

## 수요반응 프로그램의 최적 인센티브와 부하감축량 결정

김동현\*, 김동민\*, 김진오\*  
한양대학교\*

### Determination of optimal incentives and amount of load reduction for a retailer to maximize profits considering Demand Response Programs

Dong-Hyun Kim\*, Dong-Min Kim\*, Jin-O Kim\*  
Hanyang University\*

**Abstract** - 현재 수요반응(Demand Response) 프로그램은 발전설비용량의 부족이나 높은 발전 연료비용의 상승으로 인해 다양한 나라들에서 도입되고 있는 실정이다. 그것은 실시간으로 소비자들이 그들의 소비패턴을 선택할 수 있는 프로그램이라 말할 수 있다. 다시 말하면, 수요반응이란 소비자들의 일반적인 전력소비패턴에서 전력가격이나 기타 다른 신호에 반응하여 전력 사용량을 변화시키는 것으로 정의할 수 있다. 수요반응의 효과는 전력가격의 급상승 방지, 공급 신뢰도 향상, 그로인한 사회적인 복지향상 등 여러 가지 측면에서 생각해 볼 수 있다. 이러한 다양한 효과 가운데, 본 논문에서는 thermal comfort zone을 고려하여 수요반응 프로그램을 수행하는 동안 전력판매사업자 입장에서 최대의 이득을 얻기 위한 적정 인센티브와 부하 감축량을 결정한다.

#### 1. 서 론

현재 대부분의 선진국들은 기존의 수직 통합적인 전력구조로부터 벗어나 발전, 송전, 배전 그리고 판매 부분이 각각 독립적으로 수평구조를 갖는 형태로 변화하고 있다. 이러한 새로운 시장 변화의 결과 가운데 하나가 전력판매사업자로 알려진 제 3자의 출현이다[1].

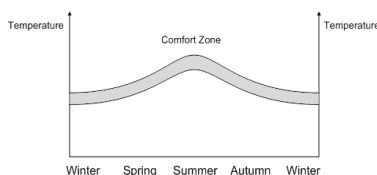
다양한 나라에서 도입되고 있는 수요반응(Demand Response) 프로그램은 실시간으로 소비자들이 그들의 소비패턴을 선택할 수 있는 프로그램이다. 이러한 수요반응 프로그램으로 인해 어떤 계통의 신뢰도가 붕괴되었을 때나 전력 가격이 급등 하였을 경우, 전력 사용량을 줄이도록 유도함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있다[2-3]. 또한 2000년에서 2001년 사이에 캘리포니아 전력 위기 동안에 5%의 수요반응을 유도함으로써 50%의 전력가격 감소의 결과를 얻었다고 보고되고 있다[4]. 이러한 이론을 바탕으로 본 논문에서는 소비자의 thermal comfort zone을 고려하여 수요반응 프로그램을 실시하는 동안 전력판매사업자 입장에서 최대의 이득을 얻기 위한 적정 인센티브와 부하 감축량을 결정한다.

#### 2. 수요반응 모델링

수요반응 프로그램은 크게 세 가지 관점에서 생각할 수 있다. 첫째, 발전사업자는 설비회피비용이나 환경회피비용 측면에서 이득을 얻는다. 다음으로 소비자 관점에서는 전력 사용 패턴을 변화시키는 것에 따른 인센티브의 이득을 얻을 수 있으며, 마지막으로 전력판매사업자들은 전력시장으로부터 싸게 구매할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이렇게 수요반응 프로그램을 수행함으로써 다양한 관점에서 이득을 얻을 수 있지만 본 논문에서는 가장 많은 이득을 얻는 전력판매사업자 입장에서 고려해 보기로 한다.

##### 2.1 소비자의 Thermal Comfort Zone

일반적으로 소비자들이 느끼는 여름철 적정 실내온도는 26도에서 28도 정도로 보고된다[5]. 이런 적정 실내온도를 본 논문에서는 소비자의 thermal comfort zone이라 정의한다. 다음의 그림 1은 계절별 thermal comfort를 보여준다.



〈그림1〉 Thermal Comfort Zone

특히, 일년중 전력수요량이 가장 높은 여름철 피크 부하 시, 냉방부하의 설정온도를 1도 높임으로 인해 소비전력량이 약 7%정도 감소된다고 보고된다. 이에 착안하여, 본 논문에서는 소비자에게 적정 지원금을 지급함으로써, 기존의 소비자의 thermal comfort보다 넓어지게 되는 수요반응의 효과에 대해 분석해본다.

##### 2.2 전력판매사업자

본 논문에서는 특히 하계 피크 시간대의 전력 수요에 가장 커다란 영향을 미치는 냉방부하를 고려해 DR의 개념을 적용해 본다. 즉, 전력판매사업자가 냉방부하를 사용하는 소비자에게 적정 인센티브를 지급함으로써 소비자의 thermal comfort zone을 넓히게 된다면, 실내 내부온도의 증가로 인해 전체적인 소비전력량은 그만큼 감소하게 될 것이다. 그로인해 전력판매사업자는 시장으로부터 전력 구매량이 줄어들게 될 것이고, 전력시장 가격을 낮추는 영향을 미칠 것이다.

###### 2.2.1 판매량

$$I_{\text{ome}} = \sum_{t=1}^{24} \alpha_t S_t \quad (1)$$

$\alpha_t$ : t시간 동안 전력판매사업자가 소비자에게 판매하는 가격

$S_t$ : t시간 동안 소비자에게 판매한 전력량

###### 2.2.2 전력구매비용

$$\text{Energy Purchase Cost} = \sum_{t=1}^{24} \beta_t P_t \quad (2)$$

$\beta_t$ : t시간의 전력시장 가격

$P_t$ : t시간 동안 전력시장으로부터 구매한 전력량

###### 2.2.3 인센티브

전력판매사업자 입장에서 이득을 최대화하기 위해 소비자들의 수요반응을 이끌어 내기 위한 유인책이다. 본 논문에서 전력판매사업자의 이득을 최대화하는 적정지원금이 결정변수가 된다.

#### 3. 수학적 모델

##### 3.1 목적함수

전력판매사업자가 소비자에게 전력을 판매할 때, 얻게 되는 이익은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$\text{Max. } RP(\gamma) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} \alpha_{i,t} S_{i,t} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} \beta_t P_{i,t} - \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} \gamma_{i,t} \quad (3)$$

$S_{i,t}$ : t시간 동안 소비자 i의 전력소비량

$P_{i,t}$ : t시간 동안 소비자 i의 전력구매량

$\alpha_{i,t}$ : t시간 동안 전력판매사업자가 소비자 i에게 판매하는 가격

$\beta_t$ : t시간의 전력시장 가격

$\gamma_{i,t}$ : t시간 동안 소비자 i에게 지급되는 인센티브

##### 3.2 제약조건

본 논문에서 최적화 문제의 제약조건은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

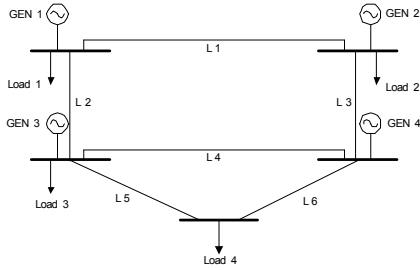
$$\sum_{i=1}^n P_{G,i} = \sum_{j=1}^m P_{L,j} \quad (4)$$

$$P_G^{\min} \leq P_G \leq P_G^{\max} \quad (5)$$

소비자의 수요반응을 유도하기 위해 지급하는 인센티브는 전력시장 가격에 가장 영향을 끼치는 냉방부하의 피크 부하가 발생하는 시점인 오후 14:00부터 오후 16:00까지로 제한을 둔다.

#### 4. 사례연구

수요반응의 효과를 알아보기 위해 본 논문에서는 용량이 각기 다른 4개의 발전기를 가진 모의계통이 사용된다.



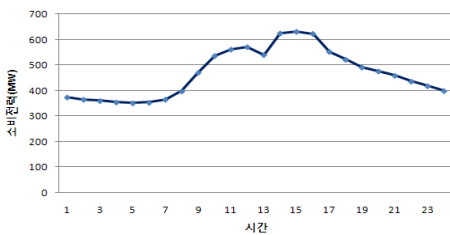
<그림 2> 모의계통

각 발전기에 대한 발전비용함수와 제약조건은 다음의 표와 같다[6].

<표 1> 발전비용곡선과 제약조건

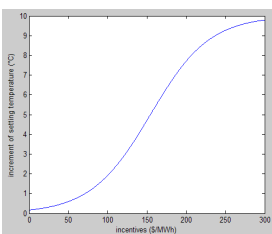
	PG Cost ( $aP_g^2 + bP_g$ )		최소 발전량	최대 발전량
	a	b		
GEN 1	0.0175	1.75	150 MW	230 MW
GEN 2	0.025	3.50	90 MW	180 MW
GEN 3	0.0625	1.00	50MW	200 MW
GEN 4	0.0834	3.25	30 MW	150 MW

다음의 그림은 본 논문의 사례연구에 적용된 일일부하행태이다.

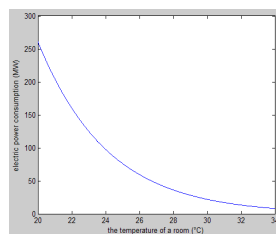


<그림 3> 일일부하행태

다음의 그림 4는 본 논문에서 가정된 전력판매사업자가 소비자에게 지불하는 인센티브에 대한 냉방부하의 설정온도 증가를 보여주며, 그림 5는 실내의 설정온도에 따른 소비전력량을 보여준다. 단, 소비자에게 전력을 판매하는 가격은 7.90\$/MWh로 가정한다.



<그림 4> 인센티브에 따른 설정온도 증가



<그림 5> 실내온도에 따른 소비전력량

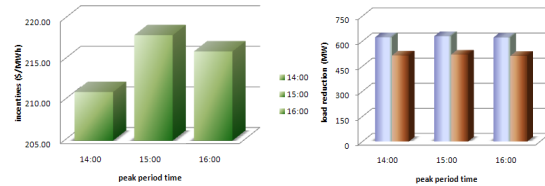
표 3은 각각의 시간에 따른 4개 발전기의 발전기 한계비용을 나타내며, 가장 높은 가격의 발전기가 MCP로 결정된다.

<표 3> 시간별 발전비용과 MCP

단위:(\$/MWh)

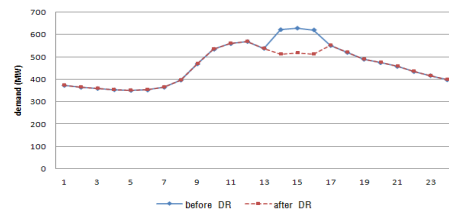
	GEN #1	GEN #2	GEN #3	GEN #4	MCP
hr. 01:00	5.04	5.92	2.78	4.26	5.92
hr. 02:00	4.97	5.85	2.76	4.25	5.85
....	....	....	....	....	....
hr. 14:00	5.78	8.00	4.02	5.59	8.00
....	....	....	....	....	....
hr. 23:00	5.39	6.27	2.88	4.37	6.27
hr. 24:00	5.24	6.12	2.83	4.32	6.12

표 3에서처럼 하계 피크시간대 MCP가 가장 높기 때문에 시장가격을 낮추기 위해 수요반응 프로그램을 수행하여 전력판매사업자는 이득을 얻는다. 이러한 것을 토대로 전력판매사업자의 이득을 최대화하는 인센티브와 부하감축량은 다음과 같다.



<그림 6> 피크시간대 인센티브 <그림 7> 피크시간대 부하 감축량

결과적으로 수요반응을 수행하기 전과 후의 일일부하행태는 그림 8로 표현되며, 전력판매사업자는 수요반응으로 인해 이득을 얻게 된다.



<그림 8> 시간별 일일부하행태

#### 5. 결론

수요반응 프로그램을 수행함으로써 다양한 측면에서 여러 가지 이익들이 존재하지만 본 논문에서는 전력판매사업자 관점에서 고려해 보았다. 특히, 일 년 가운데 가장 전력사용량이 높은 여름철의 경우에 적용시켜, 인센티브로 소비자의 Thermal Comfort Zone을 확장시킴으로써 전력판매사업자의 이득을 최대화하는 최적의 인센티브와 그 때의 부하감축량을 알아냈다. 달리 말하면, 전력판매사업자는 소비자의 전력수요량의 변화로, 전력시장으로부터 구매가격이 변화하기 때문에 DR 프로그램을 수행함으로써 자신의 이득을 최대화할 수 있다.

#### [참고 문헌]

- [1] J.M. Yusta, I.J. Ramirez-Rosado, J.A. "Optimal electricity price calculation model for retailers in a deregulated market," Electrical Power and Energy Systems, 2005.
- [2] M. H. Albadi, and E. F. El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview," IEEE, 2007.
- [3] L.Goel, Qiuwei Wu, Peng Wang, "Reliability Enhancement of A Deregulated Power System Considering Demand Response," IEEE, 2006.
- [4] S. Braithwait, K. Eakin, "The role of demand response in electric power market design," Laurits R. Christensen Associates, Prepared for Edison Electric Institute, Madison, October 2002.
- [5] Available online : <http://www.kemco.or.kr>
- [6] R.G. Karandikar, S.A. Khaparde, "Quantifying price risk of electricity retailer based on CAPM and RAROC methodology," Electrical Power and Energy Systems, 2007.