

열병합 발전기 수익 극대화를 위한 열전비 최적화

김군회* · 이재현** · 문승재** · 장택순**

Heat-Electric Power Ratio Optimization To Maximize Profit of a Cogeneration Power Plant

Gun Hoe Kim*, Jae Heon Lee**, Seung-Jae Moon**, Taek-Soon Chang**

Key Words : cogeneration power plant(열병합 발전기), heat-electric power ratio(열전비), cost-based-pool(변동비 반영 전력시장), power trading(전력거래)

Abstract

This paper presents an operational technique to maximize profit of a cogeneration power plant. To minimize errors in a loss and gain analysis of a cogeneration power plant, the energy sale profit in the cost-based-pool electric power trade market, the heat sale profit, and the supplementary fund profit for electric power industry are taken into consideration. The objective is to optimize the heat-electric power ratio to maximize profit of a cogeneration power plant. Furthermore, the constrained bidding technique to optimize heat-electric power ratio can be obtained. Profits from a cogeneration power plant are composed of three categories, such as the energy sale profit in the cost-based-pool electric power trade market, the heat sale profit, and the supplementary fund profit for electric power industry. Profits of a cogeneration power plant are varied enormously by the operation modes. The profits are mainly determined by the amount of constrained heat generation in each trading time. And the three profit categories are coupled tightly via the heat-electric power ratio. The result of this case study can be used as a reference to a cogeneration power plant under the power trading system considered in this case.

1. 서론

현재의 전력시장은 양방향 시장(TWBP) 시장으로 전환되지 못하고 CBP 시장의 형태에 머물러 있다. 수요자 중심의 시장이 형성되지 못하고 공급자 중심의 전력시장이 지속되는 현재의 변동비 반영시장에서는 수익의 대부분은 이미 결정되어 있는 것과 마찬가지로 수익증대를 위한 개선의 여지가 크지 않다 할 수 있다. 하지만 그러한 속에서도 전력시장의 움직임을 주의 깊게 관찰하면 일정부분 수익을 개선할 수 있는 여지가 있는 것도 사실이다. 특히 복합발전기에 있어서는 발전기의 운전특성이 운전모드별로 다르고, 열전비에 따라 정산수익의 상당 부분이 영향을 받는 것을 보면 이는 틀린 추론이 아닐 것이다. 발전기의 수익을 극대화하기 위한 정산요소에 대한 많은 분석들이 있었지만 변동비를 고려한 각 정산요소별 수익을 종합적으로 분석한 경우와 특히 열전비의 영향을 고려한 열병합발전기의 수익 극대화 방안에 대한 연구결과는 확인할 수 없었다.

이 논문은 수익의 극대화에 대한 정확한 이해를 위하여 수익과 비용을 종합적으로 고찰하였고, 수익에는 CBP 시장에서의 전력거래 정산수익, 변동비 차액을 보전하는 전력산업 기반기금,

열 판매 수익을 포함하였고, 비용에는 직접재료비를 나타내는 변동비와 변동비 외적인 부분이 있으나 본 논문에서는 고정비를 제외한 변동비 부분의 비용만을 고려하였다. 이렇게 함으로써 비용의 증감을 고려한 수익의 최대화를 경향을 고찰할 수 있기 때문이다.

복합발전기는 통상적으로 변동비용이 높고, 첨두부하 조절용 발전기로 운용되기 때문에 익일의 시장운용을 위한 가격결정발전계획에 포함될 지 예측하기 어렵다. 하지만 분당 복합발전기의 경우에는 변동비가 매우 높아 가격결정발전계획에 반영될 확률이 거의 없고, 열공급 제약으로만 계통에서 운전될 수 있다는 사실에서 과거의 시장운영 자료를 바탕으로 평균적인 급전운영 형태를 통계적으로 파악하는 것이 가능하다. 본 논문에서 사용한 수익분석 모델은 2장에서 제시되었고, 기본 모델에서 여러 가지 운전 상황에 따른 수익 분석은 3장에서 자세하게 알아보았다. 4장에서는 수익 최대화를 위한 열제약입찰량의 적용 결과가 설명되어 있다. 이 논문의 목적은 운전상황 변경시 수익을 최대화하기 위한 운전방법과 입찰기술에 대한 통찰력을 얻는 것이며, 5장에서는 이러한 것을 종합하여 분석모델을 이용한 수익분석결과에 대한 고찰과 향후 설비에 대한 보완 및 운용방법에 대한 사항을 간단하게 언급하였다.

2. 수익분석 모델

*한양대 파워엔지니어링공학과, kimguhno@kosep.co.kr

**한양대 파워엔지니어링공학과, jhlee@hanyang.ac.kr

**한양대 파워엔지니어링공학과, smoon@hanyang.ac.kr

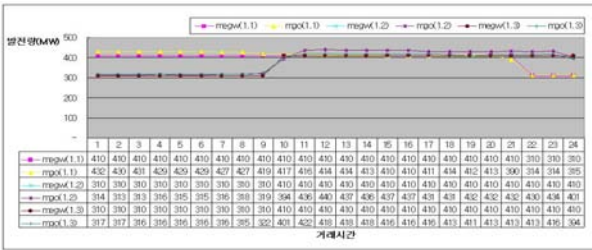


Fig. 1 Constrained bidding power generation vs actual power generation(1CC)

2.1 전력거래 수익 및 비용을 계산하는 산식

변동비 반영 시장하에서 수익을 구성하는 요소로는 시장정산금, 전력산업기반기금, 열판매수익 등이 있으며 이들에 대한 계산식은 아래와 같다.

- † 시장정산금 = 변동비 + 고정비 (1)
- ‡ 변동비 = 2차 가격계수*발전량² + 1차 가격계수*발전량 + 무부하 가격 상수 (2)
- ‡ 고정비 = 공급가능용량에 대한 정산금 (3)
- † 열판매수익 = 기본요금 + 사용량요금 (4)
- ‡ 기본요금 = 열공급량*4,191원/Gcal (5)
- ‡ 사용량요금 = 열공급량*1.98*148.3*2004*47227.48 ÷ 1000000 (6)
- † 전력산업기반기금 = 열계약 입찰량에 대한 변동비*모드 (7)
- 변화에 따른 효율보정계수 - 열계약 입찰량에 대한 시장정산금 - 열판매 수익중 사용량 요금

여기에서 열계약입찰량은 기준열전비 대비 거래시간대별 실열전비를 고려하여 산출하는데 이는 실운전시 발생된 실열전비와 기준열전비를 비교하여 그 비율만큼 감량하여 적용되는데, 기준열전비와 제약입찰량 결정 계산식은 아래와 같다.

- † 분당복합 #1CC 기준열전비(III 모드 기준) : 0.936
- † 분당복합 #2CC 기준열전비(III 모드 기준) : 0.978
- † 정산용 열계약입찰량 = 입찰용 열계약입찰량*(실열전비/기준열전비) (8)

위의 기준열전비는 성능시험을 통하여 특정 출력시에 발생하는 열량값을 취득, 평균하여 전력시장 정산에 사용되는 기준값이고, 실열전비는 공급한 열량을 열계약입찰량의 등가 환산 열량으로 나눈 값으로 정의하고 있다.

- † 실열전비 = (실제 공급한 열량*1000/열계약입찰량*860) (9)

변동비 반영 시장하에서 비용을 구성하는 요소는 발전 연료비가 주가 되며 이에 대한 계산식은 아래와 같다.

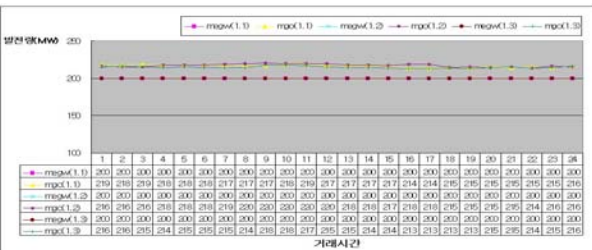


Fig. 2 Constrained bidding power generation vs actual power generation(2CC)

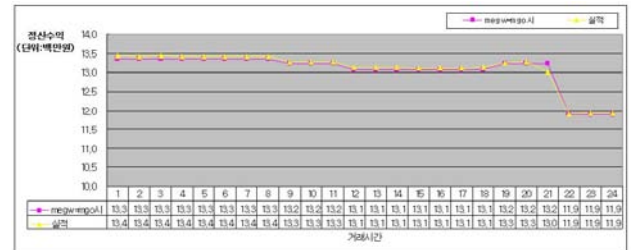


Fig. 3 Profit analysis between the model and a record of performance

- † 변동비 = 2차 가격계수*발전량² + 1차 가격계수*발전량 + 무부하 상수 (10)

2.2 과거자료를 통한 운전패턴 예측

분당복합의 경우는 변동비가 높아 대부분 가격결정 발전계획에 포함되지 않고 단지, 열공급을 위한 열계약 발전만 하고 있다. 전력시장에서의 분당복합 발전기 운영형태를 파악하기 위하여 실제 과거 운전자료를 대상으로 운전데이터를 분석하였다. 특히 변동비가 높은 분당복합 발전기의 운전패턴에는 열계약 입찰량의 영향이 결정적이므로 이러한 변화에 대한 시장운영시스템의 시장운영 패턴을 분석하는 것은 실제의 운전상황과 상당히 근접한 운전패턴을 도출할 수 있다. 변동비 반영시장에서는 기본적으로 제약사항에 대한 사항들을 우선적으로 고려하여 운영발전계획을 수립한다. 즉, 시장을 운영함에 있어 제약사항들을 우선적으로 반영한다는 것이다. Fig. 1, 2에서는 '07.1.1-1.3일간의 시장운영 그래프를 나타내고 있는데 하한 열계약입찰량과 발전량의 관계가 약간의 오차를 가지며 비슷한 값으로 운영되고 있음을 알 수 있다. 이는 분당복합의 변동비가 높아 제약량 이상의 발전을 계통에서 요구하고 있지 않기 때문인데, 실제 운전형태는 Load Limit & Governor Free 형태의 운전을 하고 있으며 계통주파수에 따라 발전량이 제약입찰량을 약간 초과하기도 하고 약간 못 미치기도 한다. 상기 그래프에서 알 수 있듯이 열계약입찰량과 발전량은 대동소이한 값을 가지며, 기타 기간에 대한 운전형태도 이와 크게 다르지 않다.

2.3 분당복합 입찰시스템 운영 과정

분당복합 발전기는 현재의 입찰에 사용되는 열계약 입찰량과 과거의 실적치를 수식화하여 이를 근거로 공급열량에 해당하는 열계약 발전량을 산출하여 입찰하고 있으며, 현재의 모드별 분당복합 발전기 열계약 발전량 산출 계산식은 아래와 같다.

- † ICC 모드 I 운전(GT+HP TBN+HRSG+DH)
 $Y = -0.0001093455X^2 + 1.4135749121X - 47.9639215857$ (10)

- † ICC 모드 V 운전(GT+HP TBN+LP TBN+HRSG+DH)
 $Y = 0.0012546489X^2 + 1.7940085457X + 16.8565651841$ (11)

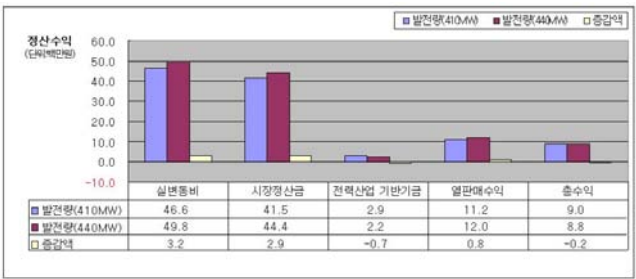


Fig. 4 The effect of over generated power than constrained bidding value(410MW)



Fig. 5 The effect of under generated power than constrained bidding value(410MW)

† 2CC 모드 I 운전(GT+HP TBN+HRSG+DH)

$$Y = -0.0001189228X^2 + 1.17444151143X - 17.8165974729 \quad (12)$$

† 2CC 모드 V 운전(GT+HP TBN+LP TBN+HRSG+DH)

$$Y = 0.00314860535X^2 + 1.877074138X - 8.9594843278 \quad (13)$$

상기식에서 X는 공급해야 할 열량이며, 모드별 열계약입찰량 결정 프로세스는 다음과 같다. 우선 공급해야 할 열량을 결정하고, 운전가능대수 및 대기온도를 고려한다. 그리고 대기온도를 고려한 운전모드를 결정한 다음 하한 열계약입찰량과 공급가능용량을 결정한다.

2.4 수익 분석을 위한 운전모델 설정

실제의 시장운영시스템이 운영하는 분당복합 발전기의 발전량은 열계약 입찰량보다 대부분의 경우 비슷하거나 약간 큰 형태로 유지되는데, 합리적인 예측을 위해서는 열계약 입찰량과 실제 계량된 발전량이 동일하다는 가정을 하는 것이 타당하다.

3. 수익분석(모델 : 열계약 입찰량 = 발전량)

3.1 실적 시장운영결과와 설정된 모델을 통한 수익 비교

Fig. 3에서 알 수 있듯이 모델의 수익은 실적분 수익 보다 약간 부족하지만 전체 거래시간에 있어 대동소이한 정산결과를 보여주고 있다. 각각의 운전상황에 대해 아래에서 경우를 세분화하여 고찰해 보았다.

3.2 발전량이 열계약입찰량보다 큰 경우

Fig. 4는 발전량이 열계약입찰량보다 큰 경우 발전량 증가에 따른 1모드 실변동비 증가분은 시장정산금 증가분보다 크고, 추가로 발생한 열량에 의한 기금감소분과 열판매 수익의 사용량 요금부분의 증가는 서로 상계됨을 1 거래시간 자료를 가지고 나타내었다. 하지만 최종적으로는 미소하나마 추가로 발생한 열에 의한 열판매 기본요금 수익과 시장정산금을 초과하는 1모드 실변동비의 차가 정산수익의 순감소분으로 남게되어 전체적으로는 손해가 되므로 하한 열계약 발전량을 초과하여 발전하는 것은 바람직하지 않다. 분당복합 발전기의 3모드 대비 1모드 운전시 기준감소출력은 아래와 같고, 이를 고려하여 전력산업 기반기금 산정시 변동비에 일정한 보정계수를 두어 정산하고 있다.

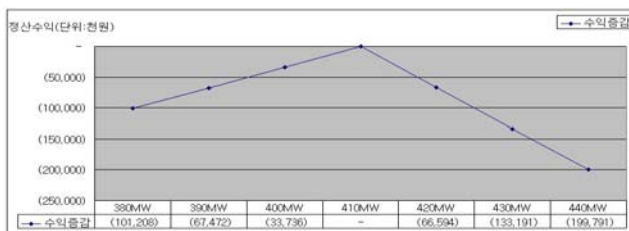


Fig. 6 Profit analysis between power generation and the constrained heat supply



Fig. 7 constrained power generation to maximize profit

† 기준열감소출력 : ICC(129.6kWh/Gcal), 2CC(177.7kWh/Gcal)

† 실변동비 보정계수 : ICC(1.105), 2CC(1.154)

3.3 발전량이 열계약입찰량보다 작은 경우

Fig. 5는 발전량이 제약량보다 작은 경우 시장정산금의 감소가 실변동비의 감소보다 적어 일면 수익이 증가할 것 같으나, 열판매수익의 감소와 기반기금의 감소로 결국 전체적으로는 발전량 감소에 따른 열공급량 감소로 열판매수익중 기본요금 만큼이 줄어드는 결과를 초래한다. 따라서 발전량이 열계약입찰량보다 적어지지 않도록 운전해야 한다.

3.4 열계약입찰량을 고려한 최적 발전량

Fig. 6은 발전량이 열계약입찰량보다 크거나 작은 경우의 정산수익 변화를 종합적으로 나타내고 있다. 단, 여기서 열계약입찰량은 공급열량의 크기에 해당하는 열계약량을 말한다. 여기서 열계약입찰량과 발전량이 같다는 것은 기준열전비와 실열전비가 동일하다는 것을 말한다.

3.5 수익최대화를 위한 열계약입찰량 적용 결과

Fig. 7에서는 열계약 입찰량의 변화, 즉 열전비 변화에 따른 수익의 증감을 분석하기 위해 열계약 입찰량과 발전량을 동일하다고 가정된 모델을 이용하여 열계약 입찰량과 발전량 모두를 증감하면서 수익의 증감여부를 분석하고, 또한 수익이 최대가 되는 열계약 입찰량을 보여주고 있다. 제약입찰량 및 발전량의 증가에 따라 열판매수익의 기본요금 만큼이 증가하고 반대의 경우도 열판매수익의 기본요금 만큼이 감소하므로 급증하지 않는 한 가급적 공급가능 출력까지 제약입찰량을 크게 하는 것이 경제적이다. 하지만 이것은 발전량 증가에 따라 추가로 발생하는 한국지역난방공사에서 받아들일 수 있는 열수용능력에 따라 제한되고, 또한 열공급량에 따른 기준감소출력분을 고려한 공급가능용량에 의해서도 제한을 받는다.

4. 열공급량 변화에 따른 최적 운전방법 결정

4.1 열공급량 감소분을 방지한 경우

Fig. 8은 실열전비 감소로 인한 전력산업 기반기금 감소와 열판매수익 감소로 정산수익 감소가 매우 크게 발생하게 되는 상황을 나타낸다. 이러한 경우를 배제하기 위하여 한국지역난방공사의 지역난방수 공급밸브 조작시는 반드시 사전 통보가 되도록

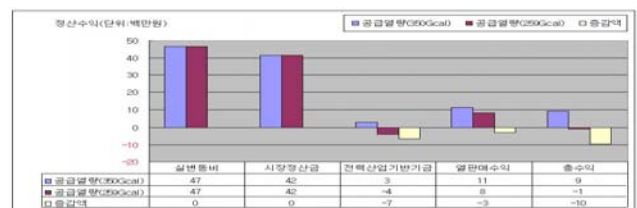


Fig. 8 A case of heat supply decrease by customers

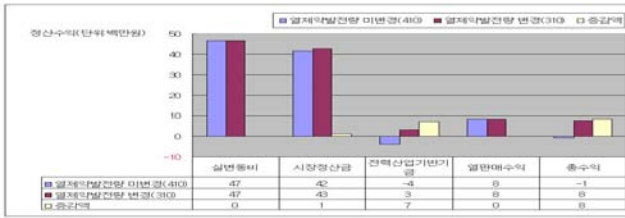


Fig. 9 Profit loss recovery by re-bidding constrained power generation

하여 열공급량에 맞는 열제약발전량을 계통에 반영시킬 수 있도록 해야 최대의 수익을 추구할 수 있다. 따라서 한국지역난방사의 열설비 운용현황을 주의 깊게 모니터링할 필요가 있으며, 필요시 신속하게 열제약입찰량을 변경하여 전력산업 기반기금 수익감소를 방지하여야 한다.

4.2 열공급량 감소에 따라 열제약량만 변경한 경우

Fig. 9은 열공급량 감소에 따라 열제약량을 변경입찰한 경우로 이 때는 전력산업기반기금 감소분을 상당부분 만회할 수 있다. 하지만 이렇게 하더라도 감소된 정산수익금을 회복하기에는 역부족이다. 여기서 발전량을 줄이지 않으면 공급열량에 초과하는 발전량에 의해 발생한 다량의 열이 손실된다.

4.3 열공급량 감소시 열제약량 및 발전량을 감소시킨 경우

Fig. 10는 열공급량 감소에 따라 열제약량을 변경입찰하고 발전량도 열제약입찰량에 맞게 감소시킨 경우로 열량의 임의 감소시의 손실분이 거의 대부분 만회된다. 하지만 상기 두 과정을 통하여 만회된 정산수익은 열공급량 임의 감소시의 수익감소분에서 열판매수익중 기본요금수익만큼이 만회되지 않는다.

4.4 열공급량 감소시 V 모드 운전

이 경우는 V모드 변동비가 I모드와 동일하다고 보면 상기 그림Fig. 8과 같은 형태의 그래프를 얻을 수 있고, 여기서 전력산업기반기금 수익이 매우 크게 감소함을 알 수 있다.

5. V모드 운전으로 인한 손실 발생 사례

Fig. 11, 12은 발전량에 비해 적은 열량 공급을 위한 V모드 운전의 경우 수익 변화를 나타내는 것으로 기준열전비를 상회하는 실열전비 구현시는 크게 문제될 것이 없으나 열제약 발전량 대비 열공급량이 적어 실열전비가 기준열전비 이하로 내려간다면 이는 기반기금의 손실을 초래한다. 즉, 열공급량과 전기공급량의 수요변화에 따른 운전 모드 전환시, 특히 V모드로의 전환시는 필히 줄어든 열공급량을 감안하여 기준열전비에 비례하는 열제약 입찰량의 크기를 줄여서 변경입찰을 하여야 한다. Fig. 10는 한국지역난방에서 열수요의 감소로 적은 열량공급을 요구한 경우로 V모드 운전이 불가피한 상황에서 열제약입찰량을 변경하지 않아 많은 손실이 발생한 경우이다. 하루동안 전체적인 손실이 1CC에서만 약53백만원 발생한 것을 알 수 있다.

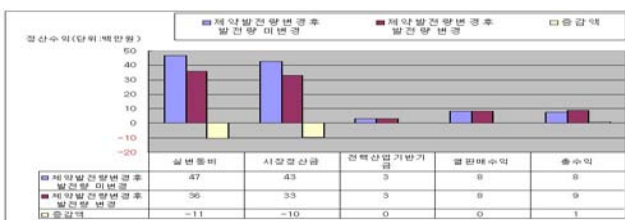


Fig. 10 Profit loss recovery by re-bidding constrained power generation and reducing of power generation

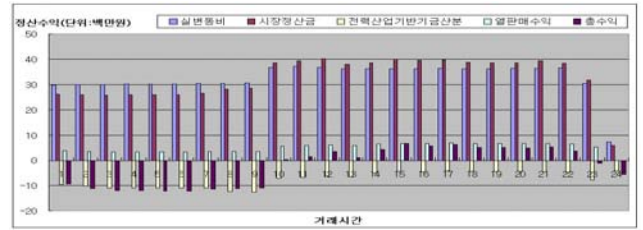


Fig. 11 Profit decrease when constrained power generation wasn't decreased as heat supply decreased

Fig. 11는 상기와 동일한 운전상황에서 줄어든 열공급량에 해당하는 기준열전비만큼 열제약입찰량을 변경한 경우로 전체적인 수익은 매 시간대마다 “+”인 것을 알 수 있다. 이렇게 운전하였을 경우 하루동안 발생하는 이익은 약161백만원인 것을 알 수 있다. 열제약입찰량을 변경입찰 하지 않았을 경우와 변경입찰을 시행한 경우의 정산수익 차는 약216백만원 이다.

6. 결론

모델을 통하여 분석해 본 결과 발전량이 열제약입찰량을 초과하는 경우 전체적으로는 수익이 감소하고, 발전량이 열제약입찰량보다 작은 경우에도 전체적으로는 수익이 감소한다. 따라서 수익을 극대화하기 위해서는 열제약입찰량과 발전량을 필히 일치시켜야 한다. 즉 실열전비는 기준열전비에 맞추어 운전해야 한다. 이러한 조건하에서 수익을 더욱 극대화하기 위해서는 열제약입찰량의 크기와 발전량의 크기를 같게 하면서 공급가능용량 범위내에서 열제약입찰량 및 발전량 모두를 증가시키는 것이다. 그러면 열판매수익중 기본요금 만큼의 순이익 발생되므로 전체적으로는 수익을 보다 극대화할 수 있다. 만약 공급열량이 임의로 감소되는 경우라면 이 때는 신속히 열제약입찰량을 변경하고, 발전량을 열제약입찰량에 맞추어야만 전력산업기반기금 수익의 감소를 최소화할 수 있다. 하지만 감소된 출력으로 인한 열생산량의 감소로 열판매수익중 기본요금 부분만큼은 순손실로 남게 된다. 이러한 경우 V모드로의 전환은 기반기금의 매우 큰 손실을 초래한다. 열공급시 모드 전환은 공급열량 변화에 따른 제약입찰량만 잘 조절하면 손실의 대부분을 만회할 수 있지만 정지상태에서 적은 양의 열공급을 위해 발전기가 기동되는 경우라면 기동비용을 회수할 수 없기 때문에 이러한 운전은 배제해야 한다. 이러한 경우를 대비하여 고효율 운전시 많은 양의 열을 축열조에 저장하여 적은 양의 열수요에도 실시간 효율적으로 대응할 수 있도록 한국지역난방공사에서 축열설비를 확충하도록 유도할 필요가 있다. 감사합니다.



Fig. 12 Profit increase when constrained power generation was decreased timely as heat supply decreased

참고문헌

- [1] 한국전력거래소, 전력시장 운영규칙, pp.95-176.
- [2] 한국전력거래소, 타에너지 지원사업 운영요령, pp.1-98.