Smart Meter와 부하 패턴 분류를 이용한 Critical Peak Pricing 요금제 적용

주지영, 권상혁, 안상호, 윤용태
서울대학교 전기.컴퓨터공학부

Categorization of End-Users' Load Patterns Applied to Dynamically-Administered Critical Peak Pricing

Jhi-Young Joo, Sang Hyeok Kwon, Sang-Ho Ahn, Yong Tae Yoon
School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

Abstract - 일반 수용가를 대상으로 한 효율적인 수요관리의 한 방법으로써 Dynamically-Administered Critical Peak Pricing[1] 요금제를 이용하여 일반 수용가 대상 수요관리를 스마트 미터기인 Smart Cabinet Panel(SCP)를 개발하여 적용하였다. 이 DA-CPP 요금제에는 핵심이 되는 최적 critical peak 시점을 푸는 하위 문제들 및 방법론들이 존재하는데, 우리는 energy service provider(ESP)가 관리해야 할 수용가의 수가 매우 많다는 점에 주목하여, 각 수용가의 1일 부하 사용량 패턴을 몇 개의 그룹으로 나누어 각 그룹에 대해 critical peak 최적 시점을 결정하는 연구를 수행하였다. 이러한 수용가 부하량 패턴 그룹화를 위해 인공 지능의 여러 기법 중 하나인 self-organizing map(SOM)을 사용하였다. 그리고 ESP와 수용가가 통신할 수 있도록 개발된 SCP를 통해 Critical Peak을 적용하였다.

1. 서 론

DA-CPP가 일반적인 CPP와 다른 점은 Critical Peak 신호를 보내어 CPP적용을 하루전이 아닌 몇분 안에 할 수 있는 점이다. 이는 ESP가 수요관리가 필요할 때, 실시간에 가까운 반응을 이끌어 낼 수 있는 점에서 한층 발전된 수요관리 방법이다. DA-CPP를 적용하기 위해서 ESP는 이윤을 최대화 하기 위해서는 전일 및 실시간 시장에서 각각 얼만큼의 전력을 사야 하는지, 그리고 언제 Critical Peak 시간대를 선언해야 하는지가 변수가 되어, 이를 결정하는 문제가 된다. 이는 미래의 한 달 동안의 Critical Peak 선언을 결정하는 문제이고, 이 Critical Peak는 시장에서의 전력 가격에 의존하므로 시장 가격을 잘 예측하는 것이 중요하다. 하지만 ESP가 관리해야 할 수용가의 수가 매우 많다는 점에 주목하여, 각 수용가의 1일 부하 패턴을 몇 개의 그룹으로 나누어 각 그룹에 대해 Critical Peak 최적 지점을 결정하는 연구를 수행 하였다. 이러한 수용가 부하량 패턴 그룹화를 위해 인공 지능의 여러 기법 중 하나인 Self-Organizing Map을 하였다. 그리고 이 기법을 이용하여 분류된 그룹들에 대해서 최적의 Critical Peak 지점이 되는 시점에서 수분 전에 각각의 수용가들의 스마트 미터기 단말기와 통신을 통하여 CP요금 적용을 한다. 수용가는 Critical Peak 요금 적용 또는 부하 차단의 선택권을 가진다. 이 선택을 하기위해서 수용가는 현재 전력 사용을 중지를 했을때 발생하는 기회비용과 Critical Peak 요금을 적용하여 현재 전력 사용을 했을 경우의 발생하는 비용을 수용가 입장에서 비교한다. 이러한 비용은 수용가에 따라 다양하고, 이번 연구에서 개발한 스마트 미터기는 수용가의 반응을 위해서 여러 인터페이스를 이용하여 수용가에게 전력 사용량과 누적 사용량 등을 시각적으로 표현해 준다. 이를 통해 수용가가 전력요금에 대한 실시간 정보를 얻고 계획적인 수요관리에 도움을 준다. 이 논문에서는 크게 2부분으로 구분되어 있다. 첫부분은 앞에서 언급하였듯이 시장 가격예측을 위해 필요한 SOM과 두 번째는 수용가와 통신 할 수있는 스마트 미터기인 SCP에 관하여 구성되어있다.

2. 본 론

2.1 수용가 부하 패턴 분류와 Self-Organizing Map(SOM)

Kohonen이 개발한 unsupervised artificial neural network architecture[2]이다. 출력이 주로 2차원의 도면(grid) 상에 시각적으로 표현된다는 점이 특징이다. 또한, 입력 값과 출력 노드(output node) 사이의 유클리드 거리(Euclidean distance)가 가장 작은 최적합 벡터(best-matching unit) 뿐만 아니라 그 주변의 이웃 노드까지 업데이트하여 학습시킨다. SOM은 공학 분야 뿐만 아니라 사회 과학 분야에도 널리 응용되고 있으며, 특히 전력 공학 분야에서는 시스템 부하의 일일 패턴을 주중/주말/휴가철 등의 일별 종류(day type)로 나누는 연구가 진행되기도 하였다[3-5].

우리의 연구에서는 전체 시스템의 일일 부하량 패턴을 day type으로 나누는 대신, 각 수용가의 일일 부하량 패턴을 수용가 수만큼 얻어낸 다음, 이를 몇 가지 대표될 만한 그룹으로 나누는 작업을 하였다.

2.1.2 SOM의 기본 알고리즘

입력 값으로 수용가의 일일 부하량 패턴 값들을 받아 읽어들인다. 그리고 필요한 초기 사용자 값들을 설정해 준다. 입력 값과 출력 값인 2차원의 도면의 관계를 나타내는 값을 '연결 가중치(connection weight)[2]'라 하는데 이 값을 초기화 해준다. 그리고 이 알고리즘의 연산에 의해 구해지는 출력 노드의 일정한 범위 내의 이웃 노드의 범위를 'neighborhood'라고 하는데, 그 주변의 어느 이웃 노드까지 업데이트 할지 설정해 준다. 그리고 연결 가중치를 총 몇 번 업데이트 할 것인지 정한다.

초기값 설정을 마친 후, 하나의 입력 패턴을 이용하여 연결 가중치를 업데이트 하는 연산을 반복한다. 이 연산은 각 노드에 대해, 입력으로 받은 패턴과 연결가중치의 곱으로 정의되는 'activation value'를 구한다. 즉,

$$a_j = \sum_{i=1}^{N} w_{ij} x_i$$

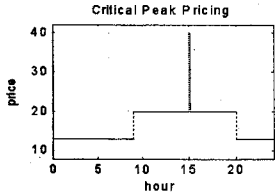
여기서, w_{ij}는 연결가중치, x_i는 입력패턴, i는 1일동안 N개의 부하, j는 출력 노드이다. 이 중 가장 큰 activation value를 가지는 노드를 최적합 벡터라 한다.

그 출력 노드와 'neighborhood'범위의 node들에 대해서 연결가중치를 입력 값과 출력 노드와의 관계를 실제 입력 패턴과 더욱 연관성을 높이는 값으로 변경하는 '업데이트'를 수행한다. 이러한 과정을 모든 패턴에 대하여 연결 가중치를 업데이트 한 후, 연결가중치와 패턴과의 관계를 더욱 극대화 시키는 값으로 변화시키기 위해 위에서 정한 횟수만큼 반복하는 '연결가중치 훈련' 과정을 거친다. 그리고 neighborhood 범위를 한 단계씩 줄여가며 업데이트

를 실시한다.

위의 과정을 통해 '훈련'된 '연결가중치'를 이용하면, 격자 형태로 된 출력 도면을 보면 입력한 여러 개의 패턴들이 몇 개의 그룹으로 분류되는 모습을 볼 수 있다.

2.2 ESP와 수용가 통신을 위한 SCP



Critical Peak Pricing(CPP) 제도는 최종소비자에게 적용되는 다양한 요금제 중의 하나이다. 이는 Time-Of-Use(TOU) 요금제와 거의 비슷하나 peak 시간대와 off-peak 시간대의 요금이 TOU보다 조금 더 낮다. 대신에, CPP는 매우 짧은 시간(예. 5분) 동안의 "critical peak 시간대"가 있어서 보통peak 시간대보다 극히 높은 요금이 부과된다. 또한 ESP가 CPP 요금제 사용자에게 부과할 수 있는critical 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 두critical peak 시간대 간의 시간차이다. 즉, ESP는 한 번 critical peak 시간대를 적용했으면, 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 짧은critical peak 시간대 동안에만 전력을 차단할지를 결정할 수 있는 권한을 가진다. SCP의 default는critical peak 시간대에 전력을 차단하는 것으로 할 경우, 만약 CPP 사용자가 어떤 특정 시간에 전력이 차단되는 것을 원하지 않는다면, 그 시간을 SCP에 입력시키면 된다. 그러면 메모리를 가진 이 SCP는 소비자가 전력 차단을 원치 않는 시간을 기억한다. 만약 그 시간에 ESP가 critical peak 시간대를 통보하고, 이 신호가 SCP에 들어오면 SCP는 이 신호를 무시하고 전력을 차단하지 않는다. 이러한 설정이 없다면 SCP는 자동적으로 critical peak 시간대 동안에 전력을 차단했다가 critical peak 시간대 이후에 다시 켤 것이다. 그러므로 짧은 critical peak 시간대에만 전력을 차단하게 될 것이다.

2.2.1 SCP통한 수요 관리

SCP는 서버로부터 CP 신호를 받으면, 사용자에게 CP 요금과 함께 전력 차단 유무 선택권을 제공한다. 이를 구현하기 위하여 서버에서 CP정보를 송신하고, 이를 수신한 미터기가 반응하여 그 시간을 기준으로 6분후부터 6분간 전력 차단 또는 CP요금 적용 선택을 사용자에게 하도록 한다. 만약 사용자가 전력 차단을 시행하여도 괜찮을 경우 차단을 행하여 고가의 CP요금을 부담하지 않는다. 하지만 중요한 부하를 사용 중이어서 전력 차단을 행할 경우 발생하는 손해비용이 CP보다 클 경우, 사용자가 부하를 차단하지 않고 CP요금제 적용을 받도록 선택할 수 있다. 예를 들어 오후 2시에 CP신호를 받으면, 수용가는 SCP 화면을 통해서 6분전에 CP 경고창을 보고, CP요금을 지불하면서 전력을 사용하거나 전력차단을 통해 비싼 요금을 회피할지 결정할 수 있다.

이와 함께 SCP는 예약 설정을 통해서 CP신호 선택을 매번 하지 않아도 자동적으로 선택되도록 설정 할 수 있다. 사용자가 CP요금을 부담하면서 전력 차단을 원하지 않는 시간대를 설정해 두면, CP신호를 받아도 자동 적으로 사용자가 설정한 예약대로 전력 사용을 계속 하면서 CP요금을 지불 하도록 선택하다. 예를 들어 사용자가 원하는 드라마가 매주 화목 오후 3시부터 오후5시까지 한다면, 사용자는 이 시간을 예약 설정 해 둔다. 그러면 비록 SCP가 서버로부터 3시에 CP신호를 받아도 SCP는 자동적으로 CP적용된 요금으로 전력사용 유지를 보장한다. 최적 critical peak 시점을 구하는 식에서, 우리는 시장 가격이 높고 수용가의 부하가 높은 시점에서 목적 함수가 커짐을 알 수 있다. 이는 계통 상의 수요 관리 필요 시점과도 일치하는 것으로, 계통에 과부하가 걸리거나 상정사고 등으로 인한 수급 불균형으로 실시간 가격이 치솟을 때 수용가의 부하가 삭감될 필요가 있다.

그런데 시간에 따른 부하량은 소비자마다 각각의 특성을 지니므로, ESP가 가지고 있는 전체 부하량에 따라 최적 CP 시점을 결정하여 모든 수용가에게 같은 시점에서 CP를 발생하는 것보다는, 각 수용가의 부하량에 대해 개별적으로 수요 관리를 하는 것이 더 효율적일 것이다. 하지만 ESP가 관리하는 수용가의 수만큼 각각 최적화 문제를 푸는 것은 비용과 시간 면에서 비경제적이므로, 우리는 각 수용가의 부하 사용량을 일일 패턴으로 파악하여 전체 수용가의 부하 사용량 패턴을 몇 개의 그룹으로 나누어 최적화 문제에 적용하는 방식을 사용하였다.

2.2.2 정산 및 요금고지 알고리즘

Critical Peak Price의 정산을 알아보기 앞서, 앞에서 간단히 언급 했었지만 이 요금제의 특징을 살펴 보겠다. Critical Peak Pricing요금제는 요금 단위가 총 3 단위로 나눠진다. 일반적으로 전력 사용양이 적은 시간대의 off-peak time요금과 전력 사용이 많은 시간대의 peak-time요금, 그리고 요금을 적용시킬 수 있는 제한이 있는 Critical Peak 요금으로 나누어 진다. 여기서 Critical peak 요금은 1개월 이내에 ESP에서 정한 제한된 횟수만큼만 적용 할 수 있으며, Critical peak 시간 간격은 최소 24시간 이상이어야 한다는 제약 조건이 존재하므로 CP신호 발생 내역을 저장하여 정산 시 이상 없는지를 확인하는데 이용된다. 이러한 CPP 요금 적용을 위해서는 6분 단위로 전력사용량을 측정한다. 사용자는 3단계의 요금 정보를 ESP로부터 받아서 SCP 화면을 통해 보면서 전력을 사용하는데, 그렇게 사용한 6분단위의 전력량을 실시간으로 저장하여 이렇게 수집된 데이터를 ESP가 정한 3단계의 요금을 적용하여 요금 청구 주기마다 계산한다. 이렇게 계산된 요금을 고지서를 통해 요금 청구일 마다 주기적으로 받아 볼 수 있다. 이러한 알고리즘을 구현하기 위해서 CPP요금제의 정산을 위한 함수는 아래와 같이 정의된다.

$$r_u^{peak}\sum_{t=1}^{T_1} d_k^{peak}(t) + r_u^{off-peak}\sum_{t=1}^{T_1} d_k^{off-peak}(t) + r_u^{CP}\sum_{t=1}^{T_1} d_k^{CP}$$

여기서 사용된 변수는 아래와 같이 정의된다.

$r_k^{off-peak}$	Off-peak Time에서의 요금[₩/kwh]
r_k^{peak}	Peak Time에서의 요금[₩/kwh]
r_k^{CP}	Critical Peak Time에서의 요금[₩/kwh]
d_k^{peak}	Peak 시간에서의 사용자 k의 소비전력[kwh]
$d_k^{off-peak}$	Off-peak 시간에서의 사용자 k의 소비전력[kwh]
d_k^{CP}	Critical peak 시간에서의 사용자 k의 소비전력[kwh]
T_1	요금 정산 주기

위의 함수를 이용하여 다른 요금제와 같이 요금 정산 주기가 되면 정산이 이루어 진다. TOU요금제와 같이 여기서 $r_k^{off-peak}$에 해당하는 off-peak time에서의 요금과 r_k^{peak}에 해당하는 peak time에서의 요금과 시간은 ESP에서 정책에 맞추어 정해진다. 하지만 Critical Peak 요금제의 경우 추가적으로 Critical Peak Time에 해당하는 r_k^{CP}

값 또한 ESP에서 손익을 따져 정책적으로 정해진다. 사용자의 미터기는 전력사용량이 6분단위로 각각 누적값으로 하루에 240개씩 매일 저장된다. 다름 요금제와 같이 요금 정산 주기가 되면 ESP는 사용자의 미터기에서 정산 주기만큼의 데이터를 이용하여 시간대별로 peak time에 사용된 전력량과 peak time에 사용된 전력량을 나누어 peak time에 사용된 전력량을 d_k^{peak} 값으로 설정하고, off-peak time에 사용된 전력량을 $d_k^{off-peak}$ 값으로 설정한다. 또한 Time Of Use 요금제에서 추가적으로 Critical Peak Time에 사용된 전력량을 d_k^{CP} 값으로 설정한다. 그리고 요금 정산 주기는 다른 요금와 같은 T_1값으로 설정한다. 이를 이용하여 요금 정산 주기동안 사용한 peak time 에서의 사용량인 d_k^{peak}와 peak time에서의 요금 r_k^{peak}을 곱하면 peak time에서의 전력 사용 요금이 산출된다. 그리고 이와 유사한 방법으로 off-peak time 에서의 사용량인 $d_k^{off-peak}$와 off-peak time에서의 요금 $r_k^{off-peak}$을 곱하면 off-peak time에서의 전력 사용 요금이 산출된다. 또한 이 요금제는 Critical Peak Time에서의 요금정산을 추가적으로 분리해서 해줘야 한다. 이는 Critical Peak Time 에서의 사용량인 d_k^{CP}와 Critical Peak Time에서의 요금 r_k^{CP}을 곱하면 off-peak time에서의 전력 사용 요금이 산출된다. 이렇게 3단계의 요금단위로 나눠진 각각의 시간대별 전력 사용요금을 더하면 요금 정산 주기의 사용자 전력 요금이 최종적으로 정해진다.

3. 결 론

하나의 ESP가 관리해야 할 수용가의 수가 매우 많고, 이들의 부하 사용량 패턴도 제각기 다르다. 따라서 이 부하 패턴을 SOM을 이용하여 몇 개의 그룹으로 나누어 최적 Critical Peak를 결정하였다. 그 결과 몇 가지의 일정한 패턴을 따르면서 임의의 잡음을 가지는 수용가의 부하 사용량 패턴을 나누었을 때, 이 패턴들이 유효하게 구분됨을 확인할 수 있었다. 이를 최적 critical peak 시점을 결정하는 문제에도 활용하였다. 그리고 이번 연구에서 또한 SCP를 통해 수용가와 통신을 하여, DA-CPP를 실제 적용하여 정산까지 가능하도록 하였다. 최적의 Critical Peak을 결정하기 위해 수용가의 부하를 예측하여야 한다. 이번 SCP를 통해서 수용가에게 6분전에 Critical Peak 적용 여부를 알려줄 수 있었다. 이를 통해 ESP의 Critical Peak에 대한 부담을 줄일 수 있었다.

본 연구는 한국학술진흥재단의 BK21 후원으로 수행된 과제이며, 관련 기관 관계자 여러분에게 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] 주지영, 안상호, 윤용태 "Critical Peak Pricing 요금제를 이용한 일반 수용가 대상 수요관리의 방법", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007

[2] T. Kohonen, "The Self-Organizing Map", Proceedings of The IEEE, Vol. 78, No. 9, pp. 1464-1480, 1990

[3] Y.-Y. Hsu, C.-C. Yang, "Design of artificial neural networks for short-term load forecasting. Part I: Self-organising feature maps for day type identification", IEE Proceedings-C. Vol. 138, No. 5, pp. 407-413, 1991

[4] G. Chicco, R. Napoli, F. Piglione, "Load pattern clustering for short-term load forecasting of anomalous days", IEEE Power Tech Proceedings, Vol. 2, 2001

[5] S.V. Verdu, M.O. Garcia, C. Senabre, A.G. Marin, F.J.G. Franco, "Classification, Filtering, and Identification of Electrical Customer Load Patterns Through the Use of Self-Organizing Maps", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21 No. 4, pp. 1672-1682, 2006