

시 변화 요금제 하의 공정형 수용가의 최적 전력 사용

°손광명° 홍준희° 최준영° 박종근°

°서울 대학교 전기공학과

Optimal response of process type customer under the electricity spot pricing

K.M. Son J.H. Hong* J.Y. Choi* J.K. Park*

*Dept. of Electrical Eng. Seoul National Univ.

Abstract

Under the electricity spot pricing, a customer can maximize its profit by adjusting its production schedule.

This paper discusses the optimal response of process type customer to the spot pricing. A fast optimization algorithm is proposed. A case study reveals the potential benefits of customer under the electricity spot pricing.

1. 서론

최근 부하 관리의 일환으로 시장 경제의 원리에 입각하여 순간적으로 변화하는 전력 공급 비용을 반영하여 전력 요금을 변화 시킴으로써 수요를 적절히 변화시키려는 시 변화 요금 제도 (Spot Pricing)의 개념이 주목 되기 시작하였다[1]. 순간의 전력 공급 비용으로서, 경제 운용에 따른 한계발전 비용을 토대로 발전기의 기동정지, 발전기의 사고, 송전 선로의 사고 등에 의한 전력공급비용을 반영 하였을때 최적의 시변화 요금을 구성할 수 있으며 종래의 요금 제도 보다 수용가와 공급자측에게 줄 수 있는 잠재 이익이 크다는 것이 밝혀 졌다[2].

시 변화 요금구조로 인한 주요 이익은 다음과 같다.

- * 년간 부하율(annual load factor)이 높아진다.
- * 평균 발전 비용이 감소 한다.
- * 예비비용량을 줄일수 있다.
- * 긴급 사고 발생시 계통의 응답을 개선 할수 있다.
- * 공급자와 수용가의 이익이 증가 한다.

이것은 공급자측과 수용가측의 합의를 전제로 하며, 양측 모두가 만족 할수 있는 요금의 설계가 부하관리의 효과를 좌우 한다.

시변화 요금제 하에서 각 수용가는 주어진 요금 정보로 부터 이익을 극대화 하기 위해 자신의 전력 사용 시간을 조정할 수 있다. 이때, 시변화 요금제의 장점을 활용하기 위하여 수용가는 자신의 생산량과 생산능력등에 따르는 계약 조건을 만족시키면서 높은 요금시간대의 수요를 낮은 요금시간대로 이동시킬수 있는 능력이 요구 된다. 이러한 요구조건을 만족시켜 줄수 있는 수용가로는 다음이 있다.

- * Cycling Air Conditioner, furnaces
- * Operating Self Generation or Cogeneration
- * Re-Scheduling production
- * Using pre-chilled water for Cooling

이러한 수용가들은 각각 독특한 특성을 가지며, 이로 인해 서로 다른 제약조건을 가지고 문제해결 방법도 달라진다. 이에 따라 각 수용가들을 특성에 따라 분류하여 각각의 모델을 제시하는 작업이 진행되었다[5].

본 논문에서는 생산 일정 계획을 조절함으로써 전력 사용 시간을 재조정할 수 있는 공정형(Process Type) 수용가[5]의 모델과 최적화 알고리즘에 대해서 논의한다. [5]에서는 공정형 수용가를 정수 계획법(Integer Programming)으로 정형화 함으로써 문제를 선형화 하였으나 투입되는 공정의 지속 시간이 작은 경우에는 계산 시간이 방대해진다. 본 논문에서는 공정형 수용가의 모델을 비선형으로 보았으며, 이것의 해를 신속히 찾아주는 알고리즘을 개발 하였다.

최적 시 변화 요금의 구성은 본 논문에서 취급하지 않으며 주어졌으므로 가정한다. 이때 모델과 최적화 알고리즘은 시변화 요금 계산 방식이나 시간 간격에 관계 없이 적용 가능하다.

2. 공정형 수용가의 모델

공정형 수용가는 일반적으로, 순서적으로 행해져야 하는 일련의 연속적인 작업을 행하는 형태의 수용가를 말한다. 이것은 대체로 하나 이상의 동작 상태를 가지고 있는 기계류에도 유효하기 때문에 많은 생산 과정에 적용될 수 있다. 이러한 예로는 제조 공장이나 화학 공장이 있다. 공정형 수용가 모델을 정형화 하는데에는 다음의 정보들이 필요하다.

- * 전체 생산 주기에 있어서의 총 생산 요구량.
- * 한 공정의 지속시간.
- * 한 공정에서의 각 단계의 지속 시간과 전력 사용량.

본 논문에서는 다음과 같은 가정을 함으로써 문제를 단순화 하였다.

- 공정형 수용가는 단일 형태의 공정만 운전되며 각 공정은 항상 최대 용량으로 운전 된다. 또한 한 시점에서 하나의 공정만 운전될 수 있으며 여러 공정의 병렬 운전은 고려 되지 않는다. 따라서 일단 하나의 공정이 시작되면 한 공정 지속 시간 내에 다음 공정이 시작될 수 없다.
- 총 생산량은 공정수의 합으로 한다.
- 수용가는 전력 회사로부터 다음 요금 주기의 요금정보를 제공 받는다.
- 다른 모든 외적인 요인은 항상 일정하다고 가정하며, 공정을 이동시키는데 드는 비용, 예를 들어 인건비 변화 등은 무시한다.
- 수용가의 대응으로 인한 수요의 변화는 시 변화 요금을 변화 시키기에는 무시할 수 있을 정도로 작다.

2.1 요금 곡선 (Price Curve)

시 변화 요금은 공급자측에 의해 정해진 일정 시간 간격 마다 갱신되며 각 시간 간격에서의 요금은 일정하다. 공급자측에서 주어지는 요금 정보가 T 번의 요금변화를 가지면 이것이 전체 요금 주기가 된다.

2.2 비용 곡선 (Cost Curve)

전체 요금 주기 T 의 요금이 p(t) 로 주어질때 지속 시간 d 이고 매시간의 전력 사용량이 f(t) 인 공정을 고려할때, 시간 t 에서 시작하는 공정의 총 비용을 C(t) 라 하면 C(t) 는 다음과 같다.

$$C(t) = \sum_{\tau=0}^{d-1} p(t+\tau) f(\tau) \quad (1)$$

주어진 요금 곡선에서, 비용곡선은 공정의 형태에 의해 변화하며, 지속 시간이 1인 공정은 on-off를 자유로이 할 수 있는 단순 수용가형이 된다.

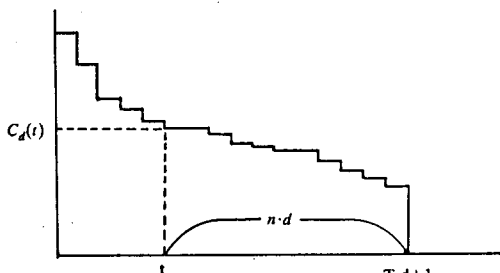


그림 1. 비용 지속 곡선

2.3 비용 지속 곡선 (Cost Duration Curve)

위의 비용 곡선에서 비용의 순서로 차례로 정렬하면 비용 지속 곡선이 구해진다. 이 비용 지속 곡선은 N 개의 공정을 투입 할 때 공정의 지속시간이 d 라면 확보하여야 하는 시간 간격은 (N-1) · d 이다. 비용 지속 곡선에서 비용이 낮은 데 부터 (N-1) · d 번째 값이 C_d 라면 이를 넘지 않는 시간간격을 N개 투입할 수 있음을 알려 준다. 이것으로서 우리는 최적화 문제의 초기 가능해 (initial feasible solution)를 구할 수 있다.

2.4 공정형 수용가의 모델

N 개의 공정을 투입해야 하는 수용가의 총 비용은 공정의 형태와 요금곡선으로 부터 만들어진 비용곡선에서 시간 간격이 d 이상 떨어진 N 개의 시점에서의 비용의 합이 되며, 결정되어야 하는 제어 변수는 N개의 공정의 시작시간 {t_i} 가 된다. 모델은 다음과 같다.

$$C_{total} = \min_{\{t_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^N C(t_i) \right\} \quad (2)$$

$$\text{subject to } t_{i+1} \geq t_i + d \quad i=1, \dots, N-1 \quad (3)$$

여기에서

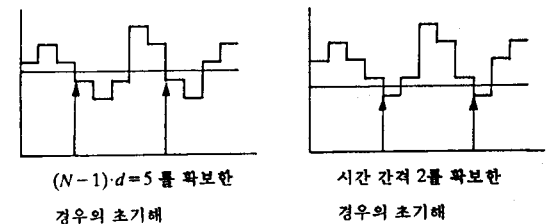
C_{total} : 최적 총 비용

C(t_i) : 시간 t_i 에서의 비용

3. 최적해 탐색 알고리즘

3.1. 초기해의 설정.

비용 지속 곡선으로 부터 필요한 공정수 N 이라 할때 공정의 지속시간을 d 라 하면 비용이 낮은 시점부터 (N-1) · d 만큼의 시간 간격을 확보한다. 이것은 비용 곡선에서 N 개 이상의 공정을 확보할 수 있게 해준다. 비용곡선의 형태에 따라 더 작은 시간간격을 확보하고도 N 개의 공정을 확보할 수 있는 경우가 있다. 이러한 예는 다음과 같이 N=2, d=5 인 경우에서 볼 수 있다.



(N-1) · d = 5 를 확보한 경우의 초기해

시간 간격 2를 확보한 경우의 초기해

그림 2. 초기해의 설정

위와 같이 시간간격 2 를 확보했을 경우가 좀더 최적해에 가까운것을 알 수 있다.

따라서, 비용이 가장 낮은 초기해를 찾는 방법은 다음과 같다.

- 1) step = (N-1) · d 만큼의 시간 간격을 비용 지속 곡선에서 확보한다.
- 2) 최대한 확보할 수 있는 공정수가 N 개 이상이면 step 을 d 만큼 감소시켜 1)로 간다.
- 3) 투입할 수 있는 공정수가 N 이 될때 까지 step 을 1 씩 증가시킨다.
- 4) 이때의 공정 시작 시간을 초기해로서 설정 한다.

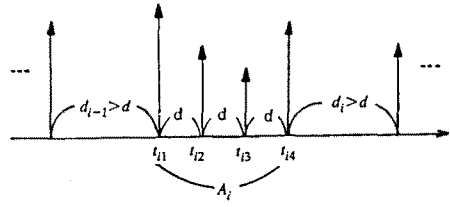


그림 3. 그룹으로 나눈 공정들의 예

이것은 비 선형 최적화 문제에서 초기해를 최적해 가까이 들도록써 탐색의 회수를 줄이며 극소값을 가능한 한 배제하고 최소값을 보장해줄 수 있는 가능성을 증대 시킨다.

3.2. 최적해의 탐색

먼저 주어진 비용곡선에서 하나의 공정을 투입할때를 생각해 보면, 주어진 초기해에서 부터 공정을 좌우로 이동 시킬때의 증분 비용을 각각 $\Delta C_r(t), \Delta C_l(t)$ 라 하면 이들은 다음과 같다.

$$\Delta C_r(t) = C(t+1) - C(t) \tag{4}$$

$$\Delta C_l(t) = C(t-1) - C(t) \tag{5}$$

이때 공정이 하나일 경우에는 공정 지속 시간에 의한 제약 조건이 없으므로 공정의 좌우이동으로 인한 총 증분 비용은 한 공정의 증분 비용과 같다.

그런데 일반적으로 N 개의 공정을 투입할 경우를 생각하면, N 개의 공정이 투입되는 시점은 다음과 같다.

$$\{t_j\} \quad i=1, \dots, N \quad t_{j+1} \geq t_j + d \quad j=1, \dots, N-1 \tag{6}$$

여기에서 초기해로 주어지는 $\{t_i\}$ 는 다음과 같은 그룹으로 나눌 수 있다.

$$A_1 = \{t_{11}, \dots, t_{1, k_1}\} \quad t_{1, i+1} = t_{1, i} + d \quad i=1, \dots, k_1-1$$

$$A_2 = \{t_{21}, \dots, t_{2, k_2}\} \quad t_{2, i+1} = t_{2, i} + d \quad i=1, \dots, k_2-1$$

...

$$A_n = \{t_{n1}, \dots, t_{n, k_n}\} \quad t_{n, i+1} = t_{n, i} + d \quad i=1, \dots, k_n-1$$

$$t_{j+1, 1} > t_{j, k_j} + d \quad j=1, \dots, n-1 \tag{8}$$

$$N = k_1 + \dots + k_n \quad \{t_j\} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\} \tag{9}$$

아래 그림과 같이 그룹 A_i 에 속하는 한 시점 t_{ij} 에 투입된 공정이 제약 조건을 만족하며 좌측, 우측으로 이동할때의 총 증분 비용을 각각 $\Delta C_{total, l}(t_{ij}), \Delta C_{total, r}(t_{ij})$ 라 하면 이들은 다음과 같다.

$$\Delta C_{total, l}(t_{ij}) = \sum_{k=1}^j \Delta C_l(t_{ik}) \tag{10}$$

$$\Delta C_{total, r}(t_{ij}) = \sum_{k=j}^{k_i} \Delta C_r(t_{ik}) \tag{11}$$

최적해를 찾는 방법은 모든 $\{t_{ij}\}$ 에 대하여 위의 식 (10), 식 (11) 을 계산하여 비용감소 효과가 제일 큰 $\{t_{ij}\}$ 를 찾아 그 방향으로 한시간 간격만큼 움직인다. 이와 같은 과정을 더이상 비용감소효과가 없을때까지 반복한다.

3.3 알고리즘과 계산량

간략화된 알고리즘은 다음과 같으며 옆에 주요 계산량을 표시 하였다.

- 1) 비용 곡선을 만든다. (식(1) : MUL -- (N-d+1) · d)
- 2) 비용 지속 곡선을 만든다. (Sorting : ADD -- N · log N)
- 3) , 비용 차분 곡선을 만든다. (ADD -- (N-d+1))
- 4) 초기해를 구한다.
- 5) 최적해를 구한다. (식(10),(11) ADD -- iter · N)

총 계산량은 공정의 수에 비례하며 곱셈은 1)의 비용 곡선을 만들때 뿐이며 N 에 비례한다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 매 시간 마다 요금에 변화 하며 전체 주기가 1주일인 시 변화 요금 구조를 생각 한다. 요금 곡선으로서는 [6]에서 사용한 예를 사용 하였다. 이때 투입되는 공정은 다음과 같다.

$$f(t) = \{2, 5, 3, 2, 1\}, d = 5$$

총 생산량 N = 18

이때의 요금곡선과 비용곡선, 비용지속곡선, 초기해, 그리고 최적해를 다음 그림에 나타 내었다.

최적화 결과 공정의 투입 시점은 다음과 같다.

$$\{t_i\} = \{0, 5, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 49, 54, 73, 78, 97, 102, 107, 126, 145, 150\}$$

이때의 총 비용은 7942 이다.

현재의 요금 구조하에서의 수용가를 생각하면 요금이 시변화 요금의 전체 주기에서의 평균치라고 생각할때 총 비용은 11250.8 이다. 따라서 시 변화 요금제를 도입함으로써 약 30%의 이득을 가져올 수 있음을 알 수 있다.

계산 시간은 IBM PC 에서 3초가 걸렸으며 4 회 iteration 으로 최적해에 도달하였다.

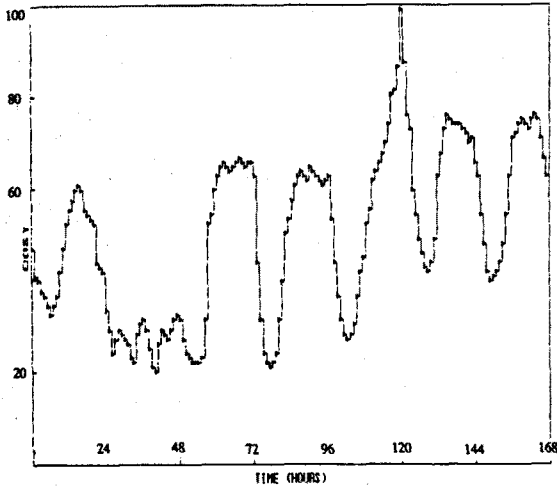


그림 4. 요금 폭선

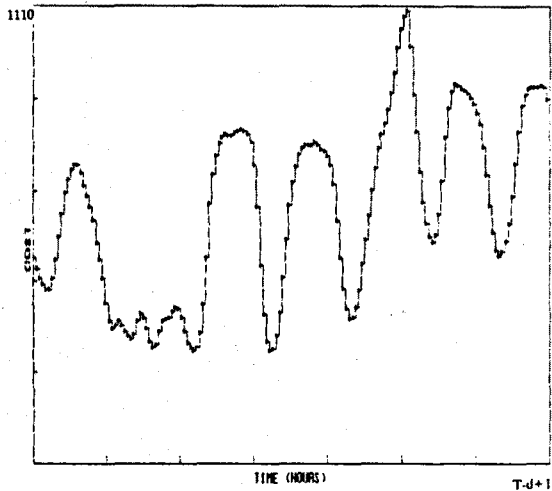


그림 5. 비용 폭선

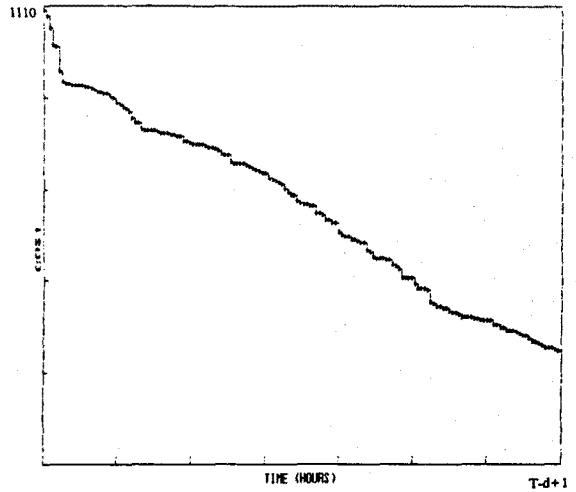


그림 6. 비용 지속 폭선

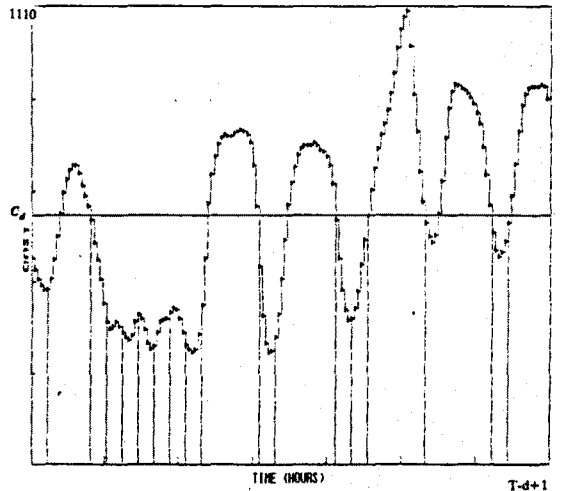


그림 7. 초기 해

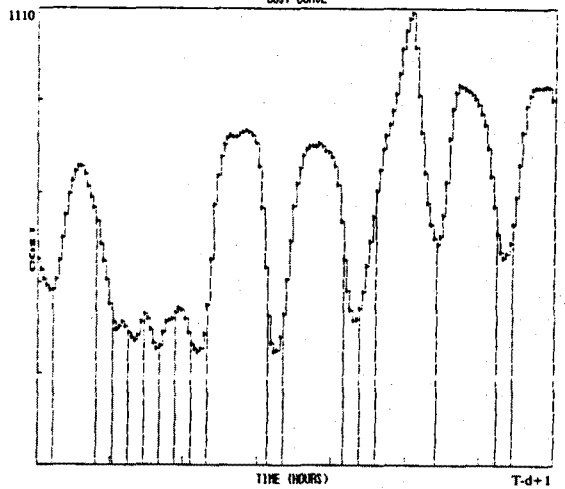


그림 8. 최적 해

5. 결론

본 논문에서는 시 변화 요금제 하에서 공정형 수용가의 최적 전력 사용 전략을 찾는 문제에 있어서 신속히 해를 찾아주는 알고리즘을 제시하였으며 사례연구를 통하여 그것을 입증하였다. 이 알고리즘의 빠른 수렴 특성으로 인해 소 규모의 수용가에서 PC 정도의 계산 속도를 가지고도 신속히 시변화 요금제에 대처해 나갈 수 있다. 또한 시 변화 요금제의 도입시 수용가가 받을 수 있는 이득을 계산하였다.

6. 참고 문헌

- [1] Schweppe, F.C., Tabors, R.D., Kirtley, J.L., Outhred, H.R., Pickel, F.H., and Cox, A.J., "Homeostatic Utility Control", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.99, no.3, 1980.
- [2] Caramanis, M.C., Bohn, R.E., and Schweppe, F.C., "Optimal Spot Pricing : Practice and Theory", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, vol.101, no.9, 1982.
- [3] Schweppe, F.C., Daryanian, B., and Tabors, R.D., "Algorithms For A Spot Price Responding Residential Load Controller", IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, no.2, 1989.
- [4] Tabors, R.D., Schweppe, F.C., and Caramanis, M.C., "Utility Experiences with Real Time Rates", IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, no.2, 1989.
- [5] A.K.David, Y.C.Lee, "Dynamic Tariffs : Theory Of Utility-Consumer Interaction", IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, no.3, 1989.
- [6] Daryanian, B., Bohn, R.E., and Tabors, R.D., "Optimal Demand-Side Response To Electricity Spot Prices For Storage-Type Customers", IEEE Transactions on Power Systems, vol.4, no.3, 1989.