

보수계획을 고려한 건물용 열병합 발전의 최적 운전비용 산출 모델

김 유 신*, 박 종 성*, 유 지 상*, 김 정 훈**

*: 홍익대학교 전기제어공학과

**: 홍익대학교 전자전기제어공학과

Optimal production cost evaluation model of cogeneration system for buildings including maintenance scheduling

Y.S.Kim*, J.S.Park*, J.S.YU*, J.H.Kim**

*: Dept. of Elec. & Ctrl. Eng. Hong-Ik Univ.

**: Dept. of Elec. & Ctrl. Eng. Hong-Ik Univ.

ABSTRACT

The cogeneration system has a strong merit in providing thermal and electrical energy simultaneously. Nowadays, cogeneration system is widely used in the point of efficient use of the energy resources. And the installation of the system is expected to be greatly increased in each year. So, we need to develop an optimal operation planning for those systems.

In this paper, we are used to result what studied at the my power system of room because it is in order to solve maintenance scheduling problem. Also we added a constraints to the proposed maintenance model for optimal maintenance rate. In the case study, we construct an multi-machine generated example system which operated in topping cycle, and calculate the yearly optimal production cost, marginal maintenance cost, and maintenance scheduling of the example system respectively.

1. 서 론

최근의 국내에너지 수급특성은 경제성장율을 상회하는 에너지 소비 증가세를 보이고 있다.^{[1][2]} 이에따라 에너지의 효율적 이용과 절약이 국가 에너지정책의 주요과제가 되고 있는데 열병합발전은 현재 에너지의 효율적이용 측면에서 널리 이용되고 있다. 이 중 건물용 열병합발전에 대한 관심이 크게 앞으로도 계속적인 설치의 증가가 예상되므로, 건물부분 열병합발전의 보급 가능성 및 국가경제적 타당성에 대해 검토가 필요한 시점에 있다고 하겠다.

이에따라 열병합발전의 경제성 분석이 필요하며 이를 최적화 하기위해서는 여러가지 고려사항들이 있겠지만 여기서는 주로 열병합시스템의 신뢰도 및 연간 발전비용에 큰 영향을 미치는 보수계획을 알아 볼 필요가 있다. 즉, 적절한 발전기 보수계획 수립으로 연료비를 절감하고 계통의 신뢰도도 만족시킬 수 있어 계통운영의 효율화를 꾀할 수 있기 때문에 최적 보수율의 선정이 중요한 문제로 대두된다. 그러므로 건물용 열병합 발전의 최적 운용을 위한 최적의 발전기 보수계획 수립을 위한 기초이론 연구 및 프로그램 패키지의 개발이 필요했다.

이에 본 논문은 저희 연구실에서 맥그리거의 모델^[3]을 확장하여 불확실성을 고려한 운전비(production cost)의 최적화 수리모델^[4] (mathematical model)을 이용하여 보수율을 포함한 적정 운전비를 산출하였고 불확실성(uncertainty)을 고려하기위해 발전기의 사고정지률(random outage probability)을 도입하여 출력을 이산화 확률분포로 처리하였으며 투자계획의 정보로 이용되는 한계설비비용을 구하였다. 추가로 적정 보수모델에 maintenance의 제약조건을 추가하여 운전비(production cost)를 목적함수로하는 최적 보수계획을 수립하였다. 사례연구에서는 다시 열병합발전시스템을 대상으로하여 한계보수비용을 구해 topping사 이를^[5] 방식에 대한 연간의 최적 운전비와 보수율의 결과를 제시하여 비교 검토하였다.

2. 열병합 시스템의 보수율을 고려한 수리모형 정립

2.1 가정

전기부하를 추종하는 열병합발전 설비의 적정운전비를 구하기 위해서, 먼저 현실과 부합되는 가정으로 본 연구실에서 이용한 가정들을 도입 했다. 첫째, 열병합시스템과 전력회사 사이에 발생하는 송전손실 비용은 열병합자가 부담한다. 둘째, 대상기간중 열과 전기부하는 입력자료로 주어진다. 셋째, 전기부하를 추종하는 토폴사이클이다. 넷째, 전력회사는 부족전기를 무한정 공급한다. 다섯째, 열공급 부족시 공급지장비를 고려한다. 여섯째, 설치되는 열병합발전시스템의 형태와 규모는 동일하다. 추가로 보수계획은 순시보수를 고려하지 않고 계획보수만을 고려하여 계산했다.

2.2 목적함수

위의 가정하에서 목적함수는 어떤 조건하에서 운전비용을 최소화하는 것이다. 수리모델, 식 (2-1)은 목적함수로서 전체비용(Total Cost:TC)을 나타낸 것이다.

$$TC = \sum_{i=1}^{M_t} \sum_{j=1}^{N_i} s_j * OC_{kj} * AT^j \quad (2-1)$$

운전비는 식 (2-2)에서 열병합발전 설비의 운전비, 보조보일러의 운전비, 전력회사로부터의 전기구매비와 전력회사로의 전기판매비 및 열공급 지장비로 나타내고 있다.

$$OC_{kj} = \min (C_{kj}^1 + C_{kj}^2 + C_{kj}^3 - C_{kj}^4 + C_{kj}^5) \quad (2-2)$$

식 (2-3)은 단가에다 양을 곱해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{kj}^1 &= aP_{kj}^1, & C_{kj}^2 &= bQ_{kj}^1, \\ C_{kj}^3 &= cF_{kj}^1, & C_{kj}^4 &= dF_{kj}^1, & C_{kj}^5 &= fZ^1 \end{aligned} \quad (2-3)$$

2.3 제약조건

여기서 부가되는 열병합발전시스템의 제약조건은 다음과 같다.

- 1) 열병합 발전기는 정지한 경우의 최소값 0(발전량이 없을 때)과 최대값(최대 발전량)사이에서 발전을 한다. 이때 최대 발전량은 각 발전기가 가진 최대 발전량에 발전기 수를 곱한 값이 되며, 여기서 좀더 현실적인 문제를 다루기 위하여 보수계획인 경우를 고려하였기 때문에 발전출력은 식 (2-4)처럼 m_i^j 인 보수율에 따라 변경된다.

$$0 \leq P_{kj}^1 \leq n_k P_{max}^1 (1-m_i^j) \quad (2-4)$$

- 2) 보조보일러의 열출력은 식 (2-5)과 같다.

$$0 \leq Q_{kj}^1 \leq B_H \quad (2-5)$$

- 3) 토폴사이클의 일부하는 식 (2-6)과 같고, 일부하기가 부족한 경우 부족한 민큼의 보조보일리를 가동하며 그래도 열이 부족하면 공급지장비를 도입한다.

$$L'_k \leq (1-\alpha_1) P_{kj}^1 + (1-\alpha_2) Q_{kj}^1 + Z^1 \quad (2-6)$$

- 4) 전기주종이므로 식 (2-7)과 같이 공급되는 전기와 같고, 전기가 부족한 경우 전력회사에서 부족한 민큼을 구입하며, 잉여전기는 전력회사에 판매한다.

$$L'_k = (1-\alpha_3) P_{kj}^1 + (1-\alpha_4) P_{kj}^2 - \frac{P_{kj}^2}{(1-\alpha_2)} \quad (2-7)$$

5) 전기 및 열은 항상 0보다 크거나 같아야 되며, 식 (2-8)에 나타낸다.

$$P_C^i \geq 0, Q_C^i \geq 0, P_T^i \geq 0, P_R^i \geq 0, Z^i \geq 0 \quad (2-8)$$

앞에서 언급한 목적함수와 제약조건들을 갖고 심플렉스 방법(simplex method)에 의해서 해를 구했다.

3. 최적보수율 결정을 위한 최적기법 및 한계보수비용 산출

설비들은 매년 일정기간동안은 보수를 해야 되며, 이 기간동안은 발전기 운전을 못하게 되어 보수율(η (년간보수일수/년간인수) 만큼 가능출력이 저하된다. 따라서 출력의 변화에 따라 운전비가 변화해 되므로 최적인 보수율의 설정이 중요한 문제로 대두된다. 이러한 목적으로 일정한 신뢰도를 유지하면서 비용을 최소화하는 최적보수율을 구하기 위하여 확률을 고려한 최적화기법을 이용했다.

3.1 수리모델

목적함수는 열병합발전설비의 년간운전비용(연료비+공급지장비)이 되고, 년간 발전기별 보수율을 만족하여야 한다는 조건 하에서 최적화문제는 다음과 같이 기술하였다.

$$\min_{m_i^i} TC = \sum_{i=1}^n [G^i(m_i^i) + D^i(m_i^i)] * s_i \quad (3-1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n m_i^i = M_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3-2)$$

$$m_i^{i \min} \leq m_i^i \leq m_i^{i \max} \quad (3-3)$$

식 (3-1)은 1년간의 연료비 및 공급지장비용이고, 분기별 보수량의 합은 년간보수량과 같은 등호제약조건식(3-2)가 된다. 또한 식(3-3)은 분기보수량의 상한과 하한을 나타내는 조건식이 된다. 이것을 풀기 위하여 앞장에서 언급했던 운전모형의 설정해를 구해 보수모형의 목적함수인 식(3-1)의 총운전비용으로 대체한다. 따라서 보수제약조건은 식(3-1)의 총운전비용으로 대체한다. 따라서 보수제약조건은 식(3-1)의 총운전비용으로 대체한다. 따라서 보수제약조건은 식(3-1)의 총운전비용으로 대체한다.

3.2 한계보수비용

한계보수비용이란 현재부터 미래에 걸쳐 모든 설비에 대해서 보수를 하는 경우 보수 한단위를 더 하는데 들어가는 증분비용으로, 이 비용은 열병합발전설비의 보수계획에 중요한 요소로서 현가화된 총비용을 최소화하는데 기여하며 보수여부를 결정하게 된다. 열병합시스템과 부하사이의 관계를 살펴보면, 다음과 같다.

1) 열병합설비의 용량이 전기부하와 일부하보다 작은 경우

$$\frac{\partial TC}{\partial m_i^i} = (1-\alpha) * \left(\frac{\partial b}{\partial m_i^i} + \frac{c}{(1-\alpha)} \right)$$

2) 열병합설비의 용량이 전기부하보다 작고, 일부하보다 큰 경우

$$\frac{\partial TC}{\partial m_i^i} = (1-\alpha) * \frac{c}{(1-\alpha)}$$

3) 열병합설비의 용량이 전기부하보다 크고, 일부하보다 작은 경우

$$\frac{\partial TC}{\partial m_i^i} = (1-\alpha) * \frac{b}{(1-\alpha)} + f$$

4) 열병합설비의 용량이 전기부하보다 크고, 일부하보다 큰 경우

$$\frac{\partial TC}{\partial m_i^i} = 0$$

3.3 최적 조건

목적함수식(3-1)은 m_i^i 의 함수이며, 여기에 제약조건식을 고려한 Lagrangian식은 다음 식(3-4)와 같이 라그랑주 함수로 확장된다.

$$L = \sum_{i=1}^n [G^i(m_i^i) + D^i(m_i^i)] + \sum_{i=1}^n \sigma_i(M_i - \sum_{i=1}^n m_i^i) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\lambda_j^i(m_j^i - m_j^{i \min}) + \mu_j^i(m_j^{i \max} - m_j^i)] \quad (3-4)$$

L의 m_i^i 에 대한 최소화 조건(Kuhn-Tucker조건)은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial L}{\partial m_i^i} = \frac{\partial G^i}{\partial m_i^i} + \frac{\partial D^i}{\partial m_i^i} - \sigma_i + \lambda_i^i - \mu_i^i = 0 \quad (3-5)$$

$$\sigma_i(M_i - \sum_{i=1}^n m_i^i) = 0 \quad (3-6)$$

$$\lambda_i^i(m_i^i - m_i^{i \min}) = 0 \quad (3-7)$$

$$\mu_i^i(m_i^{i \max} - m_i^i) = 0 \quad (3-8)$$

여기서 부등호제약조건을 별도로 처리하여 식(3-7,8)에서 $\lambda_i^i = \mu_i^i = 0$ 인 경우(이 경우인 m_i^i 가 부등호 제약조건을 만족함을 의미한다.)를 생각하면,

$$\frac{\partial G^i}{\partial m_i^i} + \frac{\partial D^i}{\partial m_i^i} - \sigma_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3-9)$$

라고 간략화 된다. 다시 말해서 매 월별한계보수비용이 같을 때가 최적을 의미하기 때문에 이렇게 되도록 보수율을 결정한다.

3.4 해법

목적함수의 최적해는 경사(gradients)방향으로 내려가면서 찾을 수 있다.

즉,(3-10)과 같이 반복적으로 계산된 최적 m_i^i 를 구한다.

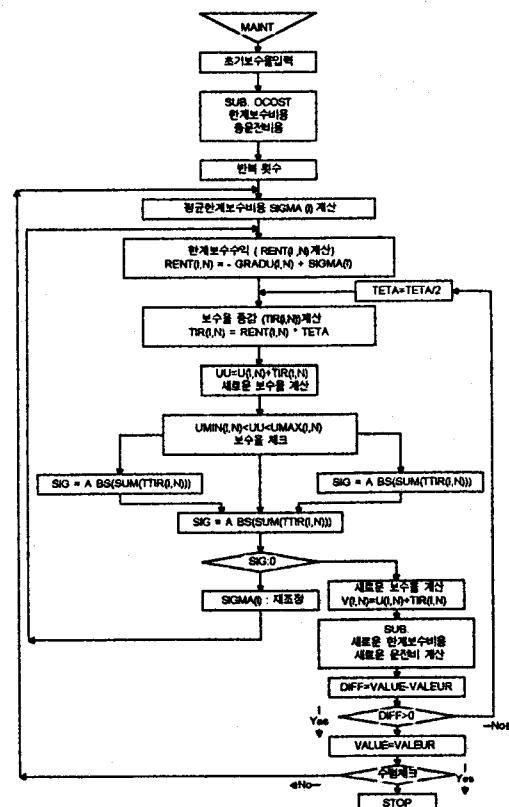
$$m_i^{i \text{ new}} = m_i^{i \text{ old}} - \theta \frac{\partial L}{\partial m_i^i} \quad (3-10)$$

단, θ 는 step size를 결정하는 양의 계수이다.

순차적으로 $\Delta m_i^i = \theta [- (\frac{\partial T C^i}{\partial m_i^i} + \sigma_i)]$ 가 설정되어 등호 및

부등호제약조건이 만족되는 새로운 m_i^i 가 결정된다.

이것의 흐름도는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> 최적보수율 계산 흐름도

4. 실제 등 사례연구

4.1 입력자료

상술한 알고리즘에 따른 프로그램 페키지를 개발하여 생플시스템에 대하여 다음과 같은 입력자료를 근거로 사례연구를 행하였다. 생플시스템에 대한 년간 부하자료를 얻기 어려운 이유로 서울에 있는 한 호텔의 부하데이터를 선정하여 가공하였다. 최대전기부하는 8월달의 27.6[MW], 최대열부하는 18.8[MW]이며, 각각 입력자료는 표1, 표2, 표3, 표4 와 같다.

표 1. 입력자료

i _p (1,0)	MT	ΔT	ng	P _{max}	β	a ₁₋₅	n	B _h
0	12	1	1	25,000[kW]	0.75	0.01	0.8	20,000 [kW]

표 2. 비용자료

a	b	c	d	f
63 [원/kWh]	57 [원/kWh]	75 [원/kWh]	68 [원/kWh]	285 [원/kWh]

표 3. 시간 구간별 부하 자료들

부하 시간	1	2	3	4	5	6
전기[kW]	18,062	15,937	17,000	19,125	21,250	22,312
열 [kW]	10,515	7,768	8,347	10,785	12,940	14,022
전기[kW]	7	8	9	10	11	12
열 [kW]	27,624	27,696	23,374	21,247	18,062	19,125
전기[kW]	18,871	18,871	15,635	13,481	7,008	6,738

표 4. 보수 입력자료

발전소군	년간 보수율[일]	월별 최대보수율[일]	월별 최소보수율[일]
1	30	8.614	0.0

시뮬레이션 결과 표5는 iteration 59번에 일있고, 부하수준이 가장 낮은 기간에서 전재적으로 보수율이 높게 나타나고 있다. 또한 초기보수율에 의해서 운전하는 것보다 최적보수율에 의해서 운전될 경우 운전비감소는 1.012%만큼이 줄어든 것을 알 수 있다. 그림 2와 3는 이것을 도시화한 것이다.

표 5. 결과 자료

비교		초 기 해					
		1	2	3	4	5	6
보 수 율[일]	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482
7	8	9	10	11	12		
보 수 율[일]	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482	2,482
총운전비[원]	1.3327×10^{10}						
비교		최 적 해					
		1	2	3	4	5	6
보 수 율[일]	5,256	5,256	5,256	5,256	3,9055	2,5185	
7	8	9	10	11	12		
보 수 율[일]	0.0000	0.0000	1.4235	0.2555	0.0365	0.0365	
총운전비[원]	1.3192×10^{10}						

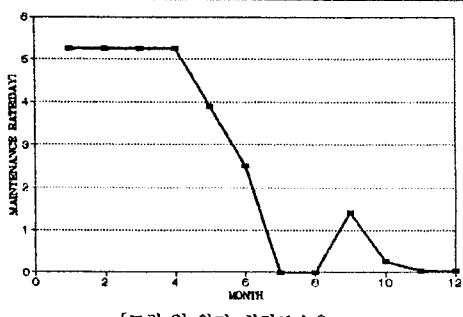


그림 2) 월간 최적보수율

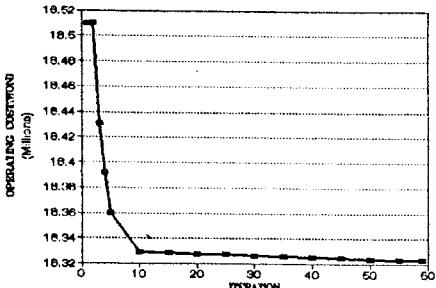


그림 3) 수행횟수에 따른 운전비감소

5. 결론

본 연구에서는 최적보수율을 결정하는데 있어서 한계보수비용에 대한 관계식을 유도하였으며, 새로운 알고리즘을 이용하여 생활 계통에 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 초기보수율로 구한 결과보다는 최적의 보수율로 구한 결과가 훨씬 운전비감소효과가 컸다.

2) 좀 더 염밀하게 하기 위하여 여러 보수계획을 감안하여야 하는데, 본 연구에서는 이러한 점들을 생략하여 더 실용적인 결과였다.

3) 적정보수율을 위한 한계보수비용을 결정하는 알고리즘을 개발하였다.

결과적으로 본 연구에서는 기존의 열병합발전시스템의 최적 운전비 산출에 최적화기법을 사용해 구한 보수율을 적용하여 보다 효율적인 사업 활동화를 위한 최적부자계획모형에 기여 할 수 있는 보수모형을 개발하였다. 또한 앞으로 보수율에 대한 처리기법으로서 정수계획법을 사용하여 좀 더 현실성 있는 값을 얻을 수 있으리라 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] 천연가스 이용 빌딩 열병합 발전기술 개발 기초연구, 한국가스공사, 1991.12.
- [2] 노동석, 건물 열병합발전 보급방안 연구, 에너지경제연구원.
- [3] 전력제공과 소규모 발전설비의 최적운용, 1993. 8. 한전자료.
- [4] 최석현, 최종기, 김정훈, 이봉용, “다기 발전기를 채용한 건물용 열병합시스템에서 최적규모 산정을 위한 확률적 최적운전 모형”, 1994년도 대한전기학회 학제기술대회 논문집(B), pp840, 1994. 8.
- [5] S.David Hu, *Cogeneration*, 1985.
- [6] David G, Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, May, 1989.
- [7] Analysis of Long-term Power Development Planning Using MNI Model, 한국전력공사, 1988.12.

[기호]

- i_p: 한전 전력구입 여부 (0:구입합함, 1:구입함)
C_a^t: 열병합 가동에 들어가는 연료비 [원]
C_b^t: 보조보일러 가동에 들어가는 비용 [원]
C_c^t: 외부 전력회사에서 전기구입에 들어가는 비용 [원]
C_d^t: 외부 전력회사에 남는 전기를 판매하는 비용 [원]
C_e^t: 보조보일러가 감당못하는 양의 열생산 비용 [원]
n : 발전기 정상운전 확률값
n_g : 발전기 수
NP : 발전기 운전 확률의 곱 [p.u]
MT : 운전비용 계산시 계산구간의 총수
ΔT : 운전비용 계산시 각 계산구간의 길이 [Hour]
a : 열병합의 전기 생산단가 [원/kWh]
b : 보조보일러의 열생산단가 [원/kWh]
c : 부족 전기 구입단가 [원/kWh]
d : 이유 전기 판매단가 [원/kWh]
e : 부족 열공급지장비 [원/kWh]
P_g^t: 열병합에서의 에너지 생산량 [kW]
Q_b^t: 보조보일러에서 부족 열생산량 [kW]
P_b^t: 외부 전력회사로부터 부족한 전력 구입량 [kW]
P_f^t: 열병합에서 남는 전기를 판매하는 양 [kW]
Z_b^t: 보조보일러가 감당 못하는 양의 열 생산량 [kW]
a₁₋₅: 1~5번 선로사이의 손실 [p.u]
P_{max}^t: 발전기 최대 발전량 [kW]
B_H^t: 보조보일러의 최대 열 발생량 [kW]
L_g^t: 열 부하 [kW]
L_F^t: 전기 부하 [kW]
β : 열전비
M.C: 한계 비용[원/p.u]
s_p: 각 경우의 운전화율
m_i^t: i전원의 원별 보수율[p.u]
M_i:년간 총 보수율 [p.u]
θ : step size 결정 계수
λ, μ, σ : 라그랑즈 계수