

실시간 전력요금제에서의 개별 수요반응 모델 연구

진영규*, 최태섭*, 이호철*, 임재균*, 김형익*, 윤용태*
서울대학교*

Modeling the Individual Demand Response under Real Time Pricing

Young Gyu Jin, TaeSeop Choi, Ho-Chul Lee, Jae Gyun Lee, Hyeong Ig Kim, YongTae Yoon
Seoul National University

Abstract - 본 논문은 전체 수요반응의 결과를 예측하는데 필요한 개별 수용가의 수요반응 모델을 제시하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해, 개별 수용가의 수요반응 결정이 투자결정 문제가 유사함을 보이고, 수요반응의 결정에 있어서도 투자결정 문제에서 위험선호 성향에 따라 수익과 위험 사이에서 개별적인 결정이 이루어진다고 보았다. 개별 수용가의 수요반응 모델을 유도할 때는 수요반응의 결과로 이루어지는 전력사용량 조절이 잘못된 결정일 확률을 고려하였고, 위험선호 지수라는 파라미터를 정의하여 일반적인 식으로 수요반응 모델을 표현하였다. 마지막으로, 시뮬레이션을 통해 위험선호 지수 R의 값에 따라 수요반응의 전력요금 감소 효과와 변동성이 달라짐을 확인하였다. 본 논문의 모델을 이용하면 전체 수용가의 총 수요반응을 예측하는 것이 가능해지고, 그 결과는 수요반응 제도 시행을 위한 장비투자 결정이나 정책 결정에 있어 중요한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

1. 서론

기존 전력망은 모든 전력수요를 충족시키는 것을 목적으로 설계되었다. 그러나, 산업이 발전하고 전력수요가 증대됨에 따라, 전력망의 안정적 운용을 위한 수요측의 역할, 즉 수요반응(demand response)이 강조되고 있다. 수요반응의 효과는 다음과 같다[1][2]. 첫째로, 수용가는 전력가격이 비싼 시간대의 전력수요를 조정함으로써 전력요금을 줄일 수 있다. 둘째로, 전력수요가 조정되면 피크 전력수요가 작아지므로, 전력망의 안정성과 발전의 효율이 증대된다. 마지막으로, 전력수요의 가격탄력성이 개선되어 발전영역의 독과점적 시장 권력을 제한할 수 있다.

이러한 수요반응의 효과를 최대한 달성하기 위해서는 수요반응으로 조정되는 전력수요를 일정 수준의 정확도를 가지고 예측할 수 있어야 한다. 그러나, 수요반응은 사회경제적 조건, 기상 조건, 전기장치 보유 현황, 생활 습관 등 추상적인 여러 가지 요소들에 영향을 받으므로[3] 수요반응의 결과를 예측하는 것이 매우 어렵다.

본 논문에서는 위험회피라는 기본적인 성향을 고려하여 전력요금을 줄이고자 하는 개별 수용가의 수요반응 모델을 제시함으로써, 전체 수요반응의 결과를 정량적으로 예측할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

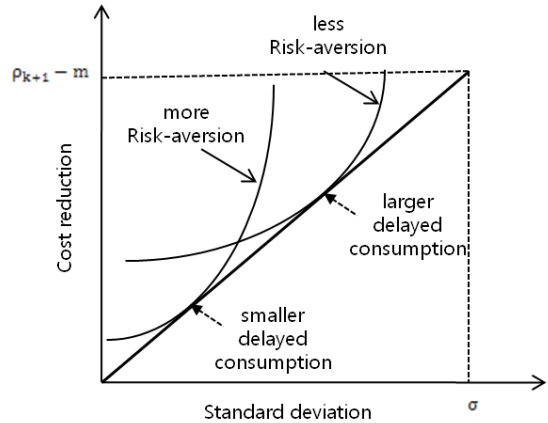
2. 본론

2.1 개별 수요반응 모델의 가정

개별 수용가의 수요반응 모델을 유도하는데 필요한 가정은 다음과 같다.

- 전력가격은 정규분포의 형태를 갖는다.
- 전력가격의 통계적 정보(평균, 분산)가 개별 수용가에 알려진다.
- 현재 시점의 전력가격이 개별 수용가에 알려진다.
- 수요반응 이전과 이후의 총 전력사용량은 동일하다.
- 개별 수용가는 위험을 회피하면서 효용을 최대화하고자 한다.

스마트그리드의 도입과 통신기술의 발달로 정보의 전달에 관한 두 번째와 세 번째 가정은 일반적으로 성립한다. 네 번째 가정에 대해서는 수요반응으로 인해 전력사용 계획이 조정되면 효율 등의 변화로 인해 총 전력사용량이 변화될 수 있지만 그 크기는 전력사용량 자체에 비해 작다고 생각할 수 있다. 그리고, 마지막 가정은 경제분야에서 사용되는 일반적인 사람의 성향에 대한 가정과 동일하다. 그러나, 전력가격은 한쪽으로 길게 늘어진 로그정규분포라는 연구를 보면[4] 첫 번째 가정은 현실과 차이가 있는데, 본 논문의 목적은 정확한 값을 구하는 것이 아니라 파라미터화된 일반적인 식으로 표현된 모델을 유도하는 것이므로, 간단한 식으로 표현가능한 상가 가정을 사용하기로 한다. 다만, 시뮬레이션에서 수요반응의 결과를 살펴볼 때는 실제와 유사하게 로그정규분포를 이용할 것이다.



<그림 1> 위험회피 성향에 따라 달라지는 수요반응 결정

2.2 투자결정과 수요반응 결정의 유사성

전력요금을 줄이고자 하는 개별 수용가의 일반적인 전략은 전력가격이 높은 시간대의 전력사용을 줄이고, 가능하다면 전력가격이 낮은 시간대로 전력사용을 조정하는 것이다. 그렇다면 얼마만큼의 전력사용을 줄이거나 조정해야 하는지에 대한 문제가 발생한다. 예를 들어, 특정 시간대에 40kWh의 전력사용이 예정되어 있고, 해당 시간대의 전력가격은 2000원/kWh이고 다음 시간대의 전력가격은 평균이 1000원/kWh이고 분산이 500인 정규분포라고 하자. 일견 모든 전력사용을 다음 시간대로 옮기는 것이 좋아 보인다. 그러나, 다음 시간대의 전력가격은 확률적으로 결정되므로, 그러한 결정이 잘못된 확률이 존재하게 된다.

이러한 상황은 일상 생활의 투자결정 문제에 그대로 나타난다. 예를 들어, 100만원을 투자하는데 A상품은 확률적으로 5%의 수익이 발생하고, B상품은 확률적인데 그 값은 60%의 확률로 20% 수익, 40%의 확률로 0의 수익이 발생한다고 하자. 투자자의 최적 결정은 무엇일까? 이 문제에서 모든 투자자에게 적용되는 최적 결정은 없고, 투자자의 성향에 따라 최적의 결정이 달라지게 된다. 그러면, 최적 결정은 투자자의 성향을 파라미터로 하는 식으로 표현될 수 있다.

수요반응의 전력사용량을 결정하는 문제에 있어서도 투자 문제와 유사하게 개별 수용가의 성향에 따라 다른 패턴으로 나타난다고 볼 수 있다. 따라서, 위험회피 정도를 개별 수용가의 성향으로 생각하여, 개별 수용가의 수요반응을 위험회피 정도를 파라미터로 하는 식으로 표현할 수 있게 된다.

2.3 개별 수용가의 수요반응 모델

수요반응에 있어서 수익은 전력요금 감소액이고, 위험은 전력요금 감소액의 변동성, 즉 분산 또는 표준편차로 볼 수 있다. 시간 t=k인 시점에서의 예정된 전력사용량을 Q, 전력가격은 $\rho_k = m + z\sigma$ 라 하고, 다음 시간 t=k+1 시점에서의 전력가격 ρ_{k+1} 은 평균이 m, 표준편차는 σ 인 정규분포라고 하자. 그리고, 수요반응으로 D만큼의 전력사용량을 다음 시점인 t=k+1로 옮긴다면, 전력요금 감소액의 기대값은

$$E[\text{cost reduction}] = \{\text{cost after DR}\} - \{\text{cost before DR}\} = \{(Q - D) \cdot (m + z\sigma) + D \cdot E[\rho_{k+1}]\} - \{Q \cdot (m + z\sigma)\} = -D \cdot z\sigma \quad (1)$$

이 되고, 분산은

$$\text{Var}[\text{cost reduction}] = D^2 \text{Var}[\rho_{k+1}] = D^2 \sigma^2 \quad (2)$$

이 된다. 조정된 전력사용량 D의 크기가 커질수록, 기대값은 커지지만 그에 따라 분산도 커짐을 알 수 있다. 따라서, 위험회피 성향이 큰 수용가는 조정되는 전력사용량을 작게 하는 방향으로 결정할 것이고, 위험선호가 큰 수용가는 상대적으로 큰 값으로 결정할 것이다. 이와같이 고위험-고수익의 특성을 나타내는 수요반응의 결과와 위험회피 성향에 따라 달라지는 전력사용량 조정의 형태를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 포물선은 효용함수를 의미하고[5], 위험회피 정도가 클수록 가파르게 증가하는 특성을 갖게 된다.

전력가격의 변동성으로 인하여 전력을 조정하는 결정이 잘못된 결정일 확률은 다음과 같다.

$$\text{Prob}\{\rho_{k+1} \geq m + z\sigma\} = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (3)$$

여기서

$$z = \frac{\rho_k - m}{\sigma}, \quad \text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$$

이다. 만일 잘못된 결정일 확률과 반비례하여 전력사용량을 조정하는 것으로 하면,

$$d_r = 1 - \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] = \frac{1}{2} \left[\text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) + 1 \right] \quad (4)$$

이 된다. 여기서 $d_r = D/Q$ 은 전력사용량 조정 비율을 의미한다. 식 (3)은 $z=0$ 인 경우에 0.5가 되는데, 전력가격이 평균과 같으면 수요반응이 일어나지 않는 것이 일반적이므로, $z=0$ 일 때 $d_r=0$ 이 되고, $z=\infty$ 일 때 $d_r=1$ 이 되도록 조정하면, 식 (4)는

$$d_r = 2 \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left[\text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) + 1 \right] - \frac{1}{2} \right\} = \text{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \quad (5)$$

이 된다. 마지막으로 개별 수용가의 위험선호 정도를 나타내는 파라미터를 R이라 하면, 식 (5)를 다음과 같이 일반적인 식으로 표현할 수 있다.

$$d_r = \text{erf}(Rz) \quad (6)$$

여기서 R은 식 (5)의 $1/\sqrt{2}$ 을 포함한 값으로서, $R \geq 0$ 이다. $R=0$ 이면 $d_r=0$ 이므로, 위험을 완전히 회피하여 수요반응에 참여하지 않는 것을 의미한다. 그리고, $R=\infty$ 이면 $d_r=1$ 이므로, 약간의 가격 변화에도 민감하게 수요반응이 일어남을 의미하게 된다. 반대로 현재시점의 전력가격 ρ_k 가 평균 m 보다 작은 경우에는 앞선 유도과정과 유사한 방법을 통해 일정 비율 a_r 만큼 전력사용을 앞당기는 것으로 해석하여 a_r 을

$$a_r = \text{erf}(-Rz) \quad (7)$$

와 같이 표현할 수 있다.

3. 시뮬레이션

개별 수용가의 위험선호 지수 R에 따라 수요반응의 결과가 어떻게 달라지는지 확인하기 위해 다음과 같이 k=1부터 k=17까지의 3가지 유형의 수요에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\text{Load1: } \left\{ 10, 12, 15, 12, 10, 8, 5, 8, 10, 12, \right. \\ \left. 15, 12, 10, 8, 5, 8, 10 \right\}$$

$$\text{Load2: } \left\{ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 16, \right. \\ \left. 16, 16, 16, 16, 16, 16 \right\}$$

$$\text{Load3: } \left\{ 1, 2, 3, 4, 7, 11, 16, 22, 24, 22, \right. \\ \left. 16, 11, 7, 4, 3, 2, 1 \right\}$$

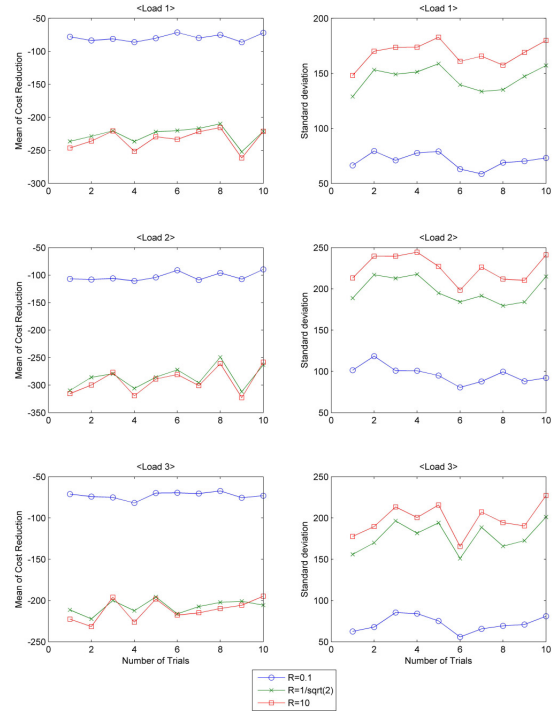
전력가격은 PJM의 2008년 1년 동안의 매시간 전력가격 자료를 이용하였다. 가격분포와 유사하게 평균은 7.2 cents/kWh, 분산은 14.92 인 로그정규분포를 통한 난수값을 전력가격으로 사용하였다. 다음은 시뮬레이션 방법이다.

10 Iterations:

100 Iterations:

- (1)Generate random electricity price;
- (2)Compute demand response for each load;
- (3)Compute cost of electricity consumption;
- (4)Compute cost benefit
- (5)Compute mean of cost benefit;
- (6)Compute standard deviation of cost benefit;

시뮬레이션 결과를 표 1과 그림 2에 나타내었다. 위험선호 지수 R의 값이 커짐에 따라 전력요금의 감소도 커지지만, 표준편차도 같이 커짐을 확인할 수 있다. 따라서, 수요반응에서도 수익과 위험(표준편차) 사이에 trade-off가 발생하고, 개별 수용가의 결정을 위험선호 지수 R이라는 파라미터를 이용하여 표현할 수 있는 것이다.



<그림 2> R값에 따른 시행횟수별 전력요금 감소량 및 표준편차

<표 1> R값에 따른 평균 전력요금 감소량 및 표준편차

Load {R}	Load 1 {0.1, $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 10}	Load 2 {0.1, $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 10}	Load 3 {0.1, $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 10}
평균	{-79.27, -226.3, -233.7}	{-102.9, -285.8, -292.4}	{-72.71, -207.4, -211.7}
표준 편차	{70.74, 145.4, 168.2}	{96.46, 198.6, 225.2}	{71.8, 177.7, 198.2}

3. 결 론

본 논문에서는 전체 수요반응의 결과를 예측하는 기본이 되는 개별 수용가의 수요반응 모델을 제시하였다. 개별 수용가의 수요반응 결정이 투자결정 문제가 유사함을 보이고, 수요반응의 결정에 있어서도 투자결정 문제에서 위험선호 성향에 따라 수익과 위험 사이에서 개별적인 결정이 이루어진다고 보고 위험선호 지수 R을 정의하여 개별 수용가의 수요반응 모델을 유도하였다. 그리고, 시뮬레이션을 통해 R의 값에 따라 수요반응의 전력요금 감소 효과와 변동성이 달라짐을 확인하였다.

본 논문의 모델을 이용하면 위험선호 지수 R의 분포를 통해 전체 수용가의 총 수요반응을 예측하는 것이 가능해지고, 그 결과는 수요반응 제도 시행을 위한 장비투자 결정이나 정책 결정에 있어 중요한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.-L. Su and D. Kirschen, "Quantifying the effect of demand response on electricity markets," IEEE Trans. Power Systems, vol. 24(3), pp. 1199-1207, 2009.
- [2] D. S. Kirschen, "Demand-side view of electricity markets," IEEE Trans. Power Systems, vol. 18(2), pp. 520-527, 2003.
- [3] D. W. Caves and L. R. Christensen, "Econometric analysis of residential time-of-use electricity pricing experiments," Journal of Econometrics, vol. 14(3), pp. 287-306, 1980.
- [4] G. B. Shrestha and Q. Songbo, "Analysis of Electricity Price in Competitive Markets: A Study in Singapore Market," In IEEE PES general meeting, 2008.
- [5] M. Liu and F. F. Wu, "Portfolio optimization in electricity markets," Electric Power Systems Research, vol. 77(8), pp. 1000-1009, 2007.