

새로운 전력 부하모형

김주락* 최준영** 김정훈*
 홍익대학교* 전주대학교 **

New Electricity Load Model

Joo-Rak Kim* Joon-Young Choi** Jung-Hoon Kim*
 Hong-Ik University* Jeonju University**

Abstract - In a competitive electricity power market, the price of electricity changes instantly, that of conventional market is predetermined and hardly changes. In such a new environment, customers' behaviors change instantly according to the changing electricity prices. If we develop a electricity load model that well describes the behavior of electricity consumers, we can utilize that model in forecasting the amount of future load, solving the load flow problem, and finding the weak point of the system.

In this paper, new electricity model that considers the price of electricity and power factor of the load is presented. While conventional load model, which is demand function of electricity, uses the price of real and reactive power as the independent variable of the demand function, this new load model uses price of real power and penalty factor according to the power factor for the calculation of amount of electricity demand.

수요함수 모델링의 중요성을 인식하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 Baughman과 Siddiqi는 최초로 가격에 대한 무효전력 수요를 모델링한 성과를 이루기도 하였다[1-3]. 그러나 현실적인 수리적 모델이 아니었으며, 전력시장의 운영 경험이 짧아 자료 취득의 어려움이 있어 구체적인 모델로의 확장이 이루어지지 않았다. 또한 다른 연구들 대부분의 수요모델도 가격에 대한 전력수요의 민감도를 정밀하게 예측 및 산정하지 못하였고, 무효전력 가격에 대한 부하의 응답 특성을 반영하지 못하고 있는 실정이다[4].

따라서 본 논문에서는 현재까지 제안된 여러 모델들의 특성을 면밀히 검토하여, 기존의 가격에 대한 수요함수들이 반영하지 않은 무효전력 수요의 가격에 따른 응답성을 일정역률 제약으로 반영하여 모델링하고자 한다. 즉, 계통 전체의 신뢰도를 만족시키기 위해 각 모선에 따라 주어진 일정범위의 역률을 유지해야 한다는 제약조건을 포함한 모델이다. 또한 소비자에게 조상설비 설치의 권리를 부여함으로써 자신에게 유리한 대안을 선택할 수 있도록 한다.

2. 기존 부하모형의 고찰

1. 서 론

현재 세계 각국에서 진행중인 전력산업 구조개편의 목적은 경쟁을 통한 경영효율성 달성과 전기요금의 인하로 요약할 수 있으며, 이것은 전력산업에 경쟁과 선택이라는 시장경제원리를 적용함으로써 이루어질 수 있을 것이다. 즉, 소비자는 자율적인 선택권으로 인한, 공급자는 기술발전을 통한 이익 실현으로 전체 사회효용을 극대화하는 것이다. 따라서 전기소비자는 저렴한 가격의 전기를 공급받기를 원할 것이고 전기공급자는 품질향상으로 인한 원가절감으로 더 많은 전기의 판매를 위해 노력할 것이다.

본 논문에서는 소비자의 자율적인 선택에 초점을 맞추어 시장원리에 의해 변동하는 전기요금에 대한 소비자의 행동을 대표하는 전력수요를 모델링하고자 한다. 현재 국내 전력시장의 경우 푸울거래와 쌍방계약에 의한 거래를 혼합한 형태로 전력을 거래하는 체제를 구축하려 하고 있다. 시장에서 현물가격체제에 의해 전력의 시장가격이 정해지고, 일반 상품과 같이 가격에 따라 수요가 변동하는 특성을 띠게 된다. 즉, 전기도 일반상품과 같이 수요함수를 모델링할 수 있다면 계통운영자의 경우 수요예측, 생산자의 경우 최적의 공급량, 소비자의 경우 자신의 최적 소비량을 결정하는 데에 구체적인 정보를 제공할 수 있을 것이다.

우리보다 앞서 구조개편을 시행한 외국에서는 일찍이

전기요금의 변화에 따라 변동하는 전력부하모형을 모델링하기 위해 이미 전력산업이 경쟁체제로 전환되어 전력의 가격이 시장에서 현물가격체제에 의해 결정되는 외국의 사례를 검토하여 새로운 전력부하모형의 수리적 모델을 제안하고자 한다.

이미 1982년 Caramanis, Bohn, Schweppe 등은 전기요금이 현물가격으로 시시각각 변화하는 상황에서 소비자의 행동을 예견한 바 있다[5]. 즉, 전기 소비자는 전력의 가격이 높은 시간대에서는 전기 사용을 최소화하려 할 것이고, 낮은 시간대에서의 효율적인 전기사용 계획을 마련할 것이다. 이러한 소비자의 행동을 기반으로, 전력수요의 예측, 최적의 공급량 결정 등을 효율적으로 수행하기 위해 전기요금에 따라 변동하는 수요함수의 수리적 모델의 필요성이 대두되었다.

이에 따라 Baughman, Siddiqi 등은 1991년 최초로 모선별 유효전력 수요와 무효전력 수요를 시스템 한계비용과 가격에 대한 수요 탄력성의 함수로 모형화 하였다[1]. 수식적 표현은 식 (1),(2)와 같다.

$$P_{d_i} = D_{p_i}(MC_{p_i})^{E_p}(MC_{q_i})^{E_w} \tag{1}$$

$$Q_{d_i} = D_{q_i}(MC_{p_i})^{E_p}(MC_{q_i})^{E_w} \tag{2}$$

단, MC_{p_i} , MC_{q_i} : i 모선 유효·무효전력의 한계비용

- E_{p_i}, E_{q_i} : i 모선의 유·무효전력 수요의 탄력성
- $E_{p_{q_i}}, E_{q_{p_i}}$: i 모선의 유·무효전력의 교차 탄력성
- D_{p_i}, D_{q_i} : 단위통일을 위한 유·무효전력 수요

이 모형은 유효전력과 무효전력의 수요를 상호 독립적인 관계로 표현하였다. 그러나 전력계통에서 실제로 소비되는 유효전력과 에너지 총·방전에 관계되는 순환에너지 개념인 무효전력은 서로 독립적이 아닌 중속적인 관계를 지니고 있다. 이에 대한 내용과 수식은 3장에서 자세히 살펴볼 것이다. 또한 무효전력을 조상설비에 의해서만 생산된다는 상황에서 모형을 구성하였기에 실제 상황과는 약간 동떨어진 모형이다.

그래서 Baughman, Siddiqi 등의 1995년 모형은 식 (1), (2)의 모형보다 변수들의 관계가 구체적이지 못한 형태의 모형으로 회귀하였다[2]. 이 모형은 1991년 모형과는 달리 유효전력과 무효전력의 관계를 상호 독립적인 관계가 아닌, 각 모선에서의 수요가 유효전력과 무효전력 가격에 영향을 받는 의해 공동하는 형태의 함수로 표현되었다. 덧붙여, 각 모선의 유효전력 및 무효전력의 수요는 각 전력의 가격과 날씨에 대한 불확실 및 경제학적 외생변수를 나타내는 인자에 의해 결정된다고 보았다. 이 때의 모형에서 날씨에 대한 불확실성 인자를 제외시킨 함수가 1997년 발표된 모형이다[3]. 수식적 표현은 다음과 같다.

$$F_i(P_i(p_i), Q_i(q_i)) \quad (3)$$

- 단, P_i : i 모선 수용가의 유효전력 부하
- Q_i : i 모선 수용가의 무효전력 부하
- p_i : i 모선 수용가의 시간 t 에서 유효전력 가격
- q_i : i 모선 수용가의 시간 t 에서 무효전력 가격

- 이상 세 모형의 흐름을 요약해보면 다음과 같다.
- 각 모선에서의 전력 수요는 가격에 따라 변화
 - 모선에서의 전력수요란 유효전력 뿐만 아니라 무효전력도 포함한다.
 - 유효전력과 무효전력은 상호 독립적인 것이 아니라 복소전력의 요소들로서 밀접한 관계를 지닌다.

위와 같은 모형들 이외에도 1992년 Baughman과 Lee에 의해 발표된 모형이 있다[4]. 이 모형은 기준이 되는 가격과 새롭게 갱신된 가격의 비율과 소비자의 민감도에 의한 지수함수 형태로 제안되었다. 그러나 이 모형은 Siddiqi의 세 가지 모형과는 달리 수요함수에 무효전력을 반영시키지 않으므로 역시 현실과는 거리가 존재한다. 또한 소비자의 민감도 산정의 구체적인 방법론이 제시되지 않은 한계가 있다.

본 논문에서는 이상의 연구결과들을 검토한 결과를 바탕으로 가격에 대해 공동하는 새로운 전력부하모형을 제안한다. 새로이 제안하는 모형은 각 모선에서의 전력수요가 전력의 가격, 역률 등에 의해 공동하는 모형으로서 각 모선의 수용가가 역률을 일정하게 유지하지 못할 경우 추가 비용을 지불하는 것을 고려한다.

3. 새로운 전력 부하모형

본 장에서는 전기요금의 변동에 따라 전력수요가 변동

하는 수요함수를 새로이 정립하고자 한다. 전력산업에 경쟁이 도입되면 전기도 일반상품의 경우와 마찬가지로 그림 1과 같이 가격이 높으면 수요가 감소하고, 가격이 낮아지면 증가하는 경향을 보일 것이다. 그러나 본 논문에서는 경쟁체제가 아닌 현 수직독점체제에서 전기요금 이 인상 혹은 인하되는 상황을 가정하고 모형을 수립하기로 한다. 향후 경쟁체제로 전환되더라도 가격이 변화하는 시간간격을 단기간(1시간, 혹은 1일)으로 고려해 준다면 실용적인 모델로 확장될 것으로 사료된다.

식(4)는 i 모선에서의 전력수요가 유효전력 및 무효전력의 가격, 일정범위의 역률 유지를 위한 부가금에 영향을 받는 함수이다. 이 식은 부하의 공동에 대한 가격의 변화를 살펴보는 데 중요한 정보가 될 것이다.

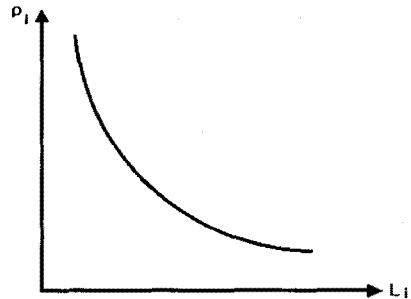


그림 1. 수요함수

$$L_{d_i} = f_D(\rho_i, pf_i, A_{pf}) \quad (4)$$

- 단, L_{d_i} : i 모선에서의 전력 수요 (kWh/h)
- ρ_i : i 모선에서의 전력 가격 [원/kWh]
- pf_i : i 모선에서의 부하 역률
- A_{pf} : 일정역률 유지를 위한 부가금 [원/kvar]

3.1 무효전력 수요에 대한 고찰

무효전력은 피상전력과 유효전력, 두 양의 차이를 나타내기 위해 파생한 실제 물리량이 아닌 개념적인 것으로, 실제 일을 하는 에너지는 아니다. 무효전력과 유효전력 간의 관계는 피상전력과 유효전력사이의 비율을 나타내는 역률(power factor)로서 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{di} = \frac{pf_i}{\sqrt{1 - pf_i^2}} Q_{di} \quad (5)$$

- 단, P_{di} : i 모선에서 유효전력 수요 (kW)
- Q_{di} : i 모선에서 무효전력 수요 (kvar)

식(5)에서와 같이 유효전력과 무효전력은 상호 독립적이 아닌 역률에 의해 밀접한 관계를 가지고 있다.

수용가의 경우 역률을 일정 범위내에서 유지하지 못한다면 전원은 실제 소비되는 에너지 외에도 불필요한 순환에너지인 무효전력을 더 공급해야 하는 부담을 진다. 또한 모선전압의 불안정도 야기하게 되어 결국에는 전체 시스템의 신뢰도 및 안정도에 영향을 미칠 수도 있다.

따라서 역률을 일정 범위내에서 유지하지 못하는 수용가에게는 역률조정에 대한 발전비용을 추가로 가격에 반영시켜야 할 것이다. 즉, 역률이 낮은 모선의 수용가는

사용하는 유효전력의 양에 비해 많은 양의 무효전력을 필요로 하는 수용가인데, 이 무효전력을 공급받는 추가 비용을 부담해야 할 것이고, 역률이 일정범위에서 유지되는 모선의 수용가는 추가부담금이 없을 것이다. 이것을 가격에 대한 수요의 측면에서 본다면, 무효전력에 의한 전력 가격의 상승시 수요감소를 야기하게 될 것이고, 추가 부담금이 없다면 무효전력에 의한 수요의 변동은 없을 것이다.

식(6)은 수용가의 역률이 일정범위에서 벗어난 경우 추가로 부담해야 하는 부가금에 대한 식이다. 즉, 모선에서 무효전력 수요에 변동이 있어, 역률의 변화를 일으켰다면 식(6)과 같이 역률 조정을 위한 전체 시스템의 발전비용 변화를 발생시킨다.

$$A_{pf} = \alpha \frac{\partial C(P_g)}{\partial Q_d} \quad (6)$$

단, $C(P_g)$: 시스템 발전비용 [원/kvar]
 α : scaling factor

3.2 역률 유지를 위한 소비자의 선택

경제적인 측면에서, 품질은 같고, 서로 대체성이 있는 두 상품이 있다면 소비자는 당연히 저렴한 가격의 상품을 구입하게 될 것이다. 즉, 일정 범위내에서 역률을 조정하는 것도 발전기의 진상 혹은 지상운전으로 달성될 수 있지만, 소비자가 직접 조상설비를 설치·운영함으로써 역률을 유지할 수도 있을 것이다. 만약 수용가가 일정 범위에서 역률을 유지하지 못한다면 전기에너지를 계속 공급받기 위해서는 다음 두 가지 대안 중 자신에게 유리한 한가지를 선택하여야 할 것이다.

- 일정역률 유지를 위한 자가 조상설비 설치
- 일정역률을 유지하지 못한 경우 추가 부담금 지불

3.2.1 조상설비의 투자단가

식(7)은 조상설비의 투자비율(I_{gq})을 설비용량(CP_{gq})로 나눈 평균 투자단가를 연가화한 비용으로서, 소비자는 이 비용과 추가 부담금 중 저렴한 대안을 선택할 것이다. 단, 잔존가치는 없다고 가정한다. 또한, 이러한 조상설비의 운영비용은 없다.

$$AEC_{gq} = \frac{I_{gq}}{CP_{gq}} (A/P, i\%, N) \quad (7)$$

단, AEC_{gq} : 조상설비 투자단가의 연간등가
 I_{gq} : 조상설비의 투자비
 CP_{gq} : 조상설비 용량
 i : 이자율
 N : 조상설비의 수명

3.2.2 자가 조상설비 설치 결정

수용가가 일정 역률을 유지하지 못한 경우 식(6)과 (7)의 비용 중 저렴한 대안을 선택할 것이다. 다음 식(8)은 소비자의 선택기준을 나타낸 것이다.

$$\begin{cases} A_{pf} > AEC_{gq} & ; \text{조상설비설치} \\ A_{pf} < AEC_{gq} & ; \text{추가부담금지불} \end{cases} \quad (8)$$

단, 수용가의 역률이 일정범위에서 유지되고 있는 경

우라면 추가부담금은 없으며, 조상설비의 설치도 필요없게 된다.

4. 결론 및 향후 연구계획

본 논문은 가격변화에 응동하는 전력부하모형의 수리적 모델의 외국사례 고찰과 함께 새로운 모형의 개발 방법을 제안하였다. 제안한 모형은 현재 전력산업체제의 가격구조하에서 전력수요를 전력의 가격, 역률, 일정 역률 유지를 위한 부가금의 함수로 나타내었으며, 수용가가 일정 역률을 유지하지 못할 경우 부가금 지불과 자가 조상설비의 설치 중 스스로 선택할 수 있는 방안을 마련하였다. 그리고 앞으로 수요함수의 독립변수들 간의 구체적인 관계를 수식화하는 연구를 진행할 계획이다. 향후의 구체적인 연구계획은 다음과 같다.

- 수요모형의 체계적 수식화
- 개발된 수리모형의 검증용 위한 컴퓨터 시뮬레이션
- 자가 조상설비의 설치 제도와 투자비 계산의 구체적인 방안 개발

※ 본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 수행되었음.

[참고문헌]

- [1] Martin L. Baughman, Shams N. Siddiqi, "Real-Time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Result", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.6, No.1, pp. 23-29, 1991.2
- [2] Martin L. Baughman, Shams N. Siddiqi, "Reliability Differentiated Pricing of Spinning Reserve", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.10, No.3, pp. 1211-1218, 1995. 8
- [3] Martin L. Baughman, Shams N. Siddiqi, Jay W. Zarnikau, "Advanced Pricing In Electrical Systems Part I : Theory", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.12, No.1, pp.489-495, 1997. 2
- [4] M.C. Caramanis, R.E. Bohn, F.C. Schweppe, "Optimal Spot Pricing: Practice and Theory", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No.9, pp. 3234-3245, 1991. 2
- [5] Martin L. Baughman, Walter L. Lee, "A Monte Carlo Model for Calculating Spot Market Prices of Electricity", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.7, No.2, pp. 584-590, 1992. 5
- [6] J.Y. Choi et. al., "Optimal Real Time Pricing of Real and Reactive powers", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.13, No.4, pp. 1226-1231, 1998. 11
- [7] Shanyou Hao, Alex Papalexopoulos, "Reactive Power Pricing and Management", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.12, No.1, pp. 95-104, 1997. 2