

퍼지선형계획법을 이용한 열병합발전시스템의 최적운전계획수립

이종범 정창호 류승현
(원광대) (한전기술연구원)

Optimal Operation Scheduling of Cogeneration Systems Using Fuzzy Linear Programming Method

Jong-Beom Lee Chang-Ho Jung Seung-Heon Lyu
Wonkwang University KEPCO Research Center

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 effectively operated in case of the bottomming cycle by modeling proposed in this paper.

1. 서론

열병합발전시스템은 지금까지 모든 설비가 대규모로 이루워져 국가적인 전체 에너지 이용이 매우 낮아 발생하는 손실을 최대한으로 줄이고 산업체등에서 필요로하는 열 에너지를 충분히 공급할 수 있으며 높은 에너지 이용효율을 갖는 소규모 분산배치방식의 발전 시스템이다. 그러나 열병합발전시스템은 전기 에너지와 열 에너지 모두를 효과적으로 운용하면서 발전시스템의 이익이 최대가 되는 입장에서의 적절한 운전계획을 수립하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 산업체 열병합발전시스템에 각종 보조설비를 연계시키고 운전자의 경험에 어느 정도 반영될 수 있도록 하는 단기운전계획을 수립하였다. 시뮬레이션은 먼저 선형계획법을 이용하여 결과를 얻었고 그것을 근거로 필요한 부분에 퍼지성을 부여하여 퍼지선형방정식을 구성하는 퍼지선형계획법을 이용하여서 최종적인 단기운전계획을 수립하였다.

2. 열병합발전시스템의 최적운전을 위한 모델링

본 논문에서 고려한 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 에너지 흐름은 그림 1에 나타내었다.

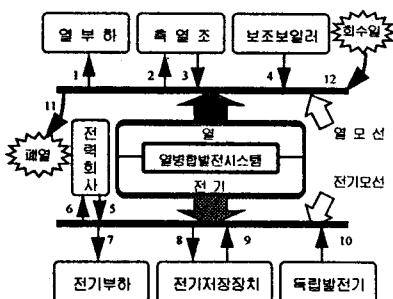


그림 1 열병합발전시스템의 에너지 흐름도

본 논문에서 모델링을 위해 사용된 기호는 표 1과 같으며, 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

$$\begin{aligned} \text{MIN } & \sum_{j=1}^N \left[\left((BUY_j \cdot \frac{1}{\eta_e} \cdot Y_{sj} - SELL_j \cdot \gamma \cdot Y_{aj}) \right. \right. \\ & + (F_c \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j})) \\ & \left. \left. + (F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{10j} + F_u \cdot \frac{1}{\eta_u} \cdot Y_{4j}) \right) \cdot TIME_j \right] \end{aligned} \quad (1)$$

표 1 모델링을 위해 사용된 기호

γ	전력회사와 산업체 사이의 송전효율 [P.U.]
N	계산구간의 총수
Y_{kj}	k선구간에서의 j선구간 동안의 에너지흐름 [MW]
μ_e	전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실률 [P.U.]
μ_t	축열조의 단위 시간당 열저장 손실률 [P.U.]
η_c	열병합발전시스템의 효율 [P.U.]
F_c	열병합발전시스템의 연료단가 [원/MWh]
$SELL_j$	연기저장장치의 최소 열전비 [P.U.]
SE_{1j}	연기저장장치의 최대 열전비 [P.U.]
ES_L	전기저장장치 최소 에너지 저장량 [MWh]
ES_H	전기저장장치 최대 에너지 저장량 [MWh]
ES_i	전기저장장치 j 구간말기 에너지 저장량 [MWh]
TS_i	축열조의 j 구간 말기 에너지 저장량 [MWh]
IG_H	독립발전기 최대출력 [MW]
IG_L	보조보일러 최대출력 [MW]
F_u , F_a	독립발전기, 보조보일러 연료단가 [원/MWh]
TIME	계산구간의 시간대수
BUY_j	전력회사로부터 구매하는 전기의 단가 [원/MWh]
$SELL_j$	전력회사에 판매하는 전기의 단가 [원/MWh]
$COEL$	열병합발전시스템의 최소 전기 출력 [MW]
$COEH$	열병합발전시스템의 최대 전기 출력 [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_{R-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_g , η_a	독립발전기, 보조보일러 효율 [P.U.]
η_{we} , η_{nr}	폐열상수, 회수열상수

(에너지 방향제약)

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

(열병합발전시스템의 열출력 상하한 제약.)

$$COT_L \leq (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq COT_H \quad (3)$$

(열병합발전시스템의 전기출력의 상하한 제약)

$$(-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \leq SE_H \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \quad (4)$$

$$SE_L \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \quad (5)$$

(독립발전기의 전기출력과 보조보일러의 열출력 상한 제약)

$$Y_{10j} \leq IG_H, (Y_{4j}/\delta_4) \leq AB_H \quad (6), (7)$$

(전기저장장치 내부전지의 최대 충·방전 제약)

$$Y_{8j} \leq (ES_{CHG}/ES_{E-CHG}), Y_{9j} \leq (ES_{DSC}/ES_{E-DSC}) \quad (8), (9)$$

(전기저장장치 에너지저장량 상하한 제약)

$$ES_L \leq (Y_{8j} \cdot ES_{E-CHG} - Y_{9j} \cdot ES_{E-DSC}) \cdot TIME + ES_{J-1} \cdot (1 - \mu_E) \cdot TIME \leq ES_H \quad (10)$$

(축열조 에너지의 저장량 상하한 제약)

$$TS_L \leq (Y_{2j} \cdot \delta_2 - Y_{3j} \cdot \delta_3) \cdot TIME + TS_{J-1} \cdot (1 - \mu_T) \cdot TIME \leq TS_H \quad (11)$$

(전기부하 제약과 열부하 제약)

$$Y_{7j} = \text{전기부하}_j, Y_{1j} \cdot \delta_1 = \text{열부하}_j \quad (12), (13)$$

(폐열 제약과 회수열 제약)

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

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

3. 퍼지선행계획법

통상의 선행계획문제는 다음과 같은 행렬형식으로 간단히 표현될 수 있다.

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

여기서, C는 n차원 행벡터를 나타낸 것이며, x는 n차원 열벡터 그리고 b는 m차원 열벡터이며, A는 m×n 행렬을 나타낸 것이다. 위의 통상의 선행계획문제는 다음과 같은 퍼지목적과 퍼지제약을 갖는 문제로 취급할 수 있으므로

$$cx \leq b \quad (17)$$

$$Ax \leq b, x \geq 0$$

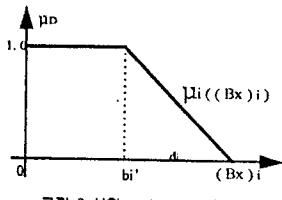
가 되며 식 (17)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Bx \leq b', x \geq 0 \quad (18)$$

$$\text{여기서, } B = \begin{bmatrix} C \\ A \end{bmatrix}, b' = \begin{bmatrix} Z_0 \\ b \end{bmatrix}$$

퍼지부등식 $Bx \leq b'$ 의 i번째 부등식 $(Bx)_i \leq b'_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$)에 대하여 식 (19)와 같이 선행 membership 함수를 이용하여 의사결정자의 판단을 고려할 수 있는데, 그림 2는 선행 membership 함수를 그림으로 표현한 것이다.

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



$$\mu_D(x^*) = \max_{x \geq 0} \min_{0 \leq i \leq m} (1 + b''_i - (Bx')_i) \quad (20)$$

$$\text{여기서, } b''_i = b'_i / d_i, (Bx')_i = (Bx)_i / d_i$$

그리고 이 문제는 결국 다음과 같은 통상의 선행계획문제로 변환 가능하다.

$$\begin{aligned} \text{maximize} \quad & \lambda \\ \text{subject to} \quad & \lambda \leq 1 + b''_i - (Bx')_i \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

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

4. 퍼지선행계획법의 적용

전체 운전비가 최소가 되도록 설정한 식 (1)에서 최소 운전비를 Z_0 라 한다면 membership 함수는 그림 3과 같고, 또한 열병합발전시스템이 발생할 수 있는 열출력의 제약인 식 (3)에 최대 열출력과 최소 열출력에 퍼지성을 부여하였고, 그림 4는 최대열출력에 퍼지성을 부여한 membership 함수를 그림으로 나타낸 것이다.

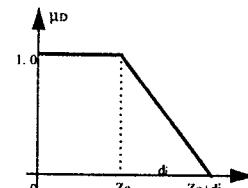


그림 3 전체 운전비에 대한 membership 함수

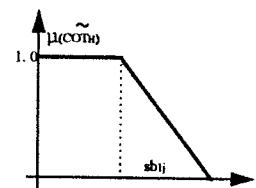


그림 4 최대 열출력의 membership 함수

5. 사례연구

본 연구에서는 의사결정자가 설정하는 d_i, sb_{ij} 값을 변화시켜 가며 사례연구를 실시하였으며, 또한 동일한 조건에서 퍼지화 했을 때와 퍼지성을 부여하지 않았을 경우를 비교하여 나타내었다. 각 Case별 membership 함수를 표현하면 그림 5 및 그림 6과 같으며, 사례연구를 위해 사용된 기본입력자료는 표 2와 같다.

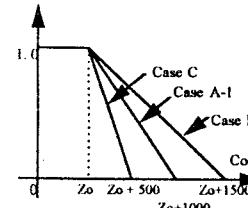


그림 5 각 case별 membership 함수

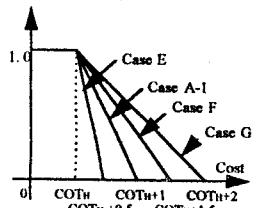


그림 6 각 case별 membership 함수

표 3 기본입력자료

시간대	1	2	3	4	5	6	7	8	
전력요금 [원/MWh]	BUY, SELL	100	100	100	200	200	200	150	100
전기부하/열부하	10/10	11/11	14/15	20/18	29/19	39/26	23/19	10/11	
COT_{Hn}	25	ES_H	5	TS_L	1	F_A	80	F_c	80
COE_L	5	AB_H	5	ES_L	1	F_B	80	γ	0.99
TS_H	6	SE_H	1.3	ES_O	1	μ_E	0.001	γ_c	0.6
δ_1	0.98	SE_L	0.8	TS_O	1	μ_T	0.001	γ_a	0.7
δ_2, δ_3	1	IC_H	5	η_w	0.1	η_{re}	0.3	η_x	0.4

6. 결과분석

6.1 열생산계획

본 연구에서는 열병합발전시스템의 연료단가를 전력요금이 가장 큰 시간대의 80% 정도로 설정하여 연생산량의 증가는 전력요금이 비싼 시간대의 전력의 구매량을 감소시키면서 전체 운전비가 감소되도록 설정하였다. 그림 7은 퍼지화 했을 때와 퍼지화 하지 않았을 경

우의 열생산계획을 그림으로 비교한 것이다.

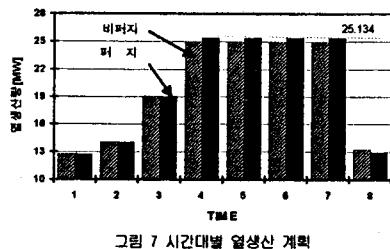


그림 7 시간대별 열생산 계획

그림 7에서 알 수 있듯이 동일한 조건에서 최대열출력에 퍼지성을 부여 하였을 때 최대 만족도를 유지하면서 열생산량을 약간 증가시켜 운전하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 sbi_i 값을 변화시킨 Case의 열생산계획을 나타낸 것이다, 그림 9는 d_i 값을 변화시킨 경우의 열생산량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 ()안의 수치는 최대 만족도를 나타낸 것이다. 여기에서는 4~6번 시간대만을 그림으로 표시하였다.

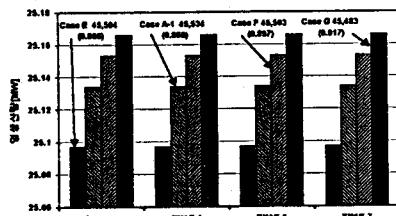


그림 8 시간대별 열생산계획 비교

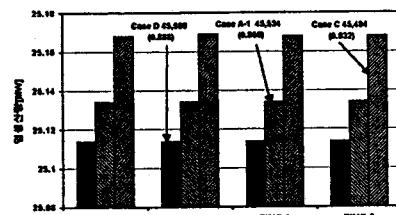


그림 9 시간대별 열생산계획 비교

그림 8에서 sbi_i 값을 2%, 4%, 6% 및 8%로 증가시켰을 경우 최대 만족도는 증가하게 되고 전체 운전비가 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 최대 열출력의 한계를 몇%로 하느냐에 따라 최대 만족도가 허용하는 수준까지 증가하여 전체 운전비를 감소 시킬 수 있다.

또한 그림 9에서도 sbi_i 값을 고정시키고 d_i 값을 1.1%, 2.2% 및 3.3%로 변화시켰을 경우에는 만족도는 감소되고 전체 운전비가 약간씩 증가되었다.

6.2 전력의 판매 및 구매

전력의 판매 및 구매는 전체 운전비에 아주 큰 영향을 준다. 따라서 발생된 전력이 전체 운전비가 감소되도록 적절한 시간대에 판매 및 구매가 이루워져야 한다. 그림 10은 전력 판매계획을 퍼지화 했을 경우와 하지 않았을 경우를 비교하여 나타내었으며, 그림 11은 전력 구매계획을 나타내었다.

그림 10에서 보면 퍼지화 했을 경우 열생산량이 약간씩 증가되는 시간대 즉, 전력요금이 비싼 시간대에서는 전력의 판매량을 약간씩 증가시켜 운전하고 있다. 그리고 전기저장장치에 충전하는 시간 대도 전력요금이 싼 시간대에 자체순실이 가장 적도록 충전하여 전력요금이 비싼 시간대에 방전하여 운전되었다.

또한 그림 11에서 전력 구매계획도 1회 전력의 구매만 이루어지

는 6번 시간대에서 전력의 구매량을 약간 줄여서 운전되었다.

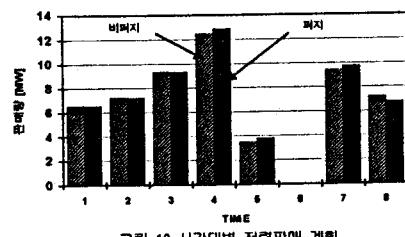


그림 10 시간대별 전력판매 계획

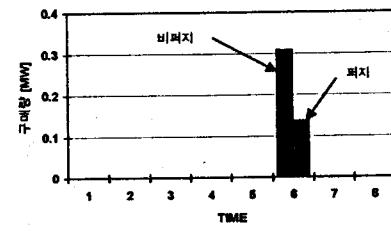


그림 11 시간대별 전력구매 계획

7. 결론

퍼지선행계획법은 종래의 선형계획문제의 목적이나 제약에 어느 특정치료로 규정하기 어려운 수치에 어느 정도의 퍼지성을 부여하여 더 유용하고 적합한 문제의 값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서도 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 최적운전을 위해 설비의 상·하한치의 제약 그리고 목적함수 값에 퍼지성을 부여하여 퍼지선행계획법을 이용한 열병합발전시스템의 최적운전계획을 수립한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 퍼지선행계획법을 이용한 열병합발전시스템의 최적운전계획수립을 제안하였고, 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 백하여 더 효과적인 운전방식이 가능함을 확인하였다.
- (3) 본 퍼지선행계획법을 이용하여 최적운전계획수립을 하였을 경우 제약조건식의 수가 거의 증가하지 않으므로 선형계획법을 이용하였을 경우와 계산량이 거의 비슷하게 나타났음을 알았다.

참고 문헌

- (1) 이종범, 유승현, 김준현, "A Daily Operation Scheduling on Cogeneration System with Thermal Storage Tank", 일본전기학회 논문지, Vol. 114-B, pp. 1295-1302, 1994. 12.
- (2) 유승현, 이종범, 김준현, "열병합발전시스템의 단기운전계획을 위한 수리적 모델에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제43권 제5호, pp. 721-729, 1994. 5.
- (3) Masatoshi Sakawa, "Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization", Hiroshima University Higashi-Hiroshima, Japan, 1993.
- (4) 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.