

각종 보조설비와 연계된 열병합발전시스템에서 퍼지이론을 적용한 단기운전계획수립

이 종 범 정 창 호
(원광대)

Shot -term Operation Scheduling Using Fuzzy Theory on Cogeneration Systems Connected with Auxiliary Equipments

Jong-Beom Lee Chang-Ho Jung
Wonkwang University

Abstract - This paper presents the optimal short-term operation scheduling by using on cogeneration systems connected with auxiliary equipments. Simulation is performed in case of the bottomming cycle which generates the demand heat preferentially. Heat storage tank, electricity charger, auxiliary boiler and independent generator are considered as auxiliary equipments connected to cogeneration systems. The results of simulation show the auxiliary equipments can be effectively operated in case of the bottomming cycle by modeling proposed in this paper. The effectiveness of operation scheduling gained by application of fuzzy theory is evaluated by detailed comparison and investigation of the simulation results.

1. 서 론

열병합발전시스템은 크게 전기를 주목적으로 생산하는 토펑사이클(topping cycle) 방식과 열생산을 주목적으로 하는 버터밍사이클(bottomming cycle) 방식으로 나눌 수 있는데 각각 부하의 성격과 시스템의 설치 목적 및 운용기준에 따라 달라질 수가 있기 때문에 이를 효과적으로 운용하기 위해서는 이익이 최대가 되는 입장에서의 적절한 운전계획을 수립하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 산업체 열병합발전시스템에 연계되어 효율적으로 운전될 수 있는 각종 보조설비들을 버터밍 사이클 방식에서 상세하게 모델링 하여, 선형방정식에 퍼지 이론을 도입해 계수들을 퍼지화시켜 퍼지선형방정식을 구성하는 퍼지선형계회로으로 최종적인 단기운전계획을 수립하였다.

2. 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 수리모델

버터밍 사이클 방식인 열병합발전시스템의 에너지 흐름도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 표시된 번호는 에너지가 흐르는 선로의 번호를 나타낸 것이다.

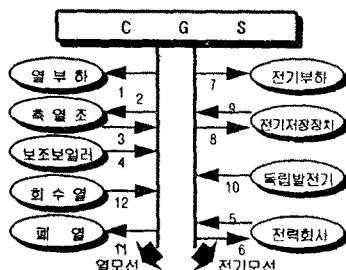


그림 1 각종 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의
에너지 흐름도

우선 운전계획을 수립하기 위해서는 열병합발전시스템과 각종 보조설비들을 모델링 하여야 하는데 이를 위하여 사용된 기호를 보면 표 1과 같다.

표 1 모델링을 위해 사용된 기호

γ	전력회사와 산업체 사이의 송전효율 [P.U.]
N	개산구간의 총수
Y_{kj}	k선로에서의 j개산구간 동안의 에너지흐름 [MW]
μ_E	전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실률 [P.U.]
μ_T	속열조의 단위 시간당 열저장 손실률 [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	속열조의 j 구간 말기 에너지 저장량 [MWh]
IG_H	독립발전기 최대출력 [MW]
IG_L	보조보일러 최대출력 [MW]
F_g, F_a	독립발전기, 보조보일러 연료단가 [원/MWh]
TIME	개산구간의 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 일출력 [MW]
COT_H	열병합발전시스템의 최대 일출력 [MW]
ES_{CNG}	전기저장장치 내부전지 최대 충전율 [MW]
ES_{DSC}	전기저장장치 내부전지 최대 방전율 [MW]
ES_{E-CNG}	전기저장장치 충전효율 [P.U.]
ES_{E-DSC}	전기저장장치 방전효율 [P.U.]
$\delta_1 \sim \delta_4$	송인관(1,2,3,4선로) 일전송 효율 [P.U.]
TS_L, TS_H	속열조의 최소, 최대 에너지저장량 [MWh]
η_u, η_n	독립발전기, 보조보일러 효율 [P.U.]
η_{we}, η_{an}	폐열상수, 회수연상수

이와 같은 가정하에서 목적함수는 열병합발전시스템에서 사용되는 연료비용, 전기의 판매 및 구매비용 등의 합을 최소화 시키는 것으로 하였으며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

목적함수

$$\begin{aligned} \text{MIN } \sum_{j=1}^N & \left\{ (BUY_j \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot Y_{sj} - SELL_j \cdot \gamma \cdot Y_{ej}) \right. \\ & + (F_C \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{10j} - Y_{11j})) \\ & \left. + (F_g \cdot \frac{1}{\eta_g} \cdot Y_{10j} + F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{4j}) \right\} \cdot TIME \end{aligned} \quad (1)$$

(에너지 방정제약)

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

(열병합발전시스템의 역출력 상하한 제약.)

$$COT_L \leq (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{10j} - Y_{12j}) \leq COT_H \quad (3)$$

(열병합발전시스템의 전기출력의 상하한 제약)

$$(-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \quad (4)$$

$$\leq SE_H \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{10j} - Y_{12j})$$

$$SE_L \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{10j} - Y_{12j}) \quad (5)$$

$$\leq (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j})$$

(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)

$$ES_L \leq (Y_{8j} \cdot ES_{E-CHG} - Y_{9j}/ES_{E-DSC}) \quad (10)$$

$$\cdot TIME + ES_{j-1} \cdot (1 - \mu_E)^{TIME} \leq ES_H$$

(축열조 에너지의 저장량 상하한 제약)

$$TS_L \leq (Y_{2j} \cdot \delta_2 - Y_{3j}/\delta_3) \cdot TIME \quad (11)$$

$$+ TS_{j-1} \cdot (1 - \mu_T)^{TIME} \leq TS_H$$

(전기부하제약과 열부하 제약)

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

(폐열 제약과 회수율 제약)

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

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{10j}) \cdot \eta_{re} - Y_{12j} \leq 0 \quad (15)$$

3. 퍼지선행계획법의 적용

본 논문에서는 선행계획법을 이용할 경우 세운 선행방정식의 계수들을 퍼지계수로 바꾸기 위해 Dubois와 Prade에 의해 도입된 가능성과 필연성의 지표를 이용하여 퍼지선행방정식을 구성하였다.

먼저 다음과 같이 퍼지수가 부등식 제약식에 포함되는 퍼지선행계획문제에 대해 다루어 보면

$$\begin{aligned} \min & \quad Z = c^T x \\ \text{subject to} & \quad A_i x \leq b_i, \quad i=1, \dots, m \\ & \quad x \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $C = [c_1, \dots, c_n]$: 목적함수의 계수벡터

$A = [A_{11}, \dots, A_{1n}]$: 요소가 퍼지수인 행벡터

B_i : 퍼지수인 우변정수

$x = [x_1, \dots, x_n]^T$: 결정변수벡터

위의 선행계획문제를 통상의 선행계획문제와 같이 일반화시키기 위해서는 퍼지수의 대소관계인 4가지의 지표를 도입하여 해결할 수 있다. 즉, Dubois와 Prade는 2개의 퍼지수 M, N (membership) 함수를 각각 $\mu_M(u), \mu_N(v)$ 로 표시함)의 대소관계에 따라 식 (17)과 같은 지표들을 도입했다.

$$Pos(M \geq N) = \sup_u \{\min[\mu_M(u), \mu_N(v)] \mid u \geq v\}$$

$$Pos(M > N) = \sup_u \{\inf_v \{\min[\mu_M(u), 1 - \mu_N(v)] \mid u \leq v\}\}$$

$$Nes(M \geq N) = \inf_u \{\sup_v \{\max(1 - \mu_M(u), \mu_N(v)) \mid u \geq v\}\}$$

$$Nes(M > N) = \inf_u \{\max(1 - \mu_M(u), 1 - \mu_N(v)) \mid u \leq v\} \quad (17)$$

여기서 Pos 와 Nes 는 가능성과 필연성을 의미하는 것이다. 이러한 수식은 간단히 다음과 같이 정리된다.

$$(1) X_{VWF}(a) = \{x \geq 0 \mid a_i^L x \leq b_i, \quad i=1, \dots, m\}$$

$$(2) X_{MWF}(a) = \{x \geq 0 \mid a_i^{(1-a)} x \leq b_i, \quad i=1, \dots, m\} \quad (18)$$

$$(3) X_{MSF}(a) = \{x \geq 0 \mid a_i^L x \leq b_i a^{(1-a)}, \quad i=1, \dots, m\}$$

$$(4) X_{VSF}(a) = \{x \geq 0 \mid a_i^{(1-a)} x \leq b_i, \quad i=1, \dots, m\}$$

식 (18)에서 $X_{VWF}(a)$ 는 Very Weak Feasible, $X_{MWF}(a)$ 는 Medium Weak Feasible, $X_{MSF}(a)$ 는 Medium Strong Feasible을 의미하며, $X_{VSF}(a)$ 는 Very Strong Feasible을 의미하는 것이다. 따라서 a -cut을 정하면 제약식에 퍼지계수를 포함시킨 선행계획문제의 제약식은 일반적인 부등식으로 쉽게 변화시킬 수 있다.

4. 사례연구

본 연구에서 실시한 각 case별 특징은 표 2와 같다.

표 2. 시간대별 열부하 및 전기부하 [단위 : MW]

구분	시간대	1	2	3	4	5	6	7	8	
		일부하/전기부하	10/10	11/11	15/14	18/20	19/29	26/39	19/23	11/10
A case	B case	일부하/전기부하	10/10	11/11	15/39	18/20	19/29	26/39	19/23	11/10

본 연구에서는 열출력의 상하한 제약식을 Fuzzy화 하여 식을 구성하였으며, 이 때 a 는 0.3을 선택하였다.

이 때 이러한 제약식의 계수들을 그 계수들이 갖고 있는 각각의 변동 특성을 간단하여 퍼지화 할 수 있다는 전제하에 그림 2와 같이 구성하였다.

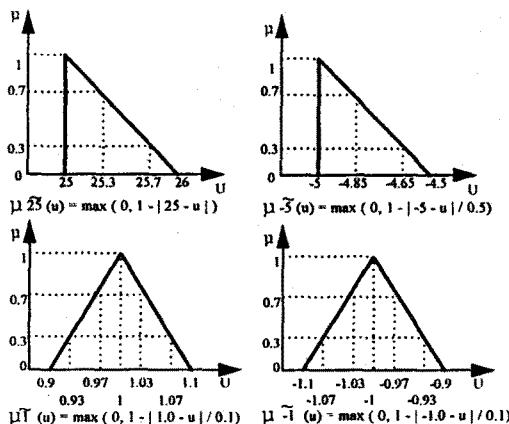


그림 2 퍼지화된 계수

사용된 기본입력자료는 표 3과 같다. 여기서 시간대는 각각 1시간대가 3시간을 의미하며 3시간 동안은 운전조건이 변하지 않다고 가정하였다.

표 3. 기본 입력자료

시간대	1	2	3	4	5	6	7	8	
전력요금 [원/MWh]	BUY: 100	SELL: 100	BUY: 100	SELL: 200	BUY: 200	SELL: 200	BUY: 150	SELL: 100	
COE_H	25	ES_H	5	TS_L	1	F_e	80	F_e	80
COE_L	5	AB_H	5	ES_L	1	F_e	80	r	0.99
TS_H	6	SE_H	1.3	ES_o	1	r_E	0.001	r_E	0.6
δ_1	0.98	SE_L	0.8	TS_o	1	r_T	0.001	r_T	0.7
δ_2, δ_3	0.97	IG_H	5	r_m	0.1	r_m	0.3	r_m	0.4

5. 결과분석

5-1. 열생산계획과 전체 운전비

아래 그림은 운전계획수립 결과를 열생산계획, 전체운전비,

보조설비 운전계획으로 구분하여 나타내었다.

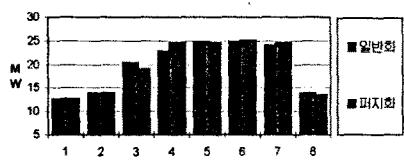


그림 3 열생산 계획

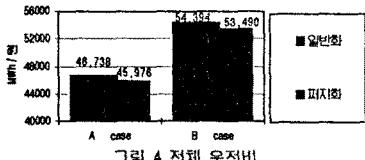


그림 4 전체 운전비

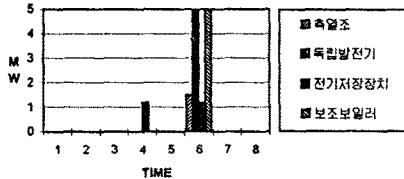


그림 5 보조설비 운전계획 (B case)

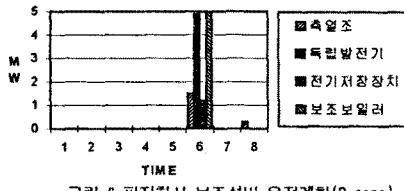


그림 6 퍼지화시 보조설비 운전계획 (B case)

그림 3에서 퍼지화전의 계획과 퍼지화한 후의 열생산계획은 거의 비슷하며 그림 4에서는 A case와 B case 모두 퍼지화 했을 경우가 운전비가 적게 나타났음을 알 수 있다. 따라서 퍼지화 했을 때 줄어든 전체 운전비는 보조 설비들이나 전력의 판매 및 구매량을 적절하게 조절함으로써 가능하다는 의미가 된다.

5-2. 전력의 판매와 구매 계획

시간대별 전력의 판매와 구매는 전체 운전비 결정에 가장 큰 영향을 준다. 그림 7은 A case에서 전력의 판매계획을 나타낸 것이다. 그림 8은 전력의 구매계획을 퍼지화 했을 경우를 나타낸 것이다.

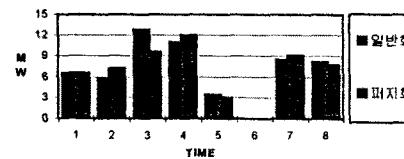


그림 7 전력의 판매계획 (A case)

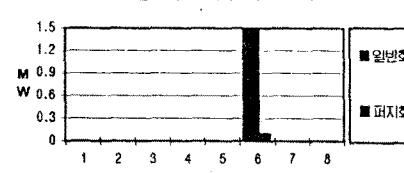


그림 8 전력의 구매계획 (A case)

그림에서 퍼지화 했을 경우 전력요금이 비싼 4번, 7번 시간대 전력 판매량이 약간 증가되고(그림 7), 전력요금이 비싼 6번 시간대에 구매전력을 억제함으로써(그림 8) 전체 운전비 감소에 큰

역할을 하였다.

또한 퍼지화 했을 경우 전력요금이 열생산 단가보다 비싸기 때문에 열생산량을 약간 증가시키는 대신 전기저장장치의 방전 시간을 4번 시간대에서 6번 시간대로 변경함으로써 전력요금이 비싼 시간대에 전력을 구매하는 것을 최대로 억제하여 전체 운전비가 감소되어 나타났다.

5-3. 축열조의 축열과 전기저장장치의 충전 계획

그림 9에서는 퍼지화 했을 경우 4번 시간대에서 열생산이 약간 증가함으로써 3번 시간대에 축열을 하던 것을 4번 시간대로 바꾸어 축열을 하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 4번 시간대에 전력을 많이 판매하기 위해서 열생산량을 약간 증가시켰기 때문이다.

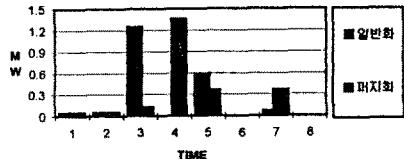


그림 9 축열조의 축열(A case)

그림 10은 B case 경우에서 전기저장장치의 충전을 나타낸 것이다. 그림 10에서 2회 충전을 하던 것이 퍼지화 했을 경우에는 전력요금이싼 시간대의 충전 1회로 줄여 운전하고 있다.

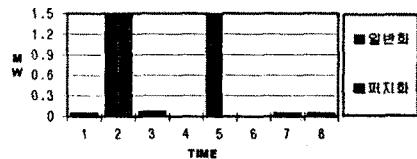


그림 10 전기저장장치의 충전(B case)

여기에서 수행된 사례연구들은 운전비 자체의 약간의 증감에 충점을 맞추는 것이 아니라 시스템이 갖고 있는 운전특성을 얼마나 협상성 있게 고려할 수 있느냐를 거냥하고 있다.

6. 결 론

- (1) 버터밍사이클 방식에서 각종 보조설비가 연계되어 운전할 경우의 상세한 운전계획을 수립하였다.
- (2) 퍼지화를 통해서 보다 유연한 재약조건을 만들 수 있었으며, 이를 통해 보다 유연한 운전계획을 수립 할 수 있음을 확인하였다. 따라서 퍼지화 기법을 운전계획에 실용화 할 수 있는 근거를 마련하였다.

참 고 문 헌

- [1] 이종범, 류승현, "열병합발전시스템의 국내외 현황과 과제 및 전망", 대한전기학회지, 1994. 5
- [2] 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.
- [3] 이종범, 류승현, 김준현, "A Daily Operation Scheduling on Cogeneration System with Thermal Storage Tank", 일본 전기학회논문지, Vol. 114-B, pp. 1295-1302, 1994. 12.
- [4] 류승현, 이종범, 김준현, "열병합발전시스템의 단기운전계획을 위한 수리적 모델에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제43권 제5호, pp. 721-729, 1994. 5.
- [5] 坂和正故, "ファジ理論の基礎と應用", 森北出版, 1990.