

Greedy Technique for Smart Grid Demand Response Systems

스마트 그리드 수요반응 시스템을 위한 그리디 스케줄링 기법

Laihyuk Park*, Jaehyeon Eom*, Joongheon Kim**, Sungrae Cho*†
박래혁*, 엄재현*, 김중헌**, 조성래*†

* Ubiquitous Computing Lab, Chung-ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea

** Distributed Platforms and Security Lab, Chung-ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, 06974, Korea

† srcho@cau.ac.kr

Abstract

In the last few decades, global electricity consumption has dramatically increased and has become drastically fluctuating and uncertain causing blackout. Due to the unexpected peak electricity demand, we need significant electricity supply. The solutions to these problems are smart grid system which is envisioned as future power system. Smart grid system can reduce electricity peak demand and induce effective electricity consumption through various price policies, demand response (DR) control methodologies, and state-of-the-art smart equipments in order to optimize electricity resource usage in an intelligent fashion. Demand response (DR) is one of the key technologies to enable smart grid. In this paper, we propose greedy technique for demand response smart grid system. The proposed scheme focuses on minimizing electricity bills, preventing system blackout and sacrificing user convenience.

최근 몇 년간, 전력 소비의 급격한 증가로 인하여 전력 수급의 불안이 전 세계적으로 발생하였다. 또한 전력 예측의 불확실성 및 전력 발전량이 급격히 증가하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 전력망과 IT 기술을 결합한 스마트 그리드 기술은 각광을 받고 있다. 스마트 그리드는 전력 최대 부하율을 낮추며 효율적인 전력 사용을 유도한다. 이를 위하여 스마트 그리드 시스템은 다양한 요금 정책, 수요반응 기술, 스마트 전자 기기들을 활용한다. 특히 전력 사용을 효율적으로 스케줄링 해주는 수요반응 기술은 스마트 그리드의 핵심 기술이다. 본 논문에서는 수요 반응 기술을 위한 그리디 기법을 제안한다. 제안하는 그리디 기법은 전력 요금의 최소화뿐만 아니라, 사용자의 편의성을 고려하며 시스템 정전을 방지하는 것을 목표로 한다.

Keywords: Demand response, smart grid

I. 서론

최근 정보화/산업 사회의 고도화에 따른 전력 소비의 증가로 인하여 전력 예측 수요와 실제 수용의 불균형이 발생하여 이로 인한 전력 수급의 불안이 발생하였다. 2000년대 북미의 대규모 정전사태 및 2011년 국내 대규모 정전 사태 이후로 전력 수급 위기는 매년 반복되고 있다. 특히, 원전 안전 요구 증대 및 송전망 확충에 대한 다양한 갈등과 공급에 드는 사회적 비용의 급증으로 인하여 전력 공급 위주의 정책은 한계에 다다르고 있다. 따라서 기존전력망에 정보 기술 (IT: Information Technology)를 접목하여 전력 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보를 교환하며 에너지 효율을 최적화 하는 스마트 그리드 (Smart Grid) 기술이 대두되고 있다. 국내외에서는 기존의 강제 절전 규제 방식에서 스마트 그리드 기술을 활용하여 사용자들의 불편을 최소화 하는 전력 수요 관리를 적극적으로 추진하고 있으며, 이를 통하여 에너지 정책의 패러다임은 공급 중심에서 벗어나 수요관리형으로 전환되는 추세이다. 수요 관리 (DSM: Demand Side Management)는 소비자의 전기사용 패턴을

합리적인 방향으로 유도하기 위한 전력회사의 제반활동을 말한다. 수요관리의 하위 개념으로, 시스템 블랙아웃 (Black-out)을 방지하기 위하여 가격 조정등을 통하여 소비자가 자발적으로 전력 소비 패턴을 변경하도록 하는 활동을 수요 반응 (DR: Demand Response) 이라고 한다. 수요 반응은 전기 요금의 조정이나 부하감축 지시를 통하여 이루어지며 최대부하를 방지하는 것을 목표로 둔다. Fig. 1은 전력 수요 반응 시스템의 예시를 나타낸다.

전력 스케줄링 전에는 제품 1, 2, 3의 사용 시간이 12 시에서 14시 사이에 몰려 있지만, 전력 수요 반응 스케줄링을 통하여 제품 2, 3의 사용 시간을 분산시킴으로써 최대 부하를 줄이는 효과를 보여준다.

수요 반응은 사회적 수용성, 환경성, 경제성, 에너지 안보 측면을 모두 충족시키는 공급 대안으로 제5의 에너지 자원으로 평가 받으며, 현재 미국의 경우 전력 수요 관리 비용이 공급 비용보다 저렴하여 수요관리 자원의 우선 확보 등 공급 발전 자원과 동등하게 대우되고 있다. 본 논문에서는 이를 위하여 사용자의 편의성을 고려한 그리디한 수요반응 알고리즘을 제안한다.

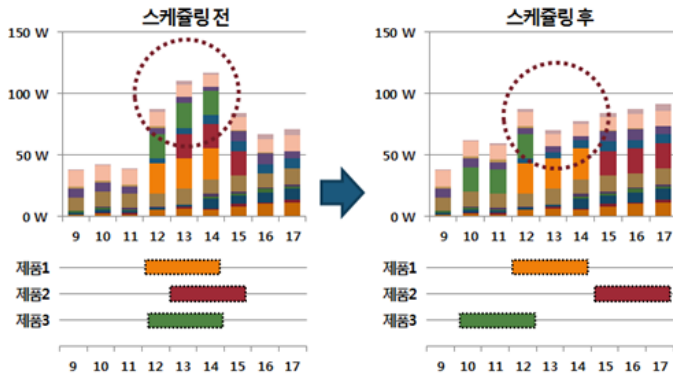


Fig. 1. 전력 수요 반응 시스템의 예시.

II. 관련 연구

본 장에서는 지금까지 연구된 수요반응 기술들에 대하여 기술한다. [1] 은 대규모 인터넷 데이터 센터 환경에서 확률 최적화 (Stochastic Optimization) 기법을 사용하여 전력 요금을 최소화 하는 기법을 제안하였다 [1]. 기법의 목표는 전자기기들의 전력 소모 구간을 변화시킴으로써 전체 전력 요금을 최소화 하는 것을 목표로 한다 [2]. 논문에서는 2단계 확률 기법 (2 Stage Stochastic) 을 사용하는 스케줄링 기법을 제안하였다. 이 논문에서는 스케줄링 매니저가 각 전자기기들에 대한 요금을 계산 한 후, 이를 바탕으로 전체 시스템의 전력 요금을 예측한다 [1][2]. 논문은 전체 요금 최소화를 목적으로 두었지만 전력 사용이 특정 구간에 몰릴 경우 시스템 정전을 예방하지 못하는 한계점을 가지고 있다.

[3]은 Min-Max 목적함수를 통하여 피크부하 최소화를 통하여 시스템 정전을 예방하는 기법을 제안하였다. 하지만 이 기법은 요금 최소화과 피크 부하 최소화만 고려되어, 스케줄링 된 전자기기들이 엉뚱한 시간에 스케줄링되는 문제점을 가지고 있다. [4]는 전체 요금 최소화과 피크 부하 최소화를 목적함수로 가지고 있는 기법을 제안하였다. 전력 사용량 한계치 (Threshold)를 설정하여 전력 사용의 균형을 맞추고자 노력하였으나, 각 기기 사용 시간에 대한 불편도를 고려하지 않은 한계점을 가지고 있다.

[5]는 전체전력 요금을 최소화 하며 전자기기의 대기시간에 따른 불편도를 고려하는 기법을 제안하였다. [6]은 전체 전력 요금을 최소화 하며 장비의 대기시간 한계치를 고려한 기법을 제안하였다. [5][6] 논문은 전자기기 대기시간을 고려하고 있으나, 각 장비마다 선호시간이 설정되어 있다는 이상적인 환경을 전제로 하고 있다.

현재까지 제안된 논문들은 이상적인 환경을 전제로 하는 한계점을 가지고 있으나, 본 논문에서는 전자기기들의 사용패턴을 저장하고 있는 DB를 가정하고 이를 스케줄링에 적용하는 실질적인 기법을 제안한다. 또한 전력 요금 최소화에 대한 목적함수와 시스템 정전 방지에 대한 제약 (Constraint)을 가진다.

III. 그리드 수요 반응 모델링

본 장에서는 본 논문에서 제안하는 그리드 방식의

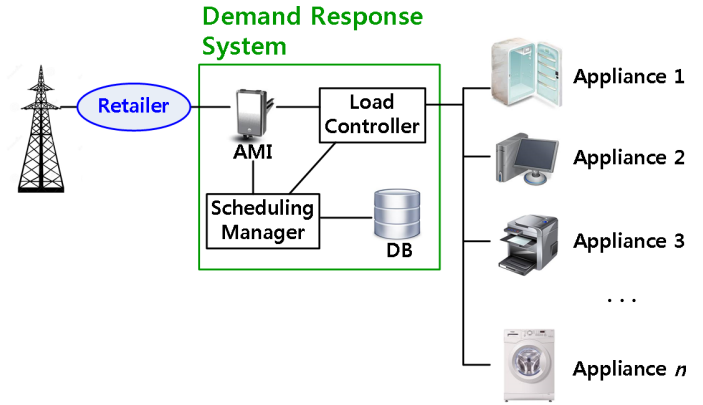


Fig. 2. 시스템 모델링.

수요반응 기술에 대한 가정 및 수학적 모델링에 대하여 기술한다. 그리드 수요 반응 기법의 목적은 사용자의 전력 요금을 최소화 하며 사용자가 기존에 사용하던 사용 패턴과 가장 유사하도록 전력 스케줄링 되는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 우리는 Fig. 2와 같은 시스템을 가정한다.

Fig. 2와 같이 수요반응 시스템은 다음과 같이 구성된다. 수요반응 시스템 내부의 AMI (Advanced Metering Infrastructure)는 전력 공급자로부터 전력 요금에 대한 정보를 수신받는다. Load Controller는 각 전자기기들의 동작을 제어한다. DB (Database)는 스케줄링 매니저로부터 각 전자기기들에 대한 사용 패턴을 전달받아서 저장하고 있다. 스케줄링 매니저는 각 AMI로부터 전달받은 전력 요금 제도와 DB로부터 수신한 사용패턴을 바탕으로 실시간 전력 스케줄링을 수행한다. 해당 스케줄링 정보는 Load Controller로 전달되어 각 전자 기기들이 정해진 시간에 동작되도록 한다.

A. 가정 (Assumption)

전자기기들의 집합을 A , 각 전자기기들의 순서(n)에 따라 a_n 이라고 가정한다. 이때, 각 전자기기들은 아래와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 N 은 전체 전자기기의 개수를 의미한다.

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_N\} \tag{1}$$

시간은 일정한 타임슬롯 (t)으로 나누어져 있다고 가정할 경우 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$t \in T = \{1, 2, 3, \dots, T\} \tag{2}$$

이때, 스케줄링이 하루 단위로 이루어지고 타임슬롯의 단위가 분이라고 한다면 T 는 1,440이 된다.

스케줄링은 타임슬롯 단위로 이루어지며, 장비 a_n 이 스케줄링된 결과 (S_n)는 아래와 같이 표현한다.

$$S_n = [S_n^1, S_n^2, S_n^3, \dots, S_n^T] \tag{3}$$

이때, s_n^t 은 스케줄링 여부를 나타내는 Indicator Function으로 아래와 같이 표현이 가능하다.

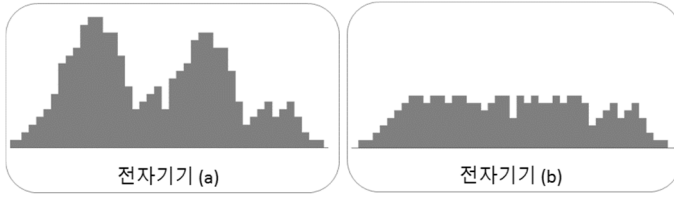


Fig. 3. 전자기기 사용 패턴의 예시.

$$s_n^t = \begin{cases} 1, & \text{만약 전자장비 } a_n \text{이 타임슬롯 } t \text{에 스케줄링될 경우} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

B. 전력 사용 모델링

본 논문에서는 전자기기 a_n 이 동작할 때, 하나의 타임슬롯에 소모하는 에너지량은 같다고 가정한다. 따라서 전자기기 a_n 이 동작할 때 소모하는 타임슬롯 당 에너지량이 E_n^{on} , 동작하지 않을 때, 소모하는 에너지량이 E_n^{off} 라고 할 경우 타임슬롯 t 에서 사용하는 총 에너지량 (E_t^{all})은 다음과 같다.

$$E_t^{all} = \sum_{a_n \in A} S_n^t \cdot E_n^{on} + (1 - s_n^t) \cdot E_n^{off} \quad (5)$$

본 논문에서 타임슬롯 t 시간의 실시간 전력 요금은 p_t 라고 가정한다. 이러한 전력 요금은 AMI를 통하여 실시간으로 전력 공급자로부터 수신된다고 가정한다. 이러한 가정을 바탕으로 타임 슬롯 t 시간에 과금되는 전력 요금은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$p(t) = \sum_{a_n \in A} p_t \{s_n^t \cdot E_n^{on} + (1 - s_n^t) \cdot E_n^{off}\} \quad (6)$$

스케줄링 매니저는 전력 요금 최소화를 위하여 아래와 같은 목적함수를 둔다.

$$\text{minimize} \sum_{t=1}^T \sum_{a_n \in A} p_t \{s_n^t \cdot E_n^{on} + (1 - s_n^t) \cdot E_n^{off}\} \quad (7)$$

C. 사용자 패턴 모델링

본 논문에서는 수요 반응 시스템 내부에 있는 DB가 각 전자기기들의 누적 사용패턴을 가지고 있다고 가정한다. 예를 들어 전자기기 (a)와 (b)가 Fig. 3과 같은 시간에 사용 패턴을 가지고 있다고 가정하자. 전자 기기들은 타임슬롯에 대한 통계로 표현될 수 있으며 PMF (Probability Mass Function)의 형태로 표현이 가능하다. 이를 위해 전자 기기 a_n 이 t 시간에 대한 사용 누적 값을 C_n^t 으로 모델링한다.

C_n^t 를 활용하여 사용자가 평소에 사용하던 시간에 전자기기들이 동작할 경우 만족도를 더 높다고 판단할 수 있으며, 아래와 같은 목적함수를 가질 수 있다.

$$\text{maximize} \sum_{a_n \in A} \sum_{t=1}^T C_n^t \cdot s_n^t \quad (8)$$

IV. 그리디 수요반응 기술

본 장에서는 앞장에서 가정한 모델링을 바탕으로 본 논문에서 제안하는 그리디 수요 반응 기법에 대하여 기술한다.

A. 모델링 간략화

수학적 복잡도를 줄이기 위하여 앞장에서 유도한 모델링을 다음과 같이 간략화 한다. 첫 번째로, 스케줄링 파라미터를 벡터 형식으로 변환한다. 모든 타임 슬롯에 대한 Indicator Function 모델링 대신 아래와 같이 변환한다. 전자장비 a_n 이 $s_{n,m}^*$ 시간부터 ΔS_n 시간동안 스케줄링 될 경우 아래와 같이 표현한다. m 은 전자 장비 a_n 이 하루에 동작하는 횟수를 표현한다.

$$S_n = (s_{n,m}^*, \Delta S_n) \quad (9)$$

두 번째로, 스케줄링 벡터를 사용하여 전력 요금 함수 $p(t)$ 를 아래와 같이 치환한다.

$$p(t) = \sum_{a_n \in A} \left\{ \left(\sum_{t=s_{n,m}^*}^{s_{n,m}^* + \Delta S_n - 1} p_t \cdot E_n^{on} \right) + p_t (T - \Delta S_n) \cdot E_n^{off} \right\} \quad (10)$$

이때, $(T - \Delta S_n) \cdot E_n^{off}$ 에 있는 모든 변수들은 고정되어 결정된 값이기 때문에 스케줄링에 영향을 미치지 않는다. 따라서 아래와 같이 변화할 수 있다.

$$p^*(t) = \left(\sum_{a_n \in A} \sum_{t=s_{n,m}^*}^{s_{n,m}^* + \Delta S_n - 1} p_t \cdot E_n^{on} \right) + \rho \quad (11)$$

여기서 ρ 는 스케줄링에 결과에는 영향이 없는 의미 없는 값이다.

세 번째로, 새로운 스케줄링 벡터를 사용하여 사용자 만족도에 대한 함수는 아래와 같이 변경하여 치환한다.

$$\sum_{a_n \in A} \sum_{t=s_{n,m}^*}^{s_{n,m}^* + \Delta S_n - 1} C_n^t \quad (12)$$

이를 바탕으로 우리가 목적으로 하는 전체 함수는 아래와 같이 표현할 수 있다. 이때, 전력 요금과 사용자 만족도를 하나의 함수로 합치기 위하여 우리는 Weight Factor α 를 사용한다. 또한 전력 요금은 최소화하고 만족

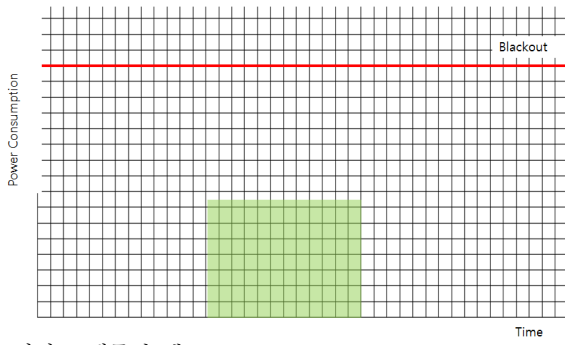


Fig. 4. 전력 스케줄링 맵.

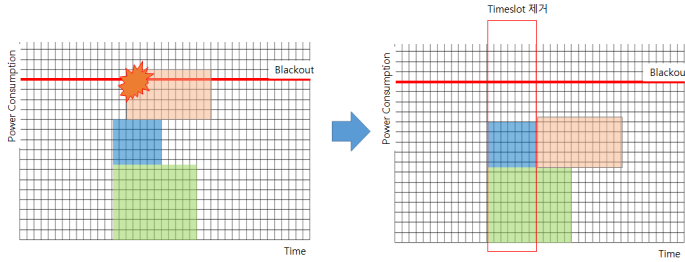


Fig. 5. 시스템 정전을 고려하는 그리디 스케줄링.

도를 최대화해야 하므로, 요금 함수에서 만족도 함수의 차만큼을 최소화 하는 것을 목표로 한다.

$$F(\cdot) = \sum_{a_n \in A} \sum_{t=s_{n,m}^*}^{s_{n,m}^* + \Delta s_n - 1} \{ \alpha \cdot p_t \cdot E_t^{om} - (1 - \alpha) \cdot C_n^t \} + \rho \quad (13)$$

여기서 α 의 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1$ 이다.

B. 제안하는 알고리즘

본 논문에서 제안하는 그리디 알고리즘은 각 전자 기기별로 우선 순위를 정하여 높은 우선 순위의 전자 기기부터 차례대로 하나씩 전력 스케줄링을 한다. 이를 위하여 본 장에서는 우선 순위 설정 방법 및 전력 스케줄링 방법을 기술한다.

우선 순위 설정 방법은 아래와 같다. Fig. 3(a)와 (b) 전자 기기처럼 두 개의 전자 기기가 있다고 가정했을 때, 전자 기기 (a)의 경우 (b)보다 시간에 따른 사용 패턴이 명확하다. 즉, (b)의 경우는 상대적으로 고른 시간에 사용이 된다. 따라서 (a)는 선호시간이 더 명확하다고 판단할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 시간에 대한 전자기기의 사용패턴 (C_n^t)의 분포를 가지고 스케줄링 우선 순위를 결정한다. C_n^t 은 PMF의 형태로 표현이 되므로 전 구간의 총 합은 모든 전자 기기별로 같다. 따라서 특정 시간에 사용이 집중 될 경우 각 시간에 대한 제공 값이 커지게 된다. 즉, 아래와 같이 X_n 을 계산하여, X_n 의 값이 클수록 높은 우선 순위 i 를 갖게 된다.

$$X_n = \sum_{t=1}^T (C_n^t)^2 \quad (14)$$

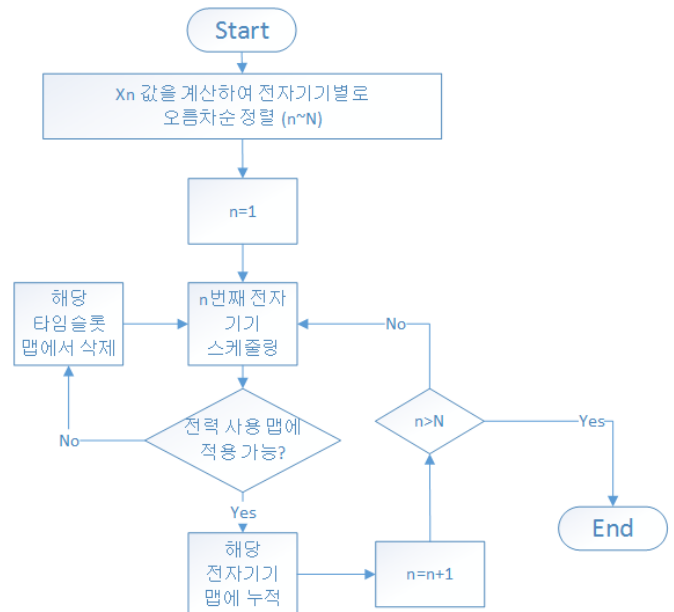


Fig. 6. 제안하는 그리디 수요반응 알고리즘.

사용패턴을 가지고 우선 순위 결정이 끝난 후, 스케줄링 매니저는 전자기기에 대한 전력 스케줄링을 수행한다. 이를 위하여 Fig. 4과 같은 전력 스케줄링 맵을 사용한다. 전력 스케줄링 맵은 시간과 파워 소모량에 대한 맵으로 표현이 된다. 파워 소모량은 시스템 정전 (Black Out)에 대한 제약사항을 가지고 있다. 따라서 각 시간에 정해진 양 이상의 전력 스케줄링이 불가능하게 유도한다. 이 제약사항으로 인하여 기기들의 사용을 분산 시킬 수 있고, 시스템 정전을 예방할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 그리디 알고리즘은 앞 절에서 도출한 함수 $F(\cdot)$ 을 최소화 하는 구간을 찾아서 맵에 적용 시키는 방식을 사용한다. 즉, 첫 번째 전자기기가 함수를 통하여 선호하는 구간이 정해질 경우 Fig. 4와 같이 전력 스케줄링 맵에 추가하게 된다. 이때 전력 사용량은 E_n^{om} 을 사용하게 된다. 이 방법으로 순차적으로 각 전자 장비에 대한 스케줄링을 추가해 나간다. 이때 전자장비 $s_{n,m}^*$ 의 m 값이 1보다 클 경우 해당 전자장비는 m 개수의 스케줄링을 필요로 한다. 이때 하나의 전자장비는 같은 시간에 중복되서 스케줄링이 될 수 없다. 따라서 하나의 전자장비가 스케줄링 된 후에 해당 타임 슬롯을 전력 스케줄링 맵에서 삭제 한 후, 다음 스케줄링을 수행한다.

또한 선호 시간이 겹치게 계산되는 장비들이 같은 시간에 스케줄링이 누적될 경우 특정 시간에 에너지 사용량이 몰리게 되면서 시스템 정전을 초래할 수 있다. 따라서 Fig. 5와 같이 스케줄링 된 결과가 Black Out을 넘어갈 경우 해당 타임 슬롯을 제거한 후 다음 선호하는 시간에 스케줄링을 하게 된다.

본 논문에서 제안하는 그리디 알고리즘을 순서대로 표현하면 Fig. 6과 같이 표현된다.

V. 결론

정보화/산업 사회의 고도화에 따른 전력 수급 불균

형을 극복하기 위하여 스마트 그리드 수요 반응 기술은 매우 필요하다. 현재까지의 수요 반응 기술 연구는 전력 요금 혹은 최대 피크 최소화만을 위해 노력하거나, 이상적인 환경에서의 사용자 불편도를 고려하는 수준에 미치고 있었다. 이를 위하여 본 논문에서는 사용자의 사용 패턴을 바탕으로 전자 기기 스케줄링을 수행하며, 전력 요금 최소화를 만족하고 시스템 정전을 방지하는 그리드 수요 반응 기법을 제안하였다.

REFERENCES

- [1] Z. Chen, L. Wu, and Z. Li, "Electric Demand Response Management for Distributed Large-Scale Internet Data Centers," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 651-661, March 2014.
- [2] M. Parvania, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 89-98, June 2010.
- [3] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 120-133, Sept. 2010.
- [4] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and Tan Zong Shun, "Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 3, pp. 1244-1252, Sept. 2012.
- [5] K. M. Tsui and S.-C. Chan, "Demand Response Optimization for Smart Home Scheduling Under Real-Time Pricing," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1812-1821, Dec. 2012.
- [6] S. Kim and G. B. Giannakis, "Scalable and Robust Demand Response With Mixed-Integer Constraints," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 4 no. 4, Dec. 2013.