

## 다양한 보조설비를 가진 열병합발전시스템의 단기운전계획

이종범 정창호<sup>o</sup> 류승현

(원광대)\* (한전기술연구원)

### Short-term Operation Strategy of Cogeneration System with Auxiliary Equipments

Jong-Bum Lee · Chang-Ho Jung<sup>o</sup> · Seung-Heon Lyu

Wonkwang University\* KEPCO Research Center

#### Abstract

This paper describes a numerical model for the short-term operation strategy of the cogeneration systems. Especially this paper considered various auxiliary equipments used for the effective operation of cogeneration system. Minimum daily operation costs of topping cycle are calculated by using LP. Simulation results of some cases are analyzed and compared each other. Through these simulations the validity of the proposed model considered various auxiliary equipments is verified.

#### 1. 서론

우리나라의 열병합발전시스템은 금년 현재까지 약 130기 정도가 보급되어 운전되고 있으며, 에너지의 효율적인 이용을 위하여 앞으로도 계속 열병합발전시스템의 도입이 예상되고 있다. 열병합발전시스템은 각종 산업공단은 물론이고 집단 주거지역, 빌딩 등에 공급하는 종합에너지시스템(Total Energy System)으로서 열에너지와, 전기에너지를 충분히 공급할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 현재 도입된 열병합발전시스템은 설비의 건설에 비중을 두는 반면 운용의 최적화에는 관심이 저조한 실정에 있다. 열병합발전시스템 운전비의 최소화 관점에서 최적운전계획을 수립하는 데는 적정규모의 건설뿐만 아니라 경제적인 측면에서 매우 중요한 요소이다. 또한 저장설비등 현재 연구개발중인 다양한 보조설비를 갖추게 될때를 감안하면 열병합발전시스템의 최적운전은 설비투자 못지않은 중요한 과제라 할 수 있다.

따라서 이와 같은 추세에 부응하여 본 연구에서

는 다양한 보조설비를 가진 열병합발전시스템에서 열부하와 전기부하를 신뢰성있게 공급하면서 운전비가 최소가 되도록 하는 단기운전계획을 수립하였다. 그리고 수립된 단기운전계획 결과를 바탕으로 각종 보조설비의 운전특성을 파악하였다. 본 연구는 전기생산을 주로하는 톱핑사이클(topping cycle) 열병합발전시스템의 입장에서 시물레이션을 하였다.

#### 2. 보조설비를 가진 열병합발전시스템

본 논문에서 고려한 보조설비로서는 보조보일러, 축열조, 전기저장장치, 독립발전기이다. 특히 보조보일러, 축열조 등은 현재 운전되고 있으며, 전기저장장치는 연구개발중에 있으므로 가능한 보조설비들은 대부분 고려하여 최적운전 계획을 수립하였다.

그림 1은 각종 보조설비를 갖춘 열병합발전시스템의 흐름도를 나타낸 것이다.

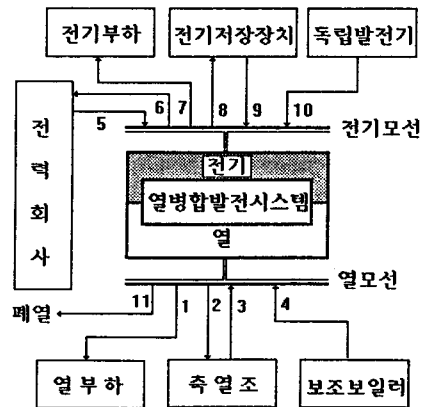


그림 1. 다양한 보조설비를 가진 열병합발전시스템의 에너지 흐름도

### 3. 열병합발전시스템의 제약

각종 보조설비를 갖춘 열병합발전시스템의 단기 운전계획을 수립하기 위해 사용되는 약어는 다음과 같다.

#### 사용된 약어

- $TIME$  : 계산구간의 시간대수
- $N$  : 계산구간의 총수
- $Y_{kj}$  :  $k$ 선로에서의  $j$ 계산구간 동안의 에너지흐름[MW]
- $\gamma$  : 전력회사와 산업체 사이의 송전효율 [P.U.]
- $\delta_1 \sim \delta_4$  : 송열관(1,2,3,4선로) 열전송 효율 [P.U.]
- $COEL$  : 열병합발전시스템의 최소 전기출력 [MW]
- $COEH$  : 열병합발전시스템의 최대 전기출력 [MW]
- $COT_L$  : 열병합발전시스템의 최소 열출력 [MW]
- $COT_H$  : 열병합발전시스템의 최대 열출력 [MW]
- $\eta_c$  : 열병합발전시스템의 효율 [P.U.]
- $F_C$  : 열병합발전시스템의 연료단가 [원/MWh]
- $SEL$  : 열병합발전시스템의 최소 열전비 [P.U.]
- $SEH$  : 열병합발전시스템의 최대 열전비 [P.U.]
- $IGH$  : 독립발전기의 최대 전기출력 [MW]
- $F_g$  : 독립발전기 연료단가 [원/MWh]
- $\eta_g$  : 독립발전기 효율 [P.U.]
- $F_a$  : 보조보일러 연료단가 [원/MW]
- $\eta_a$  : 보조보일러 효율 [P.U.]
- $ES_L$  : 전기저장장치 최소 에너지 저장량 [MWh]
- $ES_H$  : 전기저장장치 최대 에너지 저장량 [MWh]
- $ES_{CHG}$  : 전기저장장치 내부전지 최대 충전율 [MW]
- $ES_{DSC}$  : 전기저장장치 내부전지 최대 방전율 [MW]
- $ES_{E-CHG}, ES_{E-DSC}$  : 전기저장장치 충전, 방전효율[P.U.]
- $ES_j$  : 전기저장장치  $j$ 구간말기 에너지 저장량 [MWh]
- $\mu_E$  : 전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실율 [P.U.]
- $TS_L, TS_H$  : 축열조의 최소, 최대 에너지저장량[MWh]
- $TS_j$  : 축열조의  $j$  구간 말기 에너지 저장량 [MWh]
- $\mu_T$  : 축열조의 단위 시간당 열저장 손실율 [P.U.]
- $BUY_j$  : 전력회사로로부터 구매하는 전기의 단가 [원/MWh]
- $SELL_j$  : 전력회사에 판매하는 전기의 단가[원/MWh]
- $\eta_{we}$  : 패열상수

단기최적운전을 위한 목적함수 및 제약조건의 표

현식은 다음과 같다.

#### 목적함수

$$\begin{aligned} \text{MIN} \sum_{j=1}^N [ & \{ (BUY_j \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot Y_{5j} - SELL_j \cdot \gamma \cdot Y_{6j}) \\ & + (F_C \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j})) \} \\ & + (F_g \cdot \frac{1}{\eta_g} \cdot Y_{10j} + F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{4j}) \} \cdot \text{TIME}] \end{aligned} \quad (1)$$

#### 제약조건

- 에너지 방향의 제약  $Y_{kj} \geq 0$  (2)
- 열병합발전시스템의 전기출력 상하한 제약  $COEL \leq -Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j} \leq COEH$  (3)
- 열병합발전시스템의 열출력 상하한 제약  $Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} \leq SEH \cdot [-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}]$  (4)
- $SEL \cdot [-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}] \leq Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j}$  (5)
- 독립발전기의 전기출력 상한 제약  $Y_{10j} \leq IGH$  (6)
- 보일러의 열출력 상한 제약  $Y_{4j} / \delta_4 \leq ABH$  (7)
- 전기저장장치 내부전지의 최대 충,방전 제약  $Y_{8j} \leq [ES_{CHG} / ES_{E-CHG}]$  (8)
- $Y_{9j} \leq [ES_{DSC} \cdot ES_{E-DSC}]$  (9)
- 전기저장장치의 에너지저장량 상하한 제약  $ES_L \leq [Y_{8j} \cdot ES_{E-CHG} - Y_{9j} / ES_{E-DSC}] \cdot \text{TIME} + ES_{j-1} \cdot (1 - \mu_E)^{\text{**TIME}} \leq ES_H$  (10)
- 축열조 에너지저장량의 상하한 제약  $TS_L \leq [Y_{2j} \cdot \delta_2 - Y_{3j} / \delta_3] \cdot \text{TIME} + TS_{j-1} \cdot (1 - \mu_T)^{\text{**TIME}} \leq TS_H$  (11)
- 전기부하 제약  $Y_{7j} = \text{전기부하}_j$  (12)
- 열부하 제약  $Y_{1j} \cdot \delta_1 = \text{열부하}_j$  (13)
- 패열 제약  $(-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \cdot \eta_{we} - Y_{11j} = 0$  (14)

#### 4. 사례연구

본 연구의 시뮬레이션은 선형계획법(Linear Programming)을 이용하였으며, 해를 구하기 위해 고속 패키지인 LINDO를 사용하였다. 식 (1)~(14)식을 가지고 변수 104개, 목적함수를 포함한 제약조건식

218개를 입력하여 시뮬레이션을 실시하였으며 시뮬레이션에 사용된 입력자료는 표 1과 같다.

표 1. 최적운전 기본입력자료

시간	전력요금		전기부하	열부하	$\delta_2$	0.97	$AB_H$	7	
	BUY	SELL			$\delta_3$	0.97	$\delta_4$	0.97	
1	100	100	8	13	$\mu_T$	0.001	$F_a$	80	
2	100	100	10	20	$TS_H$	6	$F_g$	80	
3	100	100	15	22	$TS_L$	1	$SE_H$	1.3	
4	200	200	18	23	$TS_O$	1	$SE_L$	0.8	
5	200	200	22	25	$\mu_E$	0.001	$COE_H$	22	
6	200	200	31	32	$ES_H$	5	$COE_L$	5	
7	150	150	15	20	$ES_L$	1	$\delta_1$	0.98	
8	100	100	10	13	$ES_O$	1	$F_c$	80	
$IG_H$	5	$\eta_c$	0.6	$\eta_a$	0.7	$\eta_{we}$	0.2	$\eta_g$	0.4

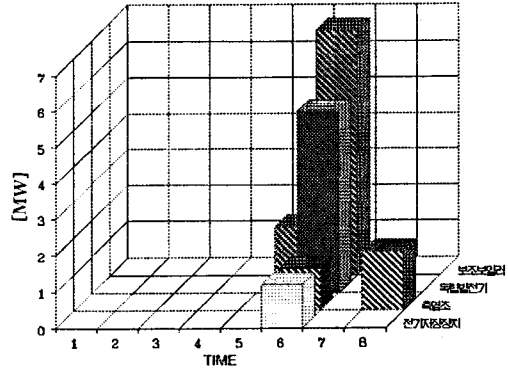


그림 3. 보조설비의 단기운전계획

### 5. 시뮬레이션 결과 분석

기본 입력자료에 대한 시뮬레이션의 결과는 표 2와 같으며, 본 연구를 통하여 얻은 단기(1일)운전계획 결과의 일부를 나타내면 그림 2와 같다.

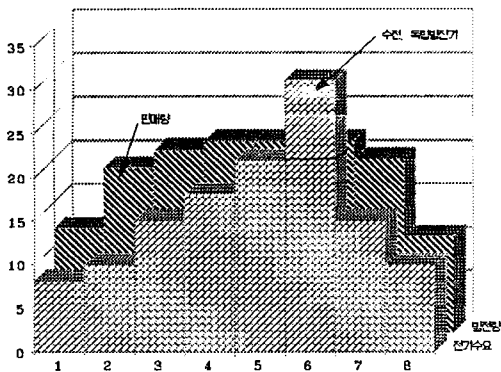


그림 2. 단기운전계획

본 연구를 위해 사용된 열병합발전시스템의 각종 보조설비 운전특성은 연계된 다른 설비들의 입력자료, 연료단가, 전기요금에 따라 매우 민감하게 반응하며, 각종 보조설비의 단기운전계획 결과는 그림 3과 같다.

표 2. 기본입력자료에 대한 최적운전의 결과

COST	시간	$Y_{1j}$	$Y_{2j}$	$Y_{3j}$	$Y_{4j}$	$Y_{5j}$	$Y_{6j}$	$Y_{7j}$	$Y_{8j}$	$Y_{9j}$	$Y_{10j}$	$Y_{11j}$	$ES_j$	$TS_j$	발전량
55,802	1	13.27	0.001	0	0	0	4.06	8	0.001	0	0	2.41	1	1	12.06
	2	20.41	0.001	0	0	0	8.55	10	0.001	0	0	3.71	1	1	18.55
	3	22.45	0.993	0	0	0	4.83	15	1.483	0	0	4.26	5	3.89	21.31
	4	23.47	0.731	0	0	0	4	18	0	0	0	4.40	4.985	6	22
	5	25.51	0.006	0	1.32	0	0	22	0	0	0	4.40	4.970	6	22
	6	32.60	0	1.61	6.79	2.81	0	31	0	1.19	5	4.40	1	1	22
	7	20.41	1.719	0	0	0	5.12	15	0.001	0	0	4.02	1	6	20.12
	8	13.27	0	1.61	0	0	0.59	10	0.001	0	0	2.12	1	1	10.60

### 6. 결론

본 연구를 통해 각종 보조설비들은 첨두열부하, 첨두전기부하시 유용하게 운전되므로 필요이상으로 크게 설계할 필요는 없지만 열부하, 전기부하를 정확하게 파악하여 적당한 용량을 결정하여 운전할 필요성이 있음을 입증하였다. 또한 다양한 보조설비를 가진 열병합발전시스템일수록 각종 보조설비들의 용량 결정도 열병합발전시스템의 최대발전량, 전력요금, 연료단가등을 충분히 고려하여 이에 부합되도록 설계해야 한다는 것을 확인하였으며, 다양한 보조설비들을 고려한 열병합발전시스템의 최적운전계획 수립이 충분히 가능하다는 것을 본 연구를 통해 확인하였다.

### 참고문헌

- (1) 이종범, "열병합발전시스템의 최적운전계획수립을 위한 수리적 모형수립에 관한 연구", 기초전력공학공동연구소 보고서, 1994. 7
- (2) ILB. Puttgen and et al., "Optimum Scheduling Procedure for Cogenerating Small Power Producing Facilities", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.4, No.3, pp.957~964, Aug. 1989.