

가스터빈 복합발전의 기동특성을 고려한 열거래 기반 지역 냉난방 시스템의 최적 운영 모델

Optimal Operation Model of Heat Trade based District Heating and Cooling System Considering Start-up Characteristic of Combined Cycle Generation

김 중 우* · 이 지 혜* · 김 학 만†
(Jong-Woo Kim · Ji-Hye Lee · Hak-Man Kim)

Abstract - Recently, district heating and cooling (DHC) systems based on combined cycle generation (CCG) providers are increasing in Korea. Since characteristics of combined heat and power (CHP) generators and heat demands of providers, heat trading between DHC providers based on the economic viewpoint is required; the heat trading has been doing. In this paper, a mathematical model for optimal operation based on heat trading between DHC providers is proposed. Especially, start-up characteristic of CCG is included. The operation model is established by mixed integer linear programming (MILP).

Key Words : Optimal operation of district heating and cooling (DHC) system, Start-up characteristic of combined cycle generation (CCG), Mixed integer programming (MIP)

1. 서 론

지역냉난방 시스템은 열원설비에서 생산된 열을 이용하여 냉, 난방을 공급하는 방식으로 우리나라에서도 신도시 및 산업단지 등에 적용되고 있다. 지역냉난방 공급시스템은 열병합발전기(CHP : combined heat and power), 열전용 보일러(HOB : heat only boiler), 축열조 (ACC : accumulator), 지역난방 펌프 등으로 구성된다.

최근, 공급권역이 나뉜 개별 지역냉난방 사업자가 증가하고 있는데, 각 개별 사업자가 가진 설비 및 열부하 특성이 상이하므로 전체 시스템의 편익을 증대시키기 위하여 사업자간 열네트워크를 연계하여 잉여열을 상호 교환하는 연계 사업이 진행되고 있다.

지역냉난방 시스템의 운영에 있어서 가장 중요한 것은 열수급조건을 충족시키면서 경제적인 열을 생산하는 것으로 시스템이 가진 다양한 제약조건을 만족시키며 운영비용을 최소화시키는 것이다. 이와 관련하여 전력계통과 연계된 소규모 발전설비의 최적운영[1], 열병합 발전을 고려한 마이크로 그리드의 최적운영[2-7], 지역난방 시스템의 최적화[8-11], 운전모드를 고려한 열병합발전의 열거래 최적운전[12]에 대한 연구가 진행되고 있다.

최근 가스터빈 복합발전 방식의 열병합 발전설비가 주로 건설되고 있는데, 지역냉난방 시스템의 최적 운영을 위해서는 단계적으로 출력이 변하는 가스터빈 복합발전 방식의 기동특성이 고려된 최적화 모형이 요구된다.

본 논문에서는 가스터빈 복합발전 방식의 기동특성을 고려한 열거래 기반 지역 냉난방 시스템의 전체 편익을 최대화하는 최적 운영 모델을 혼합정수계획법을 이용하여 수립하고 이를 제안하고자 한다. 또한, 제안된 최적 운영 모델의 타당성을 보이기 위하여 열거래를 고려한 2개의 인접한 지역 냉난방 사업자의 최적 운영 결과와 미연계 시의 운영결과에 대한 손익을 비교분석하였다.

2. 지역 냉난방 시스템의 구성

2.1 열병합 발전설비

열병합 발전설비는 열과 전기를 동시에 생산하는 발전설비로 구성상 화력발전설비와 크게 차이가 없다. 지역 냉난방 공급 시스템은 신도시 등 주로 수요지 인근에 위치하므로 LNG와 같은 청정연료를 사용하며 가스보일러를 이용한 증기터빈 발전 방식과 가스터빈 복합발전 방식이 주로 건설되고 있다. 가스터빈 복합발전은 가스터빈발전기를 구동하고 나온 배열을 배열회수 보일러에 도입하여 증기를 생산하고 증기터빈을 구동하는 발전 방식이다. 최근에는 전체 사이클 기동특성이 향상되어 가스터빈 단독운전을 위한 우회연돌(bypass stack)을 설치하지 않는 것이 일반적이며 따라서 기동 시 출력이 ramp rate에 의해 선형적으로 변화하지 않고 단계적으로 변화하는 특성을 보인다.

2.2 열전용 보일러

열전용 보일러는 스팀 또는 중온수의 형태로 열을 생산하는 보일러로서 운전조작이 간편하고 기동이 신속하여 열병합발전설비의 휴지 시 대체 열 공급의 기능과 첨두부하 시

* Dept. of Electrical Eng., Incheon National Univ.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Eng., Incheon National Univ, Korea

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr

Received : October 9, 2013; Accepted : October 28, 2013

열 공급을 담당하는 역할을 한다.

2.3 축열조

축열조는 열에너지 저장장치로서 열병합 발전설비 가동 시 발생하는 잉여열을 축열하였다가 저부하시 방열하여 열병합 발전설비의 이용효율을 최적화하거나 침두부하 시 열공급을 담당하기 위해 사용된다. 또한 열배관망을 가압하여 중온수의 증발을 방지하고 압력 변동을 흡수하며 지역난방 펌프의 흡입수두를 제공하는 부가적인 역할도 수행한다.

2.4 열거래 네트워크

공급 권역이 다른 사업자간 열거래시 대체 열 공급원 확보, 잉여 열 판매 및 저가 열 수요에 의한 경영수지 개선, 지역 난방공급 시스템의 이용 효율 최적화에 의한 국가 에너지 이용효율의 향상 및 배출물질 감소 등의 이점이 발생한다. 연계방법으로는 열 배관을 직접 연결하는 직접식과 열교환기를 통해 연계하는 간접식이 있다. 직접 연결 시 손실유량의 보충, 중온수 화학처리, 배관망 압력유지 등의 여러 문제가 있으므로 열교환기를 통한 간접연계 방식이 주로 이용된다.

3. 가스터빈 복합발전의 기동특성을 고려한 열거래 기반 지역 난방 시스템의 최적 운영 모델

3.1 목적함수

열거래를 고려한 통합지역난방 시스템의 최적운영에서 목적함수는 서로 다른 공급권역에 위치한 개별사업자간의 열네트워크 연계를 통해 각각 지역의 열부하를 만족시키면서 지역난방시스템을 구성하는 각종설비의 운전조건과 제약사항을 고려하여 전체운영비용을 최소화함으로써 이익을 극대화시키는 것이 목적이 된다.

$$\text{Max} [\text{profit} - \text{cost}] \quad (1)$$

매출이익은 지역난방시스템을 구성하는 열병합 발전설비의 전력 판매 이익과 열 판매 이익으로 구성된다. 전기 판매 이익은 생산된 전력 $PG_i(t)$ 와 전력 판매 가격인 $SMP(t)$ 와의 곱으로 표현된다. 여기서, 전력 판매 가격인 $SMP(t)$ 는 전력시장운영에 따라 결정되는 계통한계가격(SMP : system marginal price)으로 매 시간대 계통의 전력수요를 만족시키는 발전설비들의 공급능력 최상단에 위치하는 발전기의 변동비이다. 열 판매 이익은 각 사업자의 지역열부하 $HLOAD_i(t)$ 에 대한 판매이익과 열네트워크에 대한 송열량 $HE_i(t)$ 에 대한 판매이익으로 구성된다. 각각의 가격은 열판매가격 HSP 와 송열단가 HCP 로 표현되며 T 는 일일 운영구간인 24시간을 의미하고 N 은 사업자의 수를 의미한다.

$$\text{profit} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [PG_i(t) \times SMP(t) + HLOAD_i(t) \times HSP + HE_i(t) \times HCP] \quad (2)$$

비용은 발전기 및 보일러를 가동하는 비용 및 수열비용으로 구성된다. 발전기의 가동비용은 운전비, 기동비, 고정비로 구성되며 운전비용은 발전기의 가동에 따른 연료비용으로 T 시간대 발전기 출력 $PG_i(t)$ 와 운전비 $CG_i(t)$ 의 곱이 된다. 기동비는 발전기 기동시 발생하는 전력비, 용수비, 약품비 등으로 기동시에 발생하며 발전기 기동표지자 $Y_i(t)$ 와 기동비용 $CS_i(t)$ 의 곱이 된다. 고정비는 무부하비용으로 발전기가 운전되는 동안 일정하게 발생하는 비용이며 t 시간대 발전기의 운전상태 표지자인 $Z_i(t)$ 와 고정비용 $CF_i(t)$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

보일러의 가동비용은 운전비, 기동비로 구성되며 운전비용은 보일러의 가동에 따른 연료비용으로 t 시간대 보일러 출력 $HHOB_i(t)$ 와 운전비 $CHOB_i(t)$ 의 곱이 된다. 기동비는 보일러 기동시 발생하는 전력비, 피치연료비 등으로 보일러 기동표지자 $B_i(t)$ 와 기동비용 $CSB_i(t)$ 의 곱이 된다.

수열비용은 연계된 열 네트워크로부터 필요한 열을 수열받을 경우 발생하는 비용으로 수열량 $HI_i(t)$ 와 수열단가 HRP 의 곱으로 표현된다.

$$\text{cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [PG_i(t) \times CG_i(t) + CS_i(t) \times Y_i(t) + CF_i \times Z_i(t) + HHOB_i(t) \times CHOB_i + CSB_i \times B_i(t) + HI_i(t) \times HRP] \quad (3)$$

3.2 제약조건

3.2.1 열수급조건

각 지역난방 사업자는 각각의 열병합발전설비, 열전용 보일러, 축열조 등을 이용하여 경제적인 열을 생산하며 열네트워크와 연계하여 잉여열을 송열하거나 부족열을 수열 함으로써 매시간대 소비자의 열 수요를 충족시킨다.

$$\sum_{i=1}^N [HG_i(t) + HHOB_i(t) + HI_i(t) + DHACC_i(t) - CHACC_i(t) - HE_i(t) - HLOAD_i(t)] = 0 \quad (4)$$

여기서 $HG_i(t)$ 와 $HHOB_i(t)$ 는 각각 발전기와 보일러의 열생산량이며 $DHACC_i(t)$ 는 축열조의 방열량, $CHACC_i(t)$ 는 축열량을 나타낸다. $HI_i(t)$ 와 $HE_i(t)$ 는 연계 계통으로부터의 수열량과 송열량을 나타낸다.

3.2.2 발전기의 운전범위

발전기는 저 부하 운전시의 효율저하를 고려하여 최소출력 $PG_{i,min}$ 과 최대출력 $PG_{i,max}$ 사이에서 운전되며 다음과 같이 표현된다.

$$PG_{i,min} \leq PG_i(t) \leq PG_{i,max} \quad (5)$$

3.2.3 복합 발전기 기동특성

Combined cycle(C/C) 기동시 선행호기 병입후 HRSG(heat recovery steam generator) 가압 및 스팀터빈 Warm-up

완료시점까지 가스터빈(G/T) 최소부하로 운전되며 스팀터빈(S/T) 기동 및 후행호기 기동 후 터빈 바이패스 운전 종료 시까지 출력이 단계적으로 변화하는 특성을 보인다.

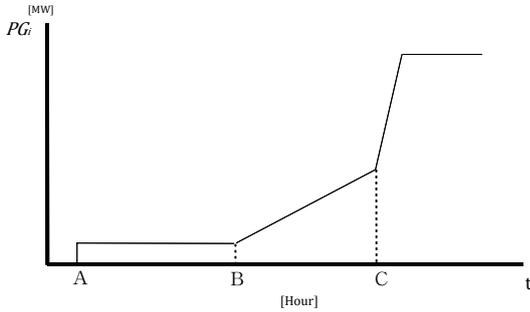


그림 1 복합화력 발전기의 기동곡선
Fig. 1 Starting curve of combined cycle power plant

그림 1에서 A-B구간은 G/T 1대 운전에 의한 S/T warm-up구간이며 이 시간동안 출력은 선행 G/T 1대의 최소출력으로 운전된다. B-C구간은 ST warm-up이 종료되고 S/T와 후행 G/T의 출력이 발생하는 구간으로 G/T 부하증발 및 turbine bypass 운전에 의해 S/T출력이 증발된다. C 시점에서 turbine bypass 운전이 종료되어 ramp rate에 의해 출력이 변동되는 C/C 최소출력에 도달된다.

A-B구간과 B-C구간의 기동 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$PG_i(t-1) = PGS_{i,1} \times Y_i(t) \quad (6)$$

$$PG_i(t-2) = PGS_{i,2} \times Y_i(t)$$

여기에서 $Y_i(t)$ 는 발전기의 기동표지자이며 $PGS_{i,1}$ 은 기동시 B-C구간 출력, $PGS_{i,2}$ 는 A-B구간 출력을 나타낸다.

3.2.4 발전기 증감발률

발전기의 출력 증감발은 다음의 제약식으로 표현되며 RDR_i 은 감발률, RUR_i 은 증발률을 나타낸다.

$$PG_i(t-1) - PG_i(t) \leq RDR_i, \text{ when } PG_i(t) \leq PG_i(t-1) \quad (7)$$

$$PG_i(t) - PG_i(t-1) \leq RUR_i, \text{ when } PG_i(t) \geq PG_i(t-1)$$

3.2.5 발전기 운전비용의 구간별 선형 근사화

발전기의 운전비용을 나타내는 비용함수는 다음과 같이 2차식으로 표현된다.

$$CG_i(t) = a_i PG_i^2 + b_i PG_i + c_i \quad (8)$$

혼합정수계획법에서는 목적함수나 제약식을 2차식으로 표현할 수 없으므로 발전기의 운전비용을 나타내기 위해 구간별 선형 근사화(piecewise approximation)가 필요하다. 발전기의 비용함수에서 운전 점을 구분하고 해당구간의 비용을 선형화하여 표현함으로써 발전기의 비용을 근사하여 표현할 수 있다[9][16].

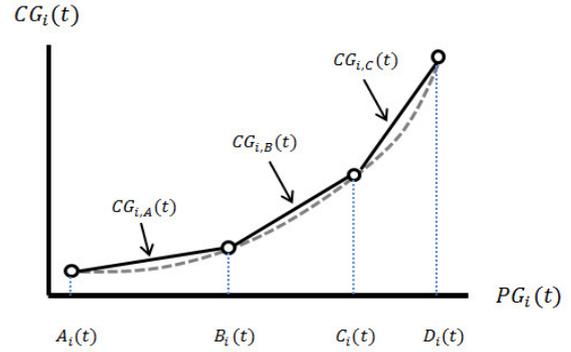


그림 2 비용함수의 선형 근사화
Fig. 2 Piecewise approximation of cost function

발전기의 비용함수를 A, B, C 3개의 구간으로 구분한 경우 발전기의 출력 $PG_i(t)$ 는 각 구간 출력의 합으로 정의된다.

$$PG_i(t) = PG_{i,A}(t) + PG_{i,B}(t) + PG_{i,C}(t) \quad (9)$$

각 구간출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$PG_{i,A}(t) \leq [B_i(t) - A_i(t)] \times Z(t) \quad (10)$$

$$PG_{i,B}(t) \leq [C_i(t) - B_i(t)] \times Z(t)$$

$$PG_{i,C}(t) \leq [D_i(t) - C_i(t)] \times Z(t)$$

3.2.6 발전기의 운전 및 기동 표지

발전기의 운전 상태를 나타내는 이진변수를 $Z_i(t)$, t-1시간에서 운전되었다가 t시간에서 정지 시 1을 나타내는 이진변수를 $S_i(t)$ 라 하고 t시간에서 발전기 기동을 나타내는 이진변수를 $Y_i(t)$ 라 할 때 발전기의 운전 및 기동에 관한 논리적 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_i(t) - S_i(t) = Z_i(t) - Z_i(t-1) \quad (11)$$

$$Y_i(t) + S_i(t) \leq 1$$

3.2.7 가변열전비

열병합 발전기는 전기를 생산하고 남은 배열을 이용하여 열을 생산하는 설비로서 발전기출력에 비례하여 열출력이 생산된다. 열출력에 대한 전기출력의 비를 열전비라 하며 이를 가변 하여 열을 생산함으로써 경제적으로 운전할 수 있다. 가스터빈 복합발전방식의 지역냉난방 시스템에서는 열부하와 전기판매가격을 고려하여 열 추종운전 또는 전기 추종운전을 하게 되며 그에 따라 열전비가 변화한다. 이는 가변 열전비를 가지는 시스템으로 생각할 수 있으며 시스템은 최대 열전비와 최저 열전비 사이의 최적 점에서 운전된다[1][2].

열병합발전기의 가변 열전비 특성은 다음과 같이 표현된다[1].

$$HG_i(t) \leq PG_i(t) / K_i^L \quad (12)$$

$$HG_i(t) \geq PG_i(t) / K_i^H$$

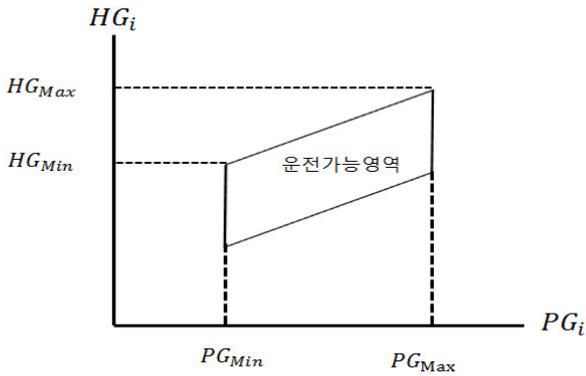


그림 3 열병합 발전기의 운전가능영역
Fig. 3 Feasible production area of CHP

여기서 K_i^L 는 발전기의 최소 열전비이며 K_i^H 는 최대 열전비를 나타낸다.

3.2.8 보일러의 운전범위

보일러는 최소출력 $HHOB_{i,min}$ 과 최대출력 $HHOB_{i,max}$ 사이에서 운전된다.

$$HHOB_{i,min} \leq HHOB_i(t) \leq HHOB_{i,max} \quad (13)$$

3.2.9 보일러의 운전 및 기동 표지

보일러의 운전 상태를 나타내는 이진변수를 $C_i(t)$, t-1시간에서 운전되었다가 t시간에서 정지 시 1을 나타내는 이진변수를 $D_i(t)$ 라 하고 t시간에서 발전기 기동을 나타내는 이진변수를 $B_i(t)$ 라 할 때 보일러의 운전 및 기동에 관한 논리적 특성은 다음과 같이 표현된다.

$$B_i(t) - D_i(t) = C_i(t) - C_i(t-1) \quad (14)$$

$$B_i(t) + D_i(t) \leq 1$$

3.2.10 축방열 한계

축열 운전 시 생산된 열을 축열조로 이송하여 저장하거나 방열 운전 시 저장된 열을 부하에 공급하는 역할은 지역난방 펌프가 담당한다. $CHACC_{i,min}$ 과 $DHACC_{i,min}$ 은 축열조의 순시 최소 축/방열량이며, $CHACC_{i,max}$ 과 $DHACC_{i,max}$ 는 축열조의 순시 최대 축/방열량으로 지역난방 펌프의 용량에 의해 제한된다.

$$CHACC_{i,min} \leq CHACC_i(t) \leq CHACC_{i,max} \quad (15)$$

$$DHACC_{i,min} \leq DHACC_i(t) \leq DHACC_{i,max}$$

3.2.11 축열조 운영범위

축열조는 열에너지 저장장치로서 저장할 수 있는 최대용량 이내에서 운전되며 비상시 열 공급을 고려하여 최소 저장용량을 설정하여 운영한다. $ACC_{i,min}$ 은 축열조의 최소 저장용량, $ACC_{i,max}$ 는 축열조의 최대 저장용량을 나타낸다.

$$ACC_{i,min} \leq ACC_i(t) \leq ACC_{i,max} \quad (16)$$

축열조의 시간대별 저장량은 다음의 제약식으로 표현되며 초기 저장량으로 $ACCINI_i$ 가 주어진다. t시간대 축열조의 보유열량 $ACC_i(t)$ 는 전 시간대 축열조의 보유열량 $ACC_i(t-1)$ 과 축열량 $DHACC_i(t)$ 의 합과 방열량 $CHACC_i(t)$ 의 차로 표현된다.

$$ACC_i(t) \leq ACC_i(t-1) + DHACC_i(t) - CHACC_i(t) \quad (17)$$

4. 사례 연구

열거래를 고려한 지역 냉난방 시스템의 최적운동을 모의하기 위해 열병합 발전기(CHP), 열전용 보일러(HOB), 축열조(ACC)를 보유한 인천지역의 인접한 2개 지역 냉난방 사업자의 실제 설비 및 수요데이터를 기반으로 상호간 연계시와 미연계시의 운영상황을 모델링하여 손익을 비교분석하였다.

모델링에 사용한 수리계획법은 혼합정수계획법으로 분지한계법(branch and bound method)에 의해 해를 도출하였다. 분지한계법은 해의 집합을 열거해 가며 최적 해의 가능성을 검토하는 방법으로 가능한 해의 집합을 열거하는 분지(branching)와 해의 상한 값과 하한 값을 고려하여 가능성이 없는 집합은 고려대상에서 제외시키는 한계(bounding)를 통해 검토영역을 좁혀나가며 최적 해를 찾는 방법이다.

또한 최근 건설되고 있는 복합화력 발전기의 기동 시 전기출력 특성을 반영하여 실제의 운전과 가깝도록 모델링함으로써 최적의 해를 도출하였으며 실제 운영 시에도 적용할 수 있도록 하였다.

4.1 입력데이터

사례연구를 위해 사용한 열병합 발전기의 입력 데이터는 표 1, 표 2와 같다.

표 1 열병합 발전기 입력 데이터 1

Table 1 Input data of CHP

구분	연료비 계수			열전비	
	a	b	c	상한	하한
사업자 1	0.000559	1.608124	40.042	4	1.2
사업자 2	0.004453	2.411826	7.404682	1.2	0.45

표 2 열병합 발전기 입력 데이터 2

Table 2 Input data of CHP

구분	고정비용 [천원]	기동비용 [천원/회]	출력범위 [MW]	
			최소	최대
사업자 1	50	1,413	130	205
사업자 2	40	1,000	10	24

HOB의 모델링에 사용한 입력 데이터는 표 3과 같다.

표 3 열전용 보일러 입력 데이터

Table 3 Input data of HOB

구분	운전비용 [천원]	기동비용 [천원/회]	출력범위 [Gcal/h]	
			최소	최대
사업자 1	109	50	10	103.4
사업자 2	109	68	30	206.3

ACC의 모델링에 사용한 입력 데이터는 표 4와 같다.

표 4 축열조 입력 데이터

Table 4 Input data of ACC

구분	축열조 용량 [Gcal]	초기 저장량 [Gcal]	축,방열한계 [Gcal/h]
사업자 1	990	650	132
사업자 2	800	194	68

사례연구에 적용된 계통한계 가격은 표 5와 같다.

표 5 계통한계가격 입력 데이터

Table 5 System marginal price input data

Hour	계통한계가격 [원/kWh]	Hour	계통한계가격 [원/kWh]
1	137	13	39
2	136	14	39
3	136	15	38
4	133	16	39
5	133	17	44
6	133	18	66
7	133	19	130
8	133	20	131
9	128	21	133
10	66	22	135
11	44	23	135
12	39	24	136

지역 냉난방사업자의 열수요는 표 6과 같다.

4.2 축열조 운영 결과

그림 4와 5는 모의에 의한 각 지역냉난방 사업자의 축열조 운영상황을 보여주는 것으로 열병합 발전기의 가동에 의해 생산된 잉여열을 축열하였다가 계통한계가격이 낮은 시간대에 열병합발전기가 정지 시 방열하여 에너지 저장장치로 기능함을 보이며 축열조의 축열과 방열운전을 통해 열수급조건을 만족시키기 위한 열생산 설비의 비용을 감소시킬

표 6 열수요 입력 데이터

Table 6 Heat demand input data

Hour	열수요1 [Gcal]	열수요2 [Gcal]	Hour	열수요1 [Gcal]	열수요2 [Gcal]
1	104	93	13	60	79
2	98	80	14	62	74
3	99	85	15	64	72
4	96	98	16	67	90
5	91	115	17	70	105
6	91	127	18	79	109
7	97	132	19	102	119
8	103	127	20	110	129
9	87	115	21	127	141
10	71	110	22	133	131
11	58	98	23	125	123
12	55	86	24	127	115

수 있음을 보여준다.

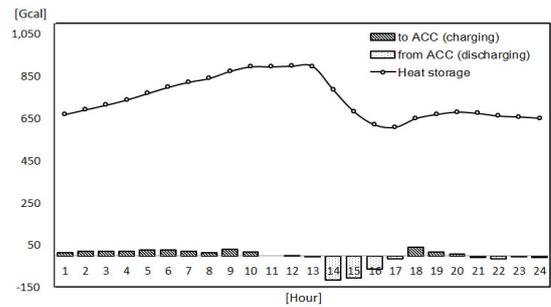


그림 4 사업자 1의 축열조 운영

Fig. 4 ACC operation of provider 1

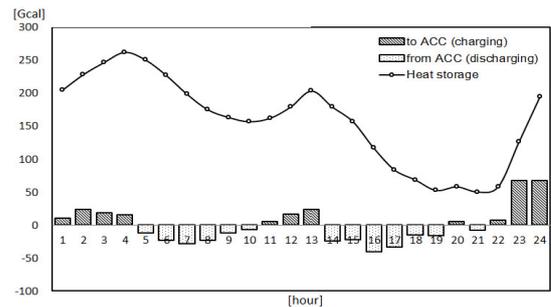


그림 5 사업자 2의 축열조 운영

Fig. 5 ACC operation of provider 2

4.3 열생산 설비 운영결과

그림 6과 7은 수요에 대응하는 지역 냉난방 시스템의 열 생산을 나타내는 것으로 해당 지역의 열 수요에 대응하기 위해 가동비용이 작은 열병합 발전기, 계통수열, 열전용 보일러의 순으로 가동함으로써 전체 운영비용을 최소화하기 위해 최적 운영되었음을 보여준다.

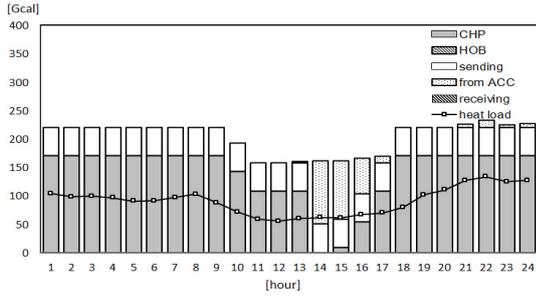


그림 6 사업자 1의 열수급균형
Fig. 6 Heat load balance of provider 1

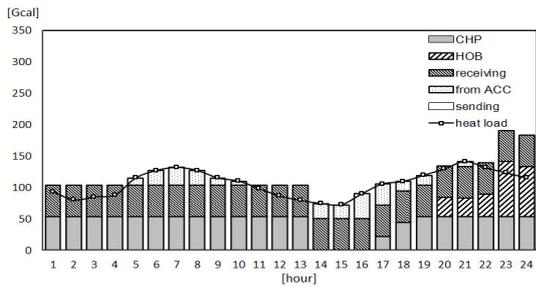


그림 7 사업자 2의 열수급균형
Fig. 7 Heat load balance of provider 2

4.4 열병합 발전기의 최적운영

그림 8과 9는 최적운영에 의한 열병합 발전기의 전력 및 열생산을 나타낸다. 사업자 1은 복합화력 형식의 열병합 발전기를 보유한 사업자로서 계통한계가격이 높은 시간대에

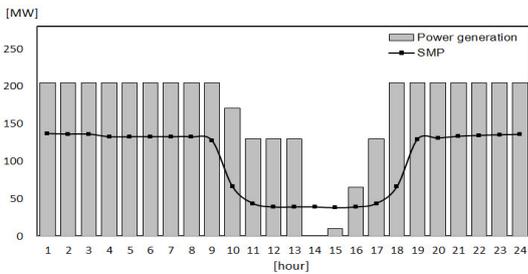


그림 8 사업자 1의 전력생산
Fig. 8 Power generation of provider 1

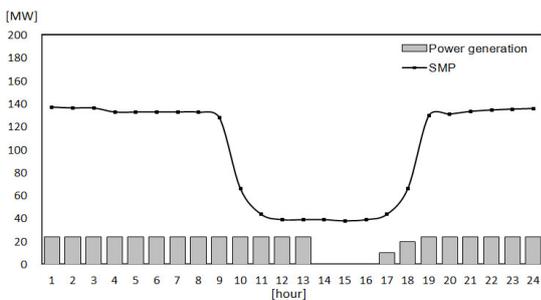


그림 9 사업자 2의 전력생산
Fig. 9 Power generation of provider 2

발전기를 가동하여 이익을 극대화하고 지역 열부하를 공급하고 남은 잉여열은 계통에 송열 및 축열조에 축열하며 계통한계가격이 낮은 시간대에 출력감소운전 및 정지함으로써 비용을 최소화함을 보여준다. 정지 후 재기동시 복합화력 발전기의 기동곡선에 의한 출력이 발생하여 기동특성이 잘 구현되었음을 보여준다.

사업자 2 역시 계통한계가격이 낮은 시간대에 정지하여 비용을 최소화함을 보여준다.

4.5 최적운영 결과 검토

실제의 운전 데이터를 이용하여 모의한 결과 사업자 1과 사업자 2의 지역 냉난방 시스템 연계 운전 시 전체 편익은 261,597,500원으로 목적함수와 제약조건에서 수열량과 송열량인 $HI_i(t)$ 와 $HE_i(t)$ 를 제거하고 계산된 각 사업자별 단독 운전시의 편익 198,540,300원에 비해 63,057,200원이 증가하여 연계모델이 최적으로 운영됨을 알 수 있다.

사업자 2의 경우 사업자 1로부터 수열을 받아 운전비용이 높은 HOB 가동이 회피되므로 연계 전 8,192,900원에서 45,822,200원으로 손익이 크게 개선되었다.

사업자 1 역시 연계공급을 위해 CHP가동이 증가하고 잉여열을 활용함으로써 연계 전 190,347,500원에서 215,775,300원으로 손익이 증가함으로써 혼합정수계획법을 이용한 지역 냉난방 시스템의 연계운영이 사업자의 경영수지 개선에 효과적임을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 가스터빈 복합발전 방식의 기동특성을 고려한 열거래 기반 지역 냉난방 시스템의 전체 편익을 최대화하기 위해 혼합정수계획법을 이용한 최적 운영 모델을 제안하였다.

또한, 사례연구로 제안한 모델을 이용하여 2개의 인접한 지역 냉난방 사업자의 열거래를 고려한 최적 운영과 미연계 운영과의 손익 비교분석을 수행하였다. 사례연구 결과 제안한 최적화 모델이 가스터빈 복합발전의 기동특성을 정확히 반영하고 있음을 확인할 수 있었고 열거래 기반 지역 냉난방 시스템의 전체 편익을 최대화하는 것을 확인할 수 있었다.

추후 전력계통의 효율적 운영을 위해 대용량 전력저장 장치의 도입이 검토되고 있는데, 이를 반영하여 확장된 운영 모델에 대한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] H.-M. Kim, M.-C. Shin, C.-H. Kim, and C.-Y. Won, "Optimum Operation of Small Power Producing Facilities Interconnected with Power System," Trans. KIEE, Vol. 44, No. 4, pp. 409-417, Apr. 1995.

[2] J.-H. Lee, and J.-S. Park, "Optimal Microgrid Operation Considering Combined Heat and Power Generation with Variable Heat and Electric Ratio," Trans. KIEE, Vol. 61, No. 10, pp. 1548-1533, Oct. 2012.

[3] J.-H. Lee, and B.-H. Lee, "Optimal Microgrid Operation Considering Fuel Cell and Combined Heat and Power Generation," Trans. KIEE, Vol. 62, No. 5, May. 2013.

[4] W. Gu, Z. Wu, and X. Yu, "Microgrid Economic Optimal Operation of the Combined Heat and Power System with Renewable Energy," Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Jul. 2010.

[5] C. M. Colson, and M. H. Nehrir, "A Review of Challenges to Real-Time Power Management of Microgrids," Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, Jul. 2009.

[6] A. K. Basu, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Planned Scheduling for Economic Power Sharing in a CHP-based Micro-Grid," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 27, No. 1, pp. 30-38, Feb. 2012.

[7] A. K. Basu, S. Chodhury, and S. P. Chowdhury, "Operational Management of CHP-based Microgrid," Proceedings of 2009 IEEE Power System Technology, pp. 24-28, Oct. 2009.

[8] C.-S. Kim, and C.-H. Rhee, "A Study on the Improvement of Subsidy Program for CHP Plant Connected with Capital Region District Heating System," Trans. KIEE Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 53, No. 2, pp. 97-103, Aug. 2004.

[9] K.-J. Lee, L.-H. Kim, and Y.-K. Yeo, "Optimization of Integrated District Heating System (IDHS) Based on the Forecasting Model for System Marginal Prices (SMP)," Korean Chem. Eng. Res, Vol. 50, No. 3, pp. 479-491, Jun. 2012.

[10] J.-S. Cha, "Optimum Operational Schedule for Cogeneration Systems using the Mixed Integer Programming," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 75 - 82, Sep. 2002.

[11] J.-B. Lee, "Optimal Operational Scheduling using Fuzzy Linear Programming Method on Cogeneration Systems," Journal of Energy Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 278 - 287, Oct. 1995.

[12] Y.-H. Kim, S.-M. Wooi, B.-M. Back, P.-H. Lee, and Y.-G. Kim, "A Study on the Optimal Bilateral Heat Transaction of CHP considering the Operation Modes," Journal of Energy Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 37 - 48, May. 2009.

[13] H.-N. Song, S.-H. Jang, H.-J. Kim, J.-H. Roh, and J.-B. Park, "Daily Unit Commitment Scheduling of

Power System with Energy Storage System," Trans. KIEE, Vol. 60, No. 4, pp. 717-725, Apr. 2011.

[14] Electric Power Statistic Information System [Online]. Available: <http://epsis.kpx.or.kr/>

[15] Korea Integrated Energy Network [Online]. Available: <http://kie.keei.re.kr/>

[16] Linus Schrage, Optimization modeling with lingo, LINDO systems Inc. 2006.

저 자 소 개



김종우 (金鍾宇)

인천대학교 공학대학원 전기공학과 석사과정. 현재 인천중합에너지(주) 운영팀 근무.

Tel : 032-830-6215

E-mail : young2me@e-inteco.co.kr

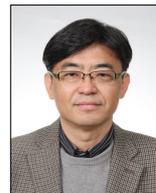


이지혜 (李枝濤)

2012년 8월 인천대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 032-835-4206

E-mail : jihyelee@incheon.ac.kr



김학만 (金學萬)

1998년 2월 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사). 2011년 3월 일본 토호쿠(東北)대학교 정보과학연구과 졸업(공학박사). 1996년 10월 ~ 2008년 2월 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원. 현재 인천대학교 공과대학 전기공학과 교수. 대한전기학회 시니어 회원.

Tel : 032-835-8706

E-mail : hmkim@incheon.ac.kr