

考虑综合能效水平的能源系统多目标优化运行

华煌圣¹, 刘育权¹, 熊文¹, 徐航², 施云辉², 董树锋²

(1. 广州供电局有限公司, 广州 510620; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 作为典型的智慧能源系统, 综合能源系统可促进源、网、荷深度融合, 提升可再生能源的利用率。因此, 智慧能源系统的评价指标应能同时体现低碳、高效的核心特征。基于多能互补的概念, 提出了新的评价指标—综合能效水平, 用于描述多能系统能源利用效果。考虑到用能经济性是用户自发调整用能策略的核心驱动力, 本文以最大化综合能效水平和提高用能经济性为优化目标, 提出了综合能源系统多目标优化模型, 并在设备物理约束和冷热电平衡的约束下, 获取用能优化策略, 实现系统出力的优化调度。算例分析表明, 本文所提优化调度策略能够全面提升系统用能的清洁性与高效性。

关键词: 综合能源系统; 多能互补; 综合能效; 经济性

Multi-Objective Optimized Operation of Energy System Considering Comprehensive Energy Efficiency

HUA Huangsheng¹, LIU Yuquan¹, XIONG Wen¹, XU Hang², SHI Yunhui², DONG Shufeng²

(1. Guangzhou Power Supply Co. Ltd, Guangzhou 510620, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As a typical intelligent energy system, integrated energy system can promote the integration of sources, networks and loads, and improve the utilization of renewable energy. Therefore, intelligent energy systems should be evaluated in terms of core features as low-carbon and high-efficiency at the same time. Based on the concept of multi-energy complement, a new evaluation index, the comprehensive energy efficiency level, is proposed to describe the energy utilization efficiency of multi-energy systems. Considering that the economy of energy consumption is the core driving force of the user to spontaneously adjust the strategy of energy use, this paper takes the maximizing comprehensive energy efficiency level and improving economy of energy consumption as the optimization objective, proposes the multi-objective optimization model of the integrated energy system, and obtains the optimal strategies of energy use under the restrains of both physical and cold-heat-electricity balance, and realizes the optimal dispatching of the system. A case analysis shows that the proposed optimal dispatching strategy can improve the cleanliness and efficiency of the system.

Key words: integrated energy system; multi-energy complement; comprehensive energy efficiency; economy

0 引言

随着传统能源的储量不断减少, 而可再生能源的开发利用技术逐渐成熟, 人类将步入“混合能源时代”。综合能源系统(integrated energy system, IES)、能源互联网和“互联网+智慧能源”等概念的提出^[1], 使可持续的能源和开发与利用模式成为国际学术界关注的新焦点。早在2001年, 美国为促

进分布式能源与热电联产技术的推广, 提出了综合能源系统发展计划。随后, 各国纷纷推出相关示范项目, 如欧盟E-DeMa、英国曼彻斯特示范工程, 日本柏叶智慧城市化, 以及我国的天津中新生态城、上海迪士尼度假区等^[2-3]。

综合能源系统是典型的智能能源系统, IES能够利用多能源在时空的耦合机制, 打破各能源系统分开规划、独立运行的既有模式^[4], 从而实现多能互补、能量梯级利用, 提升了能源的综合利用水平。目前对于综合能源系统已有较多的研究成果。文献[5]提出了一种考虑多能互补的工厂综合需求响应模型, 引导用户制订合理的综合用能方案。文

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901300)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0901300).

献[6-8]基于能源集线器概念,提出适用于综合能源系统多模式的不同混合潮流算法。文献[9]提出了多能互补的综合目标函数,结合供需侧的控制策略,对多能出力进行优化调度。

上述研究通常以用能经济性或能源利用效率来评估系统的优越性。综合能源系统将多种类型能源深度融合,促进可再生能源的就地消纳,提升能源的清洁性与高效性。因此,评价多能系统的能效水平的特征指标应同时体现其低碳、高效的核心特征。

目前,评估能源利用效力多为“效率”指标,是基于热力学第一定律的典型指标,侧重于评估能量的数量。有研究表明,冷热电联供系统(cold combined heat and power, CCHP)的一次能源利用率比分供系统高 35%^[10]。文献[11]和[12]分别以一次能源利用率最高和一次能源节约率最高为优化目标来分析 CCHP 系统的运行情况。然而,以上 2 种指标都无法为较为全面地表征系统特性。

为此,本文在考虑综合能源系统多能流的基础上,提出用于评估多能系统综合能效的新指标,并结合系统的用能经济性,以综合能效水平和用能成本为优化目标,在冷、热、电平衡的约束下,实现系统出力的优化调度。最后应用算例分析考虑多能流的综合优化目标能否升系统的清洁性与高效性。

1 多能协同系统综合能效评估

多能互补的分布式能源系统通常包含冷、热、电、气等多种类型的能源输入,通过相关技术进行整合优化,能够以较高的综合能效向用户提供能量。综合能效是考察整个多能系统的性能的重要指标。

1.1 综合能效水平

从物理学的角度出发,能效表示在能源利用过程中,发挥作用的能源与实际消耗的能源量的比值。而从消费的角度看,能效指的是系统为终端用户所提供的服务与所消耗的总能量的比值。一般来说,生产作业中投入的资源与任务的完成度是正相关的关系,但是过多的资源投入并不表征高能效水平,如资源空闲浪费,能源利用技术使用失当都会导致综合能效水平的下降。

对于存在多能耦合的能源系统,其能源的输入与输出如图 1 所示。其中,输出能流包括冷、热、电需求负荷,输入能量包括来自电网的外购电能、本地接入的可再生能源电能以及煤气或天然气等能

源。考虑冷热电各类储能的蓄能损耗,系统提供的冷量 Q_{dT} 、热量 H_{dT} 、电能 P_{dT} 的表达式为:

$$Q_{dT} = \int_0^T Q_{\text{sys}}(t) dt \quad (1)$$

$$H_{dT} = \int_0^T [H_{\text{steam}}(t) + H_{\text{water}}(t)] dt \quad (2)$$

$$P_{dT} = \int_0^T P_{\text{load}}(t) dt \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{sys}}(t)$ 为系统冷负荷需求, kW; $H_{\text{steam}}(t)$ 和 $H_{\text{water}}(t)$ 分别为系统的蒸汽负荷和热水负荷; $P_{\text{load}}(t)$ 为系统电负荷; Q_{dT} 、 H_{dT} 和 P_{dT} 分别为系统在时段 T 内供冷、供热与供电量, kJ。

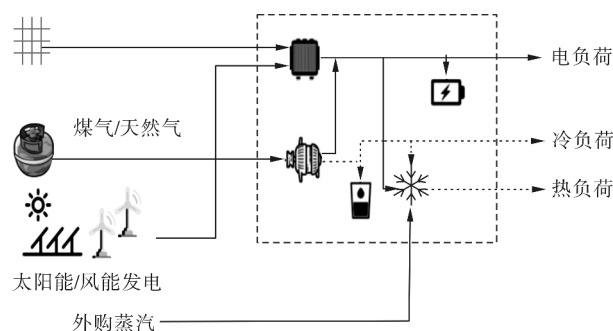


图 1 多能系统的能流输入输出组成

Fig. 1 Composition of energy input/output of multi-energy systems

工业能耗计算中,通常采用“综合能耗”来表征用能企业实际消耗的各种能源。综合能耗是指用能单位的统计周期内实际消耗的各种能源实物量。工业用户综合能耗的计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n (e_i \times p_i) \quad (4)$$

式中: E 为综合能耗, kJ, 本文用千克标准煤 kgce 来表示(1 kgce = 29 307 kJ); n 为消耗的能源品种数; e_i 为工业生产中消耗的第 i 种能源实物质量, kg; p_i 为第 i 种能源的折标准煤系数。

多能系统输入能源的综合能耗表达式为:

$$E = \int_0^T E_{\text{GT}}(t) p_{\text{gas}} + E_{\text{GB}}(t) p_{\text{gas}} + \int_0^T E_{\text{buy.e}}(t) p_{\text{electric}} + \int_0^T E_{\text{buy.h}}(t) p_{\text{steam}} \quad (5)$$

式中: $E_{\text{GT}}(t)$ 和 $E_{\text{GB}}(t)$ 分别为燃气轮机与燃气锅炉所消耗的天然气, m^3 ; $E_{\text{buy.e}}(t)$ 为工业用户向电网的实际购电量, kWh; $E_{\text{buy.h}}$ 为消耗的外购蒸汽量,

kg; p_{gas} 、 p_{electric} 和 p_{steam} 分别为天然气、外购电和外购蒸汽的折煤系数。

则多能系统的综合能效表达式为:

$$\eta_t = (Q_{dT} + H_{dT} + P_{dT}) / E \quad (6)$$

各类能源的标准煤参考系数如表 1 所示。

表 1 能源折标准煤参考系数

Tab. 1 Reference coefficient of energy standard coal

能源名称	平均低位发热量	折标准煤参考系数
天然气	35 544 kJ/m ³ (8 500 kcal/m ³)	1.214 3 kgce/m ³
电力(当量)	3 600 kJ/kWh (860 kcal/kWh)	0.122 9 kgce/kWh
蒸汽(低压)	3 763 MJ/t (900 Mcal/t)	0.128 6 kgce/kg

2 综合能源系统多目标优化模型

2.1 多能系统用能成本

用能经济性是用户自行进行用能策略调整的第一内部驱动力。因此,在制订用户综合用能策略时,有必要考虑用户整体的用能成本。仅能保证用能低碳、环保的用能策略,在现实工业生产过程中几乎不存在落地的可能。

用能成本主要包括设备运行维护成本 C_{om} 、购电成本 C_{ES} 、燃料成本 C_{f} 及购热成本 C_{HS} 。用能成本 C_{energy} 的计算如下:

$$C_{\text{energy}} = C_{\text{om}} + C_{\text{ES}} + C_{\text{HS}} + C_{\text{f}} \quad (7)$$

$$C_{\text{om}} = \sum_s \sum_t \xi_s^{\text{om}} P_s(t) T \quad (8)$$

$$C_{\text{HS}} = \sum_t \xi^{\text{h}} H_{\text{buy}}(t) T \quad (9)$$

$$C_{\text{ES}} = \sum_t \xi^{\text{e}} P_{\text{buy}}(t) T \quad (10)$$

$$C_{\text{f}} = \sum_t \xi^{\text{gas}} [F_{\text{GB}}(t) + F_{\text{GT}}(t)] T \quad (11)$$

式中: ξ_s^{om} 、 ξ^{h} 、 ξ^{e} 和 ξ^{gas} 分别为设备 s 的维护单位成本、系统购热成本、系统购电成本和燃料成本; $P_s(t)$ 、 $H_{\text{buy}}(t)$ 、 $P_{\text{buy}}(t)$ 分别为设备 s 的输出功率、购热功率和购电功率; $F_{\text{GB}}(t)$ 和 $F_{\text{GT}}(t)$ 分别为燃气轮机和燃气锅炉的天然气消耗量。

2.2 综合优化目标

综合能效的表达式已在第 1 节说明,不再赘述。由于综合能效与用能成本的量纲不同,对两者进行归一化处理,则自趋优的综合优化目标可表述为:

$$\min \lambda_1 \frac{C_{\text{energy}}}{C_{\text{energy.max}}} + \lambda_2 \frac{\eta_{\text{t.min}}}{\eta_t} \quad (12)$$

式中: $C_{\text{energy.max}}$ 为系统最大用能成本; $\eta_{\text{t.min}}$ 为系统

未优化时的最小综合能效; λ_1 和 λ_2 分别为用能成本与综合能效的权重系数,可由层次分析法确定。

2.3 约束条件

在多能系统的优化调度过程中,除了考虑设备本身的物理约束外,还应该考虑冷、热、电平衡约束。由于篇幅限制,统一用式(13)表示能量平衡约束,用式(14)表示设备物理模型。

$$W_{\text{provide}}(t) = W_{\text{demand}}(t) \quad (13)$$

$$P_{\text{output.s}}(t) = P_{\text{input.s}}(t) \eta_{\text{out.s}} \quad (14)$$

式中: $W_{\text{provide}}(t)$ 为多能系统提供的能量; $W_{\text{demand}}(t)$ 为用户需要的能量; $P_{\text{input.s}}(t)$ 和 $P_{\text{output.s}}(t)$ 分别为设备 s 输入和输出的功率; $\eta_{\text{out.s}}$ 为设备 s 的能量转换效率。

3 算例分析

本文以广州某工业园区中的工厂为研究对象,对所提优化方法开展仿真验证。该工业园区中主要包含如下设备:燃气轮机、余热锅炉、冰蓄冷空调系统、电池储能系统、用户空调、光伏机组、吸收式制冷机及各类蒸汽驱动设备。工业负荷具有基数大、稳定的特点,本文仿真数据采用该工厂实际生产过程的冷、热、电负荷及设备相关参数。

基于广州 2017 年 1 月起执行的分时电价可知,高峰时段为 14:00—17:00 和 19:00—22:00;低谷时段为 00:00—08:00;平谷时段为 08:00—14:00、17:00—19:00 和 22:00—24:00。按照高峰电价 1.05 元/kWh、低谷电价 0.35 元/kWh、平段电价 0.66 元/kWh 来计费。此外,天然气价格为 3.45 元/m³,蒸汽(200 °C, 1.555 1 MPa)购买价格为 348 元/吨。

表 2 为 5 个方案的仿真结果。可知,方案 1 与方案 5 代表仅以用能经济性或综合能效水平为优化目标的用能策略。方案 2—4 为权重系数不同的仿真结果。对上述 5 个方案进行比对可知,方案 1 的经济性最好,然而其综合能效水平较低。当综合能效水平的权重为 0.3 时,系统综合能效提高了 25.3%,经济性仅下降了 2%。当提升综合能效权重为 0.5 时,系统综合能效相较方案 1 提升了 36.5%,较方案 2 提升了 8.9%,经济性相较方案 1 下降了 3.8%,较方案 2 下降了 1.7%。然而,随着综合能效权重的继续提高,系统能效提升不显著,方案 5 的经济性更是大幅度下降。

根据上述比对可知,以经济性或综合能效水平

为单一优化目标的用能优化策略存在局限性。综合能效水平过低不利于系统的运行,而用能成本过高,则会导致用能优化策略无法落地。根据本文所提的多目标优化模型,合理调控优化目标权重,能够在保证用能经济性的前提下,大幅度提升系统整体的综合能效水平,从而提升系统的清洁性与有效性。

表 2 多目标优化仿真结果

Tab. 1 Simulation results of multi-objective optimization

优化方案	λ_1	λ_2	用能成本/元	综合能效/($\text{kJ} \cdot \text{kgce}^{-1}$)
方案 1	1	0	118 161.83	9.40
方案 2	0.7	0.3	120 619.23	11.78
方案 3	0.5	0.5	122 713.83	12.83
方案 4	0.3	0.7	122 713.82	12.84
方案 5	0	1	127 561.68	12.85

4 结语

本文考虑综合能源系统多能互补的特点,提出了用于描述能源系统用能低碳、高效等核心特征的综合能效指标。同时,以用能经济性描述用户自发进行用能行为调整的主要驱动力。以最小化用能成本及最大化综合能效为优化目标,提出了综合能源系统多目标优化模型。在设备物理约束、冷热电能量平衡约束下,得到相应的用能优化策略。结合广州某工业园区的实际数据进行了算例分析,结果表明,仅包含单一优化目标的优化策略存在局限性,综合能效水平过低不利于系统的长久运行,用能成本过高也会导致用能策略不符合生产实际,通过合理调控优化目标权重,能够得到兼顾用能经济性与综合能效水平的用能优化策略,全面提升系统的清洁性与高效性。

参考文献

- [1] 孙娟,卫志农,孙国强,等. 计及 P2H 的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6): 62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.
- [2] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6): 3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [3] BEUZekom I V, MAZAIRAC L A J, GIBESCU M, et al. Optimal design and operation of an integrated multi-energy system for smart cities[C]// 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), April 4-8, 2016, Leuven, Belgium. New York: IEEE, 2016: 1-7.
- [4] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术,2015,39(11): 3005-3013.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [5] 何仲潇,徐成司,刘育权,等. 考虑多能协同的工厂综合需求侧响应模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(6): 69-74.
HE Zhongxiao, XU Chengsi, LIU Yuquan, et al. Industrial park IDR model considering multi-energy cooperation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 69-74.
- [6] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14): 3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [7] 林威,靳小龙,穆云飞,等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20): 5829-5839.
LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Multi-objective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5829-5839.
- [8] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术,2016,40(10): 2942-2950.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [9] 胡蘭丹,刘东,闫丽霞,等. 考虑需求响应的 CCHP 多能互补优化策略[J]. 南方电网技术,2016,10(12): 75-81.
HU Landan, LIU Dong, YAN Lixai, et al. Optimal multi-energy complementary strategy for cchp considering demand response [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(12): 75-81.
- [10] SUN Z G, WANG R Z, SUN W Z. Energetic efficiency of a gas-engine-driven cooling and heating system [J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5): 941-947.
- [11] SANTO D B E. Energy and exergy efficiency of a building internal combustion engine trigeneration system under two different operational strategies [J]. Energy & Buildings, 2012, 44(53): 28-38.
- [12] LI H, FU L, GENG K, et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems [J]. Energy & Buildings, 2006, 38(3): 253-257.

收稿日期: 2018-03-01

作者简介:

华煌圣(1984),男,高级工程师,硕士,从事电力系统继电保护技术相关工作, huahuangsheng@163.com;

刘育权(1971),男,高级工程师(教授级),博士,从事电力系统运行管理工作;

熊文(1973),男,高级工程师,博士研究生,从事电力调度管理工作。