

열병합 발전계통을 고려한 전력계통의 경제급전

김학만^o 차재상 신명철

성균관대학교 전기공학과

The Economic Dispatch for Power System Considering Cogeneration Systems

Hak-Man Kim^o, Jae-Sang Cha, Myong-Chul Shin

Dept. of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan Univ.

Abstract-This paper presents mathematical formulation of economic dispatch problem for power system considering cogeneration systems. For exact mathematical formulation, conceptual division technique is introduced. Simulation is conducted to power system including two cogeneration systems.

1. 서론

최근들이 전력과 열을 동시에 생산하는 종합적인 에너지 이용 효율이 높은 열병합 발전(cogeneration)에 관심이 높아지고 있고 지역적으로 설치가 증가될 전망이다. 이러한 사회적인 요구로 민간의 열병합 발전설비에 대해서 경제적 운용계획에 관한 연구가 많이 진행되었고[1]-[4] 열병합 발전설비와 증기터빈 발전설비등의 일반 발전설비(conventional generation units), 전용보일러로 구성된 단일 열병합 발전계통(cogeneration system)의 경제급전에 관한 연구가 발표되었다[5].

민간의 열병합 발전설비 이외에 전력회사 계통에서도 열병합 발전설비의 증가가 예상되는데 전력회사는 경제적인 발전계획을 수립하기 위해서 열병합 발전설비를 포함하여 전체 전원에 대해서 최적의 발전계획을 수립하여야 한다. 그러나 열병합 발전설비를 포함한 발전계획을 수립하기 위해서는 전력과 열을 동시에 고려해야 하므로 전력만을 고려하는 일반 발전설비(열병합 발전설비와 구별하기 위해서 이하 일반 발전설비라 명명)만 존재하는 계통과는 다른 특수성이 있다.

그리고 증기 터빈 발전기나 가스 터빈 발전기등의 발전설비와 더불어 열병합 발전설비는 대용량의 전력과 열을 필요로 하는 특정 지역에 설치되어 전력과 일부화를 단행하므로 지역성이 있다. 또한 그 특정 지역에서 발전한 전력중 잉여분은 타지역으로 공급하는데 잉여전력에 대해서는 송전시 송전손실이 발생하게 되므로 이에 대한 고려가 되어야 한다. 그러므로 전술한 상황을 모두 고려하여 전력회사의 전체 계통에 대해서 경제적인 발전계획을 수립하는 것은 간단하지 않다.

따라서 본 논문에서는 전력과 열을 필요로 하는 특정 지역에 전력과 일부화를 공급하는 열병합 발전설비와 일반 발전설비 및 전용보일러를 하나의 열병합 발전 계통으로 규정하고 다수의 열병합 발전계통이 포함되어 있는 전체 전력계통의 단기 발전계획인 경제급전 문제의 최적해를 구할 수 있는 정식을 제시

하고자 한다. 여기서 열병합 발전설비의 선력과 열의 생산관계에 대해서는 단일 열병합 발전계통에 대해서 고정된 열전(전력/열)비를 고려한 경우[5]와는 달리 최소 및 최대 범위내에서 최저의 열전비율 갖도록 정식을 수립하였다.

2. 열병합 발전계통을 고려한 전력계통의 경제급전 문제의 정식화

본 논문에서 열병합 발전계통을 고려한 전력계통의 경제급전 문제의 정식을 수립하기 위해서 열병합 발전계통의 특수성과 지역성의 문제가 있기 때문에 이를 해결하기 위해서 전력회사의 전력계통을 개념적으로 열병합 발전계통과 전체 전력계통에서 열병합 발전계통을 제외한 전력계통을 주전력계통(main power system)으로 규정하고 전체 전력계통을 여러개의 열병합 발전계통과 주전력계통으로 나눈다. 그리고 이를 도식화하면 그림 1과 같다.

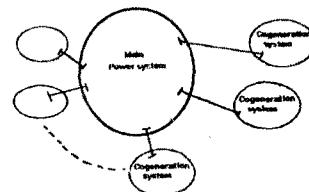


그림 1. 열병합 발전계통을 고려한 전력계통의 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of power system considering multiple cogeneration systems.

그리고 열병합 발전계통내의 발전설비의 발전량의 결정은 타 지역으로 잉여전력의 전송에 대한 손실이 고려되어야 한다. 그러나 각 발전설비의 발전량중 얼마만큼의 양이 내부부하에 이용되고 타지역으로 전송되는지 지정할 수 없으므로 이를 해결하기 위해서 열병합 발전계통내의 열병합 발전설비와 일반 발전설비에서 발전하는 전력을 내부용과 외부용으로 개념적으로 구별하여 정식화를 용이하게 하는 기법을 도입하였다.

열병합 발전계통을 고려한 전력계통의 경제급전 문제의 최적화를 위한 목적함수는 각 열병합 발전계통의 전력 및 열생산 비용함수와 주전력계통의 전력생산 비용함수로 구성되는데, 이

를 수식화하면 식 (1)과 같다.

$$\min \text{ cost} = c^{\text{Cog}}(p, q) + c^{\text{min}}(p) \quad (1)$$

여기서

$c^{\text{Cog}}(p, q)$: p 는 전력, q 는 열을 나타낸 것으로 열병합 발전계통의 전력과 열생산의 비용함수

$c^{\text{min}}(p)$: 전체 전력계통에서 열병합 발전계통을 제외한 주전력계통의 전력생산의 비용함수

그리고 $c^{\text{Cog}}(p, q)$ 를 구체적으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} c^{\text{Cog}}(p, q) = & \sum_{\text{nc}} \left\{ \sum_i c_{c,i}^{\text{Cog}}(p_{i,\text{in}}, p_{i,\text{out}}) \right. \\ & + \sum_j c_{c,j}^{\text{Cog}}(p_{j,\text{in}}, p_{j,\text{out}}, q_j) \\ & \left. + \sum_k c_k^{\text{Cog}}(q_k) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

nc : 열병합 발전계통의 수

i : 열병합 발전계통에서 열병합 발전설비를 제외한 일반 발전설비의 수

j : 열병합 발전계통에서 열병합 발전설비의 수

k : 열병합 발전계통에서 전용보일러의 수

$p_{i,\text{in}}$, $p_{i,\text{out}}$, $p_{j,\text{in}}$, $p_{j,\text{out}}$: 열병합 발전계통에서 일반 발전 설비 및 열병합 발전설비의 발전량으로 침자 in 은 열병합 발전계통의 부하공급을 위한 발전량이고 침자 out 은 타지역으로 송전을 위한 발전량

q_j , q_k : 열병합 발전계통에서의 열병합 발전설비 및 전용 보일러의 열생산량

$c_{c,i}^{\text{Cog}}(p_{i,\text{in}}, p_{i,\text{out}})$, $c_{c,j}^{\text{Cog}}(p_{j,\text{in}}, p_{j,\text{out}}, q_j)$, $c_k^{\text{Cog}}(q_k)$: 열병합 발전계통내의 일반 발전설비, 열병합 발전설비, 전용보일러의 전력생산 및 열생산 비용함수

또한 $c^{\text{min}}(p)$ 는 식 (3)과 같다.

$$c^{\text{min}}(p) = \sum_h c_h^{\text{min}}(p_h) \quad (3)$$

여기서

h : 주전력계통에서 일반 발전설비의 수

$c_h^{\text{min}}(p_h)$: 주전력계통에서 일반 발전설비의 전력생산 비용함수

전송한 각종 비용함수는 전력과 열생산량에 대한 다행식으로 구성된다. 그리고 각 열병합 발전계통에 대한 제약조건으로는 먼저 일반 발전설비의 전력생산량은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$p_i^{\text{min}} \leq p_{i,\text{in}} + p_{i,\text{out}} \leq p_i^{\text{max}} \quad (4)$$

식 (4)에서 $p_{i,\text{in}}$, $p_{i,\text{out}}$ 는 식 (5)의 조건에도 만족되어야 한다.

$$p_{i,\text{in}} \geq 0, p_{i,\text{out}} \geq 0 \quad (5)$$

그리고 열병합 발전설비의 전력생산량은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$p_i^{\text{min}} \leq p_{i,\text{in}} + p_{i,\text{out}} \leq p_i^{\text{max}} \quad (6)$$

식 (6)에서 $p_{i,\text{in}}$, $p_{i,\text{out}}$ 는 식 (7)의 조건에도 만족되어야 한다.

$$p_{j,\text{in}} \geq 0, p_{j,\text{out}} \geq 0 \quad (7)$$

열병합 발전설비의 전력과 열생산 관계를 수식화하면 식 (8), (9)와 같다.

$$q_j \geq \frac{1}{E_{1ij}} (p_{j,\text{in}} + p_{j,\text{out}}) \quad (8)$$

$$q_j \leq \frac{1}{E_{2ij}} (p_{j,\text{in}} + p_{j,\text{out}}) \quad (9)$$

여기서

E_{1ij} : 열병합 발전설비 j 기의 최소 열전(전력/열)비
 E_{2ij} : 열병합 발전설비 j 기의 최대 열전(전력/열)비

이 관계에 의한 열병합 발전설비의 전력과 열(증기)의 운용 가능 영역은 그림 2와 같다.

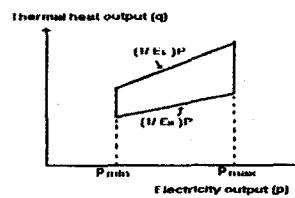


그림 2. 열병합 발전설비의 운용 가능 영역

Fig. 2 Cogeneration feasible operation region

또한 열병합 발전계통에서 내부의 부하에 공급하기 위해서 발전되는 전력량은 식 (10)으로 범위가 결정된다.

$$p_{i,\text{in}} + p_{j,\text{out}} \leq p_{\text{load}}^{\text{demand}} \quad (10)$$

여기서 $p_{\text{load}}^{\text{demand}}$: 열병합 발전계통의 전력부하

그리고 보일러의 열생산량은 식 (11)과 같다.

$$q_k^{\text{min}} \leq q_k \leq q_k^{\text{max}} \quad (11)$$

또한 열병합 발전계통에서의 열수급 균형조건은 식 (12)와 같다.

$$\sum_i q_i + \sum_k q_k = q^{\text{demand}} \quad (12)$$

여기서 q^{demand} : 열병합 발전계통의 열부하

그리고 주전력계통에 대한 제약조건으로는 각종 발전설비의 전력생산량은 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$p_h^{\text{min}} \leq p_h \leq p_h^{\text{max}} \quad (13)$$

마지막으로 열병합 발전계통 및 주전력계통을 모두 고려한 전력수급 균형 조건은 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} \sum_{\text{nc}} (\sum_i (p_{i,\text{in}} + p_{i,\text{out}}) + \sum_j (p_{j,\text{in}} + p_{j,\text{out}})) + \sum_h p_h^{\text{load}} \\ = \sum_{\text{nc}} (\sum_i p_{i,\text{out}}^{\text{load}} + \sum_j p_{j,\text{out}}^{\text{load}}) + \sum_h p_h^{\text{load}} \\ + \sum_{\text{nc}} p_{\text{load}}^{\text{demand}} + p_{\text{min}}^{\text{load}} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서

$\sum_{\text{nc}} p_{\text{load}}^{\text{demand}}, p_{\text{min}}^{\text{load}}$: 각 열병합 발전계통에서 전력부하 및 주전력계통에서의 전력부하

$$\sum_i p_{i,out}^{loss}, \sum_j p_{j,out}^{loss}, \sum_h p_h^{loss} : 각 열병합 발전계통에서$$

발전한 전력 중 타지역으로 송전하는 전력의 송전 손실 및 주전력계통의 발전설비의 송전 손실(생산전력의 다향식으로 구성)

열병합 발전계통을 고려한 전력계통의 경제급전 문제에 대한 최적해는 본 논문에서 제안한 일반화된 정식을 이용하여 전력과 열의 단위를 전력의 단위로 단일화하여 비용함수와 송전 손실함수의 차원에 따라 다양한 최적화기법을 이용하여 구할 수 있다.

3. 사례연구

사례연구에서는 모델 계통의 경제급전의 최적해를 구하기 위해서 모델 계통을 본 논문에서 제안한 정식을 이용하여 최적화 기법에 알맞은 수식으로 전환하여 최적해를 구하는 것을 보이고자 한다. 모델 계통은 열병합 발전계통이 2개가 존재하는 경우로 열병합 발전계통1은 열부하보다 전력부하가 많은 부하특징을 가지고 열병합 발전계통2는 열부하가 더 많은 부하 특징을 가진다.

모델 계통은 열병합 발전계통 1에서는 열병합 발전설비 1기, 일반 발전설비 1기, 전용보일러 1기로 구성하였고 열병합 발전계통 2에서는 열병합 발전설비 1기, 전용보일러 1기로 구성하였고 주전력계통에서는 일반 발전설비 2기로 간소화시켜 구성하였다. 그리고 각 설비의 비용함수와 운전범위, 송전손실탑수, 전력 및 열 부하량을 다음과 같다.

주전력계통

$$c(p_1)=361+7.92p_1+0.001562p_1^2 [\text{원/MWh}]$$

$$c(p_2)=310+7.85p_2+0.00194p_2^2 [\text{원/MWh}]$$

$$150\text{MW} \leq p_1 \leq 600\text{MW}$$

$$100\text{MW} \leq p_2 \leq 400\text{MW}$$

$$\text{전력부하}=850\text{MW}$$

열병합 발전계통_1

열병합 발전설비 :

$$c(p_{11}, q_{11})=750+5.62(p_{11})+0.001255(p_{11})^2+5.53q_{11}+0.001145q_{11}^2 [\text{원/MWh}]$$

$$\text{최대 열전비}=1.5, \text{최소 열전비}=0.8$$

$$5\text{MW} \leq p_{11} \leq 50\text{MW}$$

일반 발전설비 :

$$c(p_{12})=641+7.97(p_{12})+0.001765(p_{12})^2 [\text{원/MWh}]$$

$$3\text{MW} \leq p_{12} \leq 30\text{MW}$$

전용보일러 :

$$c(q_{13})=550+5.54q_{13}+0.00132q_{13}^2 [\text{원/MWh}]$$

$$1\text{MW} \leq q_{13} \leq 15\text{MW}$$

$$\text{전력부하}=80\text{MW}, \text{열부하}=30\text{MW}$$

열병합 발전계통_2

열병합 발전설비 :

$$c(p_{21}, q_{21})=730+5.92(p_{21})+0.001230(p_{21})^2+5.58q_{21}+0.001243q_{21}^2 [\text{원/MWh}]$$

$$\text{최대 열전비}=0.9, \text{최소 열전비}=0.4$$

$$5\text{MW} \leq p_{21} \leq 50\text{MW}$$

전용보일러 :

$$c(q_{22})=540+5.63q_{22}+0.00155q_{22}^2 [\text{원/MWh}]$$

$$1\text{MW} \leq q_{22} \leq 15\text{MW}$$

$$\text{전력부하}=30\text{MW}, \text{열부하}=80\text{MW}$$

송전손실

$$p^{loss}=0.00003p_1^2+0.00003p_2^2+0.00003p_{11}^2+0.00003p_{12}^2+0.00003p_{21}^2 [\text{MW}]$$

송전손실의 함수 중 p_{11}, p_{12}, p_{21} 은 열병합 발전계통 1,2에서 타지역으로의 송전량 만큼 나타낸다. 위의 조건을 본 논문에서 제안한 정식을 이용하여 재구성하면 다음과 같다.

목적 함수 :

$$\begin{aligned} \text{min cost} = & 561+7.92p_1+0.001562p_1^2+310+7.85p_2+0.00194p_2^2 \\ & +750+5.62(p_{11,in}+p_{11,out})+0.001255(p_{11,in}+p_{11,out})^2 \\ & +5.53q_{11}+0.001145q_{11}^2 \\ & +641+7.97(p_{12,in}+p_{12,out})+0.001765(p_{12,in}+p_{12,out})^2 \\ & +550+5.54q_{12}+0.00132q_{12}^2 \\ & +730+5.92(p_{21,in}+p_{21,out})+0.001230(p_{21,in}+p_{21,out})^2 \\ & +5.58q_{21}+0.001243q_{21}^2 \\ & +540+5.63q_{22}+0.00155q_{22}^2 \end{aligned}$$

제약조건 :

$$150 \leq p_1 \leq 600$$

$$100 \leq p_2 \leq 400$$

$$5 \leq p_{11,in}+p_{11,out} \leq 50$$

$$3 \leq p_{12,in}+p_{12,out} \leq 30$$

$$1 \leq q_{12} \leq 15$$

$$5 \leq p_{21,in}+p_{21,out} \leq 50$$

$$1 \leq q_{22} \leq 15$$

$$p_{11,in} \geq 0, p_{11,out} \geq 0, p_{12,in} \geq 0, p_{12,out} \geq 0, p_{21,in} \geq 0, p_{21,out} \geq 0$$

(설비의 운전범위 조건)

$$q_{11} \geq 1/1.5(p_{11,in}+p_{11,out})$$

$$q_{11} \leq 1/0.8(p_{11,in}+p_{11,out})$$

$$q_{21} \geq 1/0.9(p_{21,in}+p_{21,out})$$

$$q_{21} \leq 1/0.4(p_{21,in}+p_{21,out}) \quad (\text{열병합 발전설비의 열전비 조건})$$

$$q_{11}+q_{12}=30$$

$$q_{21}+q_{22}=80$$

(열수급 균형 조건)

$$p_1+p_2+p_{11,in}+p_{11,out}+p_{12,in}+p_{12,out}+p_{21,in}+p_{21,out}$$

$$=0.00003p_1^2+0.00003p_2^2+0.00003p_{11,out}^2+0.00003p_{12,out}^2$$

$$+0.00003p_{21,out}^2+850+80+30 \quad (\text{전력수급 균형 조건})$$

위의 조건을 본 논문에서 제시한 정식을 이용하여 경제급전 문제의 최적해를 구한 결과, 열병합 발전계통1의 전력은 열병합 발전설비에서 43.5MW, 일반 발전설비에서 30.0MW가 발전되었고 6.5MW를 수전받았다. 열은 열병합 발전설비가 29.0MW, 전용보일러가 1.0MW를 생산하여 내부 열부하에 공급하였다. 이 경우 열병합 발전설비의 최적 열전비는 1.5로 결정되었다. 그리고 열병합 발전계통2의 전력은 열병합 발전설비에서 30.0 MW가 발전되어 내부 전력부하에 공급하고 20.0MW를 송전하였다. 열은 열병합 발전설비가 65.0MW, 전용보일러가 15.0MW를 생산하여 내부 열부하에 공급하였다. 이 경우 열병합 발전설비의 최적 열전비는 0.77로 결정되었다. 또한 주전력계통에서는 발전 설비1에서 454.36MW, 발전설비2에서 392.98MW를 발전하였고 전력부하의 부족분은 열병합 발전계통2로 부터 수전받아 850 MW의 부하에 공급하였다. 그리고 전체 송전 손실은 10.84 MW가 발생하였다.

4. 결론

본 논문에서는 열병합 발전계통을 고려한 전력계통에 대해서 열병합 발전계통의 열병합 발전설비의 전력과 열 생산 관계를 고정된 비용이 아닌 최적의 비용을 결정할 수 있도록 수식을 유도하였고 열병합 발전계통에서 타지역으로 송전하는 임이전력에 대해서 송전손실을 고려할 수 있도록 열병합 발전계통의 각 발전설비의 발전량을 열병합 발전계통의 부하용과 기존 발전계통의 부하용으로 개념적으로 나누는 이원화 기법을 개발하였다. 그 결과 열병합 발전계통을 고려한 전력계통을 경제규제 문제의 최적해를 구할 수 있도록 문제를 쉽게 정식화할 수 있었다. 그리고 사례연구에서 열병합 발전계통이 포함된 모델계통의 일반적인 조건을 본 논문에서 제안한 일반화된 정식을 이용하여 최적화기법에 적용할 수 있는 수식으로 전환하여 최적해를 구할 수 있었다.

5. 참고문헌

- [1] N.N.Bengiamin,"Operation of Cogeneration Plants with Power Purchase Facilities", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, No.10, Oct., 1983
- [2] P.R.MacGregor and H.B.Püttgen, "Optimum Scheduling Procedure for Cogenerating Small Power Producing Facilities ", IEEE Trans. Power System, Vol.4, No.3, pp.957-964 ,Aug., 1989
- [3] P.R.MacGregor,"The net utility revenue impact of Small Power Producing Facilities Operating Under Spot Pricing Policies", Ph.D dissertation, GIT, 1989
- [4] K.Moslehi, M.Khadem, R.Bernal and G.Hernandez, "Optimization of Multiplant Cogeneration System Operation Including Electric and Steam Networks", IEEE Trans. Power System, Vol.6, No.2, pp.484-490 ,May, 1991
- [5] Frans J. Rooijers and Robert A. M. van Amerongen, "Static economic dispatch for co-generation systems" , IEEE Trans. Power System, Vol. 9, No.3, pp.1392-1398, Aug., 1994
- [6] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Power Generation Operation & Control, Wiley, 1984
- [7] Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman, Introduction to Operations Research, McGraw-Hill, 1990