

## Critical Peak Pricing 요금제를 이용한 일반수용가 대상 수요관리의 방법

주지영, 안상호, 윤용태  
서울대학교 전기.컴퓨터공학부

### Demand Response On End-Use Customers Through Critical Peak Pricing

Jhi-Young Joo, Sang-Ho Ahn, Yong Tae Yoon

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National Univ.

**Abstract** - 부하의 가격에 대한 높은 반응성(price-responsiveness)과 이를 이끌어 낼 수 있는 적절한 수요관리(demand response) 정책은 구조 개편된 전력 시장에서 가격 변동성 및 설비에 대한 투자 부족 문제를 효과적으로 해결하는 데 필수적이라는 데에는 많은 연구자들이 동의하고 있다. 그럼에도 불구하고, 특히 전력 사용을 미리 계획하지 않는 소규모 소비자들의 경우, 전력 소비가 본질적으로 매우 탄력적이지 못하므로(inelastic) 가격에 민감한 부하를 이끌어 내기 위한 수요관리 정책은 신중하게 세워져야 한다. 본 논문은 최종 소비자에게 전력을 제공하면서 critical peak pricing(CPP)를 동적으로 관리하고 이러한 수요관리에 대한 인센티브를 가진 개체를 도입함으로써 가격에 민감한 부하를 이끌어 내는 수요 반응의 접근법을 제시할 것이다.

가격에 민감한 부하 및 수요 반응 정책의 문제는 경제적, 경제적, 기술적 측면에서 검토되어야 하는 바이나, 본 논문에서는 기술적 측면 및 경제적인 인센티브의 수식화에 초점을 맞추었다. 정책이 인센티브를 가진 개체의 이용 방정식을 세움으로써 문제를 정식화하였으며, 문제의 최적 해를 구하기 위해 예측 가격을 바탕으로 backward dynamic programming을 통한 swing option 평가 기법을 사용하여 최적의 수요 관리 시점을 구해야 함을 제안하는 바이다.

## 1. 서 론

전력 시장 구조 내에서 수요관리 프로그램의 인센티브를 갖는 주체인 ESP(Energy Service Provider)는 전력 및 관련 서비스를 판매하는 회사, 또는 최종소비자에게 서비스를 제공하는 에너지 사업자로 정의할 수 있다[1]. ESP는 기본적으로 발전, 송전 및 배전 회사와의 계약이나 시장을 통해서 전력을 구매하고 최종 소비자에게 판매하여 이익을 창출한다. 이들은 발전 및 송전회사와 쌍무 계약을 맺거나 전일 혹은 실시간 시장에서 입찰을 함으로써 필요한 수요를 구매한다. 이렇게 구매한 전력을 최종소비자에게 전달하기 위해, ESP는 배전회사에 네트워크 이용료를 지불한다. ESP는 또한 소형열병합발전기와 같은 소용량 발전기를 소유하여 소비자 수요량의 일부를 자가발전 할 수도 있다.

지금까지 시행되고 있는 수동적 수요관리 프로그램(직접부하제어 등)의 가장 큰 문제점 중 하나는 최종소비자에 대한 인센티브가 없다는 점이다. 수동적 수요관리 프로그램은 최종소비자의 삭감될 부하에 대한 입찰을 받지 않으므로 부하 삭감량과 삭감 시간, 그리고 심지어는 정산 금액까지도 계통운영자에 의해 결정된다. 이는 프로그램 참여자 또는 참여 부하량의 부족을 야기할 수 있다. 부하 삭감을 꺼려 하는 소비자들은 설비 고장 관리 등에도 소홀할 것이며, 심지어는 부하 삭감 통보를 받지 않기 위해 통신 장비를 꺼 놓을 수도 있다. 이렇게 최종소비자의 인센티브 결여는 수요관리 프로그램의 목적을 수행하는 데 있어서 실제로 큰 걸림돌이 될 수 있기 때문에 심각한 문제이다.

반면 능동적 수요관리 프로그램(부하 삭감 인센티브 등)의 약점은 프로그램이 복잡하다는 데 있다. 대부분 입찰은 기본적으로 매일 이루어 지므로 부하 삭감을 효율적으로 입찰하는 데는 상당한 비용이 든다. 이는 대부분의 최종소비자, 특히 주거용 소비자들에게는 적절하지 못하므로 이러한 일반 소비자들을 위한 간단한 수요관리 프로그램이 필요하다.

이러한 이유들에서 최종소비자들의 선택과 요구가 실질적으로 반영된 수요관리 프로그램이 향상될 필요가 있다. 본문의 앞 절에서는 critical peak pricing이 무엇인지에 대해 설명하고 이것의 다른 수요관리 프로그램들에 비한 장점을 밝힐 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 Critical Peak Pricing

Critical Peak Pricing(CPP) 제도는 최종소비자에게 적용되는 다양한 요금제 중의 하나이다[2],[3]. 이는 Time-Of-Use(TOU) 요금제[2]와 거의 비슷하나 peak 시간대와 off-peak 시간대의 요금이 TOU보다 조금

더 높다. 대신에, CPP는 매우 짧은 시간(예. 5분) 동안의 “critical peak 시간대”가 있어서 보통 peak 시간대보다 극히 높은 요금이 부과된다. 또한 ESP가 CPP 요금제 사용자에게 부과할 수 있는 critical peak 시간대의 횟수에도 제한이 있으며 보통 한 달 단위에서 요금이 부과된다고 하면, 한 달 이내에 3번 정도의 critical peak 시간대가 적용 가능하다. 또 다른 제한 항목은 연속되는 두 critical peak 시간대 간의 시간차이다. 즉, ESP는 한 번 critical peak 시간대를 적용했다면, 다음 critical peak 시간대를 적용하기까지 최소한 기다려야 하는 시간(예. 24시간)이 있다. 소비자들은 이러한 critical peak 시간대에 전력을 사용하고 매우 높은 요금을 지불할 것인지, 또는 이 짧은 critical peak 시간대 동안에만 전력을 차단할지를 결정할 수 있는 권한을 가진다. CPP의 기능을 관장할 수 있도록 설계된 특수 미터의 default는 critical peak 시간대에 전력을 차단하는 것으로 되어 있으나 만약 CPP 사용자가 어떤 특정 시간에 전력이 차단되는 것을 원하지 않는다면, 그 시간을 특수 미터에 입력시키면 된다. 그러면 메모리를 가진 이 미터는 소비자가 전력 차단을 원치 않는 시간을 기억한다. 만약 그 시간에 ESP가 critical peak 시간대를 통보하고, 이 신호가 미터에 들어오면 미터는 이 신호를 무시하고 전력을 차단하지 않는다. 이러한 설정이 없다면 미터는 자동적으로 critical peak 시간대 동안에 전력을 차단했다가 critical peak 시간대 이후에 다시 켤 것이다. 그러므로 짧은 critical peak 시간대에만 전력을 차단하게 될 것이다.

#### 2.1.1 수요관리 프로그램으로서의 CPP 요금제

전력 수요는 가격에 대해 매우 비탄력적인 것으로 여겨진다. 이는 수요가 가격 변동에 영향을 크게 받지 않음을 의미한다. 전력의 한계비용(marginal cost)은 수요가 증가함에 따라 매우 급증한다. 그러므로, 수요량이 이미 많은 상태에서 계속해서 증가한다면, 가격이 올라가는 속도는 수요량이 적을 때보다 훨씬 빠를 것이다[4].

그러나 소비자들이 CPP 요금제를 사용하면 특별한 상황이 아닌 한 높은 요금 및 미터의 default 설정으로 인해 많은 양의 부하가 삭감될 수 있을 것이다. 이는 소비자들이 전력 가격이 매우 높을 때 전력을 사용하지 않음으로써 실질적으로 가격 변동에 “반응”할 것이라는 것을 의미한다. 왜냐하면 CPP 요금제에서는 꼭 필요한 수요를 가진 소비자만이 높은 critical peak 시간대의 요금을 지불하고자 할 것이기 때문이다[5]. 이는 전력 수요에 일정 정도의 탄력성을 부여할 것이고, 이는 수요와 공급이 만나는 시장 결정 가격을 낮추게 된다.

Critical peak 시간대는 피크부하 시간대, 혹은 가격 스파이크가 일어나는 시간에 주로 선언되므로 CPP 요금제는 피크부하 시간대에 계통의 부담을 덜어주는 효과도 가지게 된다. 즉, CPP 요금제는 과도한 수요와 공급 부족으로 인한 공급-수요 불균형의 위험을 피크부하를 경감함으로써 줄여 줄 수 있다. 그러므로, CPP 요금제는 계통의 불안정성을 줄여주고 계통이 적절한 품질 및 예비력을 유지하도록 돕는 기능을 할 수 있다.

CPP 요금제는 능동적 수요관리 프로그램과 마찬가지로 수동적 수요관리 프로그램에 비해 여러 장점을 가진다. 첫째, 최종소비자는 요금제에 대한 결정권을 가지게 되고, CPP를 선택함으로써 기본적으로 critical peak 시간대에 부하 삭감에 동의하는 것이므로, 계통운영자는 최종소비자가 부하 삭감을 꺼려하는지에 대해 염려할 필요가 없다. 둘째, CPP 요금제는 계통운영자가 아닌, 최종소비자에게 직접 가격에 반응할 수 있는 선택권을 준다. 최종소비자는 가격이 쌀 때 전력을 구입하고 critical peak 시간대에 비쌀 때에는 구매를 거부할 수 있다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이, 시장 전체 관점에서 수요에 가격 탄력성을 부여하여 이익이 된다. 셋째, CPP 요금제는 “critical peak 시간대 외에는) 더 저렴한 요금”이라는 인센티브를 제공함으로써 수동적 수요관리 프로그램보다 더 많은 참여자를 끌어낼 수 있다.

CPP 요금제는 요금제의 특성으로 인해 다른 강점도 가진다. 수요 탄력성의 측면에서 이는 real-time pricing(RTP) 요금제[2]보다 더 나은

수 있다. 이는 대부분의 최종소비자, 특히 주거용 소비자가 전력 가격의 변화를 하루 종일 지켜보면서 실시간으로 전력 구매를 결정하는 수고는 하지 않기 때문이다. 이러한 점에서 CPP는 RTP보다 수요탄력성을 향상시키는 데는 더 실용적이다.

CPP 요금제의 또 다른 강점은 “보이지 않는” 값, 즉 최종소비자가 ‘삭감한’ 부하량을 계산할 필요가 없다는 점이다. 많은 부하 입찰식 수요관리 프로그램에서 운영자는 참여자가 실제로 얼마의 부하를 삭감했는가를 알아내야 한다. 이는 프로그램이 시행되는 기간 동안의 부하 소비량과 시행되지 않은 기간의 같은 시간대의 부하 소비량을 비교하여 계산한다. 이 절차는 단순히 프로그램 기간(critical peak 시간대) 동안 참여자가 얼마의 부하를 사용하였는지를 체크하는 것보다 상대적으로 까다롭다.

## 2.2 CPP 수요관리 시행자 ESP의 인센티브 수식화

이 장에서는 CPP 요금제가 ESP에게 얼마나 이익을 줄 수 있을 것인지를 산정할 수 있는 수식을 세울 것이다. CPP 사용자에 의한 총 이익이 수식화될 것이며, 변수들은 표 1에 정의되어 있다.

$$\pi = \sum_{n=d_j}^{N_{CPP}} R_{d_j} - \sum_{k=1}^{24 \times 30} \rho^{DA}[k] \cdot Q_{mkt}[k] - \sum_{t=1}^{12 \times 24 \times 30} \rho^{RT}(t) \cdot Q_{mkt}(t)$$

where

$$R_{d_j} = \sum_{k=1}^{24 \times 30} \rho^{non-CPP}[k] \cdot Q_{d_j}[k] + \sum_{t=1}^{12 \times 24 \times 30} \rho^{CP}(t) \cdot Q_{d_j}(t)$$

〈표 1〉 이윤 방정식에 정의된 변수들

$k$	전일시장에서의 시간(단위: 1시간)	$N_{CPP}$	Critical peak pricing 소비자의 수
$t$ <th>실시간시장에서의 시간(단위: 5분)</th> <td><math>\rho^{DA}[k]</math></td> <td>전일시장의 전력 가격</td>	실시간시장에서의 시간(단위: 5분)	$\rho^{DA}[k]$	전일시장의 전력 가격
$d_j$ <th>Critical peak pricing 사용자에게 대한 index (demand)</th> <td><math>\rho^{RT}(t)</math></td> <td>실시간시장의 전력 가격</td>	Critical peak pricing 사용자에게 대한 index (demand)	$\rho^{RT}(t)$	실시간시장의 전력 가격
$Q_{mkt}$ <th>ESP가 시장으로부터 구매할 양</th> <td><math>\rho^{CP}</math></td> <td>Critical peak 시간대에 CPP 소비자에게 부과되는 전력 요금</td>	ESP가 시장으로부터 구매할 양	$\rho^{CP}$	Critical peak 시간대에 CPP 소비자에게 부과되는 전력 요금
$Q_{d_j}$ <th>소비자 <math>d_j</math>에 의한 전력 수요량</th> <td><math>\rho^{non-CPP}</math></td> <td>non-critical peak 시간대에 CPP 소비자에게 부과되는 전력 요금</td>	소비자 $d_j$ 에 의한 전력 수요량	$\rho^{non-CPP}$	non-critical peak 시간대에 CPP 소비자에게 부과되는 전력 요금
$R_{d_j}$ <th>소비자 <math>d_j</math>로부터의 수입 (revenue)</th> <td><math>N_{max}</math> <td>허용된 최대 critical peak 시간대 횟수</td> </td>	소비자 $d_j$ 로부터의 수입 (revenue)	$N_{max}$ <td>허용된 최대 critical peak 시간대 횟수</td>	허용된 최대 critical peak 시간대 횟수
$u_t$ <th>1: ESP가 시간 <math>t</math>에 critical peak 시간대를 선언한 경우 0: 그 외의 경우</th> <td><math>\Delta t_R</math> <td>연속된 두 critical peak 시간대 사이에 최소한 두어야 할 시간 (refraction period)</td> </td>	1: ESP가 시간 $t$ 에 critical peak 시간대를 선언한 경우 0: 그 외의 경우	$\Delta t_R$ <td>연속된 두 critical peak 시간대 사이에 최소한 두어야 할 시간 (refraction period)</td>	연속된 두 critical peak 시간대 사이에 최소한 두어야 할 시간 (refraction period)
$\tau_i$ <th><math>i</math>번째 critical peak 시간대가 선언된 시간</th> <td></td> <td></td>	$i$ 번째 critical peak 시간대가 선언된 시간		

이 방정식을 수립하는 데 다음과 같은 가정이 포함된다.

1. 요금을 부과하는 기간은 1개월, 즉 30일로 한다.
2. 모든 변수는 한 기간(1개월) 내에서 정의된다.
3. 실시간시장은 5분, 전일시장은 1시간 단위로 운영된다.
4. non-critical peak 시간대의 요금은 한 시간, critical peak 시간대는 5분 단위로 부과된다.

목적은 이익, 즉 수식 1을 최대화하는 것이다. CPP 요금제는 ESP가 발행할 수 있는 critical peak 시간대의 횟수에 제한이 있고 연속된 두 critical peak 간에 최소한 두어야 하는 시간의 제한이 있다. 이들은 목적 함수 이윤을 최대화하는 문제에서 제약 조건으로 작용한다. 그러므로 문제는 전체적으로 다음과 같이 수식화된다.

$$\max \left[ \pi = \sum_{n=d_j}^{N_{CPP}} R_{d_j} - \sum_{k=1}^{24 \times 30} \rho^{DA}[k] \cdot Q_{mkt}[k] - \sum_{t=1}^{12 \times 24 \times 30} \rho^{RT}(t) \cdot Q_{mkt}(t) \right]$$

$$\text{subject to } 0 \leq \sum_{t=1}^{12 \times 24 \times 30} u_t \leq N_{max}$$

$$\tau_{i+1} - \tau_i \geq \Delta t_R \text{ for } 0 \leq i \leq N_{max} - 1$$

## 2.3 최적 Critical Peak 결정 문제

위에서 정의한 최적화 문제를 풀기 위해서는 실시간시장 가격의 예측이 필요하며, 그 가격을 바탕으로 최적의 critical peak를 언제 내릴 것인지를 결정해야 한다. 실시간시장 가격 예측 문제도 많은 논의가 필요하다. 지면 관계상 본 논문에서는 우리 연구에서 직접 시행한 실시간시장 가격 예측 값의 결과를 가지고 최적의 critical peak 시간대를 결정하

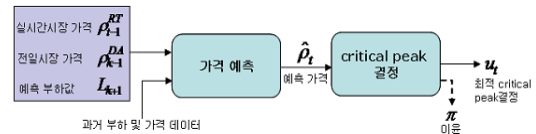
는 문제만을 논할 것이다. 본 연구에서는 이 문제를 풀기 위해 스윙 옵션(swing option)을 평가하는 문제의 방법론을 사용하였다.

### 2.3.1 스윙 옵션(swing option) 평가 방법론

스윙 옵션(swing option)은 에너지 시장에서 거래되는 이색옵션(exotic option)의 한 종류이다[6]. 이 옵션을 행사함으로써, 옵션 소유자는 에너지 거래량을 미리 정해진 양에서 변동시킬 수 있다. 이 옵션의 가치는 에너지의 소비량에 의해 결정되며, 이 소비량은 정해진 최소 및 최대량 사이여야 한다. 또한 옵션 소유자가 에너지 소비량의 비율을 바꿀 수 있는 횟수와 옵션 행사 기간 사이에 최소한 두어야 할 기간에는 제한을 둔다. 그러므로 옵션 소유자는 이러한 제한 조건 아래에서 언제 옵션을 행사할 것인가를 현명하게 판단할 필요가 있다.

언제 옵션을 행사할 것인가를 결정하는 스윙 옵션 소유자의 문제는 언제 critical peak 시간대를 선언할 것인가를 결정하는 ESP의 문제와 유사(analogous)하다. CPP 요금제는 critical peak 시간대 행사의 최대 횟수와 연속적인 두 critical peak 시간대 간에 최소한 두어야 할 시간의 제한이 있다. 그러므로, ESP의 critical peak 시간대 결정 문제를 스윙 옵션 가치 평가 문제와 같은 방법으로 풀 수 있다. 두 문제는 또한 상품, 즉 전력과 옵션의 가격을 결정 이전에 예측해야 한다는 점도 비슷하다. Critical peak 시간대 결정의 이런 전반적인 과정이 그림 1에 나타나 있다.

스윙 옵션은 소위 전통적인 두/세 갈래 나무(binomial/trinomial tree) 동적계획법(dynamic programming) 접근론의 다층 확장(multi-layer tree extension)형인 “두/세 갈래 숲”을 통해 평가된다[6]. 스윙 옵션 평가의 문제에서, 동적계획법 절차는 옵션 만기일로부터 시작해서 3차원(가격, 남아 있는 옵션 행사 가능 횟수, 거래되는 상품의 소비 가능 수위) 상에서 상품의 가치를 시간을 거슬러 오면서 계산한다. 그러나, critical peak 결정 문제에서는 critical peak가 on 또는 off의 선택지 밖에 없으므로 소비 가능 수위는 불필요하다. 따라서, critical peak 문제를 위한 동적계획법은 2차원(가격, 남아 있는 행사 가능한 critical peak의 개수) 상에서 풀 수 있다.



〈그림 1〉 Critical peak 결정을 내리는 전체적인 절차

## 3. 결 론

본 논문에서는 최종소비자의 부하를 시장 가격에 민감하게 반응할 수 있게 하는 수요관리 프로그램으로써 critical peak pricing(CPP) 요금제가 가질 수 있는 장점을 언급하고, CPP 시행자인 energy service provider(ESP)의 인센티브를 수식화하였다. 또한 이를 푸는 방법으로서 스윙 옵션(swing option) 평가 방법론을 제시하였다. 성숙한 전력 시장에서 제시한 방법과 같이 CPP와 같은 수요관리 프로그램들로 인해 최종소비자의 수요와 시장 가격이 잘 연동되어 운영된다면, 전력 시장에서 보이는 가격의 급격한 변동성에 대한 위험 부담들도 한층 완화될 것으로 기대할 수 있을 것이다. 또한 이를 증명하기 위해 본 논문에서 제시한 방법론을 실제로 시뮬레이션하고 최적의 critical peak가 언제 결정되는지를 연구할 필요도 있을 것이라 사료된다.

### [참고 문헌]

- [1] G. B. Sheblé, “Energy Service Providers”, Volume 1, Issue 6, Nov–Dec 2003, Power and Energy Magazine, IEEE, pp. 12–15.
- [2] A. Rosenfeld, M. Jaske, and S. Borenstein, “Dynamic Pricing, Advanced Metering and Demand Response in Electricity Markets,” Hewlett Foundation Energy Series [Online], Oct. 2002, pp. 15–19.
- [3] M. Räsänen, J. Ruusunen, and R. P. Hämäläinen, “Identification of Consumers’ Price Responses in the Dynamic Pricing of Electricity”, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995, IEEE
- [4] S. Barsali, M. Ceraolo, R. Glioli, and D. Poli, “Aggregation and Management of the Demand in a Deregulated Electricity Market”, 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23–26, Bologna, Italy
- [5] C. Alvarez, A. Gabaldón, and A. Molina, “Assessment and Simulation of the Responsive Demand Potential in End-User Facilities: Application to a University Customer”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, May 2004
- [6] P. Jaillet, E. I. Ronn, S. Tompaidis, “Valuation of Commodity-Based Swing Options”, Management Science, Dec. 2003 [Online].