

전력산업 경쟁도입에 따른 요금변화에 대한 부하모델수립

한만형* 김정훈* 최준영**
* 홍익대학교 ** 전주대학교

A Study on Load Modeling with respect to the Change of Price in Competitive Electricity Market

Man-Hyung Han* Jung-Hoon Kim* Joon-Young Choi**
* Hong-Ik University ** Jeonju University

Abstract - The current worldwide electricity market introduced competition, which is breaking up the monopoly structure and also enforcing phased structural reform in South Korea. The change of the electricity charge from cost base to price base due to the introduction of the electricity market competition causes consumer to choose a variety of charge schemes and a portion of loads to be affected by this change. Therefore, in order to find a mathematical model of the sensitively-responding-to-price loads and reflect this to the DSM demand management, the price-sensitive load model is needed. Thus, this paper first proposes the composite price-sensitive load model that is expressed as a function of price, presents the methodology to estimate price-sensitive load model at each bus by bus load compositions.

1. 서론

최근 전력산업은 전 세계적으로 수직적 통합구조가 해체되고, 각 나라의 실정에 맞추어 풀(Pool)모형, 쌍방계약(bilateral contract/wheeling) 모형의, 크게 두 가지 형태로 발전·송전·배전의 각 부분에 경쟁이 도입되고 있는 실정이다. 우리 나라도 단계적으로 이를 도입, 2009년 이후에는 독점체제에서 완전 경쟁체제로 전력산업구조를 전환하게 될 예정이다.

이에 따라 전력요금은 입찰을 통하여 결정되므로 비용기준에서 가격기준으로 바뀌게 되어 소비자는 다양한 요금의 전력을 구입하게 됨에 따라 과거와 달리 요금에 대한 관심이 올라가게 되어 요금의 영향을 받게 된다.

이와 같은 현상을 효과적으로 해석하고 전력산업 전반에 오게 될 변화에 효율적으로 대처하는 전력수요관리 정책 등에 반영하기 위해서 요금에 따른 부하모형을 확립할 필요가 있다. 또한 D.Shirmohammadi 등이 발표한 논문[1]에서 ISO(Independent System Operator)는 계통운용비용을 최소화하기 위해서는 요금부하모델을 제약조건으로 고려하고 있다. 이러한 요금부하모델에 대한 본격적인 연구는 아직 수행되지 않았고 다만 Baughman, Siddiqi 등에 의해 지수함수모형[2,3]이 제안되어 있지만 현실적인 문제가 있어 새로운 전력부하모형이 제안되고 있는 실정이다[4,5].

따라서 본 논문은 전력이 시장에서 거래되는 상황을 반영하게 될 가격에 따른 모션별 부하모델 수립을 위한 구조를 제안하고 다항식 형태의 부하 구성성분별 요금부하모델(price-sensitive load model)을 추정하는 알고리즘을 제시한다. 기존 지수 모델과는 달리 다항식 모형이므로 부하의 구성비를 이용하여 간단한 축약과정을 통하여 각 모션별 요금부하모델을 수립하는 방법론을 제시한다.

2. 요금부하모델 구조

2.1 요금부하모델 수립의 개요

부하의 구성비를 이미 제안된 관련 연구[6,7]를 통해 얻을 수 있으므로 이를 이용하여 요금부하모델을 수립할 수 있는 그림 1과 같은 구조를 제안한다.

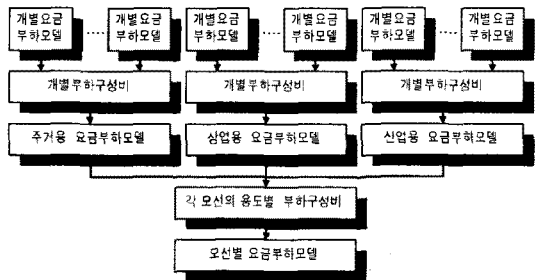


그림 1. 요금부하모델의 수립 흐름도

어떠한 개별 요금부하모델이 확립되어 있을 때, 각 용도의 부하에 속하는 개별부하의 구성비가 주어져 있으므로 이를 가중하여 개별부하모델을 더하면 용도별 모델이 산출되며 또한 각 모션은 용도별 부하들로 구성되어 있으므로 이를 반영하면 모션별 요금부하모델을 구할 수 있다. 이와 같은 구조는 모션별 요금부하 모델을 구하는 것이나, 구조를 바꾸면 지역별, 계절별, 일형식별, 시간별 부하모델 등 어떠한 형태로도 변환하여 활용이 가능하게 된다.

2.2 다항식 개별 요금부하모델

앞의 제안된 구조로 효율적인 요금부하모델을 수립하기 위해서는 이 구조에 알맞은 개별 부하요금모델이 필요하다. 이를 위하여, 전력계통의 안정도해석에 주로 사용하기 위하여 수립되었던 전압과 주파수의 변화에 따른 유·무효전력의 변화를 모델화한 부하모델의 변천과정을 살펴보면, 1973년 IEEE committee에서 지수함수모델을 제안하였고[8], 1979년 UTA[9]와 1987년 GE사[10]에서는 초월함수와 지수함수가 일부 섞인 다항식 형태의 모델을 제시하였다. 그 후 부하모델링의 연구가 본격화되어 우리 나라에서는 1990년에 일관된 5차 다항식 부하모델을 실험을 통하여 부하의 용도특성을 정확히 반영하고 있음을 보였고 자료변환 및 활용이 용이하다는 것이 입증되어[11], 변화된 부하구성 등을 반영하여 1999년부터 같은 모델을 가지고 다시 연구되고 있다[12].

기존의 요금부하모델은, Baughman, Siddiqi 등이 제안한 것이나 캘리포니아 전력거래소(California Power Exchange, CAL PX)에서의 시장 요금과 거래된 전력량과의 관계를 근사적으로 나타낸 것이[13] 모두 지수함수이다. 이 지수함수는 전압-주파수 모델에서와 같이, 그림 1과 같은 구조에 적합하지 못하기 때문에

본 논문에서는 각 부하의 종류별로 전력요금에 따라 변화하는 부하를 5차 다항식 형태의 개별 요금부하모델로 서 제안한다.

$$L_i(P_i) = k_0 + k_1 P_i + k_2 P_i^2 + k_3 P_i^3 + k_4 P_i^4 + k_5 P_i^5 \quad (1)$$

여기서, $L_i(P_i)$: 요금부하모델로 표현된 개별부하 i

P_i : t 시간의 요금

$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$: 부하 i 의 특성계수

이러한 5차 다항식모델은 일정 시간대 일정 종류의 부하는 동일하다고 보기 때문에 요금에 따른 특정부하의 특성을 일관되게 보여줄 수 있는 장점을 가지고 있고 부하구성비를 가중하면 단순히 계수만 합하면 되므로 모델 수렴이 용이하다.

2.3 모션별 요금 부하모델로의 확장

경쟁시장에서는 입찰이 모션단위로 일어나므로, (1)식 으로 표현된 개별부하모델을 용도별 개별 부하의 구성비 로써 용도별 요금부하모델을 구한 후, 모션별 용도별 부 하구성비를 이용하여 모션별 요금부하모델을 찾아낼 수 있다. 이와 같은 과정을 수식으로 정식화하면 다음과 같 다.

$$L^b(P_i) = \sum_r \sum_j C_r^b C_j^i L^i(P_i) \quad (2)$$

여기서, $L^b(P_i)$: 모션 b 에서의 요금부하모델

C_j^b : 모션 b 에서의 용도별 부하구성비

C_r^i : 용도 r 에서의 개별 부하구성비

b, r : 모션, 용도

이를 보다 더 확장한다면 지역(area, zone)별, 전국 에 대한 요금모델의 수립까지도 가능할 것이다.

3. 요금부하모델 추정 알고리즘

개별 요금부하모델의 계수를 구하기 위하여 얻을 수 있는 자료인 전력시장이 이미 구조개편 된 나라에서의 각 발전·배전사업자의 연간 입찰자료와 수용가측의 요 금에 대한 수요탄력성 등을 분석해보고, 이를 이용하는 추정 알고리즘을 모색한다.

3.1 경쟁 전력시장의 자료

우리 나라의 전기요금은 그 동안 독점사업자에 대한 규제목적과 물가 등 경제전반에 미치는 영향을 감안하여 상당히 저렴한 수준으로 유지된 정책적 요금이었다. 따 라서 이러한 요금 체제하에서 요금의 변화에 따른 부하 의 변화에 대한 연구의 결과는 문제가 있고[14] 경쟁도 입의 초기단계에는 경쟁이행과정에서 과도기적으로 소요 되는 추가적 비용이 요금에 반영되었으나 전력산업이 완 전 자유경쟁체제로 전환된 이후에는 수요와 공급에 의한 시장원리에 따라 전력의 가격이 정해지게 될 것이다.

그러므로 제안한 5차 다항식 요금부하모델을 확립하 기 위한 개별부하 각각의 특성계수를 산정하기 위해서 이미 전력산업에 경쟁체제를 도입하여 운영하고 있는 각 국가들, 영국, 노르웨이, 미국의 캘리포니아주 등의 실 제 입찰 통계자료(historical data)를 활용할 수 있다.

전력의 시장가격은 주식과 같이 각 사업자들의 게임 등으로 인해 발생하게 되는 불확실성(volatility)이 존 재할 것이나 이러한 오차를 백색잡음(white noise)으로 본다면 충분히 큰 모질단을 갖는 자료에서 이들의 총합 은 0이 되므로 평균적인 관점에서 무시할 수 있다[13]. 즉, 실제 가격을 식(1)(2)에 대입하여 계산된 부하는 실제부하와 불확실성에 의한 차이가 있지만 차이나는 값

들의 합은 0으로 볼 수 있다는 것을 의미한다.

3.2 가격에 대한 수요탄력성 자료

각 국에서는 전력 요금에 대한 부하의 수요탄력성을 얻기 위하여 연구를 계속 진행하여 왔다. 따라서 계수 산정을 위한 최적화 알고리즘의 제약조건으로 수요탄력 성(price elasticity of demand)[3,14]을 이용할 수 있다.

개별 부하 i 의 수요탄력성은 다음과 같이 일반적으로 표시할 수 있다.

$$e_i = - \frac{\text{수요량의 변화율}}{\text{전력요금의 변화율}} = \lim_{P \rightarrow 0} \left[- \frac{\Delta L/L_i(P)}{\Delta P/P} \right] \quad (3)$$

현재 우리가 얻을 수 있는 관련자료는 전력회사의 용 도별 전력판매량 자료 등을 가지고 이루어지는 용도별 수요탄력성이므로[14] 지역별, 계절별, 일형식별, 시간 별 수요탄력성이 아닌, 시간대별로 합한 개념이기 때문 에 본 논문에서 사용하게 되는 가격에 따른 공급 및 수 요량 등의 연간 자료를 반영한다. 이를 위해, 수요탄력 성이 요금에 대한 부하의 변화율을 의미하므로 요금-부 하의 그래프에서의 기울기, 즉 제안된 요금부하모델의 1 계 미분과 같다는 점을 이용하여 다음과 같이 용도별 수 요탄력성 e_r 을 정의할 수 있다.

$$e_r = \frac{1}{n_k n_l n_m n_h} \sum_k \sum_l \sum_m \sum_h \frac{dL_{k,l,m}(P_{ij})}{dP_{ij}} \quad (4)$$

여기서, P_{ij} : j 일 t 시간의 시장가격

$L_{k,l,m}(P_{ij})$: P_{ij} 에서 지역별, 계절별, 일형식별

로 요금부하모델로써 추정된 부하

n_k, n_l, n_m, n_h : 지역별, 계절별, 일형식별, 시

간별로 분류된 개수

k, l, m, h : 지역, 계절, 일형식, 시간

3.3 최적화 기법을 이용한 계수추정

요금부하모델의 계수를 찾기 위한 알고리즘은 편차 제 곱의 총합의 최소화를 수행함으로써 변수를 결정하게 되 는 최적화 기법에 의해 다음과 같이 수식적으로 정식화 할 수 있다.

$$\text{Min. } \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m \sum_h [L_{k,l,m}^{actual}(P_{ij}) - L_{k,l,m}(P_{ij})]^2 \quad (5)$$

$$j = 0, 1, \dots, n_d$$

subject to : $e_r^{\min} \leq e_r \leq e_r^{\max}$, $r = 1, 2, \dots, n_r$

여기서, $L_{k,l,m}^{actual}(P_{ij})$: P_{ij} 에서 계절별, 일형식별, 지역별

로 실제 모션별 전력부하

n_d : 지역별, 계절별, 일형식별로 사용되는 일

별 자료의 개수

n_r : 용도별 개수

즉, 가격에 대한 용도별 수요탄력성 조건을 만족하면 서, 어떤 시점의 시장가격에서 실제 전력부하와 가장 가 까운, 제안된 요금부하모델을 통해 얻어지는 부하의 계 수를 찾는 방법이다. 제약조건으로 부과된 수요탄력성은 앞서 언급했듯이 시간대별 수요탄력성이 아닌 평균적인 개념이므로 어느 정도의 오차가 존재하게 되고 또한 계 산된 수요탄력성 자체가 오차를 포함하고 있으므로 유 의 수준에 따라 그 범위가 결정되게 될 것이다[14].

3.4 계수 추정 흐름도

제안된 추정 알고리즘을 이용하여 각 지역별, 계절별, 일형식별, 시간별 요금부하모델을 결정할 수 있고, 여기 에 모션 부하구성비를 이용하여 각 모션의 용도별 요금

부하모형을 산출하고 이를 개별 부하구성비의 비율대로 분리하면 계절별, 일형식별, 지역별, 시간별, 개별 요금 부하모델의 각 계수를 그림 2와 같은 흐름으로 추정할 수 있다.

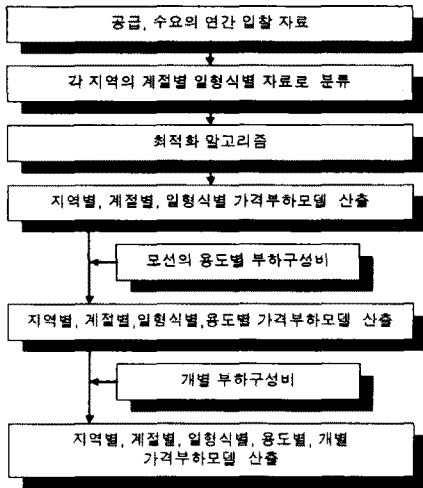


그림 2. 계수 추정 흐름도

4. 사례 연구

본 사례연구에서는 계수 추정을 위한 기본 자료로 캘리포니아 전력거래소(California Power Exchange, CAL PX)의 day-ahead market supply and demand curve data와 기존의 수요탄력성 연구[14]의 결과를 사용하였으며, 용도별, 개별 부하구성비는 캘리포니아가 있는 미국 서부지역의 연간 에너지구성비[10]를 근거로 하였고, 계수추정 계산은 MATLAB 프로그램의 최적화 내장모듈인 CONSTR를 이용하였다.

상업용 겨울 일요일의 조명부하모델 추정에 있어서 계산의 편의를 위해 제안된 부하모델을 2차 다항식으로, 겨울 일요일의 용도별·개별 부하구성비와 계수추정의 근거자료의 개수는 표 1, 2와 같이 단순화하였으며, 수요탄력성의 유의수준은 5%로 계산하였다.

표 1. 겨울 일요일 부하구성비

용도별	주거용	상업용	산업용
구성비(%)	34	29	37
개별(주거용)	조명	취사	기타
구성비(%)	10	35	55
개별(상업용)	조명	난방	기타
구성비(%)	41	36	23
개별(산업용)	조명	동력	기타
구성비(%)	15	75	10

표 2. day-ahead market s/d curve data

날짜	1월2일	1월9일	1월16일	1월23일	1월30일
P_{θ}	24	26	27	28.5	26.5
$L_{k, l, m}^{actual}(P_{\theta})$	17600	17350	18800	18500	19000

표 3. 요금부하모델 계수 추정결과

분류	k_0	k_1	k_2
겨울 일요일	-1.0972	2.1288	-0.0315
상업용	-0.3182	0.6174	-0.0091
조명	-0.1305	0.2531	-0.0037

5. 결 론

본 연구는 전력이 시장에서 거래되는 상황을 반영하게 될 가격에 따른 모션별 부하모델 수립을 위한 구조를 제안하고 다항식 형태의 부하 구성성분별 요금부하모델을 추정하는 알고리즘을 제시하였다.

본 연구를 이용하여 구체적인 요금부하모델이 제시된다면 요금제에 대한 전력부하의 영향분석이 가능해져 미래의 부하특성을 유도할 수 있는 정책수립이 가능하다. 또한 DSM에 활용할 수 있는 구체적인 시험모델을 제시할 수 있으므로 경제적인 전기공급으로서 전력 요금의 인하를 유도하며 양질의 전기를 공급하는 전력 수급을 가져올 것이다.

※ 본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] D.Shirmohammadi, et. al, "Transmission Dispatch and Congestion Management in the Emerging Energy Market Structure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.4, pp1466-1474, Nov.1998
- [2] M. L. Baughman, W.W. Lee, "A Monte Carlo Model For Calculating Spot Market Prices of Electricity", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.7, No.2, pp.584-590, May 1992
- [3] M. L. Baughman, S. N. Siddiqi, "Real-Time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.6, No.1, pp.23-29, Feb.1991
- [4] J.Y. Choi, S.H. Rim, J.K. Park, "Optimal Real Time Pricing of Real and Reactive Powers", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.13, No.4, pp. 1226-1231, 1998.11
- [5] 김주락, 최준영, 김정훈, "새로운 전력 부하모형", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2000.7
- [6] J.Y. Lim, J.H. Kim, J.O. Kim, Chanan Singh, "Application of Expert System to Load Composition Rate Estimation on Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No.3, pp.1137-1143, Nov.1999
- [7] 박시우, 김기동, 윤용범, 추진부, "한전계통의 부하구성비 분석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제C권, pp. 1478-1480, 1999.7
- [8] IEEE Commit Report, "System Load Dynamics", IEEE Trans., Vol. PAS-92, No.2, pp.600-609 March/April 1973
- [9] University of Texas, Arlington, "Determining Load Characteristics for Transient Performance," EPRI Report, EL-849, 1979
- [10] General Electric Co., "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies," EPRI Report, EL-5003, Jan.1987
- [11] 한국전력공사 기술연구원, "전력계통 안정도 해석을 위한 적정 부하모델에 대한 연구", 1990.10
- [12] 한국전력공사 전력연구원, "전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정 부하모델에 대한 연구", 1차년도 중간보고서, 2000.2
- [13] Petter Skantze, Marija Ilic, Jeffrey Chapman, "Stochastic Modeling of Electric Power Prices in a Multi-market Environment", IEEE PES winter meeting, Jan.2000
- [14] 에너지경제연구원, "전력수요의 가격탄력성과 요금조정방안", 1996