수열 및 급전에 따른 산업단지 열병합 발전소 운전에 대한 기초 경제성 평가

서영호*, 이준희*, 조충식*, 전용한**, 한상철**, 조성갑***
*(주)성현아앤디 기술연구소, **상지영서대학, ***유한대학
e-mail : yhseo@shind.kr

Basic Economic Evaluation of Industrial Complex CHP Plant for Recieving Heat and Dispatch

Young-Ho Seo*, Joon-Hee Lee*, Chung-Sik Cho*, Yong-Han Jeon**, Sang-Chul Han**, Sung-Kap Cho***
*Research Center, Sung Hyun IND, **Sang Gi Young Seo College, ***Yuhan College

요 약

본 논문에서는 산업단지에 공정증기를 공급하는 열병합 발전소 건설에 대한 타당성 분석시 적용되는 기초 경제성 분석에 대한 것으로, 인근의 타 열병합 발전소에서 잉여열을 수열받고 중압급전을 하였을 경우 매전수익 및 기타 소요 금액 산출을 통해 연간 발생되는 발전소 경제성 평가에 목적이 있다. 시스템 구성은 순환유동층보일러, 증기터빈, 복수기, 급수펌프, 탈기기 및 급수가열기 그리고 수처리 설비로 구성되어 있다. 중앙급전 지시를 받을 경우 열원설비인 보일러는 최대부하로 운전되기 때문에 이때 전력생산량이 증가하였으며, 수열을 받을 경우도 수열된 증기는 탈기기 및 급수가열기 등의 열원 및 증기터빈으로 공급되기 때문에 전력생산량이 증가하였다.

1. 서론

화석연료의 고갈 및 지구 온난화 등의 환경문제가 전 세계적으로 대두 되면서 온실가스 생산의 주요요인 중 하나인 발전플랜트에 대한 관심과 연구가 활발히 이루어 지고 있다. 이러한 관점에서 기존 화력발전으로 전력을 생산하는 시스템에서 열원 및 전기를 동시에 공급할 수 있는 열병합 발전 시스템(CHP : Combined Heat & Power System)에 대한 연구 및 설치사례가 증가하고 있다. 본 논문은 국내 A시 산업단지에 공정증기를 공급하는 열병합 발전소에 대한 설계 사례로 신규 건설예정인 열병합는 발전소 인근 발전소에서 잉여열을 수열 받고, 전력생산량에 대해 중앙급전을 할 경우에 대한 발전소 운전 방식에 따른 경제성 평가를 통하여 최적화하는 시스템 설계에 그 중요성이 있다. CHP 시스템을 구성하기 위한 열평형도(Heat balance diagram)를 작성하기 위해 Thermoflex program을 사용하였으며, Steam Table의 물성치는 IAPWS-IF67을 적용하였다.

2. 시스템 구성 및 개요

2.1. 시스템 설계 조건

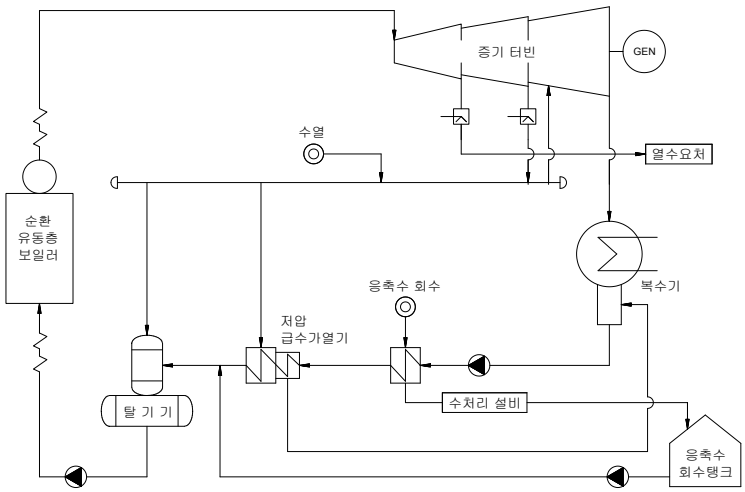
본 본문에 적용된 열병합 발전시스템의 설계 조건은 인근 발전소에서의 잉여열 수열 유무와 중앙급전 등록에 따른 전력생산량 산출한다.

증압급전을 등록한 열병합 발전소는 급전지시를 받을 경우 열원설비(보일러)는 최대 부하로 운전하고 열수요처에서 요구하는 열부하를 공급해주고 남을 열원을 복수기로 배출하여 최대 전력을 생산한다. 급전시기가 없을 때에는 열수요처에서 요구하는 열부하만 생산하기 위해 열원설비는 부분부하 운전을 하게 된다.

[표 1] 계절별 급전 비율

계 절	급전	비급전
봄, 여름, 가을	70%	30%
겨울	100%	-

[표 1]에서는 계절별 급전 비율을 분류하였다. 전력 생산에 따른 매전수익의 산출근거가 되는 월별 SMP(계통한계가격 : System Marginal Price)는 [표 2]에 나타 내었다. 열수요처에서 요구하는 열부하량 및 조건은 24 ata, 255℃로 최대 167 t/h, 최소 122 t/h를 공급한다. [표 2]에서 보면 가을철의 SMP가



[그림 1] 열병합 발전 시스템의 개략도

가장 낮게 나타나므로 이때의 전력 수요량이 가장 적으므로 최소 열부하 조건으로 열수요처에 공급한다. [표 3]에 나와 있는 Case별 시스템 설계시 공통사항으로는,

1) 발전소 정비기간 : 15일/년, SMP가 가장 낮은 9월에 시행
2) 용량 요금 : 7.7 원/kWh
3) 연료 및 증기(열부하) 가격
   ① 석탄 : 180,000원/ton
   ② 석회석 : 35,000원/ton
   ③ 증기 : 40,000원/ton
4) 공급증기의 회수율 : 85%
5) 복수기 냉각수 입·출구 온도차 : 10℃
6) 수열된 증기의 일부는 탈기기 및 급수가열기 등의 열원으로 사용되고 나머지 증기는 저압 터빈으로 40 t/h가 공급된다.

2.2. 시스템 구성

본 논문의 열병합발전 시스템의 구성은 순환유동층보일러, 증기터빈, 복수기, 급수펌프, 탈기기 및 급수가열기로 구성되어 있다. 기타설비로는 열수요처로부터 회수되는 공정증기의 수처리를 위한 수처리 시스템을 갖추고 있다. 탈기기로부터 탈기처리를 한 급수는 급수펌프를 통해 보일러에 공급되어 과열증기를 생산한다. 이 과열증기는 2개의 추기 1개의 배기로 구성된 증기터빈으로 유입되는데 첫 번째 추기단은 열수요처로 공정증기를 공급하기 위한 것이고, 두 번째 추기는 탈기기 및 급수가열기 등의 열원으로 사용된다. 공정증기 및 기타 기기의 열원으로 사용 후 나머지 증기는 증기터빈의 배기단을 통하여 복수기로 공급되어 응축된다. 발전소가 중앙급전 지시를 받으면 보일러의 최대용량인 250 t/h로 운전되지만 미급전시에는 열수요처에 공급하기 위한 공정증기에 해당되는 용량으로만 부분부하 운전을 한다.

[표 2] 월별 SMP

[단위 : 원/kWh]

1월	2월	3월	4월	5월	6월
144.93	115.76	130.39	128.59	124.61	124.45
7월	8월	9월	10월	11월	12월
125.6	121.67	113.07	114.91	114.98	131.75

[표 3] Case 구분

Case	수열 유무	계절	급전유무		열부하 [t/h]
			급전	비급전	
Case 1	수열	봄	70%	30%	167
		여름			167
		가을			122
		겨울	100%	-	167
Case 2	미수열	봄	70%	30%	167
		여름			167
		가을			122
		겨울	100%	-	167
Case 3	수열	봄	70%	30%	167
		여름			167
	미수열	가을			122
	수열	겨울	100%	-	167

3. 해석 및 결과

3.1. 수열 및 급전여부에 따른 전력생산량 및 보보일러 용량

본 열병합발전 시스템에 적용된 순환유동층 보일러는 시간당 250 t/h의 과열증기를 생산하는데 급전유무에 따라 보일러의 운전부하는 변경이 되며, 열수요처에서 요구하는 공정증기의 양이 최소이며 급전 지시 및 인근 발전소로부터 잉여열을 수열 받을 경우 최대 전력생산량을 나타냈다.

[표 4] 전력생산량 및 보일러 용량

열부하 [t/h]	수열 유무	급전 유무	전력 생산량 [kW]	보일러 용량 [t/h]	석탄 [kg/h]	석회석 [kg/h]
167	○	×	18,100	151.1	19,084	1,435
		○	47,400	250.0	31,680	2,382
	×	×	26,700	218.3	27,601	2,075
		○	34,500	250.0	31,680	2,382
122	○	×	14,700	110.6	14,044	1,056
		○	56,400	250.0	31,680	2,382
	×	×	23,300	171.9	21,686	1,630
		○	43,600	250.0	31,680	2,382

위의 [표 4]에서 알 수 있듯이 최소 열부하시 수열을 하고 급전을 할 경우 전력생산량이 56,400 kW로 최대가 되었다.

3.2. Case 별 전력 생산량

[표 5]는 인근 발전소에서 수열을 받았을 경우 급전 유무에 따른 계절별 전력생산량을 나타낸 것으로 열부가가 가장 적은 가을철에 급전을 위해 보일러가 최대운저을 할 경우 전력생산량이 최대로 나타났다. [표 6]은 수열을 받지 않은 경우로 최대 전력생산량이 [표 5]에 비해 22.7% 감소 되었다. 그 이유는 급전시 열원기기는 최대 부하로 운전을 하고 수열을 받게 되면 수열된 증기의 일부는 발전소내 탈기기 및 급수가열기 등의 열원으로 공급이 되고 나머지 증기는 저압단 터빈으로 유입되기 때문에 상대적으로 미수열 할 때 보다는 복수기로 유입되는 증기량의 증가로 인해 전력 생산량이 증가 된다.

[표 7]은 실제 발전소 운영시와 유사한 조건으로 수열과 급전 유무를 동시에 적용한 것으로 Case 1과 2와 같이 가을철 급전을 할 경우 전력생산량이 최대가 아니였다. 그 이유는 열수요처의 공정증기량이 최소이고 SMP가 가장 낮은 가을철은 인근 발전소로부터 수열을 받아 전력생산량을 증가시켜 매전수익을 증가시키기 위해저는 상대적으로 석탄 및 석회석등의 연료비가 증가하기 때문에 이때에는 열원설비를 부분부하 운전하여 열수요처에서 필요로 하는 공정증기만 공급해주는 것이 바람직 하다.

[표 5] Case1 : 전력 생산량

계절	급전유무		열부하 [t/h]	전력생산량 [kW]	
	급전	비급전		급전	비급전
봄	70%	30%	167	47,400	18,100
여름			167	47,400	18,100
가을			122	56,400	14,700
겨울	100%	-	167	47,400	-

[표 6] Case2 : 전력 생산량

계절	급전유무		열부하 [t/h]	전력생산량 [kW]	
	급전	비급전		급전	비급전
봄	70%	30%	167	34,500	26,700
여름			167	34,500	26,700
가을			122	43,600	23,300
겨울	100%	-	167	34,500	-

[표 7] Case3 : 전력 생산량

계절	급전유무		열부하 [t/h]	전력생산량 [kW]			
	급전	비급전		수열		미수열	
봄	70%	30%	167	급전	47,400	급전	-
				비급전	18,100	비급전	-
여름			167	급전	47,400	급전	-
				비급전	18,100	비급전	-
가을			122	급전	-	급전	43,600
				비급전	-	비급전	23,300
겨울	100%	-	167	급전	47,400	급전	-
				비급전	-	비급전	-

3.3. Case 별 수열량

[표 8]은 Case별 수열량을 나타낸 것으로 급전시에는 80.49 t/h 이내, 비급전시에는 63.53 t/h 이내로 공급 받는다. 이 수열량의 일부는 탈기기 및 급수가열기 등의 열원으로 공급이 되며 나머지 증기는 저압단 터빈으로 40 t/h가 유입 되어 전력생산량 증대에 참여하게 된다.

수열량이 급전을 할 때가 비급전시 보다 는 데 복수기를 통하여 응축된 응축수량이 증가할수록 급전을 할 경우의 최대 약 39.5% 차이가 나타났는데 이 이유는 급전을 할 경우 열원설비인 보일러는 최대 열부하로 운전을 하기 때문에 부분부하 운전시보다는 복수기로 유입되는 증기량이 증가하게 된다. 이는 복수기로부터 배출되는 응축수량이 증가하게 되

고 이 응축수는 탈기기 및 급수가열기로 공급되어 수열된 증기를 열원으로 하여 승온 후 보일러에 공급되기 때문에 응축수량 증가에 따라 수열량이 증가한다.

[표 8] Case 별 수열량

[단위 : t/h]

Case	계절	급전	비급전
Case 1	봄	80.34	63.53
	여름	80.34	63.53
	가을	80.49	57.69
	겨울	80.34	-
Case 3	봄	80.34	63.53
	여름	80.34	63.53
	가을	-	-
	겨울	80.34	-

3.4. Case 별 년간 총수입 비교

[표 9]와 같이 수열은 받는 Case 1의 연간 총수입이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 수열된 증기로 발전소내 열원으로 사용하기 때문에 보일러에서 생산된 증기는 전량 터빈으로 유입되어 전력생산이 증가되면 이에 따른 매전수익이 증가된다. Case 2는 Case 1에 비하여 약 20%정도 년간 총수입이 작게 나타났다. 이는 수열을 받지 않고 열원설비에서 생산된 증기로 탈기기 및 급수 가열기 등의 열원으로 일부 소비되기 때문에 전력생산량이 감소한다. Case 3는 실제 발전소 운영과 가장 유사한 경우로 Case 1 보다는 약 3.7% 연간 총수입이 작게 나타났다.

[표 9] Case 별 연간 총수입

[단위 : t/h]

항 목		Case 1	Case 2	Case 3
수입	매전수익	44,726.1	35,792.1	43,114.2
	용량요금	3,648	3,758.4	3,758.4
	증기판매	52,828.8	52,828.8	52,828.8
	합계	101,202.9	92,379.3	99,701.4
지출	석탄	43,590.4	46,171.5	44,184.6
	Lime Stone	637.3	673	644
	합계	44,227.7	46,844.5	44,828.6
연간 총수입		56,975.2	45,534.8	54,872.8

4. 결론

수열 및 급전에 따라 산업단지 열병합 발전소에서의 기초 경제성 평가를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 동일한 열수요처 부하 조건하에서도 급전을 하고 인근 발전소로부터 수열을 받을 경우 전력생산량이 증가함을 알 수 있다.
2) 본 시스템과 같은 경우 증기 터빈의 용량 기준 산정을 열수요처의 최소부하 조건하에서 수열 및 급전을 하는 전력생산량 56,400 kW로 결정할 수 있다.

참고문헌

[1] Lee, B. R., Kim, T. S., Ro, S. T., Shin, H. T., and Jeon, Y. J., 2002, Thermal Design Analysis of Triple-Pressure Heat Recovery Steam Generator and Steam Turbine Systems, Transactions of the KSME B, Vol. 26, No 3, pp. 507-514

[2] Cho, Y. B., Sohn, J. L. and Ro, S. T., 2004, A Study for the Optimal Operating Conditions of the Gas Turbine Based Combined Cycle Cogeneration Power Plant, Transactions of the KSME B, Vol. 28, No. 12, pp. 1582-1590.

[3] Thermoflow, 2009, Thermoflex ver 19.

[4] Basic Design Report for PyeongTaek Sosabul Co-Generation Power Plant.

[5] 서영호, “계절별 부하 특성을 고려한 CHP 성능 해석”, 설비공학논문집, v22 n07, 2010년, pp 454-459