스마트 에너지 시스템 최적설계 및 적용사례

김기영†· 서석호*· 성진일*· 서현욱*· 오시덕* · 곽호영**

Optimal Planning of Smart Energy System and its Applications

Ki Young Kim, Seok-Ho Seo, Jinil Sung, Hyonuk Seo, Si-Doek Oh and Ho-Young Kwak

Key Words : economic feasibility (경제성), optimal planning(최적설계), smart energy(스마트 에너지)

Abstract

The smart energy system is the integrated power system in which the power components including central station generation, distributed generation, renewable power generation, energy storage, and communications and controls are complexly connected with each other. In smart energy system, it is very important how to configure the diverse power generations and how to determine the operation mode of the chosen components with economic feasibility. In this study, we introduce the optimal planning method based on both economic feasibility and load profiles and its applications for the smart energy system in apartment. This method was considered very useful to determine the configuration and to decide the optimal operation mode of the smart energy system.

기호설명

C : 전력 및 연료 단가
$\overline{C_P}$: 구입전력의 기본요금단가
i : 연간 이자율
I : 초기 설비비
q : 냉방 출력량
Q_D : 냉방 요구량
R : 상환율
$T_D{}^m$: 에너지패턴에 대한 연간운전시간
W : 전기 사용/출력량
w_P : 매전량
W_D : 전력 요구량
$\overline{W_p}$: 최대 계약 전력량
X : 연료 소비량
Y : 열 사용/출력량
Y_D : 열 요구량
Z_f : 년간 고정 비용
Z_r : 연간 변동 비용

그리스 문자
γ : 연간유지보수비 대 초기설비비 비율
ρ : 감가상각 후 잔존가치
τ : 기기의 경제적 유효수명

하첨자
A : 보조보일러
G : 가스엔진
RE : 전동터보 냉동기
RF : 가스 직화식 냉 · 온수기
RS : 증기흡수식 냉동기

1. 서 론

DOE/EIA 의 IEO 2006 에[1] 의하면 세계 전기 에너지 소비는 년 3.9%씩 증가하여 2030 년에는 2003 년 전기 에너지 소비의 2 배에 이를 것으로 예상하고 있으며, 신규로 증가하는 에너지 소비

† 회원, ㈜ 효성
E-mail : kykim@hyosung.com
TEL : (02)707-4306 FAX : (02)707-4399
* ㈜ 효성
** 중앙대학교 기계공학부

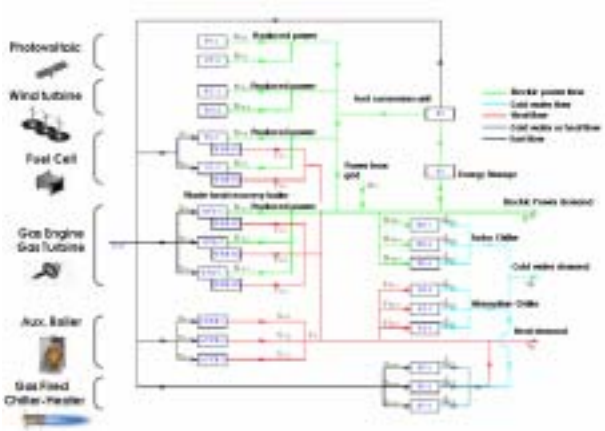


Fig. 1 Schematic diagram of smart energy system

증가분의 71%는 비 OECD, 29%는 OECD 국가가 차지하고, 미국과 중국이 전기 에너지 소비를 선도하는 것으로 전망하고 있다. 또 IEA 의 World Energy Outlook(WEO 2006)에[2] 의하면 정책의 2004 년 소비량 대비 50%이상 증가하고, 이 중에서 70%는 개발도상국에서 증가할 전망이며, CO_2 배출량은 2030 년까지 2004 년 배출량 대비 55% 증가할 것으로 전망하는 등 획기적인 조치가 없는 한 에너지 문제는 지속적으로 악화될 것으로 전망하고 있다. 이와 같은 인류가 직면한 에너지 및 환경 문제를 극복하는 중요한 대안 기술로 수요처에 산재해 있는 에너지 자원, 각종 분산전원 기술 및 수요 측의 부하관리를 포괄하는 에너지 공급 사슬 및 운영을 최적화한 토털 에너지 시스템이 부상되고 있다. 본 고에서는 에너지 공급 사슬 및 운영을 최적화한 에너지 시스템의 개념, 최적화 절차 및 내용, 적용사례 등에 대하여 기술하고자 한다. 스마트 에너지 시스템은 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 기존의 에너지 발전 시스템은 물론 화석연료를 사용하지 않는 풍력(wind power), 태양광(photovoltaic), 지열(geothermal), 연료전지(fuel cell) 발전 시스템 등의 신 · 재생 에너지 발전 시스템[3-5], 전기 및 열 저장 장치(energy storage)는 물론 난방 부하가 높은 지역에 열병합 발전 시스템[6,7] 등 다양한 에너지 시스템이 상호 네트워크로 구성된 스마트 에너지(smart energy) 시스템에 대한 최적 설계 및 합리적인 성능평가의 방법의 개발이 점차 중요한 이슈가 되고 있다.[6-14] 하지만 현재 혹은 미래의 복잡해지는 에너지 발전 시스템과 다양한 에너지 소비 패턴에서 기존의 효율계산과 같은 단순평가 방법으로는 시스템의 경제성 평가가 합리적으로 이루어질 수 없다.

따라서 다양한 특성의 에너지 수요를 가지는 수

Fig. 2 The economic evaluation procedure for adoption of cogeneration system

요처에 에너지 시스템의 운전모드 분석을 통한 최적 도입계획 및 경제성 검토를 위하여 에너지원 및 에너지 시스템의 다양성, 다기능성을 충분히 반영할 수 있는 에너지 시스템의 최적화 방안 및 방법에 대한 요구가 증가하게 되었다. 또한 범세계적으로 추진되고 있는 에너지 산업의 구조조정, 민영화를 포함한 에너지 시장 상황의 급격한 변화 및 신 · 재생에너지를 포함한 에너지 기술의 시장 수용성의 증대는 분산발전을 포함한 에너지 시스템의 도입 시에 용량의 적합성을 고려한 경제성의 확보 방안의 수립이 중요한 이슈로 등장되고 있다.

본 연구에서는 스마트 에너지 시스템의 개념을 아파트 열병합 발전의 도입에 적용하고, 도입 절차 및 검토 내용, 적용 결과의 평가 등을 통하여 에너지 공급사슬 및 운영 최적화의 중요성에 대하여 논의하는 기회를 가져 보고자 한다.

2. 에너지 시스템 도입 검토

2.1 에너지 시스템의 도입 타당성 검토 절차

Fig. 2 는 에너지 시스템 도입 절차를 나타내는데, 발전 시스템의 경우에도 일반적인 기타의 설

비 도입 계획과 마찬가지로 『①기획 → ②기본 계획 → ③기본 설계 → ④실시 설계 → ⑤시공』의 크게 5 단계의 절차를 따르게 된다. 이들 각 단계에서는 각종 검토의 반복을 통하여 협의, 평가 및 판단 등을 수행하고, 수요자와 설계자간의 합의에 도달하면 검토가 완료된다.

예를 들어, 열병합 발전 시스템 도입 결정을 위한 수요측의 검토, 시스템의 선정 및 평가까지의 절차는 다음과 같다.

① 건물의 용도 · 장소 · 규모의 산정
- 초기투자비의 신속한 회수 가능성(경제성 사전 조사)

② 전력부하 · 열부하의 추정
- 전력, 열부하 추정을 위한 최소 1 년 이상의 자료 조사 및 검토(신뢰성 확보)

③ 운전 형태 · 운전 시각의 설정
- 에너지 이용 효율 극대화

④ 기존 시스템의 계통연계와 계통분리
- 수요처, 행정 및 제도적 문제 고려

⑤ 시스템 선정
- 종합적인 자료를 바탕으로 신규 시스템 대상 선정(기기의 타입 및 용량)

⑥ 전력 · 열 · 냉방 에너지 밸런스
- 전력 · 열 · 냉방 부하에 따른 선정 가능한 대상 기기들의 가동 및 부하율 검토

⑦ 경제성 평가
- 시스템 도입에 따른 고정비, 연간 운전비, 투자수익율 및 단순투자회수기간 평가를 통한 경제성 검토

2.2 에너지 시스템 최적 운전 모드 분석 방법

에너지 시스템의 선정은 연간 수요 패턴에 따른 연간 운전비의 최소가 되는 구성기기 및 운전 모드를 선정하면 되는데 이때 연간 운전비는 기기 선정에 따른 연간 고정비와 운전 모드에 따른 연간 변동비의 합으로 나타낼 수 있다.[8,9]

$$Z = Z_f + Z_r \tag{1}$$

이때 연간 고정비는 각 설비의 초기 투자비에 각 설비의 자본 상환율의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_f = & \sum_{n=1}^{N} R_G I_{G,n} + \sum_{l=1}^{L} R_A I_{A,l} + \sum_{j=1}^{J} R_{RE} I_{RE,j} \\ & + \sum_{k=1}^{K} R_{RS} I_{RS,k} + \sum_{m=1}^{M} R_{RF} I_{RF,m} + \sum_{n=1}^{N} \gamma_G I_{G,n} \\ & + \sum_{l=1}^{L} \gamma_A I_{A,l} + \sum_{j=1}^{J} \gamma_{RE} I_{RE,j} + \sum_{k=1}^{K} \gamma_{RS} I_{RS,k} \\ & + \sum_{m=1}^{M} \gamma_{RF} I_{RF,m} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 자본 상환율은 각 설비의 유효 수명과 이자율로부터 구할 수 있다.

$$R_G = i\frac{1-\gamma(1+i)^{-\tau_G}}{1-(1+i)^{-\tau_G}} \tag{3}$$

또한 연간 변동비는 구성기기의 운전모드에 따른 연료 소비량, 외부로부터 구입하는 전력 비용 및 연간 최대 계약 전력 요구 비용의 합으로 나타낼 수 있다.[10]

$$\begin{aligned} Z_r = & \sum_{m=1}^{M} C_G X_G{}^m + C_A X_A{}^m + C_{RF} X_{RF}{}^m \\ & + C_P X_P{}^m - C_S X_S{}^m) T_D{}^m + \overline{C}_P \overline{W}_P \end{aligned} \tag{4}$$

이때 목적함수 식(1)은 주어진 전기,열 그리고 냉방 수요조건을 모두 만족해야 하기 때문에, 다음 식(5)로 주어진 각각의 수요조건에 대한 부하조건을 만족하여야 한다.

$$W_D^m \le W_G^m - W_{RE}^m + w_p^m \tag{5-1}$$

$$Y_D^m \le Y_G^m - Y_{RS}^m \tag{5-2}$$

$$Q_D^m \le Q_{RE}^m + Q_{RF}^m \tag{5-3}$$

각 기기구성 및 운전모드에 따라서 고정비용과 운전비용은 경제적 측면에서 많은 차이가 발생하기 때문에 에너지 수요에 따라 식(5)를 만족하면서 초기설비비용과 운전비용, 즉 식(1)를 최소화할 수 있는 에너지 시스템 선택 및 수요패턴에 따른 기기들의 운전모드를 설정해야 한다. 이때 구성기기들의 운전/정지를 제어하기 위하여 혼합 정수계획법을[10-12] 이용하여 에너지 시스템의 운전 모드 분석을 통하여 최적설계를 수행하였다.[8,9,15]

Table 1 The information of APTs

아파트	세대수	관리평수	지 역	비고
A	1,436	25,740	대전	
B	2,146	52,728	대전	
C	1,080	38,640	인천	
D	672	26,919	부산	
E	1,840	39,052	대구	
F	674	22,302	원주	
G	1,669	56,408	부산	
H	565	17,653	춘천	

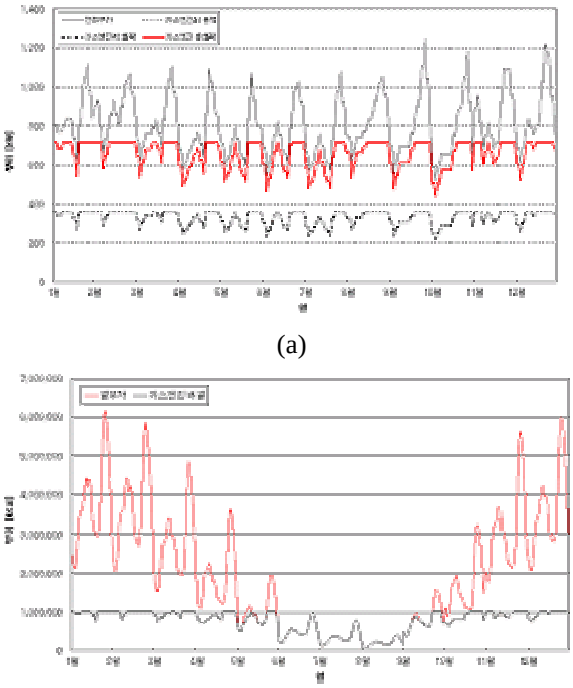
Table 2 Optimum components installed in APTs

Apartment	Gas engine	Auxiliary boiler
A	356 kW x 1	5,814 kW x 2 4,651 kW x 1
B	356 kW x 2	5,814 kW x 3
C	404 kW x 1	6,395 kW x 2
D	356 kW x 1	5,233 kW x 2
E	404 kW x 1	5,814 kW x 3
F	248 kW x 1	6,395 kW x 2 4,070 kW x 1
G	356 kW x 2	10,465 kW x 2
H	248 kW x 1	5,233 kW x 1 4,070 kW x 1

3. 아파트 적용 사례

3.1 대상 아파트 개요 및 최적 설계

본 고에서 제안한 스마트 에너지 시스템의 개념을 이용하여 Fig. 3 과 같은 유형의 부하(Fig. 3 (a), (b)의 맨 위쪽 그래프가 각각 수요처의 전기 및 열 수요 패턴을 나타냄)를 가지는 다양한 규모의 아파트에 적용하여 에너지 시스템의 최적설계를 실시하고, 적용한 실적을 보유하고 있다. 본 고에서는 전술한 도입타당성 검토를 거쳐 설치된 아파트 열병합발전 설비 중 세대수, 평수 및 지역이 서로 다르고, 1 년 이상 운전 실적을 보유한 Table 1 에 나타나 있는 바와 같은 8 개의 아파트 단지의



(a)

(b)

Fig. 3 Optimal operation modes of (a) the electricity and (b) heat energy.

사례들을 통하여 에너지 시스템 최적설계 및 운전 모드 설정의 중요성에 대하여 살펴보고자 한다.

연간 에너지 부하 패턴, 기존 에너지설비 및 신규 도입 시스템, 경제성 변수 등을 고려하여 2 장에 언급된 수학적 모델을 사용하여 자체 개발한 시스템 최적화 프로그램(Smart Energy Solution)을 활용하여 해당 수요처에 가장 경제적인 시스템으로 선정된 결과는 Table 2 와 같다.

아파트에 설치될 소형 열병합 발전 시스템으로는 시설투자비 및 유지보수비가 상대적으로 적고 발전 효율이 높으며 부하 대응이 유연한 가스엔진 발전기가 선정되었으며, 기존 보일러는 설비 상태에 따라 에너지 손실을 개선하기 위하여 개조 또는 교체하는 것이 바람직한 것으로 검토되었다.

이때 가스엔진은 전력부하 패턴에 따른 부분 부하율, 계절별 전력 부하 및 연료비 변동 등을 고려하여 아파트 전력 부하율의 60~80 %를 담당할 수 있는 조건을 만족하는 기기들로 선정하였다. 보일러의 경우에는 가스엔진 가동 시 얻을 수 있는 엔진 냉각수와 배기가스의 폐열을 24 시간 회수 할 수 있으므로 이를 고려하여 보일러 용량을 재산정하였다. 최적설계를 바탕으로 열병합 시스템을 설치한 후 연중 전력부하 및 열부하에 따른 열병합 시스템 기기별 부하 패턴을 Fig. 3 의 하단부의 그래프로 나타내었다.

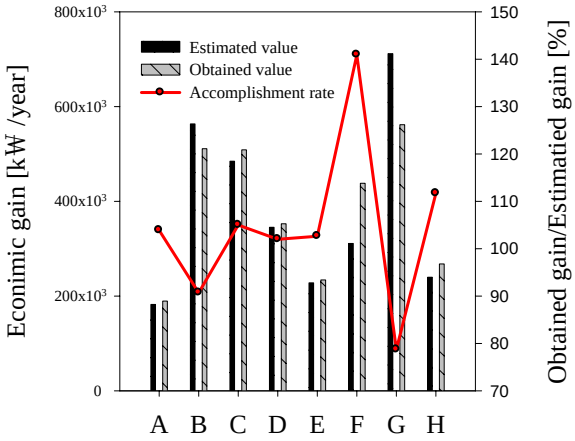


Fig. 4 The economic gain of APTs

3.2 평가 결과

열병합발전 시스템이 도입된 아파트 단지의 에너지 절감 및 비용 절감 효과를 검토해 보기 위하여 1 년 이상 상용 운전 실적이 확보된 8 개 단지를 선택하였다. 이때 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 열병합 시스템 운전 시작일을 기준으로 1 개월 이후에 얻어진 자료만을 취하였다.

Fig. 4 는 운영 실적으로부터 얻어진 에너지 절감액과 열병합 발전 도입 시 예상한 결과치를 비교한 결과이다. Fig. 4 에서 알 수 있는 바와 같이 현장 여건상의 특수성이 있었던 B, F, G 아파트를 제외하면 예상치와 실적치가 유사함을 알 수 있다. 아파트 B 의 경우 2,100 여 세대의 다양한 평수, 다세대 단지로 난방 밸런싱에 어려움을 극복하는 과정에서, 아파트 G 의 경우 난방 수요에 대한 수요측의 요구를 수용함으로써 열병합 도입 전·후의 에너지 시스템의 운전패턴 차이로 절감량이 부족한 것으로 조사되었다. 반면에 아파트 F, H 의 경우 열병합 도입전 간헐난방, 난방비를 평형별 동일 부과 방식에서 도입 후에는 24 시간 연속난방, 난방비를 사용량 부과 방식으로 변경하여 각 세대별로 적절한 난방을 조절할 수 있게 되어서 에너지 절약 효과가 커진 것으로 조사되었다. 특히 아파트 F 의 경우 열병합 발전을 도입하면서 증기 시스템의 보완을 통하여 증기 누출로 인한 손실을 줄여서 절감량이 커진 것으로 조사되었다.

열병합발전 시스템의 경우 지역별 에너지 단가 변동의 차이, 날씨 변화에 따른 부하패턴 변화 등 여러 가지 요인에 의해 에너지 절감의 차이가 발생하지만 열병합 설비의 운전 패턴이 에너지 사용량에 매우 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 따라서 에너지 시스템의 도입 검토 시에는 운전 패턴과 관련될 수 있는 기기의 상태, 에너지 수용가의 생활 패턴 및 요구 사항을 충분히 반영하여야 함을 알 수 있었다.

4. 결 론

열병합 발전 시스템의 경제성 평가를 거쳐 설치된 8 개 아파트 단지의 운영 결과를 검토해 본 결과, 열병합 발전 시스템이 도입하기 위해 당사가 제안한 최적 운전모드 분석을 통한 경제성 평가 방법을 사용하여 예측된 결과와 실제 열병합 발전 운영 사례가 매우 잘 일치함을 알 수 있었고, 이를 신·재생에너지를 포함한 다양한 에너지 자원, 시스템 및 수요를 포괄하는 스마트 에너지 시스템의 최적 설계를 위한 중요한 도구가 될 수 있음을 확인하였다.

미래학자 엘빈 토플러박사는 2006 년에 발간한 “부의 미래(Revolutionary Wealth)”에서 기존의 중앙집중식 에너지 체계로는 세계가 직면하고 있는 에너지 위기를 극복할 수 없으며 석탄과 석유, 천연가스에만 의존하지 않고, 다양한 에너지원, 다양한 기술, 다양한 사용자 및 생산자가 연결되는 에너지 체계가 필요함을 강조하였다.[16] 여기에는 프로슈머(prosumer)는 물론 에너지 사용자 및 생산자들은 연료전지 등과 같은 개인적이고 분산된 에너지 기술을 이용하여 점점 더 많이 자신만의 에너지 욕구를 충족시키는 시대의 도래를 예견하였다.

따라서 다양한 수요를 반영하여 복잡하고 다양해지는 에너지 시스템의 최적화 설계가 선행되어야 하고, 또한 실제로 최적화된 에너지 시스템이 최적의 조건에서 운영되도록 에너지 시스템의 운전 모드의 최적 관리가 요구된다.

참고문헌

(1) Energy Information Administration (EIA), 2006, *International Energy Outlook 2006*.

(2) International Energy Agency (IEA), 2006, *World Energy Outlook 2006*.

(3) Asanuma, H., Utestu, K. and Niitsuma, 2006, “Feasibility study on the Introduction of Renewable Energy System at Tohoku University, Japan,” *Proc. Renewable Energy*, Makuhari, pp. 1693~1695.

(4) Toyoda, J., 2006, “Networking harmonization of Renewable and distributed Generation in the Utility Power Grid,” *Proc. Renewable Energy*, Makuhari, pp. 35-40.

(5) Bakken, B., Skjelbred, H. I. and Aki, H., 2006, “ Optimum Planning Hydrogen and Renewable Energy,” *Proc. Renewable Energy*, Makuhari, pp. 1696~1699.

(6) Baughn J. W. and Kerwin, R. A., 1987, “A Comparison of the Predicted and Measured Thermodynamics Performance of a Gas Turbine Cogeneration System,” *Trans. ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 109, pp. 32~38.

(7) Baughn, J. W. and Bagheri, N., 1987. “The Effect of Thermal Matching on the Thermodynamics of Gas Turbine and IC Engine Cogeneration Systems”, *Trans. ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 109, pp. 39~45.

(8) Oh, S., Lee, H., Jung, J. and Kwak, H., 2007, “Optimal Planning and Economic Evaluation of Cogeneration System,” *Energy*, Vol. 32, pp. 760~771.

(9) Oh, S., Oh, H. and Kwak, H., 2007, “Economic Evaluation for Adoption of Cogeneration system,” *Appl. Energy*, Vol. 84, pp. 266~278.

(10) Horii, S., Ito, K., Pak, P. S., and Suzuki, Y., 1987, “Optimal Planning Gas Turbine Co-Generation Plants Base on Mixed-Integer Linear Programming,” *Int. J. Energy Res.*, Vol. 11, pp. 507~508.

(11) Ito, K., Yokoyama, R., Akagi, S. and Matsumoto, Y., 1990, “Influence of Fuel Cost on the Operation of a Gas Turbine-Waste Heat Boiler Cogeneration Plant,” *Trans. ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 112, pp. 122~128.

(12) Yokoyama, R., Ito, K., and Matsumoto, Y., 1994, “Optimal Sizing of A Gas Turbine Cogeneration Plant in Consideration of Its Operational Strategy,” *Trans. ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 116, pp. 32~38.

(13) Land, A. H. and S. Powell, 1973, *Fortran Codes for Mathematical Programming : Linear, Quadratic and Discrete*, Wiley, New York.

(14) Land, A. H. and Mize, J. H. 1960, “An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problem,” *Econometrica*, Vol. 28, pp. 497~520.

(15) Chung-Ang Univ. & Hyosung Co., 1995. 8, Final Report of Development of a Computer Program for Gas Turbine Cogeneration System.

(16) Alvin Toffler and Heidi Toffler, 2006, *Revolutionary Wealth*, Knopf, New York.