

열병합발전소의 최적운전 알고리즘 개발

김용하*, 백범민*, 우성민*, 이광성**, 신형철***
 인천대학교*, 한화중합기술단**, 인천국제공항공사***

A Study on the Model Development of CHP optimal operation algorithm

Yong-Ha Kim*, Bum_Min Back*, Sung-Min Woo*, Kwang-Seong Lee**, Hyeong-Cheol Sin***
 University of Incheon*, Han Hwa ENG**, IIAC***

Abstract - This paper develops optimal operation mechanism of CHP(Combine Heat and Power) for enhancement of energy efficiency. It verify optimal operation of Accumulator using Economic Heat Load Dispatch and Dynamic Programming through case study.

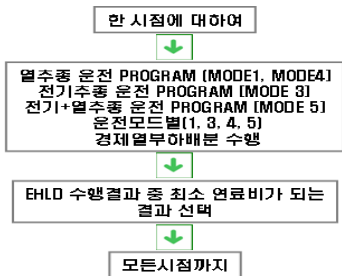
1. 서 론

최근 전 세계적으로 고유가 시대에 대비하여 발전기들의 경쟁성 및 유용성을 높이고 낮은 가격, 고품질, 높은 안정성을 고려한 전력의 생산 및 분배의 효율성을 극대화하고 있다. 세계의 흐름에 발맞추어 우리나라에서도 전기산업에 있어서 경쟁 원리가 도입되고 전력수요가 급증하면서 우리나라에서도 에너지이용의 합리화에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 에너지 효율이 높은 CHP의 도입이 증가하고 있으며, 적은연료를 이용하여 효율적인 전력 및 열 생산이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 에너지 효율을 더욱더 향상시키기 위해서 열병합 발전의 최적 운전 매커니즘을 제시하고자 한다.

2. 열병합발전소의 최적운전 알고리즘

2.1 개발 알고리즘

본 연구의 열병합발전소의 최적운전 알고리즘은 크게 2단계로 나누었다. 첫 번째 단계에서는 한 시점의 부하에 대하여 모드별 경제열부하배분(Economic Heat Load Dispatch)을 수행하게 된다. 각 모드별로는 열료비 함수와 열전비가 각각 다르게 적용된다. 그리고 상·하한치 제약이 있어 전기부하와 열부하를 만족시키기 못하는 경우는 제외하게 된다. 두 번째 단계는 앞에서 계산된 모드별 출력 중 연료비가 가장 싸게 계산된 출력을 선택하게 된다. 같은 부하를 가장 싸게 운전하는 것이 가장 최적 이 되기 때문이다.



<그림 1> 본 연구의 흐름도

2.2 CHP 열출력비용 산정

일반적인 발전기의 출력비용은 다음과 같다.

$$F_T = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i) \quad (1)$$

단, P_{gi} : 발전기 출력 [MW]

여기서 출력비용 함수 $c_i + b_i P_{gi} + a_i P_{gi}^2$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i = \frac{p}{h} (\alpha_i P_{gi}^2 + \beta_i P_{gi} + \gamma_i) \quad (2)$$

단, p : 연료단가 [원/kg] h : 연료의 kg당 열량 [Kcal/kg]

$\alpha_i + \beta_i P_{gi} + \gamma_i P_{gi}^2$ 는 발전기의 입출력 특성식으로서 단위 시간당 어떤

출력으로 운전하는데 필요한 열을 의미한다. CHP의 열출력함수를 산정하기 위하여 전기 출력 P[MW]를 열출력 H[Gcal]로 전환하면 다음과 같다.

$$P = \frac{Q}{860 \times Q_{CHP}} H \quad (3)$$

단, Q : 발전기 효율 [%] Q_{CHP} : CHP 효율 [%]

(3) 식을 (2) 식에 대입하여 정리하면 CHP의 열출력함수는 다음과 같다.

$$\frac{p}{h} (\alpha_i P_{gi}^2 + \beta_i P_{gi} + \gamma_i) = \frac{p}{h} (\alpha'_i H_{gi}^2 + \beta'_i H_{gi} + \gamma_i) \quad (4)$$

단, $\beta'_i = \beta_i \left(\frac{Q}{860 \times Q_{CHP}} \right)$ $\alpha'_i = \alpha_i \left(\frac{Q}{860 \times Q_{CHP}} \right)^2$: 연료비 계수

2.3 모드별 운전

본 연구에서 사용되는 운전모드는 다음과 같이 4가지로 구분하였다.

- Mode 1 : 열부하 추종운전
- Mode 3 : 전기부하 추종운전
- Mode 4 : 최대 열부하 추종운전
- Mode 5 : 전기+열부하 추종운전

2.3.1 최대 열부하 및 열부하 추종운전(Mode 1, Mode 4)

열부하에 대해서 경제열부하배분을 수행한다. 같은 시점의 전기부하가 만족되면 출력결정, 그렇지 못한다면 그 모드는 운전 불가이다.

2.3.2 전기부하 추종운전(Mode 3)

전기부하에 대해서 경제부하배분을 수행한다. 같은 시점의 열부하가 만족되면 출력결정, 그렇지 못한다면 그 모드는 운전 불가이다.

2.3.3 전기+열부하 추종운전(Mode 5)

열부하 혹은 전기부하에 대해서 경제부하배분을 수행한다. 열부하에 대해서 수행했다고 가정하고, 그 때의 출력이 열전비를 고려하여 전기부하를 만족시키면 출력 결정, 그렇지 못하면 다시 전기부하에 대해 경제부하배분 수행 후 모자라는 열출력은 PLB가 담당하도록 하였다.

각 모드별 운전형태는 위와 같이 정의 하였다.

2.4 축열조를 고려한 경제부하배분

식 (4)에 의해서 열출력에 대한 경제부하배분문제는 식 5 ~ 7과 같이 정식화하였다.

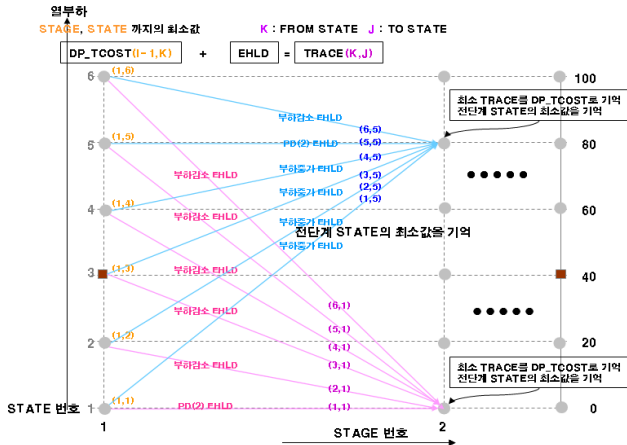
• 목적함수 : $\text{Min } F_T = \sum_{i=1}^{N_g} (a'_i H_{gi}^2 + b'_i H_{gi} + c_i) \quad (5)$

• 제약조건 : $\sum_{i=1}^{N_g} H_{gi} - H_{Load} - H_{Loss} = 0$: 열출력평형식 (6)

$H_{gi}^{\min} \leq H_{gi} \leq H_{gi}^{\max}$: CHP 열출력범위 (7)

단, H_{Load} : 계통 총열부하 [Gcal] H_{gi} : CHP 열출력 [Gcal/h]
 H_{Loss} : 열손실 [Gcal]

열은 전기와 달리 저장이 가능한 매체로서 열병합발전 열원 설비 중 축열조에 저장을 할 수 있으며 부하의 변동에 따라 축방열운전을 하고 있다. 따라서 축열조의 축방열운전에 따라 열출력비용의 차이가 발생하게 되므로 본 연구에서는 동적계획법(Dynamic Programming)을 이용하여 축열조의 최적운전을 도출하고 축열조 운영을 고려한 경제부하배분을 통하여 CHP의 최적운전을 제시하였다.



<그림 2> 축열조를 고려한 경제부하배분 절차

3. 사례연구

본 연구에서 사용되는 열부하 및 전기부하, 열원설비는 A발전소에서 정보를 취득하였다. 입력자료는 다음과 같다.

<표 1> 열출력함수 입력자료

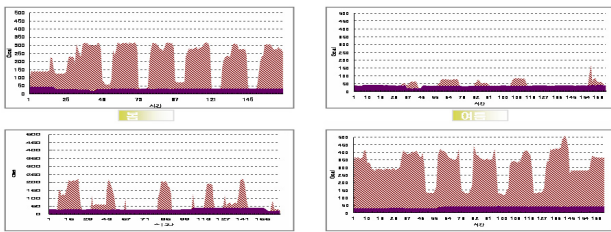
구분	항목	연료비 계수		
		a	b	c
Mode 1		0.0071	33.690	569.80
Mode 3		0.0097	11.030	25.80
Mode 4		0.0051	59.016	-281.27
Mode 5		0.0236	26.621	343.21

<표 2> 축열조 입력자료

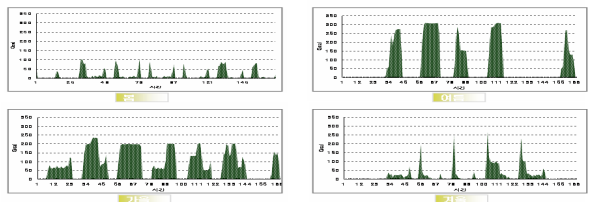
구분	항목	초기열수위 [Gcal]	최대용량 [Gcal]	시간당 축방열용량 [Gcal/h]
ACC		600	1200	140

입력자료에 근거하여 열거래 매커니즘을 적용한 결과는 다음과 같다.

부하는 계절별로 1주일(168시간)에 대한 자료를 가지고 도출하였다.

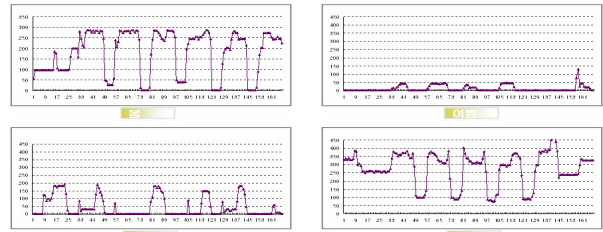


<그림3> 계절별 열부하 및 소각로 수열 패턴

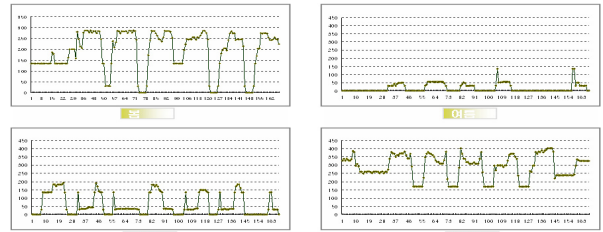


<그림4> 계절별 전기부하 패턴

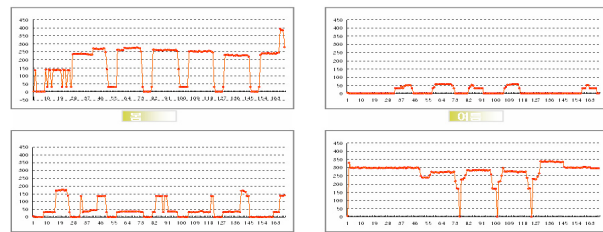
그림 2와 그림 3에 나온 부하를 사용하여 최적운전을 실시하였다. 그 결과 실제 운전 결과와 거의 비슷한 운전이 되었고, 축열조 최적운전을 고려하게 되면 다음과 같은 결과 값이 나왔다.



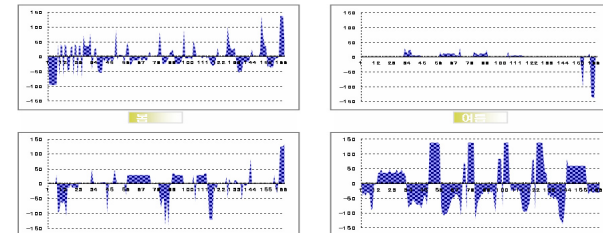
<그림 5> 실제운전실적



<그림 6> 축열조 최적운전 고려전 운전 시뮬레이션



<그림 7> 축열조 최적운전 고려 운전 시뮬레이션



<그림 8> 축열조 최적운전시 축열조의 축·방열량

위의 그림 5~8을 보면 실제운전실적과 축열조 최적운전 고려전을 비교하면 거의 같은 값의 운전을 하고 있다. 하지만 축열조 최적운전을 고려하게 되면 그림 7과 같이 출력이 일정하게 내면서 그림 8과 같이 축열조가 운전이 된다.

3. 결 론

열병합발전소 최적운전 알고리즘을 수립하기 위해서 발전소의 운전모드별 연료비 최소화 기법을 이용하여 한 시점의 가장 싼 연료비로 운전할 수 있는 모드를 찾아냈다. 전체 흐름에서는 축열조를 이용하여 최적운전을 하도록 운전하기 위해서 사례연구를 수행하였다. 그 결과 1년 중 4주간의 연료비 감소율이 8.41%가 되어 축열조가 축방열을 효율적으로 하게 되어 남은열은 축열하고 모자라는 열에 대해서는 방열을 하여 가장 저렴한 운전을 할 수 있게 되므로 축열조의 최적운전을 고려하면 연료비 및 에너지 이용효율이 증대되는 것을 정량적으로 증명하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김용하, 이범, 최상규, 조성린, 정현성, 오석현, "전압 및 과도안정도를 고려한 최적조류계산 알고리즘 개발에 관한 연구", 2005년도 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, 2005. 11.18- 11.19
- [2] 윤중해, "열병합발전시스템의 에너지 사용패턴분석 및 계통연계 가이드라인 정립에 관한 연구", 인천대학교, 2005
- [3] "집단지너지사업관련자료집", 에너지관리공단 2006
- [4] "제 3차 전력수급기본계획", 산업자원부 2006