_{n,a} \in \mathcal{X}_n}{\text{maximize}} P_n(x_n; x_{-n}) \quad (4-1)$$

이 최적화 문제는 최적화 변수가 소비자 n 의 에너지 소비 스케줄 x_n 밖에 존재하지 않기 때문에 이것은 소비자 n 에 대한 지역 최적화 문제이다. 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underset{x_{n,a} \in \mathcal{X}_n}{\text{minimize}} C_1(L_1) \times (l_n^1 / L_1) + C_2(L_2) \times (l_n^2 / L_2) \quad (4-2)$$

이것을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\underset{x_{n,a} \in \mathcal{X}_n}{\text{minimize}} \sum_{h=1}^2 \left(C_h \left(\sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h + \sum_{m \in \mathcal{N} - \{n\}} l_m^h \right) \times \frac{\sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h}{\sum_{a \in \mathcal{A}_n} x_{n,a}^h + \sum_{m \in \mathcal{N} - \{n\}} l_m^h} \right) \quad (4-3)$$

식(3-4)과 식(4-3)는 같은 목적함수를 가지고 있다. 하지만 식(4-3)는 소비자 n 의 로컬 변수만을 사용한다. 또한 식(4-3) 역시 순블록 함수이기 때문에 IPM을 통해서 해를 구할 수 있다.

제 2 절 알고리즘

소비자는 다른 소비자의 전체 사용량을 알기 때문에 식(4-3)을 다음과 같은 알고리즘을 통해 최적화 시킬 수 있다.

[표 2] 최적화 알고리즘

Algorithm 1

- 1: Initialize x_n, x_{-n}
 - 2: Repeat
 - 3: For every user
 - 4: Solve local problem (2) using IPM
 - 5: If user changes schedule Then
 - 6: Update x_n and broadcast to other user
 - 7: End
 - 8: End
 - 9: Until no user update their schedule
-

1번 줄에서는 각 소비자는 각자의 전력 요구 사용량을 만족하는 에너지 소비 스케줄로 초기화를 한다. 2번줄에서 9번줄까지 모든 소비자의 에너지 소비 스케줄이 수렴할 때까지 에너지 소비 스케줄 업데이트를 반복 해준다. 각 소비자는 3번줄

에서 8번줄까지 요금을 최소화하는 에너지 소비 스케줄을 구하는 지역 최적화 식(4-3)의 해를 도출한다. 4번줄에서 도출한 에너지 소비 스케줄이 현재와는 다른 새로운 에너지 소비 스케줄을 가지게 되면 각 소비자는 자신의 에너지 소비 스케줄을 업데이트 하고 이를 다른 소비자들에게 공지하게 된다.

제 3 절 수렴과 최적화

본 논문에서 사용되는 알고리즘이 의미가 있기 위해서는 알고리즘을 통해서 나오는 결과가 전역 최적해가 되어야 한다. 따라서 본 절에서는 논문에서 사용되는 알고리즘이 수렴이 되고 최적화 된 결과인지에 대해서 알아볼 것이다.

Theorem 3: 개인의 에너지 소비 스케줄이 동시에 일어나지 않고 각자 한 소비자씩 일어난다면 에너지 소비 스케줄 초기값과 무관하게 한 점으로 수렴하게 되고 이것이 내시 균형이다.

모든 소비자의 최적 반응은 식(4-3)에 대한 최적해이다. 그렇다는 것은 알고리즘을 순차적으로 실행하게 된다면 한 소비자가 스케줄을 업데이트를 하게 되면 전체 전력 비용은 줄거나 최소한 같을 것이다. 또한 비용은 항상 양수이기 때문에 최소값이 존재한다. 이 것은 모든 사용자가 더 이상 스케줄을 바꿈으로 얻을 수 있는 이득이 없는 상태에 이르게 된다는 뜻이다. 이를 통해 Theorem 3가 성립됨을 보일 수 있다.

이러한 수렴에 대한 성질은 각 소비자가 동시에 스케줄을 새로이 업데이트 하지 않는다면 성립하게 된다. Theorem 2와 Theorem 3를 통해 앞서 보여준 알고리즘을 사용하여 각 지역 최적해를 구하게 된다면 그것은 결국 비용 최소화 문제의 전역 최적해가 된다.

제 5 장 시뮬레이션

제 1 절 시뮬레이션 과정

시뮬레이션에 사용된 전체 소비자의 수 $N=10$ 이다. 각각의 소비자는 3개의 기기를 소유하고 있고 그에 따른 하루 전력 요구 사용량과 피크 타임 전력 요구 사용량이 존재한다. 제약 조건의 현실성을 위해 기기 a_2 의 피크 타임 요구 사용량 E_{n,a_2}^p 은 전체 요구 사용량 E_{n,a_2} 의 절반 이상이라고 가정하였다. 또한 기기 a_3 의 전체 요구 사용량은 기기 a_2 의 전체 요구 사용량보다 작다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} E_{n,a_2}^p &> \frac{E_{n,a_2}}{2} \\ E_{n,a_3} &< E_{n,a_2} \end{aligned} \quad (5-1)$$

이러한 제약 조건에 만족하는 무작위의 에너지 소비 스케줄을 생성한다.

먼저 모든 소비자가 저장 장치가 없을 때의 최적 에너지 소비를 알고리즘을 통해 요금 최소화식의 최적해를 통해 모든 개인의 소비 스케줄을 구하였다. 모든 소비자가 더 이상 자신의 에너지 소비 스케줄을 변경하지 않으면 시뮬레이션을 종료한다.

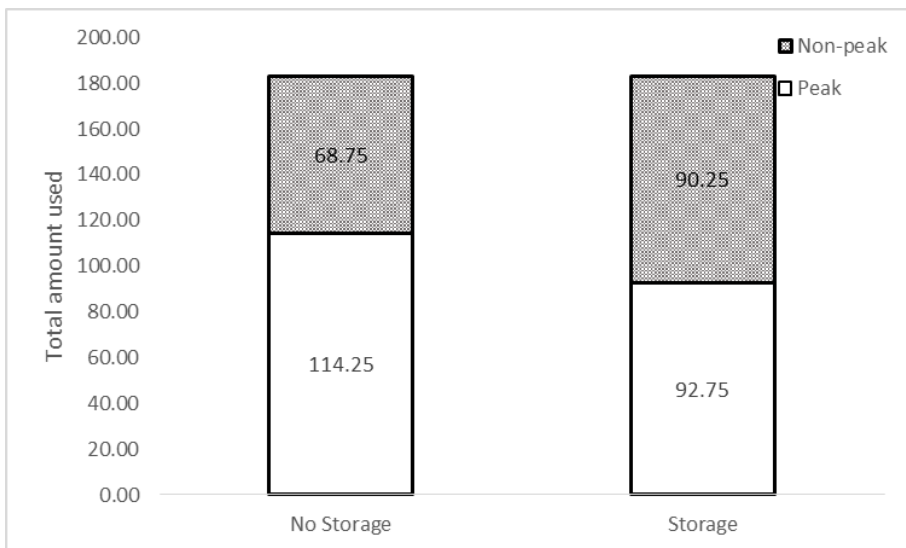
다음 모든 소비자에게 같은 전력 요구 사용량과 피크 타임

전력 요구 사용량이 주어지고 저장 장치가 도입된 경우에 대해서 전력 스케줄을 구해주었다. 저장 장치가 없을 때와 마찬가지로 알고리즘을 통해 요금 최소화식의 최적해를 통해 모든 개인의 소비 스케줄을 구하였다. 이를 저장 장치가 없을 경우의 소비 스케줄과 비교를 하였다.^④

^④ Matlab 사용

제 2 절 사용량 최소화

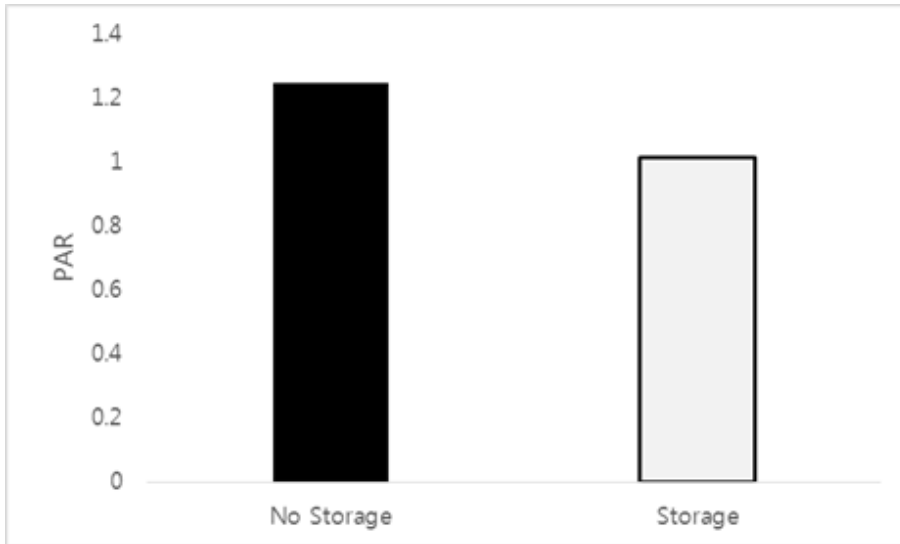
각 개인의 소비 스케줄은 각 시간대별 최소 요구치를 만족시키는 범위 내에서 바뀔 수 있지만 각 소비자 별 각 기기의 하루 사용 요구치는 저장 장치가 있을 때와 없을 때 차이가 없다. 그렇기 때문에 모든 소비자의 전체 사용량은 같지만 다음 그림과 같이 저장 장치를 도입할 시에 피크 타임에 사용하는 비율은 줄고 논-피크 타임에서는 늘어난다.



[그림 3] 전체 사용량 중 피크 타임 사용 비율

저장장치 도입 이후에도 여전히 피크 타임에 사용하는 비율이 많지만 거의 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 피크 타임에 사용하는

양은 114.25에서 92.75로 18.8%로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 에너지 생산 한계량을 낮출 수 있다는 것을 의미한다.



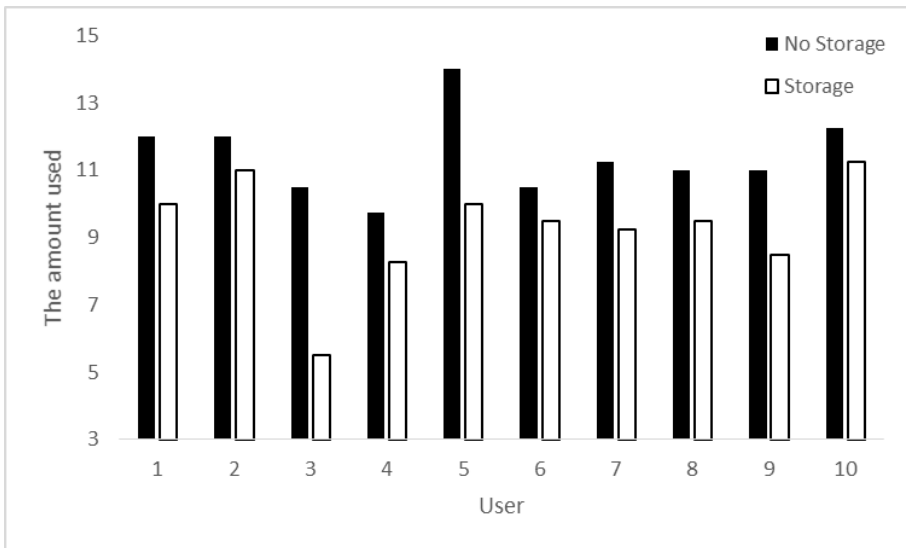
[그림 4] PAR 비교

평균 사용량 대비 피크 타임에 사용하는 비율을 뜻하는 PAR역시 저장 장치를 사용하지 않을 경우에는 1.249이고 저장 장치를 도입할 시에는 1.014로 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 저장 장치 도입으로 통해 전력 사용이 피크타임에만 몰리는 것이 아니고 각 시간대 별로 고르게 분포됨을 알 수 있다.

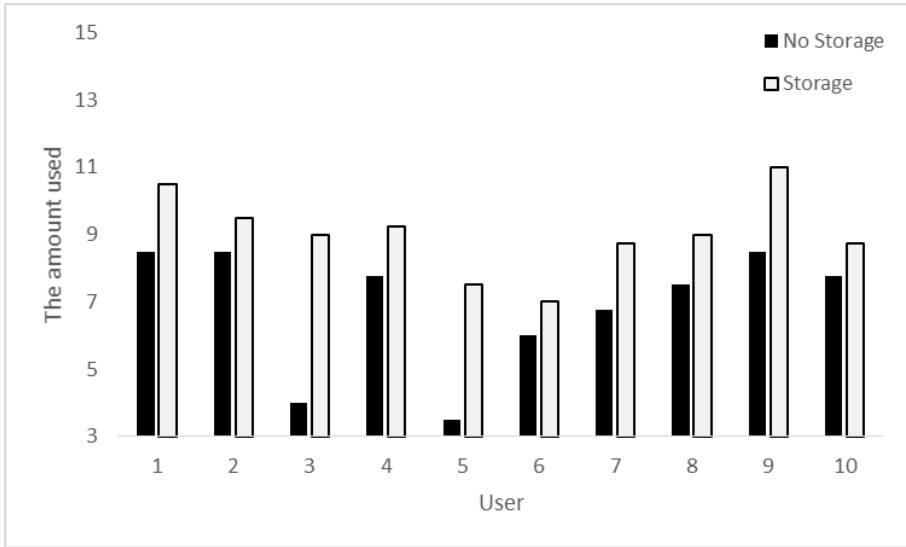
이러한 결과들은 저장장치 도입은 전력 생산자와 사회적으로 이득이 된다는 것을 보여준다. 이는 본 논문에서는 시간대를 단지 2개로 나누었기 때문에 결과가 단순하게 나왔지만 추후 연구에서

다양한 시간대로 나눌 수 있다면 PAR의 변화는 좀 더 커질 것이다.

[그림 5]와 [그림 6]을 통해서 각 소비자의 입장에서 모든 소비자가 피크 타임 사용량은 줄고 논-피크 타임 사용량은 늘어난 것을 확인할 수 있다. 이는 저장 장치를 제외한 다른 기기에서 사용하는 전력은 저장 장치를 도입하기 전과 큰 차이는 없지만 저장 장치 도입으로 인해 논-피크 타임에 전기를 비축해 피크 타임에 전력을 사용하는 결과이다. 이러한 감소는 자연스럽게 요금 절약으로 이어질 것이다.



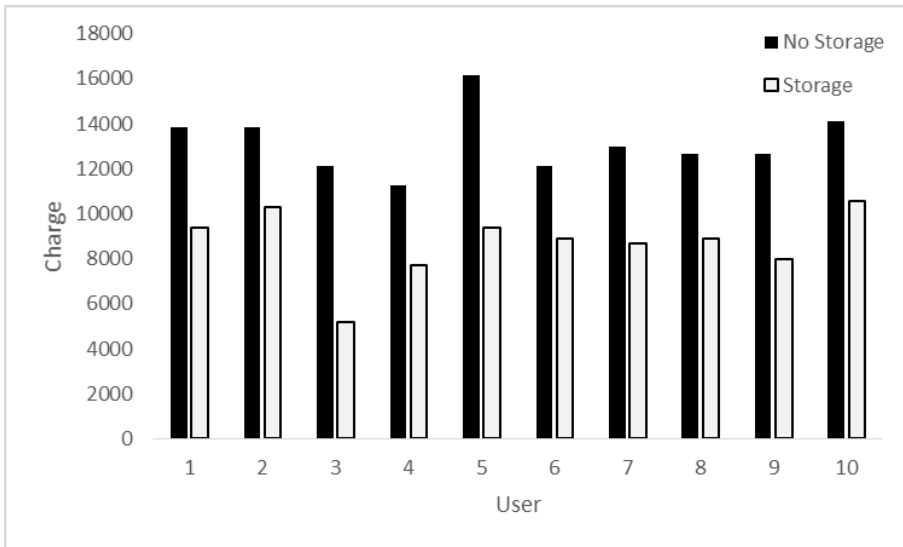
[그림 5] 피크 타임 사용량 비교



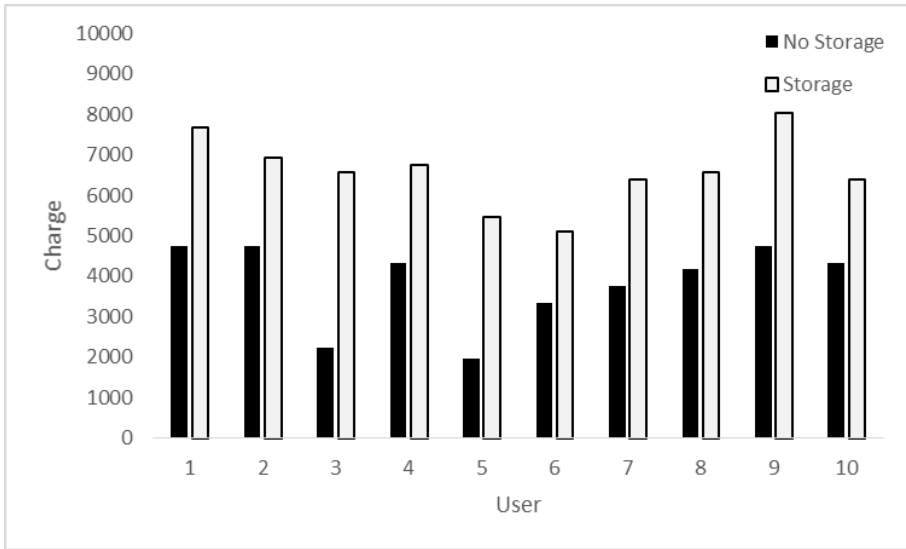
[그림 6] 논-피크 타임 사용량 비교

제 3 절 요금

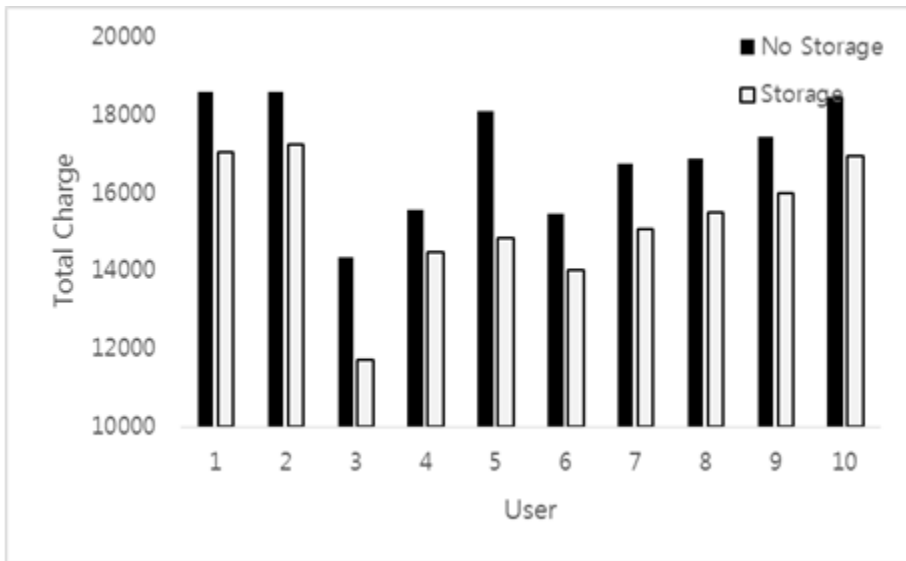
지금까지는 저장 장치 도입으로 인한 사용량 변화에 대해서 알아 보았다. 이를 통해 사회적 입장에서 이득이 있다는 것을 알 수 있었다. 개인 입장에서 저장 장치 도입으로 인한 이득을 알기 위해서는 각 개인의 요금 비교가 필요하다. 저장 장치가 도입 후 소비자의 피크 타임에서의 요금 변화는 [그림 7]과 같고 논-피크 타임에서의 요금 변화는 [그림 8]과 같다. 이를 더한 전체 시간 요금 변화는 [그림 9]에서 보이는 것과 같이 모든 사용자에게 줄어드는 것을 볼 수 있다.



[그림 7] 피크 타임 요금 비교



[그림 8] 논-피크 타임 요금 비교

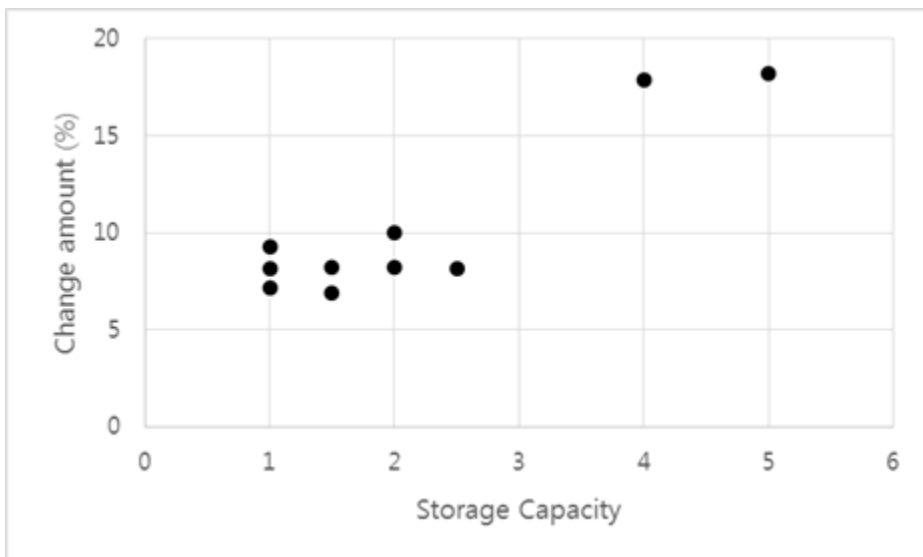


[그림 9] 전체 시간 요금 비교

[그림 7]과 [그림 8]에서 볼 수 있듯이 피크 타임 요금은 줄고 논-피크 타임 요금은 늘어나는 것을 알 수 있다. 이는 피크 타임 사용량과 논-피크 타임 사용량의 변화에서 오는 것이다. 하지만 아무리 저장 장치가 도입이 되어 피크 타임 요금이 줄어도 논-피크 타임 요금보다는 많다는 것을 볼 수 있다.

이러한 변화는 각 사용자가 피크 타임 사용량이 줄어 전체 피크 타임 사용량이 줄게 되어 피크 타임 전력 생산 비용이 줄게 되어 나타나는 것이다. 이는 모든 소비자가 저장 장치 도입과 협력을 통해 요금절약이 가능하다는 것을 보여준다.

각 소비자는 각자의 저장 장치의 저장 한계 값이 있었다. 저장 장치의 크기와 요금절약의 변화는 [그림 10]과 같다.



[그림 10] 저장 장치 용량에 따른 요금 변화

이를 통해 대체적으로 저장 장치가 클수록 요금 절약 비율 역시 커지는 것을 알 수 있다. 저장 장치의 도입 비용은 저장 장치의 용량에 따라 차이가 있을 텐데 그에 비례하여 요금 절약 역시 일어난다.

모든 소비자의 구체적인 변화량은 데이터는 다음과 같다.

[표 3] 소비자 별 요금 변화

User		Peak	Non-peak	Total
1	No Storage	13830	4743	18573
	Storage	9375.001	7664.826	17039.83
2	No Storage	13830	4743	18573
	Storage	10312.5	6934.629	17247.13
3	No Storage	12101.25	2232	14333.25
	Storage	5156.251	6569.84	11726.09
4	No Storage	11236.88	4324.5	15561.38
	Storage	7734.376	6752.133	14486.51
5	No Storage	16135	1953	18088
	Storage	9375.001	5474.662	14849.66
6	No Storage	12101.25	3348	15449.25
	Storage	8906.263	5109.671	14015.93
7	No Storage	12965.63	3766.5	16732.13
	Storage	8671.876	6387.142	15059.02
8	No Storage	12677.5	4185	16862.5
	Storage	8906.251	6569.637	15475.89
9	No Storage	12677.5	4743	17420.5
	Storage	7968.751	8029.604	15998.36
10	No Storage	14118.13	4324.5	18442.63
	Storage	10546.88	6387.353	16934.23

제 6 장 결론 및 추후 연구 과제

제 1 절 결론

본 연구는 지금까지 ECS를 이용한 차세대 스마트 그리드 시스템에 저장 장치가 도입된다면 어떠한 변화가 생길지에 대한 연구이다.

시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 저장 장치의 도입은 모든 사용자의 피크 타임 전력 사용량을 줄이고 논-피크 타임에서 전력 사용량을 늘려주는 효과가 있는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 피크 타임에서의 전체 사용량이 줄고 전체 전력 생산 비용이 줄어 각 소비자의 요금 역시 줄어 들게 된다. 논-피크 타임에서의 사용량은 늘게 되지만 이를 통해 일어나는 전력 생산 비용의 증가는 피크 타임에서의 감소하는 양보다 적게 된다. 이는 저장 장치의 도입은 사회적인 측면이나 개인적인 측면 모두에게 이익이 된다는 것을 보 수 있다.

사회적인 측면에서의 이득은 PAR의 변화로 알 수 있다. PAR이 감소한다는 것은 피크 타임에 몰리던 전력이 고르게 분배가 되었다는 뜻이다. 이것은 전력 공급자의 입장에서도 최대 생산 한계를 낮출 수 있기 때문에 추가적인 발전 시설이 필요 없게 되고 전력 공급 예비율을 높일 수 있게 된다.

개인적인 측면에서는 모든 소비자들의 요금이 절약이 되고 적절한 전력 사용량 분배로 정전과 같은 사고를 피할 수 있다. 저장 장치의 용량과 요금 절약은 양의 관계가 있는 것을 볼 수 있다. 그렇기 때문에 저장 장치 용량은 그만큼의 가치를 갖고 있는 것을 알 수 있고 각 개인은 이를 통해 초기 투자 비용에 대해 선택을 할 수 있다.

제 2 절 추후 연구 과제

본 논문에서 가정한 것은 문제를 단순화 시킨 것이다 그렇기 때문에 모든 조건을 일반화 시킬 수 있을 것이다. 시간대를 단순히 피크 타임과 논-피크 타임으로 나누지 않고 좀 더 세분화 시켜 저장 장치 도입에 따른 변화를 확인해 볼 수 있을 것이다. 또한 기기의 종류를 더 다양하게 할 수 있고 더 많은 기기에 대한 제약을 둘 수 있다.

또한 피크 타임과 논-피크 타임에 기기 사용에 대한 제약뿐만 아니라 시간대별 개인 효용 함수를 추가해 최적화 식을 구성할 수 있을 것이다.

본 연구의 궁극적인 목적은 단순히 요금이 감소하는 것을 보여주는 것이 아니라 실제 데이터와 요금을 적용하여 저장 장치의 실제 가치를 평가 하는 것이다. 이를 위해서는 저장 장치에 대한 민감도 분석이 필요할 것이고 모든 소비자가 아닌 단계적 도입에 대한 소비자들의 반응을 알아 볼 수 있을 것이다.

이를 통해 개인의 의사 결정뿐만 아니라 국가의 전력 정책 결정에도 도움이 될 것이다. 차세대 스마트 그리드 시스템에서의 저장장치는 전력 사용 분배와 개인 요금에 큰 영향을 미칠 것이다.

참고 문헌

- 김태완, 이성진, 이상훈, “수요 반응에서 가정용 전력기계의 최적화된 스케줄링 기법”, 한국통신학회논문지, (2010), Vol. 35, pp.1407-1415
- 문용마, “소비자 행동과 가격탄성을 고려한 스마트 그리드 수요반응 실시간 가격 결정 모델”, 한국경영과학회지, 제39권, 제1호 (2014), pp.49-67.
- 박기경, 이영호, 도길현, 유준상, “스마트그리드에서 에너지 효율 최적화를 위한 스케줄링 문제”, 대한산업공학회 춘계학술대회 논문집, (2012), Vol. 24, pp.1187-1206.
- 이미혜, 이진권, “스마트 그리드 시장 현황 및 전망”, 한국수출입은행(2012).
- 최태섭, 고경록, 박성찬, 김형태, 윤용태, “스마트 그리드 환경에서의 수용가 에너지 비용 최적화 전략 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, (2012), pp.517-518.
- Bu, S., Yu, F.R., and Liu, P.X., “A game-theoretical decision-making scheme for electricity retailers in the smart grid with demand-side management,” IEEE International Conference on Smart Grid Communications, (2011), pp.387-391.
- Conejo, A.J., Morales, J.M., and Baringo, L., “Real-time demand response model,” Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol.1, No.3, (2010), pp.236-242.
- Fudenberg, D., Tirole, J., Game Theory. Cambridge, MA: MIT

Press, (1991)

Mohsenian–Rad, A. H., Wong, V.W.S., Jatskevich, J. and Leon–Garcia, A., “Autonomous Demand–Side Management Based on Game–Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid”, *Smart Grid, IEEE*, (2010), Vol. 1 , pp.320–331

Rosen, J.B., “Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n–person games,” *Econometrica*, (1965), vol. 33, pp. 347–351

Saad, W., Han, Z., Poor, H. V. and Basar, T., “Game–Theoretic Methods for the Smart Grid”, *IEEE Signal Processing Magazine*, (2012), pp.86–105

Samadi, P., Mohsenian–Rad, A–H., Schober, R., Wong, V.W.S., and Jatskevich, J., “Optimal real–time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid,” 2010 First IEEE International Conference on. *IEEE*, (2010), pp.415–420.

Vytelingum, P., Voice, T.D., Ramchurn, S.D., Rogers, A. and Jennings, N.R., “Agent–based Micro–Storage Management for the Smart Grid”, *Proc. Of the 8th Conf. Autonomous Agents And Multi–Agent Systems*, (2010), pp.39–46

Wade, N.S., Taylor, P.C., Lang, P.D. and Jones, P.R., “Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid”, *Energy Policy*, (2010), Vol. 38, pp.7180–7188.

Abstract

Optimal Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid Considering Storage Appliance: A Game–Theoretic Approach

Sangmin Yeo

Industrial Engineering

The Graduate School

Seoul 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 energy consumption scheduler (ECS) and updates their consumption schedule in order to minimize the bill expenditures by which the required power consumption should be satisfied under the given pricing. 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 a lower peak-to-average ratio in terms of overall energy consumption as well as a lower bill for a consumer.

Keywords : smart grid, ECS, storage appliance, real-time decision making problem, game theory, optimization

Student Number : 2012-23311