

열병합발전시스템에서 퍼지선형계획법을 이용한 최적운전계획

이 종 범

원광대학교 공과대학 전기공학과

Optimal Operation Scheduling Using Fuzzy Linear Programming Method on Cogeneration Systems

Jong Beom Lee

Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

요 약

본 논문은 산업체의 열병합발전시스템이 각종 보조설비와 연계되어 운전되고 있을 경우의 최적운전계획을 수립하였다. 최적운전계획을 수립하기 위하여 열병합발전시스템의 수리적 모델링은 물론 각종 보조설비들의 모델링도 수립하였으며, 사례연구를 통하여 모델링의 효용성을 검토하였다. 본 논문에서는 열병합발전시스템의 방식에서 버터밍사이클을 대상으로 삼았다. 시뮬레이션은 우선 선형계획법을 이용하여 운전계획을 수립한 후에 그 결과를 바탕으로 퍼지선형계획법을 적용하였으며, 퍼지화의 정도에 따라 여러 Case를 구성하여 단기운전계획을 수립하였다. 사례연구를 통해 각종 보조설비들이 버터밍사이클 방식에서 효과적으로 운전될 수 있음을 확인하였으며 퍼지선형계획법의 도입전후에서 얻은 운전계획 결과와의 상호 비교, 검토를 통하여 퍼지선형계획법을 도입시켰을 경우 수립된 운전계획의 효용성을 평가하였다.

Abstract—This paper presents the optimal short-term operation scheduling by using fuzzy linear programming method on cogeneration systems connected with auxiliary equipments. Simulation is performed in case of the bottomming cycle. Modeling of cogeneration systems and auxiliary equipments is done, the effectiveness of modeling is evaluated through the detailed simulation. After the optimal operation scheduling is established by using linear programming method, the last optimal operation scheduling is established by using fuzzy linear programming method. The results of simulation show the auxiliary equipments can be efficiently operated in case of the bottomming cycle by modeling proposed in this paper. The effectiveness of operation scheduling gained by application of fuzzy linear programming method is evaluated by detailed comparison and investigation of the simulation results.

1. 서 론

지금까지의 발전방식은 대규모 집중방식으로 모든 설비가 대규모로 이루어졌다. 그러나 이러한 발전방식은 산업체에서 대부분 필요로 하는 열을 공급해 줄 수 없으므로 산업체는 필요로 하는 열을 확보하기 위해서 별도의 설비를 갖춰야 했다. 또한 국가적으로도 전체적인 에너지 이용면에서 볼 때에 에너지를 전력으로만 변화시키기 때문에 발전에 이용되는 것 이외에는 대부분이 손실이 되어 종합적인 에너지효율은 매우 낮을 수

밖에 없었다.

따라서 대규모 집중발전 설비에서 나타나는 손실을 최대한으로 줄이고 산업체 등에서 필요로 하는 열에너지를 충분히 공급할 수 있으며 높은 에너지 이용효율을 갖는 소규모 분산배치방식이 검토되어 선진국을 비롯하여 우리나라에서도 급격히 확산되고 있는 것이 최근의 추세이다. 그리고 이러한 추세에 따라 높은 에너지 이용효율을 갖는 여러가지 발전시스템 가운데 용량 및 에너지 이용관점에서 현재 산업체와 민간 및 전력회사 등에서 각광을 받고 있는 것이 열병합발전시스템이다.

이 발전시스템은 특히 에너지 이용효율이 높아 열수요와 전기수요의 적절한 조화가 가능할 때에는 전체적인 에너지 효율이 약 80% 정도에 달하는 경우도 있다. 따라서 국내에서도 최근 경인지방에 전력회사용으로 대규모 열병합발전시스템이 건설되어 운전되고 있으며, 산업체에도 앞으로 전국적으로 40여개 공단에 산업용 열병합발전시스템을 건설할 예정이다¹²⁾.

열병합발전시스템의 방식에는 톱핑 사이클(topping cycle) 방식과 버터밍 사이클(bottomming cycle) 방식으로 나눌 수가 있으며 각기 부하의 성격과 시스템의 설치 목적 및 운용기준에 따라 달라질 수가 있는데, 어느 방식이든³⁾ 열병합발전시스템은 전기 에너지와 열 에너지 모두를 효과적으로 운용하면서 발전시스템의 이익이 최대가 되는 입장에서의 적절한 운전계획을 수립하여야 한다. 지금까지의 연구는 열병합발전소의 규모산정 위한 연구⁴⁾와 각종 보조설비를 연계한 열병합발전시스템의 최적운전계획을 수립하였다⁵⁾.

따라서 본 논문에서는 산업체 열병합발전시스템에 각종 보조설비를 연계시키고 운전자의 경험에 어느 정도 반영될 수 있도록 하는 단기운전계획을 수립하였다. 고려된 보조설비들은 향후 사용될 가능성이 매우 높은 전기저장장치를 비롯하여 축열조, 보조보일러 및 독립발전기이며, 전기와 열부하의 시간대 요구량에 근거하여 단기운전계획을 수립하였다. 시뮬레이션은 먼저 선형계획법을 이용하여 결과를 얻었고 그것을 근거로 필요한 부분에 퍼지성을 부여하여 퍼지선형방정식을 구성하는 퍼지선형계획법⁶⁾을 이용하여서 최종적인 단기운전계획을 수립하였다. 또한 선형계획법과 퍼지선형계획법으로 시뮬레이션한 결과들을 종합적으로 비교, 분석함으로써 퍼지선형계획법에 의해 운전계획을 수립할 수 있음은 물론 퍼지선형계획법에 의해 구한 결과들이 보다 유연

성 있는 단기운전계획임을 확인할 수 있었다.

2. 열병합발전시스템의 최적운전을 위한 모델링

본 논문에서 고려한 보조설비들은 축열조, 전기저장장치, 보조보일러 및 독립발전기등이며 열병합발전시스템 방식은 열생산이 우선적인 버터밍사이클 방식을 선정하였다. 여기에 포함된 각종 보조설비들은 첨두 열부하, 첨두 전기부하를 위한 설비들이며 장시간 운전되는 경우는 드물지만 첨두부하시에는 아주 효과적인 설비들이므로 사용 가능한 보조설비들은 모두 연계하여 사례 연구를 실시하였다. Fig. 1는 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 에너지 흐름을 나타낸 것이며, 8시간대로 구분하여(1시간대는 3시간) 각 시간대별로 운전계획을 수립하게 된다.

위의 기호에서 열에너지와 전기에너지의 단위는 1[J]

Table. 1 Notatins used for modeling.

γ	: 전력회사와 산업체 사이의 송전효율을 [P.U.]
N	: 계산구간의 총수
Y_{kj}	: k선로에서의 j계산구간 동안의 에너지흐름 [MW]
μ_E	: 전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실을 [P.U.]
μ_T	: 축열조의 단위 시간당 열저장 손실을 [P.U.]
η_c	: 열병합발전시스템의 효율 [P.U.]
F_c	: 열병합발전시스템의 연료단가 [원/MWh]
SE_L	: 열병합발전시스템의 최소 열전비 [P.U.]
SE_H	: 열병합발전시스템의 최대 열전비 [P.U.]
ES_L	: 전기저장장치 최소 에너지 저장량 [MWh]
ES_H	: 전기저장장치 최대 에너지 저장량 [MWh]
ES_j	: 전기저장장치 j 구간말기 에너지 저장량 [MWh]
TS_j	: 축열조의 j 구간말기 에너지 저장량 [MWh]
IG_H	: 독립발전기 최대출력 [MW]
AB_H	: 보조보일러 최대출력 [MW]
F_e, F_f	: 독립발전기, 보조보일러 연료단가 [원/MWh]
TIME	: 계산구간의 시간대수
BUY_j	: 전력회사로부터 구매하는 전기의 단가 [원/MWh]
$SELL_j$: 전력회사에 판매하는 전기의 단가 [원/MWh]
COE_L	: 열병합발전시스템의 최소 전기출력 [MW]
COE_H	: 열병합발전시스템의 최대 전기출력 [MW]
COT_L	: 열병합발전시스템의 최소 열출력 [MW]
COT_H	: 열병합발전시스템의 최대 열출력 [MW]
ES_{CHG}	: 전기저장장치 내부전지 최대 충전율 [MW]
ES_{DSC}	: 전기저장장치 내부전지 최대 방전율 [MW]
ES_{E-CHG}	: 전기저장장치 충전효율 [P.U.]
ES_{E-DSC}	: 전기저장장치 방전효율 [P.U.]
$\delta_1 \sim \delta_4$: 송열관(1, 2, 3, 4선로) 열전송 효율 [P.U.]
TS_L, TS_H	: 축열조의 최소, 최대 에너지저장량 [MWh]
η_B, η_f	: 독립발전기, 보조보일러 효율 [P.U.]
η_{es}, η_{it}	: 폐열상수, 회수열상수

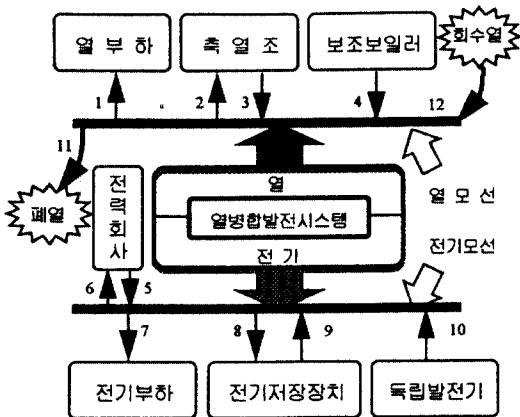


Fig. 1. Energy flow of cogeneration system.

=0.24[cal]의 관계에 의하여 환산되었으며 운전계획수립을 위해 대상기간내의 전기부하 및 열부하는 예측이나 자료를 통해 미리 주어지고 열병합발전시스템은 계속 운전되고 있으며, 열병합발전시스템의 효율을 비롯하여 독립발전기, 보조보일러 등의 효율은 거의 일정하다고 하였다. 그리고 전기를 판매하거나 구매할 때 발생하는 송전손실비용은 산업체에서 부담한다고 가정하였다.

이와 같은 가정하에서 목적함수는 열병합발전시스템에서 사용되는 연료비용, 보조설비에서 사용되는 연료비용, 전기의 판매 및 구매비용 등의 합이 최소화되는 식으로 구성하였으며, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

< 목적함수 >

$$\begin{aligned} \text{MIN} \sum_{j=1}^N [& \{ (\text{BUY}_j \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot Y_{5j} - \text{SELL}_j \cdot \gamma \cdot Y_{6j}) \\ & + (F_c \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j})) \\ & + (F_g \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Y_{10j} + F_s \cdot \frac{1}{\eta} \cdot Y_{4j}) \} \cdot \text{TIME}] \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 첫째 항은 전력회사로부터의 전기구매 및 판매시 발생하는 비용을 나타낸 것이며, 둘째 항은 열병합발전시스템에서 열생산에 소비되는 연료비용, 셋째 항은 독립발전기의 연료비용과 보조보일러의 연료비용을 나타낸 것이다. 또한 각 선로의 j 시간대에서의 에너지 흐름 제약조건식은 다음과 같다.

Fig. 2에서 에너지는 화살표 방향으로만 흐르게 되므로 k선로의 j시간대 에너지는 다음과 같이 된다.

$$Y_{kj} \geq 0 \quad (2)$$

열병합발전시스템의 열출력 상하한 제약은 다음과 같다.

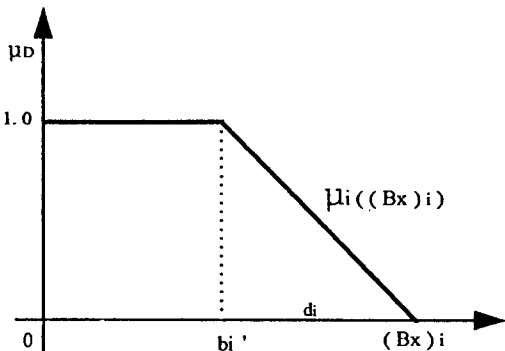


Fig. 2. Linear membership function.

$$\text{COT}_L \leq (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq \text{COT}_H \quad (3)$$

열병합발전시스템의 전기출력의 상하한 값은 생산된 열출력과 최대 및 최소 열전비와의 곱으로 표현되므로 전기출력 상하한 제약은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \leq \\ \text{SE}_H \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{SE}_L \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq \\ (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \end{aligned} \quad (5)$$

독립발전기의 전기출력 상한 제약과 보조보일러의 열출력 상한 제약은 보조설비의 최대출력 이내에서 운전되므로 다음과 같이 된다.

$$Y_{10j} \leq \text{IG}_H \quad (6)$$

$$(Y_{4j} / \delta_4) \leq \text{AB}_H \quad (7)$$

전기저장장치 내부전지의 최대 충·방전 제약은 저장장치 내부에서 자체적으로 발생하는 손실이며 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{8j} \leq (\text{ES}_{\text{CHG}} / \text{ES}_{\text{E-CHG}}) \quad (8)$$

$$Y_{9j} \leq (\text{ES}_{\text{DSC}} \cdot \text{ES}_{\text{E-DSC}}) \quad (9)$$

한편, 전기저장장치 에너지저장량 상하한 제약은 다음과 같으며,

$$\begin{aligned} \text{ES}_L \leq (Y_{8j} \cdot \text{ES}_{\text{E-CHG}} - Y_{9j} / \text{ES}_{\text{E-DSC}}) \cdot \text{TIME} \\ + \text{ES}_{j-1} \cdot (1 - \mu_E) \cdot \text{TIME} \leq \text{ES}_H \end{aligned} \quad (10)$$

축열조 에너지의 저장량 상하한 제약은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{TS}_L \leq (Y_{2j} \cdot \delta_2 - Y_{3j} / \delta_3) \cdot \text{TIME} \\ + \text{TS}_{j-1} \cdot (1 - \mu_T) \cdot \text{TIME} \leq \text{TS}_H \end{aligned} \quad (11)$$

또한, 전기부하제약과 열부하 제약은 이미 주어진 부하를 충분히 공급해야 하므로 다음과 같이 된다.

$$Y_{7j} = \text{전기부하}_j \quad (12)$$

$$Y_{1j} \cdot \delta_1 = \text{열부하}_j \quad (13)$$

열병합발전시스템은 열에너지를 유용하게 이용하지 못한 것과 복수기에서 빼앗긴 열에너지, 연도로 버려진 열에너지 등이 있는가 하면, 생산공정을 거친 열에너지의 일부는 회수된다. 그리고 복수기에서 뜨거운 물로서 열에너지는 남아 있게 된다. 따라서 폐열과 회수열은 열에너지 생산에 비례하여 어느 값 이상이 될 것으로 처리하였으며, 이에 근거한 제약식은 다음과 같다.

< 폐열 제약 >

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} - Y_{12j}) \cdot \eta_{wc} - y_{11j} \leq 0 \quad (14)$$

< 최수열 제약 >

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j}) \cdot \eta_n - Y_{12j} \leq 0 \quad (15)$$

3. 퍼지선형계획법

통상의 선형계획문제는 다음과 같은 행렬형식으로 간단히 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && Z = cx \\ &\text{subject to} && Ax \leq b \\ &&& x \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$: n차원 행벡터
 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$: n차원 열벡터
 $b = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$: m차원 열벡터
 $A = [a_{ij}]$: $m \times n$ 행렬

위의 통상의 선형계획문제는 다음과 같은 퍼지목적과 퍼지제약을 갖는 문제로 취급할 수 있으므로

$$\begin{aligned} &cx \leq Z_0 \\ &Ax \leq b \\ &x \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

가 된다. 여기서 기호는 퍼지 부등호로서 대략 어느 정도 이하 및 이상으로 취급하며 식 (17)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} &Bx \leq b' \\ &x \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

퍼지부등식 $Bx \leq b'$ 의 i번째 부등식 $(Bx)_i \leq b'_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$)에 대하여 다음과 같은 선형 membership 함수를 이용하여 의사결정자의 판단을 고려할 수 있는데, Fig. 2는 선형 membership 함수를 그림으로 표현한 것이다.

$$\mu_i((Bx)_i) = \begin{cases} 1 & : (Bx)_i \leq b'_i \text{ 일때} \\ 1 - \frac{(Bx)_i - b'_i}{d_i} & : b'_i \leq (Bx)_i \leq b'_i + d_i \text{ 일때} \\ 0 & : (Bx)_i \geq b'_i + d_i \text{ 일때} \end{cases} \quad (19)$$

Fig. 2에서 d_i 는 의사결정자가 임의로 결정하는 수치이며, 퍼지결정은 목적함수가 만족도(membership)함수에서 최대값을 갖도록 하면 다음과 같이 표현할 수가 있다.

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \geq 0} \min_{0 \leq i \leq m} \{ \mu_i((Bx)_i) \} \quad (20)$$

따라서 식 (20)을 만족하는 x^* 을 구하는 문제가 되므로 최소의 membership 함수를 최대로 하는 $x^* \geq 0$ 을 구하는 문제가 된다. 그러므로 식 (20)은 다음과 같이 구성된다.

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \geq 0} \min_{0 \leq i \leq m} \{ 1 + b'_i - (Bx)_i \} \quad (21)$$

여기서, $b'_i = b'_i/d_i, (Bx)_i = (Bx)_i/d_i$

그리고 이 문제는 결국 다음과 같은 통상의 선형계획 문제로 변환이 가능하다.

$$\begin{aligned} &\text{maximize} && \lambda \\ &\text{subject to} && \lambda \leq 1 + b'_i - (Bx)_i \\ &&& x \geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

위의 식에서 최적해를 λ^* 라고 하면 λ^* 는 퍼지목적과 퍼지제약에 대한 최대 만족도(membership)함수를 의미한다.

4. 퍼지선형계획법의 적용

퍼지선형계획법의 적용목적은 전체 운전비를 감소시키기 위해서 보다 운전패턴을 더 효과적으로 그리고 실제 상황에 근접하기 위한 적용이다. 따라서 종래의 비퍼지화로 운전계획을 수립했을 때 운전에 있어서 가장 큰 변수가 되는 열병합발전시스템의 최대 열출력과 최소 열출력에 퍼지성을 도입하고 목적함수인 전체 운전비도 퍼지성을 도입하였다.

4-1. 목적함수의 퍼지성

전체 운전비가 최소가 되도록 설정한 식 (1)에서 최소 운전비를 Z_0 라 한다면 식 (1)은 식 (23)처럼 표현될 수 있다.

그리고 식 (23)의 membership 함수는 Fig. 3과 같이 된다. Fig. 3에서 최소 운전비 Z_0 를 최고 만족도 1.0으로 표현하여 변수 d_i 는 의사결정자가 결정할 수 있는 하한 운전비의 퍼지성을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} f(d^*) = \sum_{j=1}^N [& \{ (BUY_j \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot Y_{3j} - SELL_j \cdot \gamma \cdot Y_{6j}) \\ & + (F_c \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j})) \\ & + (F_g \cdot \frac{1}{\eta_g} + y_{10j} + F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{4j}) \} \cdot \text{TIME}] \leq Z_0 \quad (23) \end{aligned}$$

4-2. 제약조건의 퍼지성

4-2-1. 최대 열출력의 퍼지성

열병합발전시스템이 발생할 수 있는 열출력의 제약인 식 (3)에서 최대 열출력에 퍼지성을 부여하면 식 (24)과 같아지며 membership 함수 표현은 Fig. 4와 같이 된다.

$$f(sb_{ij}) = (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq COT_H \quad (24)$$

4-2-2. 최소 열출력의 퍼지성

열출력 제약식인 식 (3)에서 최소 열출력에 퍼지성을

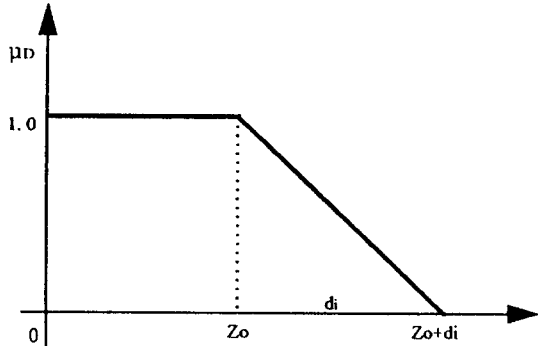


Fig. 3. Membership function on the total cost.

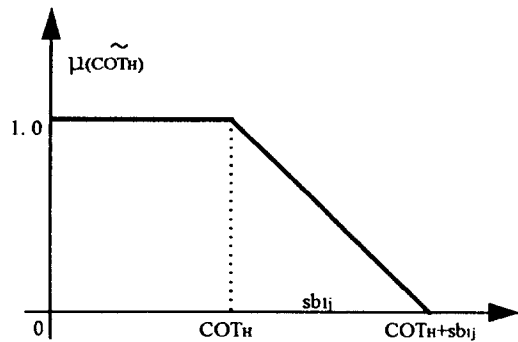


Fig. 4. Membership function of the maximum thermal output.

부여하면 식 (25)와 같아지며 membership 함수 표현은 Fig. 5와 같이 표현할 수 있다.

$$f(sb_{2j}) = (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \geq COT_L \quad (25)$$

따라서 위의 식 (23), (24) 및 (25)에 대해서 식 (22)을 적용하여 퍼지선형계획 문제를 일반화하고 1번 시간대만을 표현하면 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} & \max \lambda \\ & \text{subject to} \\ & \lambda \leq 1 + \frac{\left[\frac{Z_0}{COT_H} \right] - \left[\frac{f(D)}{f(sb_{1j})} \right]}{\left[\frac{d_i}{sb_{1j}} \right]} \quad (26) \\ & \left[\frac{d_i}{sb_{2j}} \right] \end{aligned}$$

5. 사례연구

본 연구를 위한 사례연구는 시간대별 전력요금 비율

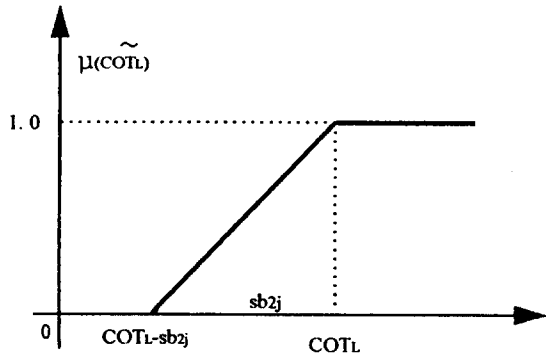


Fig. 5. Membership function of the minimum thermal output.

Table 2. Characteristics by cases.

Case	d _i	sb _{ij}	전기부하/열부하							
			1	2	3	4	5	6	7	8
A										
A-1	1,000	1.0	10/10	11/11	14/15	20/18	29/19	39.26	23/19	10/11
B										
B-1	1,000	1.0	10/10	11/11	14/15	20/18	29/19	30/21	23/19	10/11
C	500	1.0								
D	1,500	1.0								
E	1,000	0.5	10/10	11/11	14/15	20/18	29/19	39/26	23/19	10/11
F	1,000	1.5								
G	1,000	2.0								

을 하절기를 기준으로 하였으며, 시간대별 열부하, 전기 부하량과 의사결정자가 결정하는 d_i, sb_{ij} 값을 변화시켜 가며 사례연구를 실시하였다.

Table 2는 각 Case별 퍼지성이 변화되는 특징을 나타낸 것이며, 퍼지화 했을 때와 하지 않았을 때를 비교 검토하기 위해 A Case와 B Case는 퍼지성을 부여하지 않은 경우이며, 동일한 조건에서 A Case와 B Case에 퍼지성을 부여한 경우는 A-1 Case와 B-1 Case이다. A Case는 6번 시간대에 침두 열부하, 침두 전기부하가 발생한 경우이며, B Case는 침두 열부하, 침두 전기부하가 발생하지 않은 경우이다. 그리고 C,D,E Case는 d_i, sb_{ij} 값

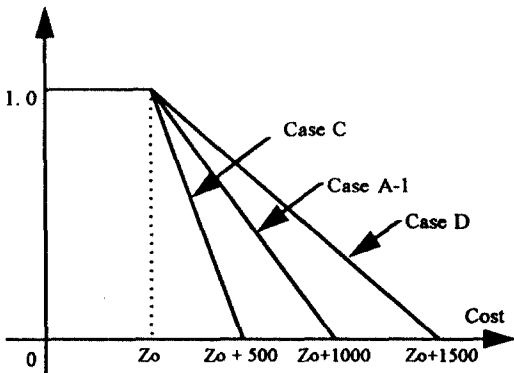


Fig. 6. Membership function by cases.

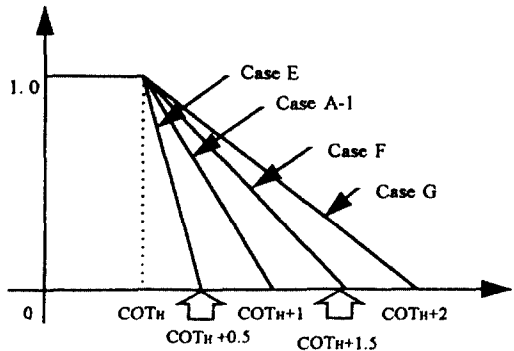


Fig. 7. membership function by cases.

Table 3. Basic input data.

시간대	→	1	2	3	4	5	6	7	8
전력요금 [원/MWh]	BUY, SELL	100	100	100	200	200	200	150	100
COE_H	25	ES_H	5	TS_L	1	F_i	80	F_c	80
COE_L	5	AB_H	5	ES_L	1	F_k	80	γ	0.99
TS_H	6	SE_H	1.3	ES_o	1	μ_e	0.001	η_c	0.6
δ_1	0.98	SE_L	0.8	TS_o	1	μ_T	0.001	η_a	0.7
δ_2, δ_3	1	IG_H	5	η_n	0.1	η_{we}	0.3	η_g	0.4

을 변화시킨 경우이다. 각 Case별 membership 함수를 표현하면 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

버터밍사이클 방식의 열병합발전시스템은 주어진 여러 가지 조건에 따라 운전방식이 다르기 때문에 본 연구에서는 현장성을 고려하기 위해 실제 운전중인 열병합발전시스템의 6개월간의 운전실적결과를 검토하여 전력 요금의 시간대 구분, 효율, 폐열, 회수열 등 입력자료의 일부를 구성하였으며 사례연구를 위해 사용된 기본입력 자료는 Table 3과 같다. 여기서 각 시간대는 각 계산구간을 의미하며, 1시간대는 3시간을 나타낸 것이다.

6. 결과분석

버터밍사이클 방식에서 운전계획은 주어진 열부하를 우선적으로 공급하기 위해 열을 생산하고, 각종 보조설비들은 시간대의 조건에 따라 적절하게 운전된다. 퍼지화 했을 때와 퍼지화 하지 않았을 때와 비슷하게 운전계획수립에 상이한 변화는 없지만 정확하게 설비들의 상한치, 하한치를 제약으로 규정했던 종래의 방식 보다는 어느정도 유연한 값을 설정해 줌으로써 운전계획수립에 있어서 효율성을 좀더 높일 수 있다는 장점이 있다.

Table 4는 기본입력자료를 근거한 A Case와 A-1 Case에서 최적운전계획수립의 결과를 나타낸 것이며, A Case의 경우 즉, 비퍼지화 했을 경우의 전체 운전비가 45,753원이었으므로 Fig. 3에서 Z_0 값은 45,400으로 설정하여 사례연구를 실시하였다.

Table 4에서 A Case, A-1 Case 모두 시간대별로 가격 차이가 없는 열은 수시로 축열조에 축열과 방열을 하여 운전되고 있으며, 시간대별로 가격차이가 있는 전력은 전력요금이 싼 시간대에 미리 충전을 하되 미리충전하여 발생하는 자체손실을 줄이기위해 전력요금이 변하는 시간대의 바로 이전 시간대에서 충전을 하여 운전된다. 또한 보조보일러와 독립발전기의 연료단가는 열병합발전시스템의 연료단가와 같지만 효율이 열병합발전시스템에 비해서 좋지않으므로 침두열부하, 침두전기부하시

Table 4. Results of the optimal operation scheduling (A Case, A-1 Case).

COST		TIME	구분	Y _{1j}	Y _{2j}	Y _{3j}	Y _{4j}	Y _{5j}	Y _{6j}
NF	F								
45,753	45,534	1	NF	10.20	0.001	0	0	0	6.58
			F		0.001	0	0	0	6.58
		2	NF	11.22	0.001	0	0	0	7.24
			F		0.001	0	0	0	7.24
		3	NF	15.31	0.001	0	0	0	9.39
			F		0.001	0	0	0	9.39
		4	NF	18.37	1.060	0	0	0	12.50
			F		1.668	0	0	0	12.67
		5	NF	19.39	0.612	0	0	0	3.50
			F		0.006	0	0	0	3.67
		6	NF	26.50	0	1.66	4.9	0.31	0
			F		0	1.66	4.76	0.14	0
		7	NF	19.39	0.612	0	0	0	9.50
			F		0.719	0	0	0	9.67
		8	NF	11.22	0	0.61	0	0	7.25
			F		0	0.72	0	0	7.08
TIME	구분	Y _{7j}	Y _{8j}	Y _{9j}	Y _{10j}	Y _{11j}	Y _{12j}	열생산량	
1	NF	10	0.001	0	0	3.83	1.28	12.76	
	F		0.001	0	0	3.83	1.28	12.76	
2	NF	11	0.001	0	0	4.21	1.40	14.03	
	F		0.001	0	0	4.21	1.40	14.03	
3	NF	14	1.483	0	0	5.74	1.91	19.13	
	F		1.483	0	0	5.74	1.91	19.13	
4	NF	20	0	0	0	8.07	2.50	25	
	F		0	0	0	7.61	2.51	25.13	
5	NF	29	0	0	0	7.50	2.50	25	
	F		0	0	0	8.25	2.51	25.13	
6	NF	39	0	1.187	5	7.50	2.50	25	
	F		0	1.187	5	7.54	2.51	25.13	
7	NF	23	0.001	0	0	7.50	2.50	25	
	F		0.001	0	0	7.54	2.51	25.13	
8	NF	10	0.001	0	0	3.98	1.33	13.27	
	F		0.001	0	0	3.94	1.31	13.14	

(참고) NF : 비퍼지, F : 퍼지

에 한해서 운전된다. 그리고 A Case 운전계획과 A-1 Case 운전계획을 비교하면 보조설비의 운전계획은 약간씩 시간대마다 차이가 있기는 하지만 근본적인 운전패턴에는 큰 변화가 없다. 그러나 퍼지성을 부여한 최대 열출력은 최대만족도의 범위 안에서 전력요금에 비싼 시간대에서 약간씩 증가시켜 열을 생산하고 있음을 알 수 있다. 최대 만족도는 보통 0.8 이상을 상회하여 나타나고 있다. Fig. 8은 각 Case의 최대 만족도의 변화를 나타낸 것이다.

6-1. 열생산계획

열병합발전시스템의 운전계획수립에 있어서 가장 중요한 운전계획은 열생산계획이다. 따라서 본 연구에서는 열병합발전시스템의 연료단가를 전력요금이 가장 싼 시간대의 80% 정도로 설정하여 열생산의 증가는 전력요금이 비싼 시간대의 전력의 구매량을 감소시켜 전체 운전비가 감소되도록 설정하였다. Fig. 9는 A Case 와 A-1 Case의 열생산계획을 그림으로 비교한 것이다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 동일한 조건에서 최대열출력에 퍼지성을 부여 하였을 때 최대 만족도를 유지하면서 열생산량을 약간 증가시켜 운전하고 있음을 알 수 있다.

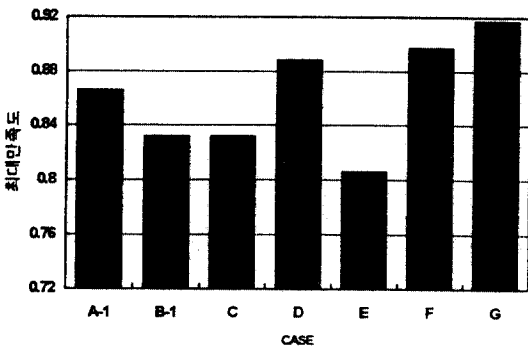


Fig. 8. Variatoin of maximum membership function.

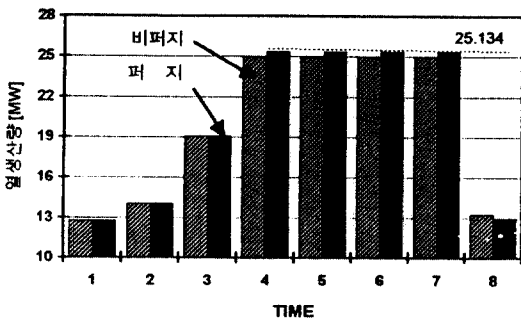


Fig. 9. Thermal production scheduling by times.

또한 동일한 조건에서 퍼지성을 어느정도 부여하느냐에 따라서 최대 열생산량이 조금씩 변화되어 나타났다. Fig. 10은 sb_{ij} 값을 변화시킨 Case의 열생산계획을 나타낸 것이며, Fig. 11은 d_i 값을 변화시킨 경우의 열생산량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 ()안의 수치는 최대 만족도를 나타낸 것이다. 여기에서는 시간대별로 변화가 있는 4~6번 시간대만을 그림으로 Table시하였다.

Fig. 10에서 sb_{ij} 값을 2%, 4%, 6% 및 8%로 증가시켰을 경우 최대 만족도는 증가하게 되고 최고만족도가 증가되므로 전체 운전비가 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 최대 열출력의 한계를 몇% 하느냐에 따라 최대 만족도가 허용하는 수준까지 증가하여 전체 운전비를 감소시킬 수 있다.

또한 Fig. 11에서도 sb_{ij} 값을 고정시키고 d_i 값을 1.1%, 2.2% 및 3.3%로 변화시켰을 경우에는 만족도는 감소되고 따라서 전체 운전cost가 약간씩 증가되었다.

6-2. 전력의 구매 및 판매

전력의 구매 및 판매계획도 전체운전비에 큰 영향을 준다. 열병합발전시스템에서 생산된 열에 의해 발생된 전기는 손실을 적게 하기 위해 3번 시간대에서 전기저장장치에 충전되는 양과 시간대별로 요구되는 전기부하

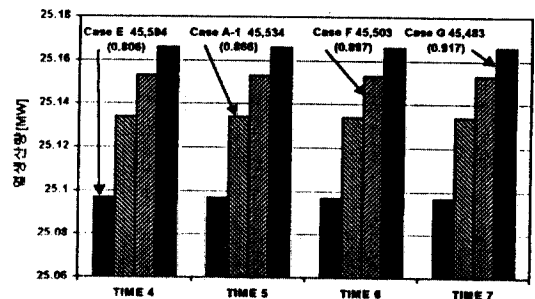


Fig. 10. Comparison of the thermal production scheduling by times.

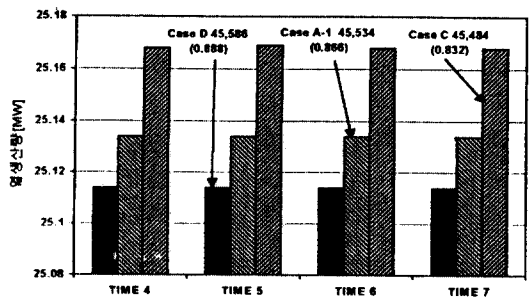


Fig. 11. Comparison of the thermal production scheduling by times.

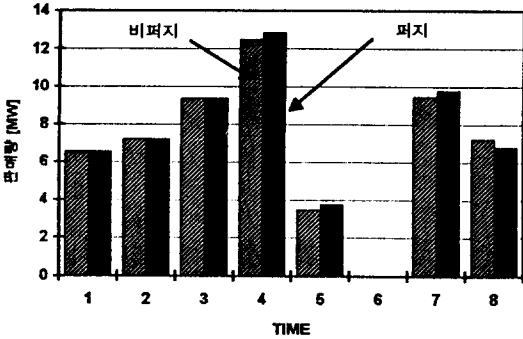


Fig. 12. Sell scheduling of the electric power by times.

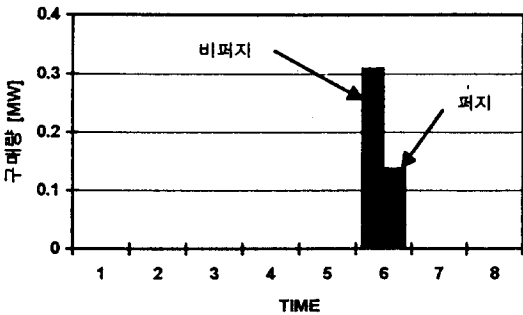


Fig. 13. Buy scheduling of the electric power by times.

에 공급되는 양을 제외하고는 모두 전력회사에 판매한다. 따라서 전력요금이 비싼 시간대에는 될수있는 한 전력구매를 억제하고 전력판매량을 증가시키는 방향으로 운전계획이 수립되었다. Fig. 12는 시간대별 전력의 판매계획을, 그리고 Fig. 13은 구매계획을 퍼지화 했을 경우와 비교하여 나타내었다.

Fig. 12에서 보면 퍼지화 했을 경우 열생산량이 증가되는 시간대 즉, 전력요금이 비싼 시간대에서는 전력의 판매량을 약간씩 증가시켜 운전하고 있으며, 1회 전력의 구매만 이루어지는 6번 시간대의 전력의 구매량도 소폭 줄었음을 알 수 있다.

6. 결 론

퍼지선형계획법은 종래의 선형계획문제의 목적이나 제약에 어느 특징치로 규정하기 어려운 수치에 어느 정도의 퍼지성을 부여한 다음 통상의 선형문제로 변환하여 문제를 다루기 때문에 통상의 선형문제에서 다룰 수 없는 문제를 다룰 수 있는 것은 아니지만 더 효과적으로 문제를 접근할 수 있거나 더 유용하고 적합한 문제의 값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서도 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 최적운전

을 위해 설비의 상, 하한치의 제약 그리고 목적함수 값에 퍼지성을 부여하여 퍼지선형계획법을 이용한 열병합발전시스템의 최적운전계획을 수립한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 퍼지선형계획법을 이용한 열병합발전시스템의 최적운전계획수립을 제안 하였고, 제안한 모델링으로 수립한 결과 운전계획이 적절하게 수립됨을 확인하였다.
- 2) 최대 만족도를 일정한 수치이상 유지하면서 최대 열출력을 약간 증가시켜 운전함으로써 축열조를 더 효과적으로 사용하며 전력요금이 비싼 시간대의 전력판매는 증가시키고 전력구매는 억제하는 방식을 택하여 더 효과적인 운전방식이 가능함을 확인하였다.
- 3) 본 퍼지선형계획법을 이용하여 최적운전계획수립을 하였을 경우 제약조건식의 수가 거의 증가하지 않으므로 선형계획법을 이용하였을 경우와 계산량이 거의 비슷하게 나타났음을 알았다.

참고문헌

1. 이중범, 류승헌: "열병합발전시스템의 국내외 현황과 과제 및 전망", 대한전기학회지 (1994. 5).
2. 이중범, 류승헌: "국내 열병합발전시스템의 보급확대를 위한 과제 및 대안", 대한전기학회지 (1995. 1).
3. H. B. Puttgen and et al.: "Optimum Scheduling Procedure for Cogenerating Small Power Producing Facilities", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 3, pp. 957-964, Aug. (1989).
4. H. Ghoudjehbakkou and et al.: "Optimization Topics Related to Small Power Producing Facilities Operating under Energy Spot Pricing Policies", IEEE Trans. on Power System, Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 269-302, May. (1987).
5. M. L. Baughman and et al.: "Optimizing Combined Cogeneration and Thermal Storage Systems: An Engineering Economics Approach", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 3, pp. 974-980, Aug. (1989).
6. 이중범, 류승헌, 김준현: "A Daily Operation Scheduling on Cogeneration System with Thermal Storage Tank", 일본전기학회 논문지, Vol, 114-B, pp. 1295-1302 (1994. 12).
7. 류승헌, 이중범, 김준현: "열병합발전시스템의 단기운전계획을 위한 수리적 모델에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제 43권 제 5호, pp. 721-729 (1994. 5).
8. 이중범: "열병합발전시스템의 최적운전계획수립을 위한 수리적 모형수립에 관한 연구", 기초전력공학공동연구소 보고서 (1994. 7).

9. S. Horii, *et al.*: "Optimal Planning of Gas Turbine Co-Generation Plants Based on Mixed-Integer Linear Programming", *Int'l Journal of Energy Research*, Vol. 11, pp. 507-518 (1987).
10. Masatoshi Sakawa: "Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization", Hiroshima University Higashi-Hiroshima, Japan (1993).