

## 혼합정수계획법에 의한 열병합발전설비의 최적운용

(Optimum Operational Schedule for Cogeneration Systems using  
the Mixed Integer Programming)

차재상\*

(Jae - Sang Cha)

### 요 약

본 논문에서는 열병합발전설비의 최적운용계획을 위한 새로운 수리적 모델을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 에너지생산량에 따른 비용의 비선형적인 문제를 구간별로 선형화된 함수를 이용하여 혼합정수 계획법으로 모델링하였다. 제안한 수리적 모델은 종래 제시되었던 열병합발전설비의 최적운용을 위한 모델링 기법에서 해결하지 못했던 한계사항을 극복한 것으로서, 더욱 현실에 근접한 최적운용을 위한 모델이 되었다. 또한 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 다양한 사례에 대한 열병합발전설비의 최적 운용계획을 제시함으로써 수리적 모델의 유용성을 입증하였다.

### Abstract

This paper propose a new mathematical modelling method about optimum operational schedule for cogeneration systems. Proposed algorithm solving the energy product cost funtion in this paper is very similar to the real model that is, proposed algorithm solve nonlinear type of real model using mixed integer programming based on the piecewise linear function, while the conventional algorithms used before could not solve that kind of problems. The effectiveness of the proposed method is ascertained by the simulation results with varius case studies which are similar to real operation circumstances.

Key Words : cogeneration, mixed integer programming, optimum operation

### 1. 서 론

현재 세계적으로 부존자원의 고갈과 환경오염문제

가 심각한 사회문제로 대두됨에 따라, 환경친화적이면서도 고효율의 에너지자원을 개발하기 위한 열기가 뜨겁다. 열병합발전은 동일한 설비로부터 상이한 형태의 에너지, 즉, 전기에너지와 열에너지를 동시에 생산하는 종합에너지시스템으로서 에너지 종합효율이 다른 발전설비에 비해 월등히 높으므로, 전원계획 정책의 일환으로 대규모 공단 및 아파트단지등에 건설되어있는 실정이다[1]. 이러한 열병합발전은 새로

\* 주저자 : 서경대학교 정보통신공학과 전임강사

Tel/Fax : 02-940-7468

E-mail : chajs@skuniv.ac.kr

접수일자 : 2002년 7월 9일

1차심사 : 2002년 7월 12일

심사완료 : 2002년 8월 10일

## 혼합정수계획법에 의한 열병합발전 설비의 최적운용

은 에너지생산기술이 아니고 기존의 에너지설비를 조합하여 사용하는 복합설비이므로 에너지효율을 극대화시킬 수 있는 최적운용방안이 중요하다. 그리고 열병합발전설비는 현장에서 필요로 하는 전력부하를 충당하면서 잉여분의 전력은 예비용으로 저장하거나 전력회사에 판매할 수 있으며 부족분은 전력회사로부터 구매해야하므로 전력계통과 연계하여 접속되어야 한다[2]. 따라서 열병합발전설비를 전력계통과 연계시켜 최적 운용하는 연구가 많이 수행되어 상당한 수준에 도달되어있다[2~6]. 그러나 기존의 열병합발전설비의 최적화 기법들에서는 최적운용을 위해 가장 중요한 요소 중 하나인 열병합발전설비의 에너지생산비용단가를 산출함에 있어, 에너지생산비용단가가 에너지생산량에 대해 비선형적이라는 현실적인 가격 특성을 반영하지 못한 채 선형적으로만 모델링을 하였다. 그러므로 본 논문에서는 에너지생산비용의 비선형성을 반영하기 위해 구간적으로 선형화시키는 기법을 도입하고 혼합정수계획법[7]을 이용한 실제모델에 근접한 수리적 모델을 확립한다. 또한 시물레이션을 통해 다양한 사례에 대한 열병합발전설비의 최적운용계획을 제시함으로써 그 유용성을 명확히 하고자한다.

## 2. 열병합발전설비의 모델링

본 연구에서는 전력계통과 연계된 열병합발전설비의 시스템구성을 열병합발전설비, 전기저장장치, 전력부하, 열부하 그리고 보조보일러를 선택적으로 취하여 구성했으며, 열병합발전설비의 수리적 모델과 관련된 전기에너지 및 열에너지의 흐름을 그림 1에 나타냈다.

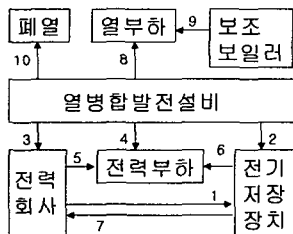


그림 1. 열병합 발전설비모델의 에너지 흐름도  
Fig. 1. Energy flow diagram of the cogeneration model

그림 1의 화살표는 하나의 구성요소에서 다른 구성요소로 이동하는 에너지 흐름의 경로를 나타낸다. 열병합발전설비의 최적운용을 위한 수리적 모델을 구성할 때 목적함수는 열병합발전설비의 측면에서 본 수익으로부터 비용을 뺀 순이익을 최대화시키는 것이다. 식(1)은 열병합발전시스템의 최적운용을 위한 목적함수로서 첫째 항은 전력회사에 전력을 판매함으로써 발생하는 수익부분이고 나머지 항은 전력회사로부터 전력을 구입하는 전력비용과 열병합발전설비의 발전비용, 보조보일러의 운전비용을 나타내는 비용부분이다.

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & \sum_{K=1}^N [p_K(Y_{3K} + Y_{7K}) - q_K(Y_{1K} + Y_{5K}) \\ & - s_K(Y_{2K} + (1/\gamma)Y_{3K} + Y_{4K}) - t_K Y_{9K}] \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에 사용된 기호를 포함해 수리적 모델을 위해 사용된 기호는 첨부 2에서 설명하고 있다.

식(1)의 목적함수에서 열병합발전설비의 발전비용과 보조보일러의 열에너지생산비용과 같은 에너지생산비용은 실제로 그 생산비용이 에너지의 생산량에 따라 변동하는 비선형적인 특성을 갖는다. 그러나 지금까지 수행되어온 기존의 연구[2~6]은 수리적 모델링에 있어서 에너지생산비용이 에너지의 생산량과 관계없이 일정하다고 간주하였으므로 목적함수의 비용함수부분의 모델링 자체가 현실성을 제대로 반영하지 못하는 문제점을 내포하고 있었다. 따라서 본 논문에서는 에너지저장비용 모델링부분을 포함한 최적화 모델에 관해서 종래의 방식에서 해결하지 못한 새로운 방식으로 더욱 현실에 가까운 새로운 모델링 기법을 제안한다. 즉, 에너지생산량에 따른 비용의 비선형적인 문제를 첨부 1에서 언급한 구간별선형화함수를 도입하여 혼합정수계획법[7]으로 모델링함으로써 한층 현실에 근접한 수리적 모델을 수립하였다.

## 3. 혼합정수계획법에 의한 수리적 모델

혼합정수계획법이란 사용하는 변수의 일부가 정수값인 혼합정수로 구성된 특수한 형태의 선형계획법

이며[7], 본 논문에서는 열병합발전설비의 수리적 모델에서 구간별로 선형화 시킨 함수를 수식화하기 위해 이용되었다. 식(1)에서 에너지 생산비용함수부분인  $s_K [Y_{2K} + (1/\gamma) Y_{3K} + Y_{4K}]$ 와  $t_K Y_{9K}$ 는 실제로 비선형적인 특성을 가지므로 이를 구간별로 선형화 시킨 형태의 목적함수로 변환시키기로 한다.

식(1)을 부분적으로 전개하면 식(2)가된다.

$$MAX \sum_{K=1}^N [p_K(Y_{3K} + Y_{7K}) - q_K(Y_{1K} + Y_{5K}) - s_K Y_{2K} - (1/\gamma)s_K Y_{3K} - s_K Y_{4K} - t_K Y_{9K}] \quad (2)$$

식(2)에서 에너지 생산비용을 나타내는  $s_K Y_{2K}$ ,  $(1/\gamma)s_K Y_{3K}$ ,  $s_K Y_{4K}$ , 그리고  $t_K Y_{9K}$ 는  $COB_1, COB_2, \dots, COB_n$ 와  $ABB_1, ABB_2, \dots, ABB_n$ 의 구분 점을 이용해 구간별 선형함수로서 표현될 수 있다.

### 3.1 경로2의 에너지생산비용함수

그림 1의 경로2의 비용인 전기에너지 생산비용함수[원]는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며 이때 식(4)~식(8)의 제약조건들이 추가된다[7].

$$f(Y_{2K}) = s_K Y_{2K} = \sum_{i=1}^K CZA_{iK} f(COB_i) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} CZA_{1K} &\leq CYA_{1K}, \quad CZA_{2K} \leq CYA_{1K} + CYA_{2K} \\ CZA_{3K} &\leq CYA_{2K} + CYA_{3K}, \quad \dots, \\ CZA_{(n-1)K} &\leq CYA_{(n-2)K} + CYA_{(n-3)K} \\ CZA_{nK} &\leq CYA_{(n-1)K} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{(n-1)K} CYA_{iK} = 1, \quad \sum_{i=1}^K CZA_{iK} = 1 \quad (5)$$

$$Y_{2K} = \sum_{i=1}^K CZA_{iK} COB_i \quad (6)$$

$$CYA_{iK} = 0 \text{ 또는 } 1 (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (7)$$

$$CZA_{iK} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

### 3.2 경로3의 에너지생산비용함수

경로3의 전기에너지 생산비용함수는 식(9)와 같다.

$$f(Y_{3K}) = (1/\gamma)s_K Y_{3K} = (1/\gamma) [\sum_{i=1}^K CZB_{iK} f(COB_i)] \quad (9)$$

이때 추가되는 제약조건들은 이하와 같다.

$$\begin{aligned} CZB_{1K} &\leq CYB_{1K}, \quad CZB_{2K} \leq CYB_{1K} + CYB_{2K} \\ CZB_{3K} &\leq CYB_{2K} + CYB_{3K}, \quad \dots, \\ CZB_{(n-1)K} &\leq CYB_{(n-2)K} + CYB_{(n-3)K} \\ CZB_{nK} &\leq CYB_{(n-1)K} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{(n-1)K} CYB_{iK} = 1, \quad \sum_{i=1}^K CZB_{iK} = 1 \quad (11)$$

$$Y_{3K} = \sum_{i=1}^K CZB_{iK} COB_i \quad (12)$$

$$CYB_{iK} = 0 \text{ 또는 } 1 (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (13)$$

$$CZB_{iK} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

### 3.3 경로4에서의 전기에너지생산비용함수

경로4에서의 전기에너지 생산비용함수[원]는 식(15)와 같이 표현되며, 식(16)~식(20)의 제약조건들이 추가된다.

$$f(Y_{4K}) = s_K Y_{4K} = \sum_{i=1}^K CZC_{iK} f(COB_i) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} CZC_{1K} &\leq CYC_{1K}, \quad CZC_{2K} \leq CYC_{1K} + CYC_{2K} \\ CZC_{3K} &\leq CYC_{2K} + CYC_{3K}, \quad \dots, \\ CZC_{(n-1)K} &\leq CYC_{(n-2)K} + CYC_{(n-3)K} \\ CZC_{nK} &\leq CYC_{(n-1)K} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{(n-1)K} CYC_{iK} = 1, \quad \sum_{i=1}^K CZC_{iK} = 1 \quad (17)$$

$$Y_{4K} = \sum_{i=1}^K CZC_{iK} COB_i \quad (18)$$

$$CYC_{iK} = 0 \text{ 또는 } 1 (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (19)$$

$$CZC_{iK} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

### 3.4 경로9의 에너지생산 비용함수

그림 1의 경로 9의 비용함수인 보조보일러의 열에너지 생산비용함수 또한 구간별 선형함수의 형태이므로 선형상수와 0-1변수를 이용해 식(21)과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 식(22)~식(26)의 제약조건들이 추가된다.

$$f(Y_{9K}) = t_K Y_{9K} = \sum_{i=1}^K AZA_{iK} f(ABB_i) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} AZA_{1K} &\leq AYA_{1K}, \quad AZA_{2K} \leq AYA_{1K} + AYA_{2K} \\ AZA_{3K} &\leq AYA_{2K} + AYA_{3K}, \quad \dots, \\ AZA_{(n-1)K} &\leq AYA_{(n-2)K} + AYA_{(n-3)K} \\ AZA_{nK} &\leq AYA_{(n-1)K} \end{aligned} \quad (22)$$

온압정수계획법에 의한 열병합발전 설비의 최적운용

$$\sum_{i=1}^{(n-1)k} AYA_{ik} = 1, \sum_{i=1}^n AZA_{ik} = 1 \quad (23)$$

$$Y_{9K} = \sum_{i=1}^n AZA_{ik} ABB_i \quad (24)$$

$$AYA_{ik} = 0 \text{ 또는 } 1 (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (25)$$

$$AZA_{ik} \geq 0 (i = 1, 2, \dots, n) \quad (26)$$

### 3.5 전기 에너지 저장장치의 제약조건

전기에너지 저장장치의 충전량은 단위시간구간에 대해  $R_1 \cdot \Delta T$ 을 초과할 수 없으며[4] 그 관계는 식 (27)과 같다.

$$0 \leq \epsilon\gamma Y_{1K} + \epsilon Y_{2K} \leq R_1 \cdot \Delta T \quad (27)$$

또한 방전시의 방전량은 단위시간구간에 대해  $R_2 \cdot \Delta T$ 을 초과할 수 없으며 그 관계는 식 (28)과 같다.

$$0 \leq (1/\delta) Y_{6K} + (1/\delta)(1/\gamma) Y_{7K} \leq R_2 \cdot \Delta T \quad (28)$$

각 시간구간의 시점에서의 저장량은 전기에너지 저장장치의 저장 가능한 최대용량을 초과할 수 없으며 이 관계는 식 (29)와 같다.

$$e_{i,j} = \mu^{i-1} X_0 + \sum_{k=1}^i \mu^{i-k} [\epsilon(\gamma Y_{1K} + Y_{2K}) - 1/\delta(Y_{6K} + (1/\gamma) Y_{7K})] \leq R_T \quad (29)$$

여기서  $X_0$ 는 각 주기에서의 초기저장량으로 최적화된 변수 또는 상수로 처리된다. 각 시간구간의 방전량은 저장장치에 저장된 전기에너지량을 초과할 수 없으며 그 관계는 다음과 같다.

$$\mu^{i-1} X_0 + \sum_{k=1}^i \mu^{i-k} [\epsilon(\gamma Y_{1K} + Y_{2K}) - 1/\delta(Y_{6K} + (1/\gamma) Y_{7K})] - 1/\delta(Y_{6i} + (1/\gamma) Y_{7i}) \geq 0 \quad (30)$$

주기성을 고려하면 주기의 마지막 N 시간간격의 종점에서의 전기에너지 저장량은  $X_0$ 와 같으며 이 관계를 정리하면 식 (31)과 같다.

$$(\mu^N - 1)X_0 + \sum_{k=1}^N \mu^{N-k+1} [\epsilon(\gamma Y_{1K} + Y_{2K}) - 1/\delta(Y_{6K} + (1/\gamma) Y_{7K})] = 0 \quad (31)$$

초기저장량  $X_0$ 는 최대 저장용량을 초과할 수 없으며 이 관계는 식 (32)와 같다.

$$X_0 \leq R_T \quad (32)$$

### 3.6 전력부하 및 열부하에 대한 제약조건

전력부하 및 열부하에 대한 제약조건은 식(33),(34)와 같다.

$$Y_{4K} + \gamma Y_{5K} + Y_{6K} = U_K \quad (33)$$

$$Y_{8K} + Y_{9K} = H_K \quad (34)$$

### 3.7 기타 제약조건

각 시간구간 동안 열병합 발전설비에서 생산된 전력량 및 열은 최소값과 최대값사이에 존재하며 이를 표현하면 다음과 같다.

$$CO_L \leq Y_{2K} + (1/\gamma)Y_{3K} + Y_{4K} \leq CO_H \quad (35)$$

$$(1/E_H)(Y_{2K} + (1/\gamma)Y_{3K} + Y_{4K}) \leq Y_{8K} \leq (1/E_L)(Y_{2K} + (1/\gamma)Y_{3K} + Y_{4K}) \quad (36)$$

폐열은 열병합 발전설비의 전기 및 에너지생산에 따른 손실로 다음과 같다.

$$Y_{10K} = (\beta_1/1 - \beta_1)(Y_{2K} + Y_{3K} + Y_{4K}) + (\beta_2/1 - \beta_2)(Y_{8K}) \quad (37)$$

또한 각 시간구간 동안 보조 보일러에서 생산된 증기량은 미리 설정된 최소 증기생산량과 최대 증기생산량 사이에 있어야 하며 이 관계는 식(38)과 같다.

$$AB_L \leq Y_{9K} \leq AB_H \quad (38)$$

## 4. 사례별 최적운용계획의 수립

본 연구에서는 시스템구성의 가변요소인 전기저장장치와 보조보일러의 선택유무에 따라 4가지 사례를 이용하였고, 각 사례는 기존의 모델링기법[2~6]과 달리 에너지저장장치의 비선형성을 구간별로 선형화하여 현실성을 반영하였다.

표 1. 사례별 입력자료의 특징

Table 1. Input-data characteristics of cases

◎: 고려함 ×: 고려하지 않음

	전기 저장장치	보조 보일러	특징 (그림1의 경로)
사례 1	×	×	1,2,6,7,9번 경로는 고려안함.
사례 2	◎	×	9번 경로는 고려안함.
사례 3	×	◎	1,2,6,7번 경로는 고려안함.
사례 4	◎	◎	모든 경로를 고려함.

표 2. 사례 1, 2의 입력데이터  
Table 2. Input-data of case 1,2

$R_T=20$ [MWh],  $R_1=5$ ,  $R_2=5$ ,  $\gamma=0.99$ ,  $\epsilon=0.95$ ,  $\beta_1=0.175$ ,  
 $\beta_2=0.095$ ,  $\delta=0.95$ ,  $\mu=0.95$ ,  $N=6$ ,  $\Delta T=4$ ,  $E_L=0.4$ ,  
 $E_H=0.8$ ,  $CO_L=5$ [MWh]  $\leq CO \leq CO_H=50$ [MWh]

K	s(K) [원/MWh]			p(K), q(K) [원/MWh]	전력 수요량 [MWh]	열 수요량 [MWh]
	5≤CO≤20 [MWh]	20≤CO≤40 [MWh]	40≤CO≤50 [MWh]			
1	30,000	20,000	25,000	24,700	33.4	32
2	30,000	20,000	25,000	24,700	34.1	34
3	30,000	20,000	25,000	37,000	37.9	31
4	30,000	20,000	25,000	37,000	38.0	27
5	30,000	20,000	25,000	44,800	35.0	31
6	30,000	20,000	25,000	24,700	34.2	28

K를 시간구간으로 정하고 6구간으로 구성된 한 주 기(1일; 24시간)에 대하여 각 요소들의 제약조건을 만족하는 범위 내에서 열병합발전설비를 최적으로 운용하는 계획을 확립하고 사례별 운용비용을 분석하였다. 사례별 입력자료로는 열 및 전력의 예측수요량과 구성요소별 에너지의 단가 등을 이용하였고, 에너지생산 비용함수는 구간별 선형함수로 표현하였다. 각 사례별 혼합정수계획법기반의 수리적 모델에 대해서는 최적화 시뮬레이션 툴인 Lindo를 사용하여 그 결과들을 도출하였다. 표 1에서 각 사례별 입력자료의 차이점을 정리해서 나타냈다.

표 3. 사례 3,4의 입력데이터  
Table 3. Input-data of case 3,4

$R_T=20$ [MWh],  $R_1=5$ ,  $R_2=5$ ,  $\gamma=0.99$ ,  $\epsilon=0.95$ ,  $\beta_1=0.175$ ,  
 $\beta_2=0.095$ ,  $\delta=0.95$ ,  $\mu=0.95$ ,  $N=6$ ,  $\Delta T=4$ ,  $E_L=0.4$ ,  
 $E_H=0.8$ ,  $CO_L=5$ [MWh]  $\leq CO \leq CO_H=50$ [MWh]  
 $AB_L=5$ [MWh]  $\leq AB \leq AB_H=40$ [MWh]

K	s(K) [원/MWh]			p(K), q(K) [원/MWh]	전력 수요량 [MWh]
	5≤CO≤20 [MWh]	20≤CO≤40 [MWh]	40≤CO≤50 [MWh]		
1	30,000	20,000	25,000	24,700	33.4
2	30,000	20,000	25,000	24,700	34.1
3	30,000	20,000	25,000	37,000	37.9
4	30,000	20,000	25,000	37,000	38.0
5	30,000	20,000	25,000	44,800	35.0
6	30,000	20,000	25,000	24,700	34.2

K	k(K) [원/MWh]			열수요량 [MWh]
	5≤CO≤20 [MWh]	20≤AB≤30 [MWh]	30≤AB≤40 [MWh]	
1	30,000	20,000	25,000	32.0
2	30,000	20,000	25,000	34.0
3	30,000	20,000	25,000	31.0
4	30,000	20,000	25,000	27.0
5	30,000	20,000	25,000	31.0
6	30,000	0,000	25,000	28.0

5. 사례별 시뮬레이션결과 및 고찰

시뮬레이션 결과, 각 사례별 최적운용계획은 표 4~표 7에 나타난 결과가 도출되었으며, 1일의 최적 운용비용은 표 8과 같은 결과가 나왔다.

표 4. 사례 1의 최적운용계획  
Table 4. Optimum operation schedule of case 1

단위: [MWh]

K	전력구입	전력판매	열병합발전전력	열병합발전열
1	13.54	0	20.0	32.0
2	14.24	0	20.0	34.0
3	18.08	0	20.0	31.0
4	18.18	0	20.0	27.0
5	15.15	0	20.0	31.0
6	14.34	0	20.0	28.0

표 5. 사례 2의 최적운용계획  
Table 5. Optimum operation schedule of case 2

K	전력구입	전력판매	열병합발전전력	열병합발전열	전기저장장치 입력량	출력량
1	13.54	0	20.0	32.0	0	0
2	35.49	0	20.0	34.0	20.0	0
3	18.08	0	20.0	31.0	0	0
4	20.25	0	20.0	27.0	1.97	0
5	0	5.51	20.0	31.0	0	19.26
6	14.34	0	20.0	28.0	0	0

표 6. 사례 3의 최적운용계획  
Table 6. Optimum operation schedule of case 3

K	전력구입	전력판매	열병합발전전력	열병합발전열	보조보일러 생산열
1	13.54	0	20.0	32.0	20
2	14.24	0	20.0	34.0	20
3	18.08	0	20.0	31.0	20
4	18.18	0	20.0	27.0	30
5	15.15	0	20.0	31.0	30
6	14.34	0	20.0	28.0	30

표 7. 사례4의 최적운용계획

Table 7. Optimum operation schedule of case 4

K.	전력 구입	전력 판매	열병합 발전 전력	열병합 발전열	전기저장장치		보조 보일러 생산열
					입력량	출력량	
1	13.54	0	20.0	32.0	0	0	20
2	35.49	0	20.0	34.0	20.01	0	20
3	18.08	0	20.0	31.0	0	0	20
4	18.18	0	20.0	27.0	1.97	0	30
5	0	3.01	20.0	31.0	0	18.01	30
6	14.34	0	20.0	28.0	0	0	30

표 8. 1일(24시간)의 최적운용비용

Table 8. Optimum operation cost for 24 hours

	1일 최적운용비용(원)
사례1	6,660,899
사례2	6,467,386
사례3	8,460,899
사례4	8,248,953

이상의 표 4~8에서 나타낸바와 같이 각 사례별 최적운용계획이 도출되었으며, 1일의 최적운용을 위한 비용을 분석한 결과, 열병합발전설비의 시스템구성과 운용 비용증감과의 관계, 및 효율적인 시스템구성방안을 확인할 수 있었으며 상세한 내용을 이하에 기술하였다.

### 5.1 전기저장장치추가에 따른 비용절감 효과

전기저장장치를 추가한 사례 2 및 사례 4가 전기저장장치를 추가하지 않은 사례 1 및 사례 3에 비해 1일의 최적운용비용이 각각 193,513원 및 211,946원씩 감소한다는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 열병합발전설비의 1일 최적운용비용의 절약 면에서는 전기저장장치의 부가가 효과적임을 확인하였다.

### 5.2 보조보일러에 의한 운용비용증가

보조보일러를 추가한 사례 3 및 사례 4가 보조보일러를 추가하지 않은 사례 1 및 사례 2에 비해 1일의 최적운용비용이 각각 원 1800,000 및 1781,567원씩 증가된다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 열병합발전설비의 1일 최적운용비용의 절약 면에서는 보조보일러가 비효과적임을 확인할 수 있었다.

### 5.3 효과적인 열병합발전설비의 시스템 구성

열병합발전설비의 다양한 구성에 대해 비교한 결과, 효율적인 발전설비를 구성하기 위해서는 전기 저장장치를 갖추는 것이 에너지관리에 효과적이다. 그리고 보조보일러는 운용비용의 이점보다는 보조 및 후비 열원으로서의 중요한 의미가 있기 때문에, 운용비용의 부담을 가중시키는 요소가 되므로 열부하의 특성을 고려해서 설치여부를 결정해야한다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 소형 열병합발전설비를 전력계통과 연계시켜 운용하는데 있어 에너지생산비용을 구간별로 선형화 하여 현실성을 반영한 새로운 수리적 모델을 제시하였다. 또한, 다양한 사례에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최적운용계획을 확립하였으며, 시스템구성에 따른 효율성을 검토하여 전기에너지저장장치와 보조보일러의 운용의 효과를 분석하였다. 본 논문에서 제시한 새로운 수리적 모델은 에너지생산비용의 현실적 가격변동을 반영할 수 있으므로, 소규모 열병합발전설비의 효율적인 에너지관리 및 최적운용에 아주 유용하게 활용되리라 생각된다.

## References

- (1) 김우조, "소형열병합발전의 당위성연구", 대한전기협회논문, 1992.
- (2) 김학만, 신명철, 김철환, 원종연, "전력계통과 연계된 소규모 발전설비의 최적운용", Trans. KIEE Vol. 44, No.4, April, 1995.
- (3) 김학만, 차재상, 신명철, "열병합발전계통을 고려한 전력계통의 경제급전", 대한전기학회 하계학술대회논문집, 1995.
- (4) H.B. Puttgen, and P.R. Macgregor, "Optimum scheduling procedure for cogenerating small power facilities", IEEE Trans. Power System, Vol.3, 575-582, Sep., 1988.
- (5) H.Choudjehbaklou, and H.B. Puttgen, "Optimization topics related to small power producing facilities operation under energy spot pricing policies", IEEE Trans. PARS-2, May, 1988.
- (6) B.L.Capehart, F.Mahoney, B.D.Sivazlian "Optimum operation of small power production facilities", Electric Power Systems Research, Vol.6, 225-233, Sep., 1983.
- (7) W. Winston, "Introduction to mathematical programming

application and algorithms", International Thomson Publishing, 1995.

**첨부1. 구간별선형함수 및 혼합정수 계획법에 의한 선형화기법**

그림2에서 표현한 구간별 선형함수를 일반화하면  $f(x) = \sum_{j=1}^n f_j(x_j)$ 이다. 여기서 각  $f_j(x_j)$ 는 각 구분점( $b_1, b_2, b_3, \dots$ )에서 기울기  $s_j$ 를 가지며, 구간 $x_j$ 에 대해서만 유효한 특징을 갖고 있다.

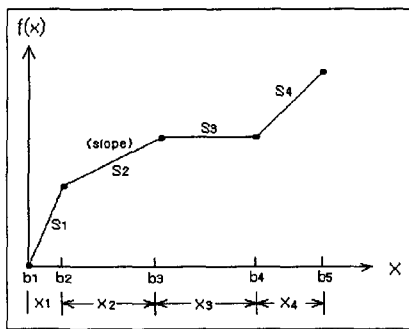


그림 2. 구간별 선형함수  
Fig. 2 piecewise linear function

구간별선형함수는 선형함수가 아니지만 0-1 변수를 이용함으로써 선형형태로 표현할수 있으며 이의 최적화문제는 혼합정수계획법[7]으로 해결할 수 있다. 구간별선형함수를 선형화한형태는 다음과 같다.

$$f(x) = z_1 f(b_1) + z_2 f(b_2) + \dots + z_n f(b_{n+1})$$

이때 추가되는 제약조건은 다음과 같다.

$$z_1 \leq y_1, \quad z_2 \leq y_1 + y_2, \quad z_3 \leq y_2 + y_3, \quad \dots,$$

$$z_{n-1} \leq y_{n-2} + y_{n-1}, \quad z_n \leq y_{n-1}$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n z_i = 1, \quad x = \sum_{i=1}^n z_i b_i$$

$$y_i = 0 \text{ 또는 } 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$z_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

여기서  $z_i$ 는 임의의 매개변수이고,  $y_i$ 는 0 또는 1의 변수이다.

**첨부2. 기호설명**

$K$  = 변수에 관한 시간구간 지정자,  $1 \leq K \leq N$

$j$  = 변수에 관한 시간구간 지정자,  $1 \leq j \leq N$

$N$  = 시간구간수

$\Delta T$  = 시간구간의 길이

$Y_{ik}$  =  $i$ 번째의 경로에서의 에너지의 흐름

$\gamma$  = 송전선 1, 3, 5, 7, 10의 효율계수

$b_k$  = 전력회사에의 전력판매가격[won/MWh]

$a_k$  = 전력회사에의 전력구입가격[won/MWh]

$U_k$  = 현장전력부하[MWh]

$H_k$  = 현장열부하[MWh]

$H_T$  = 전체 최적화주기 $N\Delta T$ 사이의 전체 열부하량 [MWh]

$S_K$  = 열병합 발전설비의 에너지생산비용[won/MWh]

$CO$  = 열병합발전설비의 발전용량[MWh]

$CO_L$  = 열병합발전설비의 최소발전용량[MWh]

$CO_H$  = 열병합발전설비의 최대발전용량[MWh]

$E_L$  = 열병합발전설비의 전기와 열생산의 최소비율[MWh]

$E_H$  = 열병합발전설비의 전기와 열생산의 최대비율[MWh]

$\beta_1$  = 열병합발전설비의 전기에너지생산시 발생하는 손실을

$\beta_2$  = 열병합발전설비의 열에너지생산시 발생하는 손실을

$CZA_{ik}$  = 구간별선형함수의  $i$ 번째 임의의 매개변수

$CYA_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{2k})$ 의  $i$ 번째의 0-1변수

$CZB_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{3k})$ 의  $i$ 번째 임의의 매개변수

$CYB_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{3k})$ 의  $i$ 번째 0-1변수

$CZC_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{4k})$ 의  $i$ 번째 임의의 매개변수

$CYC_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{4k})$ 의  $i$ 번째 0-1변수

$COB_i$  = 열병합발전설비의 전기에너지생산비용함수의

$i$ 번째 구분점

$f(COB_i)$  = 구분점  $COB_i$ 를 변수로 하는 함수

$t_k$  = 보조보일러의 열생산비용[won/MWh]

$AB$  = 보조보일러의 열생산량[MWh]

$AB_L$  = 보조보일러의 최소열생산량[MWh]

$AB_H$  = 보조보일러의 최대열생산량[MWh]

온입정수계획법에 의한 열병합발전 설비의 최적운용

$AZA_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{iK})$ 의  $i$ 번째 임의의 매개변수

$AYA_{ik}$  = 구간별선형함수  $f(Y_{iK})$ 의  $i$ 번째 0-1변수

$ABB_i$  = 보조보일러 열에너지생산비용함수의  $i$ 번째 구분점

$f(ABB_i)$  = 구분점  $ABB_i$  을 변수로하는 함수

$f(Y_{iK})$  = 시간구간  $K$ , 경로  $i$  에서의 에너지생산비용함수

$R_1$  = 전기에너지저장장치의 최대방전비율[MW]

$R_2$  = 전기에너지저장장치의 최대충전비율[MW]

$R_r$  = 전기에너지저장장치용량[MWh]

$\varepsilon$  = 전기에너지저장장치충전효율계수

$\delta$  = 전기에너지 저장장치방전효율계수

$X_0$  = 각 주기의 전기에너지저장장치의 초기저장량[MWh]

$X_F$  = 각 주기의 전기에너지저장장치의 최종저장량[MWh]

$\mu$  = 전기에너지저장장치의 효율계수

## ◇ 저자소개 ◇

### 차재상(車載祥)

1968년 1월 11일생. 1991년 성균관대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1997년 성균관대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 일본 東北대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사), 2000~2002년 한국전자통신연구원 이동통신연구소 선임연구원, 2002년~현재 서경대학교 정보통신공학과 전임강사.