

한국 전력시장 환경을 고려한 소형열병합발전기의 요금 기반 기동정지계획

주지영, 안상호, 김동현, 박근표, 윤용태
 서울대학교 전기.컴퓨터공학부

Price-Based Unit Commitment for Micro-CHP in Korea

Jhi-Young Joo, Sang-Ho Ahn, Dong-Hyeon Kim, Geun Pyo Park, Yong Tae Yoon
 School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - 발전기의 기동정지계획(unit commitment)에 있어서 전통적인 방식은 발전기를 기동/정지하는 데 드는 비용(cost)을 기반으로 결정해 왔다. 그러나 전력시장의 변화에 따라 발전기의 기동정지계획에 전력 요금(price)의 중요성이 인식되면서 요금에 기반한 기동정지계획에 대한 연구들이 진행되고 있다.[1] 본 논문에서는 이러한 요금 기반 기동정지계획을 한국의 전력시장 환경에서 소형열병합발전기(micro-CHP(combined heat and power))에 적용해 본다. 한국의 전력시장에서 주택에 사용되는 전력 요금에 대해서는 누진제가 적용된다. 그러므로 본 논문에서는 아파트에 설치된 소형열병합발전기의 요금 기반 기동정지계획의 시뮬레이션 결과를 분석함으로써 전력 요금의 누진제가 기동정지계획에 어떠한 영향을 주는지에 대해서 논하고자 한다.

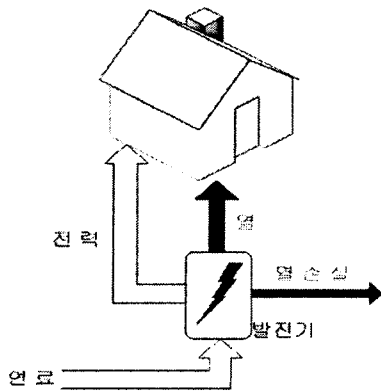
1. 서 론

열병합발전(combined heat and power; CHP)이란, 열과 전기를 동시에 발생시켜 사용하는 에너지 시스템을 의미한다. 이 중에서도 본 논문에서 다룬 소형열병합발전(micro-CHP)은 주로 천연가스(LNG)를 연료로 사용하여 발전용량이 1만kW 이하인 가스엔진 또는 가스 터빈을 통해 전기와 열을 동시에 생산하여 발전기에 직접 연결되어있는 부하에 생산한 전기와 열을 제공하는 방식을 적용한다.[2](<그림 1>)

이러한 소형열병합발전은 기존 계통에 대비하여 크게 세 가지의 장점을 가지고 있는데, 그 첫 번째로는 경제성을 들 수 있다. 소형열병합발전은 기존 계통에 비하여 15~32%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타나고 있다.[3] 이것의 가장 큰 이유는 발전 과정에서 발생하는 폐열을 열 수요에 공급하기 때문이다. 둘째, 소형열병합발전은 이용하면 안정적이고도 효율적인 수요 관리를 할 수 있다. 소형열병합발전은 전력 계통 측면에서는 분산형 전원을 구축하므로 독립된 전력 수급이 가능하며, 가스 에너지 측면에서는 하절기 가스 수요 창출로 계절별 에너지 수급 균형에 도움이 된다. 마지막으로 소형열병합발전은 친환경적인 에너지 공급 시스템이다. 이는 동일한 양의 에너지 발생시 기존 계통에 비해 CO₂를 42%, NO_x를 39.1% 감소시킨다는 점에서 드러난다.[4]

그러나 이러한 이점들이 있음에도 우리나라에는 아직 소형열병합발전의 보급이 미미한 실정이다. <표 1>은 우리나라의 소형열병합발전의 보급 현황을 보여 주고 있다. 소형열병합발전은 우리나라 총 발전용량의 0.2%를 차지하며 이는 소형열병합발전에 대한 지원이 활발한 다른 나라들에 비해 낮은 수치이다.[2] 특히 산업 시설에서의 소형열병합발전 시설의 비율은 더욱 낮는데 이는 산업용 전력 요금이 우리나라에서는 상대적으로 저렴하기 때문으로 분석된다.

소형열병합발전의 경쟁성을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있는데, 본 논문에서 계산한 기동정지계획(unit commitment)은 짧은 시간 단위(작게는 1일, 길게는 수개월 정도)에서 발전기가 얼마의 이득(profit)을 낼 것인가 하는 문제를 푸는 것이며, 최적의 비용/이득으로 발전기를 운영하기 위해서 언제 발전기를 켜거나 꺼야 하는지를 알 수 있는 방법이 된다.



<그림 1> 소형열병합발전기의 작동 구조

<표 1> 우리나라 소형열병합발전 보급 현황 (2006년 3월 말 기준)

구분	업체 수	대수	총 용량(kW)
아파트	95	120	37,082
병원	10	12	6,394
복합 건물	5	18	60,414
사무용	8	10	6,050
산업체	3	5	28,500
위락 시설	1	1	2,300
호텔	3	4	1,256
전체	125	170	141,996

출처: 에너지관리공단

2. 본 론

2.1 요금 기반 기동정지계획

기동정지계획이란 전력 계통에 연결되어 있는 각 발전기를 언제, 얼마만큼 켜야 하는지, 혹은 꺼야 하는지를 미리 결정하는 과정이다. 전력 가격이 미리 정해져 있는 고정 요금 체계(uniform price)에서는 발전기를 구동하는 데 필요한 비용(cost)에 근거하여 기동정지(on/off)를 결정했다면, 전력 요금이 실시간으로 변동하는 실시간 요금 체계(real-time price)에서는 전력 요금(price)에 대한 예측이 발전기의 기동정지에 중요한 영향을 주게 된다.

2.1.1 실시간 요금 체계에서의 일반적인 발전기 기동정지계획

발전기의 기동정지계획에서 단위 시간별 전력 수요(부하)의 값은 주어진 것으로 가정한다. 전력 요금이 실시간으로 변화하는 경쟁적 시장 환경의 경우, 이 주어진 부하량을 가지고 실시간 전력 요금을 예측하고, 예측된 전력 요금 및 부하량으로 Dynamic Programming(DP)을 이용하여 시간별 기동정지를 결정한다.[1],[5]

부하량으로 전력 요금을 예측하기 위해서는 부하량과 전력 요금의 관계식을 도출할 필요가 있다. 이를 위한 방법에는 Random Walk, Jump Diffusion, Mean-Reverting Model 등이 있으며, 본 논문에서는 이 중 실시간 요금 체계의 특성을 가장 잘 반영한 Mean-Reverting Model을 사용하여 도출된 부하-요금 관계식을 이용하였다. 단위시간 k 에서의 전력 요금을 ρ_k , 부하량을 L_k 라고 할 때, 부하-요금 관계식은 다음과 같다.[1]

$$\ln \rho_k = m L_k + b_k \quad (1)$$

부하-요금 관계 도출시 m 은 상수로 주어지며, b_k 는 전력 요금의 불확실성을 반영하기 위한 random variable로, 전력 요금의 오차 term이라고 볼 수 있다.

예측된 요금과 부하량으로 일정 기간 동안 발전기를 운영하는 데 얼마의 비용이 들 것인지를 Backward Dynamic Programming으로 계산한다. 이때의 상태 변수(state variable)는 발전기가 얼마나 켜져 있었는가, 혹은 꺼져 있었는가 하는 발전기의 상태 변수 및 random variable인 전력 요금을 적정 수준으로 이산화(discretized)한 요금 변수가 포함된다. 발전기의 상태 변수 식은 다음과 같다.[1]

$$x_{k+1} = \begin{cases} \max(1, x_k + 1) & : u_k = 1 \\ \min(-1, x_k - 1) & : u_k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

각 시간대에서 상태 변수들에 대한 비용/이득을 계산하여 맨 마지막 시간대에서부터 첫 시간대로 거슬러 올라오면서 optimal path를 찾고(DP) 그에 해당하는 비용/이득이 최적의 이득이 된다.[5] u_k 를 기동(1) 혹은 정지(0) 계획이라 하고, 발전기 비용함수를 $c_G(P_G)$, 고정 비용(fixed cost)을 C_f , startup cost를 S , shutdown cost를 T 라 할 때, 시간대 k 에서의 이득 식은 다음과 같다.[1]

$$\pi_k = u_k(\rho_k - c_G(P_G)) - I(x_k < 0)S - (1 - u_k)(C_f + I(x_k > 0)T) \quad (3)$$

$$\text{where } P_G = \frac{\rho_k - b}{2a}, \quad (4)$$

$I(\cdot)$: ()안의 식이 참일 때 1, 거짓일 때 0의 값을 갖는 indicator 함수

여기에서 발전량 P_G 는 가격 ρ_k 및 발전기 비용함수의 계수 a , b 에 의해 결정되는데, 이는 발전량에 따른 이득[1]이

$$\rho_k P_G - c(P_G) = \rho_k P_G - (aP_G^2 + bP_G + c) \quad (5)$$

와 같이 나타나며, 이를 최대화하는 P_G 가 식 (4)와 같이 구해지기 때문이다. 즉, 발전량은 가격에 근거하여 이득을 최대화하는 값으로 결정된다.

2.1.2 우리나라 아파트에서의 소형열병합발전기 기동정지계획

우리나라에서 소형열병합발전기를 운영하는 경우 임의의 실시간 요금을 가정한 위의 2.1.1절과 달리 누진제가 적용된 주택용 요금이 적용된다. 요금 이외에도 열병합발전은 일반적인 발전기와 달리 열 공급 및 수요가 있으므로 이 또한 이득 식에 포함해야 할 것이다. 이를 바탕으로 이득 식을 재정의하면 다음과 같다. 새로 도입된 변수들은 <표 2>에 정리하였다.

$$\pi_k = u_k [\rho_k^e (Q_{s,k}^e - Q_{d,k}^e) + \rho_k^h (Q_{s,k}^h - Q_{d,k}^h) - C(Q_{s,k}^e) - I(x_k < 0)S] - (1 - u_k) [\rho_k^e Q_{d,k}^e + \rho_k^h Q_{d,k}^h + c_f + I(x_k > 0)T] \quad (6)$$

우리나라의 소형열병합발전기에서 잉여 전력을 전력 시장에 파는 것은 일반적으로 허용되지 않으므로 발전량에 제약이 따른다. 즉, 발전량은 부하량을 넘을 수 없다. 이 제약조건을 식으로 표현하면

$$Q_{s,k}^e \leq Q_{d,k}^e \quad (7)$$

이 된다. 실제로 2.1.1절의 경우를 시뮬레이션하면 전력 요금에 따라서 발전기를 가동하여 양(+)의 이득을 취할 수 있는 반면, 소형열병합발전기의 시뮬레이션에서는 이득을 얻을 수는 없고 단지 요금 및 비용을 최소화하는 문제가 된다.

<표 2> 소형열병합발전기 기동정지계획 이득 식에 포함되는 변수

$Q_{s,k}^e$	시간 k 에서의 전력 공급량 (발전량)
$Q_{s,k}^h$	시간 k 에서의 열 공급량
$Q_{d,k}^e$	시간 k 에서의 전력 수요량 (부하량)
$Q_{d,k}^h$	시간 k 에서의 열 수요량
ρ_k^e	시간 k 에서의 전력 요금
ρ_k^h	시간 k 에서의 열(가스) 요금
C	발전기 비용함수

2.2 우리나라 아파트에서의 소형열병합발전기 기동정지계획 시뮬레이션

상기 (6) 식을 이용하여 아파트에 소형열병합발전기를 운영하는 경우를 시뮬레이션해 보았다. 아파트의 한 가구에 대한 여름 및 겨울의 주중의 1일치 부하 변동량[6]을 가지고 1일 동안의 기동정지계획을 구하였다. 전력 요금으로는 현재 한국전력공사에서 사용하고 있는 주택용 저압 요금(<표 3>), 열 요금으로는 경기 지역의 공동주택 열병합 가스 요금 단가인 464.79W/m³[7]을 적용했다.

<표 3> 주택용전력(저압) 전기요금표 (2006년 현재 기준)

기본요금(원/호)		전력량 요금(원/kWh)	
100kWh 이하 사용	370	처음 100kWh까지	55.10
101~200kWh 사용	820	다음 100kWh까지	113.80
201~300kWh 사용	1,430	다음 100kWh까지	168.30
301~400kWh 사용	3,420	다음 100kWh까지	248.60
401~500kWh 사용	6,410	다음 100kWh까지	366.40
500kWh 초과 사용	11,750	100kWh 초과	643.90

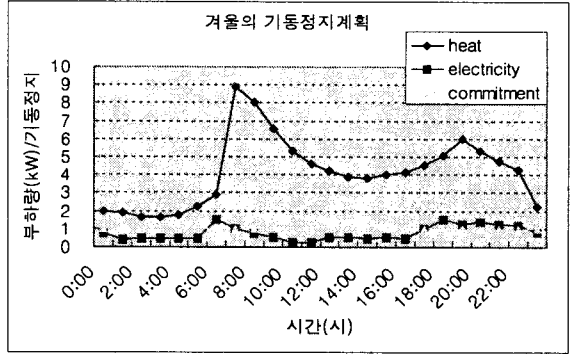
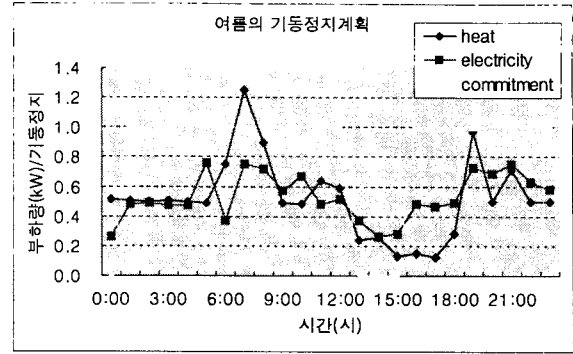
출처: 한국전력공사

2.2.1 시뮬레이션 결과 및 분석

계절별 수요(부하량) 및 기동정지계획 시뮬레이션 결과를 그래프로 <그림 2>에 나타내었다.

여름에는 전력 및 열의 부하량이 낮은 시간대에 발전기를 정지시키는 결정이 내려졌으며, 겨울에는 전력 및 열의 부하량이 여름보다 현저히 높아 발전기를 항상 가동해야 하는 것으로 나타났다.

1일 간의 비용, 즉 발전기 가동 비용과 전력 및 열 요금을 모두 포함한 값은 여름의 경우 3,996.2원, 겨울의 경우 7,216.1원으로 나타났다. 이 때 여름의 경우를 좀더 자세히 살펴보면 위 전기요금표 중 기본요금인 3,420원인 요금제를 적용하였는데, 전력 요금이 가장 싼 기본요금 370원의 요금제를 적용하여 기동정지계획을 다시 계산해 보면 모든 시간에 대해 $u_k = 0$, 즉 발전기를 항상 끄도록 나타난다. 이것은 전력 요금이 싼 때에는 굳이 비용을 들여 발전기를 돌릴 필요가 없고 계통의 전력을 사용하는 것이 더 저렴하다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 이 경우 1일 간의 비용은 2,137.2원으로 나타났다. 반대로 전력 요금이 가장 비싼 경우인 기본요금인 11,750원인 경우로 시뮬레이션을 수행한 결과 예상대로 모든 시간에 대해 $u_k = 1$, 즉 발전기를 항상 켜도록 나타나며 1일 간의 비용은 4,067.9원으로 나타났다. 그러므로 전력 요금의 고저에 의해 발전기의 기동정지계획은 확연한 차이를 나타내며, 소형열병합발전기의 경제성에 전력 요금이 중대한 영향을 미친다는 점을 알 수 있다.



<그림 2> 소형열병합발전기의 기동정지계획 시뮬레이션 결과 (전력요금: 기본요금 3,420원을 적용한 경우)

3. 결 론

소형열병합발전은 경제적이고 친환경적이며, 안정적이면서 효율적인 수요 관리를 하게 할 수 있는 에너지 시스템이다. 소형열병합발전기의 경제성을 평가하기 위해 본 논문에서는 단기간의 경제성을 평가할 수 있는 기동정지계획을 계산하였으며, 전통적인 방식의 발전기의 가동 비용에 근거한 기동정지계획이 아닌 전력 요금에 근거하여 비용을 최소화하거나 이득을 최대화할 수 있는 기동정지계획을 적용하였다. 시뮬레이션 결과 소형열병합발전기의 기동정지 결정은 전력 요금에 큰 영향을 받을 수 있었다. 한편, 우리나라 전력 요금의 누진제가 부하의 집중도를 고려하지 않고 단순히 한 달의 전체 누적 사용량에 근거하여 매겨진다는 점에서 비합리적이라고 볼 수 있는데, 이는 소형열병합발전기의 경제적인 운영과 보급에도 영향을 미친다는 결론을 내릴 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Eric Allen & Marija Ilić, "Price-Based Commitment Decisions in the Electricity Market", Springer, (논문에 인용된 순서대로) pp. 57,6,13,13, 1999
- [2] 에너지관리공단, "소형 가스 열병합발전 보급 활성화 방안"
- [3] 에너지관리공단, "열병합발전 보급 정책 및 제도", p. 7 <http://www.kemco.or.kr>
- [4] 한국에너지기술연구원, "소형열병합발전 기술 동향", 2005, 11
- [5] Christos G. Cassandras, Stéphane Lafortune, "Introduction to Discrete Event Systems", Kluwer Academic Publishers, pp. 534~540, 1999
- [6] R. Jablko, C. Saniter & R. Hanitsch, "Technical and Economical Comparison of Micro CHP Systems", p. 2
- [7] (주)삼천리 웹페이지 <http://www.samchully.co.kr>
- [8] Sang-Ho Ahn, Jhi-Young Joo, Yong Tae Yoon, "A Sustainable Business Model for Micro-CHP Systems with Residential Application in the Evolving Electricity Markets in Korea", 2006
- [9] 안상호, 주지영, 이호철, "전력시장 환경 변화와 CHP의 발전방향", 제2회 전력거래소 논문공모전 수상집, 2006