

각종 보조설비가 연계된 열병합발전시스템에서 가능성 퍼지이론을 적용한 최적운전계획수립

김성일* · 정창호 · 이종범
(원광대)

Optimal Operation Scheduling Using Possibility Fuzzy Theory on Cogeneration Systems Connected with Auxiliary Equipment

Sung-Il Kim * · Chang-Ho Jung · Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - This paper presents the optimal operation scheduling on cogeneration systems connected with auxiliary equipment by using the possibility fuzzy theory. The probability fuzzy theory is a method to obtain the possibility of the solution from the fuzzification of coefficients. Simulation is carried out to obtain the boundary of heat production in each time interval. Simulation results shows effectively the flexible operation boundary to establish operation scheduling.

1. 서론

열병합발전시스템은 에너지 이용효율이 기존의 발전시스템에 비해 높은 발전시스템이다. 그러나 발생된 열과 전기를 동시에 제어해야 하기 때문에 그 운전량은 기존 발전시스템에 비해 많다. 그리고 모든 운전제약을 만족하면서도 유연한 운전계획을 수립할 수 있는 것이 어려움이 있었다.

본 논문은 비터빙방식 열병합시스템에서 운전비용을 가능한 범위까지 변화시키 운전가능의 구간을 선정하는데 그 목적이 있다. 따라서 운전가능한 범위를 알기위해 가능성 퍼지이론을 도입하여 운전계획을 수립하였다.

2. 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 수리모델

열병합발전시스템의 열출력과 전기출력을 열모선과 전기모선으로 처리한 열병합발전시스템의 에너지 흐름도는 그림 1에 나타내었으며 표시된 번호는 에너지 선로의 번호를 나타낸 것이다.

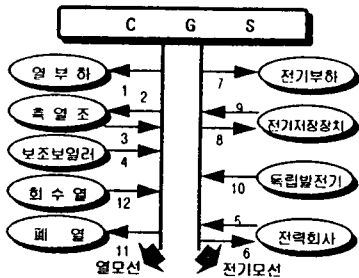


그림 1 각종 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 에너지 흐름도

운전계획을 수립하기 위해 사용된 기호는 표 1과 같다.

표 1 모델링을 위해 사용된 기호

| | |
|-----------------------|--------------------------------|
| γ | : 전력회사와 산업체 사이의 송전효율 [P.U.] |
| N | : 계산구간의 총수 |
| Y_{kj} | : k선로에서의 j계산구간 동안의 에너지흐름 [MWh] |
| μ_E | : 전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실율 [P.U.] |
| μ_T | : 축열조의 단위 시간당 열저장 손실율 [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 구간당 에너지 저장량 [MWh] |
| TS_j | : 축열조의 j 구간 당 에너지 저장량 [MWh] |
| IG_H | : 독립발전기 최대출력 [MW] |
| AB_H | : 보조보일러 최대출력 [MW] |
| F_g, 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] |
| 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_{DISC} | : 전기저장장치 내부전지 최대 방전율 [MW] |
| ES_{E-CHG} | : 전기저장장치 충전효율 [P.U.] |
| ES_{E-DISC} | : 전기저장장치 방전효율 [P.U.] |
| $\delta_1 - \delta_4$ | : 송전선(1,2,3,4선로) 열전송 효율 [P.U.] |
| TS_L, TS_H | : 축열조의 최소/최대 에너지저장량 [MWh] |
| η_K, η_a | : 독립발전기, 보조보일러 효율 [P.U.] |
| η_{wc}, η_n | : 계열상수, 회수열상수 |

목적함수는 식 (1)과 같으며 첫째 항은 전력의 판매 및 구매 시 나타나는 비용을 나타내었고 두번째 항은 열병합발전시스템의 연료비용 그리고 마지막 항은 독립발전기, 보조보일러의 열출력을 나타낸 것이며 모든 항의 비용이 최소가 되도록 설정하였다.

목적함수

$$\begin{aligned} \text{MIN} \sum_{j=1}^N & \left\{ (BUY_j \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot Y_{5j} - SELL_j \cdot \gamma \cdot Y_{6j}) \right. \\ & + (F_c \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j})) \\ & \left. + (F_g \cdot \frac{1}{\eta_g} \cdot Y_{10j} + F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{5j}) \right\} \cdot \text{TIME} \end{aligned} \quad (1)$$

제약조건

(에너지 방향제약)

$$Y_{ij} \geq 0$$

(열병합발전시스템의 열출력 상하한 제약.)

$$COT_L \leq (Y_{11} + Y_{21} - Y_{31} - Y_{41} + Y_{11} - Y_{12}) \leq COT_H \quad (3)$$

(연방발전시스템의 전기출력의 상한 제약)

$$(-Y_{31} + Y_{61} + Y_{71} + Y_{81} - Y_{91} - Y_{101}) \leq SE_H \cdot (Y_{11} + Y_{21} - Y_{31} - Y_{41} + Y_{11} - Y_{12}) \quad (4)$$

$$SE_L \cdot (Y_{11} + Y_{21} - Y_{31} - Y_{41} + Y_{11} - Y_{12}) \leq (-Y_{31} + Y_{61} + Y_{71} + Y_{81} - Y_{91} - Y_{101}) \quad (5)$$

(독립발전기의 전기출력 과 보호보일러의 연동력 상한 제약)

$$Y_{11} \leq IG_H, (Y_{41} / \delta_4) \leq AB_H \quad (6), (7)$$

(전기저장장치 내부전지의 최대 충·방전 제약)

$$Y_{81} \leq (ES_{CHG} / ES_{E-CHG}), Y_{91} \leq (ES_{DISC} \cdot ES_{E-DISC}) \quad (8), (9)$$

(전기저장장치 에너지저장량 상한 제약)

$$ES_L \leq (Y_{81} \cdot ES_{E-CHG} - Y_{91} / ES_{E-DISC}) \cdot TIME + ES_{j-1} \cdot (1 - \mu_E)^{**TIME} \leq ES_H \quad (10)$$

(축열조 에너지의 저장량 상한 제약)

$$TS_L \leq (Y_{21} \cdot \delta_2 - Y_{31} / \delta_3) \cdot TIME + TS_{j-1} \cdot (1 - \mu_T)^{**TIME} \leq TS_H \quad (11)$$

(전기부하 제약과 열부하 제약)

$$Y_{71} = \text{전기부하}_i, Y_{11} \cdot \delta_1 = \text{열부하}_i \quad (12), (13)$$

(패열 제약과 회수열 제약)

$$(Y_{11} + Y_{21} - Y_{31} - Y_{41} - Y_{12}) \cdot \eta_{rec} - Y_{11} \leq 0 \quad (14)$$

$$(Y_{11} + Y_{21} - Y_{31} - Y_{41} + Y_{11}) \cdot \eta_{re} - Y_{12} \leq 0 \quad (15)$$

3. 가능성 피지이론의 적용

가능성 피지계획 문제는 계수가 정확히 규정되어 있지 않은 경우에 계수의 애매함을 피지수로 간주하고 있다. 피지수는 전문가의 지식에 의해 고려되고 피지수를 가능성분포로 생각하면 다음과 같은 피지부등식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + \dots &\geq B_1 \quad (\text{피지목적}) \\ A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + \dots &\leq B_2 \quad (\text{피지제약}) \\ \vdots &\vdots \\ A_{m1}x_1 + A_{m2}x_2 + \dots &\leq B_m \quad (\text{피지제약}) \end{aligned} \quad (16)$$

목적함수와 제약조건을 고려하지 않고 통일적으로 표시하면 식 (17)과 같으며 식 (17)을 가능성 선형시스템으로 고려하여 피지계수를 대칭적인 L형 피지수로 하면 Y_i 의 멤버쉽함수는 식 (18)식과 같다.

$$Y_i = A_{0i}x_0 + A_{1i}x_1 + \dots + A_{ni}x_n \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

단, $A_0 = B_i, x_0 = 1$

$$\mu_Y(y) = L((y - x^i a) / c^i | \dot{x}^i) \quad (18)$$

단, 피지계수는 $A_i = (a_i, c_i)_i$

$$| \dot{x}^i | = (|x_1|, \dots, |x_n|)^t$$

또한 $Y_i \geq 0$ 의 의미를 간단하게 표현하면 식 (19)와 같이 정의 할 수 있고 그럼으로 표현하면 그림 2와 같이 표현된 수

있다.

$$Y_i \geq 0 \rightarrow \mu_{Y_i}(0) \leq 1 - h, \quad a^i \dot{x}^i \geq 0 \quad (19)$$

단, h 는 $Y_i \geq 0$ 의 정도로 표시되고 h 가 클수록 양의 의미는 상해진다.

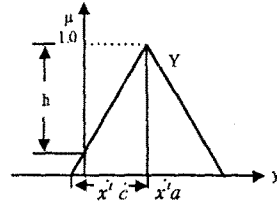


그림 2. 피지부등호 $Y_i \geq 0$

따라서 식 (16)에서 B_i 의 항에만 애매성을 갖게 하면 해의 가능성을 피지수 X_i 로서 구하는 문제를 생각할 수 있다. 즉,

$$Y_i = B_i + a_{in}X_i + \dots + a_{im}X_m \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (20)$$

여기서, $X_i = (x_i, c_i), B_i = (b_i, d_i), X_i$ 는 피지해이며 피지수 X_i, B_i 는 삼각형 모양이 된다.

또한 $Y_i \geq 0$ 라고 하는 정도 h 를 고려하면 피지 부등식은 다음과 같이 변환 가능하다.

$$\sum_j (a_{ij}x_j - h | a_{ij} | c_j) + b_i - d | h_i \geq 0 \quad (21)$$

여기서, 해의 가능성의 측도는 식(22)과 같이 평가함수를 도입하여 나타낼 수 있다.

$$J = k_1c_1 + \dots + k_nc_n \quad (22)$$

따라서, 식 (21)의 제약조건을 갖는 식 (22)의 J 를 최대로 하는 피지에 $\dot{X} = (x, c)$ 를 구하는 문제가 된다.

4. 사례연구

사례연구를 위해 사용된 기본 입력자료는 표 2와 같다. 여기서 시간대는 각각 1시간대가 3시간을 의미하며 3시간 동안에는 운전 조건이 변하지 않는다고 가정하였다.

표 2. 기본 입력자료

| 시간대 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
|--------------------------------|----------|-----------------|-----|-----------------|-----|-------------------|-------|------------------|------|
| 전력요구량 [단/MWh] | BUY, 100 | 100 | 100 | 200 | 200 | 200 | 150 | 100 | |
| COE _H | 25 | ES _H | 5 | TS _H | 1 | F _H | 80 | F _E | 80 |
| COE _L | 5 | AB _H | 5 | ES _L | 1 | F _H | 80 | r | 0.99 |
| TS _H | 6 | SE _H | 1.3 | ES ₀ | 1 | μ _E | 0.001 | η _c | 0.6 |
| δ ₁ | 0.98 | SE _L | 0.8 | TS ₀ | 1 | μ _T | 0.001 | η _s | 0.7 |
| δ _{2}, δ₃} | 1 | IG _H | 5 | η _n | 0.1 | η _{rec}} | 0.3 | η _{re}} | 0.4 |

표 2의 기본 입력자료를 토대로 본 연구에서는 운전 가능한 구간을 설정하기 위해 4가지의 case를 구성하여 사례연구를 실시하였다. 가능성 피지이론은 목적함수인 운전비의 범위를 어느 정도까지 확대해 주느냐에 따라 운전 가능성의 범위와 시간대가 증가하여 여유있는 운전을 계획할 수 있다. 그러나 운전비의 범

위를 무조건적으로 증가시킨다는 것은 불합리하므로 본 연구에서는 가능성퍼지이론을 적용하지 않았을 경우의 운전비용을 기준으로하여 운전비를 점점 증가시키거나 표 3과 같은 case를 구성하여 사례연구를 실시하였다.

| case | 운전비 | 운전비의 최대값 |
|------|--------|----------|
| A | 45,753 | - |
| B | - | 48,400 |
| C | - | 50,400 |
| D | - | 53,400 |

또한, 가능성 퍼지이론을 적용하기 위해 본 연구에서는 열병합발전시스템의 최대 열출력에 가능성 퍼지이론을 도입하여 실제 운전시 여유있는 운전운 할 수 있도록 하였다. 그림 4는 최대 열출력에 가능성 퍼지이론을 적용하였을 때를 그림으로 표현한 것이다.

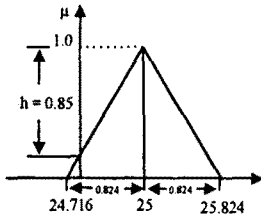


그림 3. 가능성을 부여한 경우 멤버십함수

그림 3을 기초로 각 case별 운전계획 수립의 결과는 그림 5 ~ 7에 나타냈으며 그림 4는 가능성퍼지이론을 적용하지 않은 운전계획을 나타내었다. 열부하가 많은 4, 5, 6, 시간대에서 열생산을 최대로 하여 운전계획이 수립되었고 각종 보조설비들은 운전비가 최소가 되도록 시간대별로 적절하게 운전되었으나 지인 상 생략하였다.

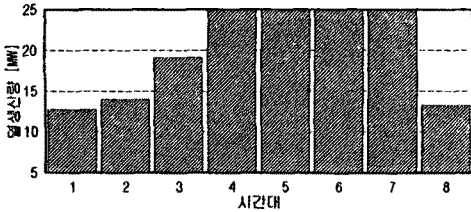


그림 4. A case의 열생산계획(기준)

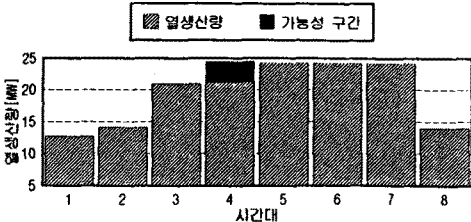


그림 5. B case의 열생산계획

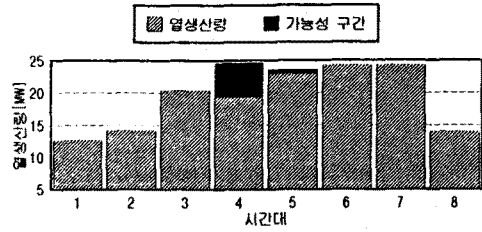


그림 6. C case의 열생산계획

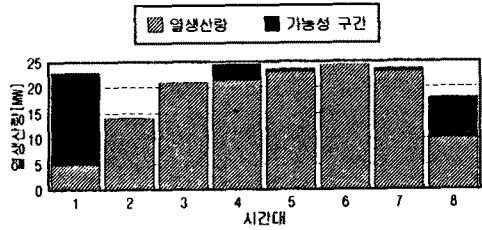


그림 7. D case의 열생산계획

그림 5에서 B case의 경우 운전비의 범위를 기준 case에서 약간 증가시키므로서 운전계획은 거의 비슷하게 수립되었으나 운전 가능성 구간이 1회 나타났으며 그림 6의 C case의 경우는 2회 그리고 그림 7의 D case는 5회 나타났다. 따라서 운전비의 범위를 증가시킬수록 가능성 운전구간의 횟수와 범위는 증가하여 상정한 운전비의 운전범위 내에서 유연한 운전계획을 수립할 수가 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서 제시한 가능성 퍼지이론을 적용하여 열병합발전시스템의 최적운전계획을 수립할 경우 실제운전에 가까운 운전계획을 수립할 수 있다. 즉, 기존의 운전계획은 최적운전을 수립시 운전의 유연성을 전혀 고려하지 않아 수립된 운전계획을 실제로 적용하기에는 많은 어려움이 예상되었다. 그러나 본 논문에서 제시한 모델링으로 운전계획을 수립할 경우는 상정한 운전비의 범위내에서 운전 가능한 범위를 제시해 줌으로써 운전자가 현장성을 고려해 유연성있게 운전할 수 있다는 장점이 있다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 이종병, 류승현, 김준현, "A Daily Operation Scheduling on Cogeneration System with Thermal Storage Tank", 일본전기학회 논문지, Vol. 114-B, pp. 1295-1302, 1994. 12.
- [3] 이종병, 정창호, "각종 보조설비와 연계된 열병합발전시스템에서 퍼지이론을 적용한 단기운전계획 수립", 대한전기학회논문지, 제 41권 제9호, pp.1119-1125, 1995. 9.
- [4] 寺野高郎, 富野道夫, 淺居喜代治 "フアシシステム入門" オーム社, 1987.