

퍼지이론을 이용한 소비자의 편리성과 전기가격에 따른 수요반응

박용두, 김진오
한양대, 한양대

The convenience of consumer by using fuzzy theory and demand response for electricity price

Yong-Doo Park, Jin-O Kim
Hanyang University, Hanyang University

Abstract - 현재 대한민국 전력공급은 한국전력공사의 독점적 시장지배구조에서 자유 경쟁 전력 공급체제로 나아가려고 한다. 이에 기존의 연구논문들이 발전, 송전, 배전, 영업에 관련된 생산자 입장을 주로 다룬 점에서 착안하여 소비자 입장에서 연구를 해보고자 한다. 전기는 현대사회에서 없어서는 안 될 필수재이므로 소비자 입장에서는 전력 사용량을 줄이기는 힘들다. 본 논문에서는 실시간으로 전력의 가격이 바뀌는 전력경제 시장에서 전력 가격에 따른 소비자의 불편함을 느끼는 정도를 퍼지 이론으로 수식화하여 민감도에 따라 부하 사용의 시간대를 효율적으로 조절하고 또한 전기소비가격을 줄이고 공급자입장에서 완만한 수요 곡선에 따른 안정적인 전력공급을 제공한다. 이를 matlab을 사용하여 결과를 모의한다.

$$E = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \cdot & \xi_{1j} & \cdot & \cdot & \xi_{1,24} \\ \xi_{21} & \cdot & \cdot & \xi_{2,j} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \xi_{i1} & \xi_{i2} & \cdot & \xi_{ij} & \cdot & \cdot & \xi_{i,24} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \xi_{i+1,j} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \xi_{24,j} & \cdot & \cdot & \xi_{24,j} & \cdot & \cdot & \xi_{24,24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

1. 서 론

실제 전력시장에서의 수요는 시간과 가격에 따라 변한다. 정확한 수요 예측은 생산자 입장에서는 좀 더 정확하게 발전량을 결정할 수 있고, 불필요한 에너지 낭비를 막을 수 있게 되며, 소비자 입장에서는 더욱 저렴한 가격으로 전력을 소비할 수 있게 된다. 본 논문에서는 가격 변화에 따른 효율적인 수요예측을 위해 먼저 가격탄력성에 대한 Matrix와 Demand Respons 대해 소개한다. 수요예측은 소비자의 입장을 생각해야 하기 때문에 소비자의 불편함 정도를 가격탄력성과 같은 민감도적인 관점에서 가정하였다. 추상적인 소비자의 불편함을 느끼는 정도를 수식화하기 위해 퍼지이론을 도입하였고, 불편함의 정도를 시간에 따른 Matrix로 구성한다. 구성된 Matrix는 가격탄력성 Matrix와 결합하여 새로운 형태의 Demand Response를 구성할 수 있고, 새롭게 결합된 Matrix는 더욱 현실적인 수요예측을 가능하게 한다.

2. 본 론

2.1 Demand Response

실시간으로 가격이 변하는 전력시장에서 수요예측은 효율적인 발전량 결정이나 전력가격 책정에서 없어서는 안될 중요한 요소다. 정확한 수요 예측은 무분별한 에너지 낭비를 막고, 생산자나 소비자 둘 간의 이익을 최대화하기 위한 밑바탕이 될 수 있다. 정확한 수요예측이라는 것은 다양한 요소를 생각해야하기 때문에 현실적으로 매우 난해한 문제이다. 실시간으로 불규칙적으로 변하는 수요응답 곡선을 좀 더 완만하게 만드는 것이 전력 시장의 목표라고 할 수 있을 것이다. 그러기 위해 현재 elasticity라는 개념을 도입하고 있고, elasticity를 좀더 현실적으로 표현하기위해 다른 요소를 추가하는 것은 타당한 주제가 될 수 있다..

2.2 Elasticity

가격탄력성은 가격의 변화에 따른 수요의 변화 정도를 나타내고 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\xi = \frac{\Delta d}{\Delta p} \quad (1)$$

Δd : 수요 변화
 Δp : 가격 변화

즉, 가격탄력성이 크다는 것은 가격 변화에 따른 수요량의 변화 정도가 크다는 것을 의미한다. 탄력성을 한 시간 단위로 24시간을 표현하면 elasticity coefficient는 식(2)와 같은 24by 24 matrix [E]로 구성할 수 있다.

2.3 퍼지(fuzzy)이론과 부하의 퍼지화

2.3.1 퍼지

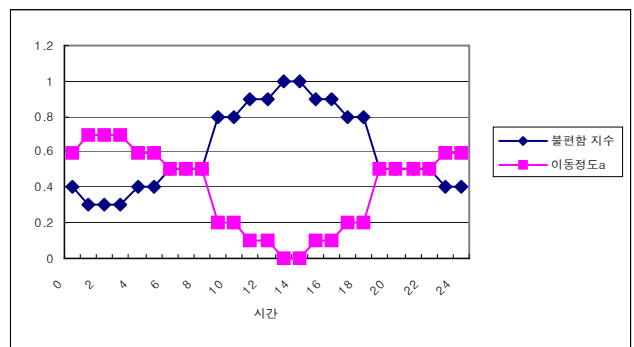
퍼지는 '애매하다', '모호하다'란 뜻으로 부정확하고 불확실하며 신뢰할 수 없는 지식을 표현하고 추론하기 위한 다양한 개념과 기법들을 사용하여 최적의 상태를 찾아가는 이론을 말한다. 즉, 단순한 0과 1이 아닌 0과 1사이의 값을 인정하고 그 정도를 나타내는 이론이다.

2.3.2 Load의 퍼지화

소비자가 불편함을 느끼지 않아서 전기 사용을 다른 시간대로 이동을 허용하는 정도를 나타내는 함수로서 Δf 를 정의하고, 이를 퍼지화 하면 수식 (3)과 같고,

$$0 \leq \Delta f \leq 1 \quad (3)$$

여기서 Δf 가 큰 값을 가질수록 소비자가 느끼는 불편함이 적다고 말할 수 있다. 불편함이 적다는 것은 그 시간대에 전기 사용을 포기하고 다른 시간대로 이동하는 정도나 그 시간대의 전기 사용 자체를 포기하는 정도가 크다는 것을 의미하게 되고 이것은 <그림1>와 같이 표로 나타낼 수 있다.



<그림 1>시간대별 불편함을 느끼는 정도와 이동정도

Δf 는 식 (4)와 같이 24by24 Matrix로 구성할 수 있게 된다.

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdot & f_{1j} & \cdot & \cdot & f_{1,24} \\ f_{21} & \cdot & \cdot & f_{2,j} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{i1} & f_{i2} & \cdot & f_{ij} & \cdot & \cdot & f_{i,24} \\ \cdot & \cdot & \cdot & f_{i+1,j} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{24,j} & \cdot & \cdot & f_{24,j} & \cdot & \cdot & f_{24,24} \end{bmatrix} \quad (4)$$

불편함을 느끼는 정도를 a라고 가정하면 Matrix F의 성분 중 대각성분 요소를 구성하는 계수를 즉, self-coefficient는 다른 시간으로 이동하는데

a만큼 불편함을 느끼므로 이동하지 않는 정도를 나타낸다고 할 수 있으므로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 반면 비대각성분 요소를 구성하는 계수들 즉, cross-coefficient는 다른 시간대로 수요가 이동하는 정도를 나타낸다고 할 수 있고 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ii} = a \quad (6)$$

$$\sum_{i \neq j} f_{ij} = 1 - a \quad (7)$$

2.3.3 탄력성 매트릭스와 퍼지화된 부하의 결합

앞서 정의한 탄력성 매트릭스 E와 소비자의 불편함을 느껴 이동하는 정도를 나타내는 퍼지화 매트릭스 F와 결합을 통하여 새로운 매트릭스를 다음 (8)식과 같이 정의하고자 한다.

$$E^* = \begin{bmatrix} \xi_{11}f_{11} & \xi_{12}f_{12} & \cdot & \xi_{1j}f_{1j} & \cdot & \cdot & \xi_{1,24}f_{1,24} \\ \xi_{21}f_{21} & \cdot & \cdot & \xi_{2j}f_{2j} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \xi_{i1}f_{i1} & \xi_{i2}f_{i2} & \cdot & \xi_{ij}f_{ij} & \cdot & \cdot & \xi_{i,24}f_{i,24} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \xi_{i+1,j}f_{i+1,j} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \xi_{24,j}f_{24,j} & \cdot & \cdot & \xi_{24,j}f_{24,j} & \cdot & \cdot & \xi_{24,24}f_{24,24} \end{bmatrix} \quad (8)$$

따라서 최종적인 수요변화에 대한 식은 다음 (9)식과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta d = E^* \Delta \rho \quad (9)$$

수요의 변화량 Δd 는 수요 이동의 정도를 나타내는 함수 Δf 가 결합된 새로운 탄력성 매트릭스와 조합이 되어서 좀 더 현실적인 수식이 된다. 즉, 어떠한 시간대에 불편함을 느끼는 정도가 1이라면 다른 시간대로의 수요의 이동이 거의 없다고 생각할 수 있고, 이러한 개념은 새로운 탄력성 매트릭스에 그대로 반영이 되어서 수요예측을 가능하게 한다. 이러한 발상은 시간대에 따른 수요예측을 더욱 실용적이고 현실적으로 가능하게 할 수 있다.

2.4 OPF(Optimal Power Flow)를 사용한 발전 스케줄링

각 노드의 가격을 결정하는 최적화 문제는 라그랑주 함수를 사용하여 해결할 수 있는데, 이 논문에서는 뉴턴랩슨에 기반한 OPF를 사용하여 최적의 노드가격을 결정한다. 목적함수는 다음 (10)식과 같다.

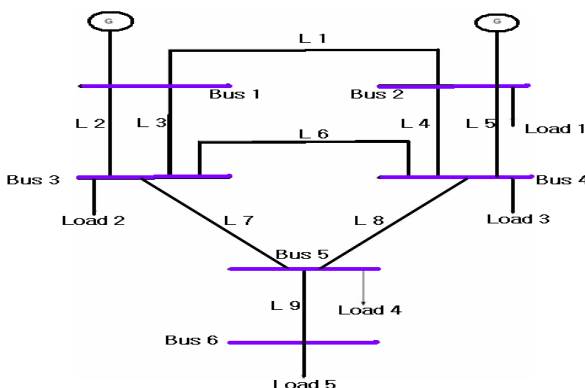
목적 함수 :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{N_g} ((C_{\pi}(P_{gi}) + C_{qi}(Q_{gi})) \quad (10)$$

본 논문에서는 목적 함수에 부하로 흐르는 조류, 발전, 전압 제약조건들을 추가하여 발전 스케줄링을 한다.

2.5 시뮬레이션 및 결과 분석

본 논문에서는 OPF를 이용한 테스트 시스템 RBTS와 맵틀램으로 시뮬레이션을 하고자 한다. RBTS 테스트를 위한 시스템의 다이어그램은 다음 <그림2>와 같다.

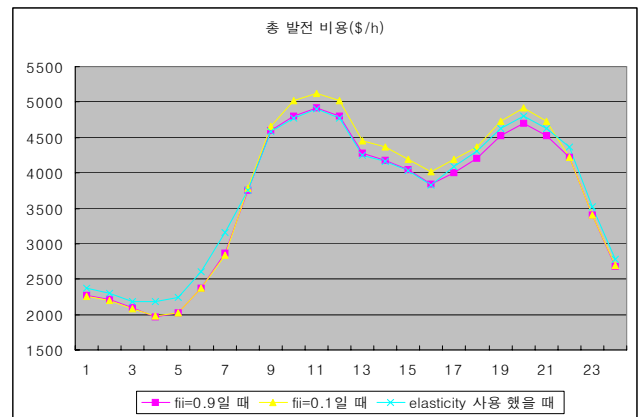


<그림 2> RBTS 테스트 시스템 단일 선로 다이어그램

최적화된 고객이라고 가정을 하면 탄력성 매트릭스의 성분 중 대각요소인 self-coefficient는 -0.2, 비대각요소인 cross-coefficient는 오전 0시부터 3시, 오후 4시부터 12시까지는 0.01값을 오전 4시부터 7시까지는 0.025값을 가지게 된다. 시뮬레이션 결과에 대한 수요응답 및 총 발전비용은 다음 <표1>,<그림3>과 같다.

<표 1> 수요 응답

	d_0	E	$f_{ii}=0.9$	$f_{ii}=0.1$
0~1시	116.55	120.396	117.4339	116.7594
1~2시	114.7	118.3119	115.3832	114.8867
:	:	:	:	:
11~12시	183.15	177.8986	178.4237	182.6249
12~13시	172.05	167.2749	167.7524	171.5725
13~14시	170.2	165.3058	165.7952	169.7106
:	:	:	:	:
22~23시	148	150.9053	148.0774	148.1181
23~24시	129.5	132.1286	129.3401	129.5912



<그림 3> 총 발전 비용

<표1>에 의하면 하루의 부하양인 d_0 에 비해 탄력성 매트릭스를 사용했을 경우 피크시간대의 수요응답은 감소하고 다른 시간대는 증가한 것을 알 수 있다. 즉, 수요 곡선의 기울기가 완만해진다. 또한, f_{ii} 가 큰 값일 수록 E를 사용한 결과와 비슷한 결과 값이 나왔다. 각각에 대한 총 발전 비용은 f_{ii} 가 큰 값일 때는 역시 대체로 탄력성 매트릭스와 비슷한 그래프 모양을 보이지만 작은 값일 때는 피크시간대에는 불편함이 커서 이동정도가 작아 발전 비용이 늘어나고, 다른 시간대에는 오히려 전기 소비를 포기하는 정도가 늘어나서 소비가 줄어들어 발전 비용이 감소했다.

3. 결 론

탄력성을 이용한 수요응답은 정확한 수요예측을 가능하게 해줄 수 있다. 하지만 본 논문에서는 더욱 현실적인 수요 응답 예측을 위해서 시간대에 따라 소비자가 불편함 느껴서 이동하지 않는 정도를 따져보고, 그 이동정도를 퍼지화하여 새로운 탄력성 매트릭스를 구성하였다. 새롭게 구성된 매트릭스는 이동정도가 작은 피크시간대에는 탄력성을 이용한 결과와 비슷한 수요 응답이 나타났고, 불편함을 느끼는 정도가 작아서 이동정도가 큰 시간대에는 더욱 적은 수요 응답이 나타났다. 즉, 불편함을 적게 느끼는 시간에는 수요가 다른 시간대로 이동한다는 것을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kirschen, D.S., "Factoring the elasticity of demand in electricity prices", IEEE Transactions on Power Systems, VOL 15, pp. 612-617, May 2000
- [2] R. Billinton, "A reliability test system for educational purposes-basic data", IEEE Transactions on Power Systems, VOL 4, pp. 1238-1244, Aug 1989
- [3] L. Goel, "Reliability Enhancement of A Deregulated Power System Considering Demand Response", Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, pp.-6, 18-22 June 2006