

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.003

区域级综合能源系统多能耦合优化研究

李刚, 王晓东, 邓广义

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 综合能源系统是未来能源消费方式的重要发展方向, 按照不同能源品味的高低进行综合互补利用, 以取得最合理的能源利用效果和经济环保效益显得至关重要。从功能模块、子系统、区域级综合能源系统三个层级进行模型构建, 在合理配置多种功能模块的基础上进行各子系统和综合能源系统的能量平衡计算, 建立能耗目标、经济目标、环保目标三种单一目标以及由此任意组合得到的多目标评价指标, 制定多能耦合优化策略, 实现综合能源系统设计中的方案配置优化。

关键词: 区域级综合能源系统; 多能耦合; 功能模块; 子系统

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0024-05

Multi-energy Complementary Optimization Research on Local Area Integrated Energy System

LI Gang, WANG Xiaodong, DENG Guangyi

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663)

Abstract: The integrated energy system (IES) is an important developing direction for future energy use. The tradeoff between energy system setting and economic and environmental benefit is a paramount design consideration for multi-energy complementary system. In this paper, a general model was established based on three levels consisting of function unit, subsystem, and local area IES. Then, the energy balance calculation of subsystem and IES was performed after rational allocation of function unit. Furthermore, the model provided the optimal IES setting scheme satisfying energy consumption, economic, or environment protection single evaluating indicator or the multi-complementary evaluating indicator requirements.

Key words: local area integrated energy system; multi-energy complementary; function unit; subsystem

智慧能源是指拥有自组织、自检查、自平衡、自优化等人类大脑功能, 满足系统、安全、清洁和经济要求的能源形式^[1]。智慧能源借助信息技术使得能源网络与市场相结合, 通过信息系统平台实现数据集中和整合, 有效把控市场动态供需关系, 实现快速响应和资源优化匹配, 为节能减排和能源系统市场化以及结构调整提供机遇。智慧能源作为能

源发展的高级模式, 在具体落地时主要依托分布式能源系统, 而可以包容多种能源资源输入的多能互补分布式综合能源系统在近期的国家能源规划中被大力倡导。综合能源系统是集中能源梯级利用, 清洁可再生能源的利用, 冷、热、电多种能源的供应与消费, 新能源技术应用以及智能电网应用等的有机整体。综合能源系统的主要能源利用包括传统能源、天然气冷热电三联供、光电或光热、沼气和垃圾发电、风能、热泵、蓄能、楼宇节能等多种形式。综合能源系统不是多种能源的简单叠加, 而要在系统高度上按照不同能源品味的高低进行综合互补利用, 并统筹安排好各种能量之间的配合关系与转换使用, 以取得最合理能源利用效果与效益。面对这种技术上的新挑战, 需要对综合能源系统的集

收稿日期: 2017-05-30

基金项目: 中国能建广东院科技项目“综合能源系统在智慧城市及园区规划中的应用研究”(EX03761W)

作者简介: 李刚(1975), 男, 广东揭阳人, 中国能建广东院发电工程公司(基础设施工程公司)总经理, 高级工程师, 学士, 主要从事电力设计及管理工(e-mail)ligang@gedi.com.cn。

成技术进行广泛和深入的研究。本文以区域级(工业园区、科技园区等)综合能源系统为主要研究对象, 深入研究综合能源系统的多种能源利用技术和冷、热、电多种能量形式的耦合优化过程。

1 国内外研究现状

国内外针对综合能源系统的规划和优化运行的研究主要集中在天然气网络、热力网络和电力网络的综合网络领域。文献[2-5]分析了天然气价格波动[2]和管道故障[3]对电网安全的影响, 研究天然气管道运行约束条件下的电力机组组合优化[4]和电力风险评估[5]等内容。文献[6]给出多区域综合能源系统的热网传输通用模型, 在冷热电联供系统运行优化模型基础上建立了含有热网的优化混合整数线性规划模型。近年来也有学者开展了综合能源系统多种能源利用技术的研究, 文献[7]仅针对微型燃气轮机综合能源系统给出了建模方法; 文献[8]建立了含吸收式制冷机和电制冷机的冷热联供系统的优化配置模型及运行策略; 文献[9]建立了含风机、光伏电池等新能源发电设备的冷热电联供系统的优化运行模型, 着重针对新能源发电的随机性和负荷的波动特性开展研究; 文献[10]以多种设备模型联立冷热电联供系统, 以经济型最优为目标, 对系统内的电源进行容量配置。目前的综合能源系统多种能源利用研究往往针对部分设备模型, 并且没有全面考虑能耗、经济、环保等指标以及由此任意组合得到的多目标评价指标对于优化结果的影响。基于此, 本文以设备功能模块自由组合为基础, 对综合能源系统进行分层构建, 研究适用于区域级综合能源系统的单目标和多目标优化算法, 实现在选定的指标评价体系下完成多种能源配置、运行策略两个层次的优化。

2 综合能源系统模型

由于综合能源系统的设备类型众多, 组合形式多样, 因此为了提高模型的通用性、可扩展性, 同时也为了便于实现设备间的自由组合和综合能源系统的模型构建, 在建模研究中首先将综合能源系统从上至下被分解为三个层级: 综合能源系统、子系统、功能模块, 如图1所示。以功能模块的建模研究为基础, 从下至上的对综合能源系统进行模型构建。同时, 为了更好地发挥功能模块的自由组合和便于计算子系统及综合能源系统的能效指标、经济指标和环境排放指标, 功能模块模型同时包括能效模型和环境模型, 经济模型则以子系统为单位建立。

综合能源系统的建模研究以满足能源规划需求为原则, 对功能模块的建模采取由简单到复杂, 由框架到细节, 由基本到多样的研究思路, 根据设备的各自特性和工程实际应用需求选择混合建模(机理+经验)或数据建模方法。

功能模块中各基本设备单元的一次建模研究是重要的基础环节, 在建模研究时不仅要考虑模型程序开发本身的难度, 而且要充分考虑到后续能量平衡计算和优化的便捷性。机理模型虽然在一定程度上能揭示设备及系统的内在规律, 但由于设备类型众多, 涉及面广, 相互之间的组合形式更是繁杂多样, 完全采用机理建模方法工作量巨大, 短时间内既不现实也没有必要。并且机理建模往往需要涉及设备的内部结构, 如果设备本身部件众多, 结构形式多样, 如溴化锂双效吸收式制冷机中包括高低压发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器及高低温换热器等六大部件, 其中吸收器与高低温换热器之间、高低温换热器与高低压发生器之间的联结可以组合出很多形式, 包括串联、并联、串并联等, 使机理模

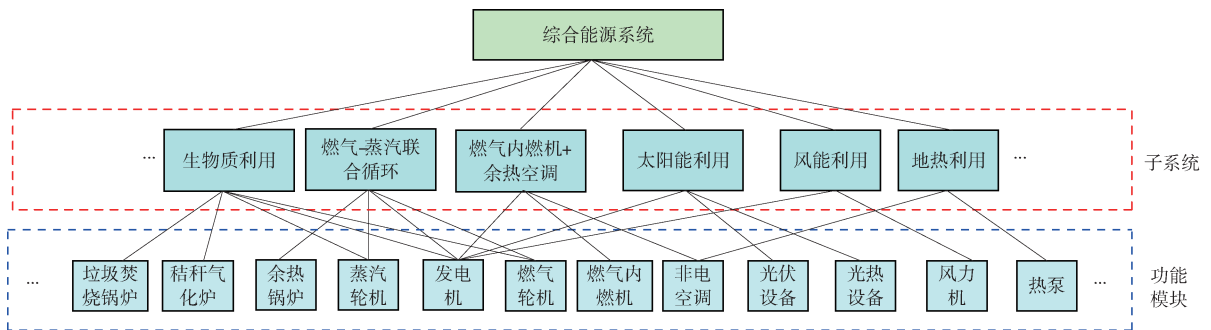


图1 综合能源系统结构示意图

Fig. 1 Illustration of integrated energy system structure

型的复杂性大大增加, 不仅开发难度大, 而且非常不利于后续能量平衡计算和优化的研究。因此, 在本文的建模研究中, 对一些结构形式相对固定的重要设备, 如燃气轮机、内燃机、光伏发电等, 在建立其能效模型时主要采取了机理建模与经验建模相结合的方法, 而对于另外一些本身结构就非常多样的设备, 如锅炉、吸收式制冷机等, 在建立能效模型时则主要采用数据建模方法, 即在分析各主要影响因素的基础上, 基于经验公式或者厂家提供的性能曲线建立该设备的能效模型。不管是采用机理经验混合建模方法还是基于数据建模方法, 在进行建模研究时均着重考虑了设备的变工况特性。

综合能源系统中, 既有常规能源, 又有可再生能源, 既有传统的可能造成环境污染的燃料, 如煤、垃圾等, 又有新兴的清洁型能源, 如太阳能、风能等。因此, 在建模研究时有所侧重, 对于环保性能较好的设备, 重点关注其能效模型; 而对于一些污染排放物较多的设备则还需要关注其环境模型的研究, 如燃煤锅炉、垃圾锅炉等等。能效模型主要立足于满足能量平衡计算, 并便于输出所需的能效指标, 环境模型则重点考虑了各设备所排放的对环境有害的气、固、液含量。

在建模研究中, 还考虑了各设备的输入与输出接口, 以便于各设备间组合建模。以燃气—蒸汽联合循环中各设备的能效模型为例, 如图2所示。燃气轮机的输出参数包括两部分, 一部分是用于整个系统指标计算(如电负荷), 另一部分是作为余热锅炉的输入参数(如透平排烟参数)。而余热锅炉的输出参数则是汽轮机的输入参数(如蒸汽参数), 汽轮机输出参数中既有用于整个系统指标计算的参数(如电负荷), 也有用于返回余热锅炉的参数(如给水参数)。通过输入与输出参数的联结, 使得三个设备的模型可以闭合联立(由于发电机效率变化通常较小, 因此在建模研究中, 发电机不单独建模, 发电机效率默认为0.985, 用户可根据需要修改), 从而形成整个燃气—蒸汽联合循环系统的模型并最终计算得到该系统的能效指标。环境模型和能效模型的构建方法类似, 经济模型则直接以子系统为单位构建, 最终通过各子系统模型的联立可得到所需的综合能源系统模型。

3 综合能源系统能量平衡计算

遵循不同品质能源的综合梯级利用原则, 结合

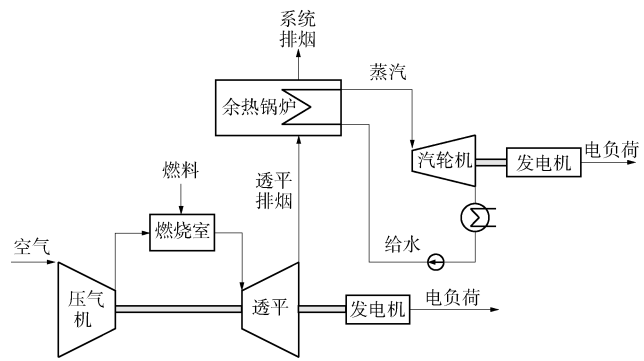


图2 燃气—蒸汽联合循环系统建模示意图

Fig. 2 Illustration of combined gas and steam cycle system modeling structure

多能源互补和多功能综合的系统集成理论, 在合理配置各功能模块的基础上进行各子系统和综合能源系统的能量和火用平衡计算, 确保基于各子系统负荷分配方案的负荷供应与外界负荷需求平衡, 并且进入方案的热耗与方案能量输出之间符合能效模型关系, 计算方法如图3所示。为了方便解算和加快运算速度, 采用矩阵求解方法, 尽量减少迭代过程。对于确定结构的系统, 通过矩阵的满秩构建和适当处理, 以支持系统的正、逆计算。

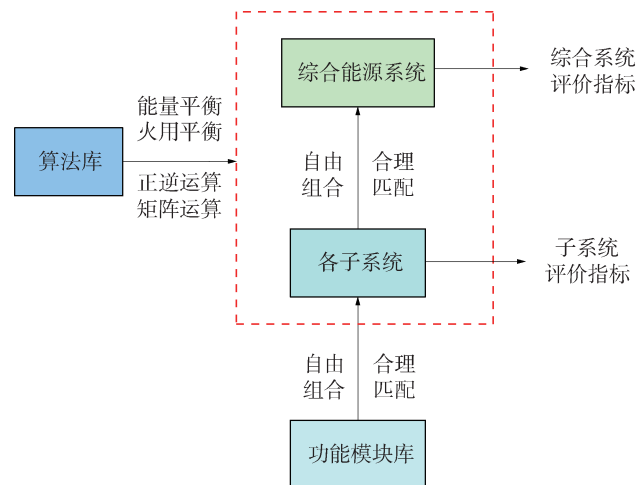


图3 能量平衡计算方法

Fig. 3 Illustration of energy balance calculation

4 综合能源系统优化算法

综合能源系统优化算法研究的目的是为了实现综合能源系统规划设计中的方案配置优化。在进行区域综合能源系统的规划设计时, 通常只给定整个区域的负荷总需求曲线和基本的约束条件。由于综合能源系统涉及的设备类型众多, 设备间组合和子

系统间组合繁杂多样, 因此能满足这些需求和条件的方案数量非常多。方案选择时, 不仅需要考虑其在额定工况下的性能, 还需要考虑其在全年负荷需求变动下的总体性能, 因此整个配置优化过程既与配置组合相关又与运行模式有很大关系。如果采用逐一枚举计算, 不仅计算量大而且对数据处理要求较高。而忽视综合能源系统配置优化的特点, 完全依赖于优化算法本身来解决, 其结果的合理可行性也难以保证。

综合能源系统优化算法包括优化目标函数的构建和优化方法的选取。综合能源系统优化目标函数主要包括能耗目标、经济目标、环保目标三种单一目标函数以及由此任意组合得到的多目标函数。针对所构建的目标函数, 将传统优化算法、智能优化算法以及混合型优化算法在收敛速度、全局优化性能等方面进行论证比选, 得到适用于综合能源系统的单目标和多目标优化算法, 实现在选定的指标评价体系下完成能源配置、运行策略两个层次的优化, 如图 4 所示。

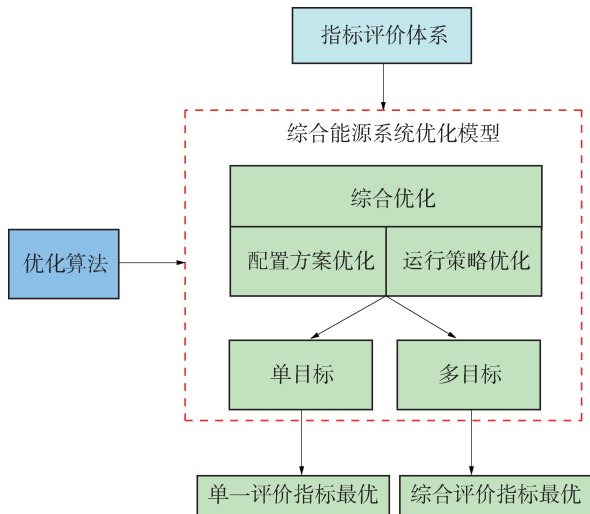


图 4 综合能源系统优化方法

Fig. 4 Illustration of IES optimization scheme

基于配置优化过程可控、配置优化结果合理可行以及工程实用性的要求, 形成如图 5 所示的总体优化方法。分两个步骤进行方案的配置优化, 第一步是在充分考虑子系统组合合理性的基础上, 根据负荷需求、约束条件以及组合筛选策略选出合理可行的所有配置方案, 即建立可行的配置方案库。第二步是根据年负荷需求预测曲线对方案库中的每种配置方案进行运行策略优化, 计算出各方案的年运

行费用、年一次能耗和年污染物排放量等指标, 运行策略优化以单位能耗最低为目标进行负荷分配。整体配置优化采用单一目标或多目标方法。单一目标包括年总费用最小(年总费用由年固定费用和年运行费用两部分组成)、年一次能耗最小及年污染物排放量(CO₂、SO₂和NO_x)最小等三类目标。多目标方法是综合考虑年总费用、年一次能耗和年污染物排放量三类指标的影响。

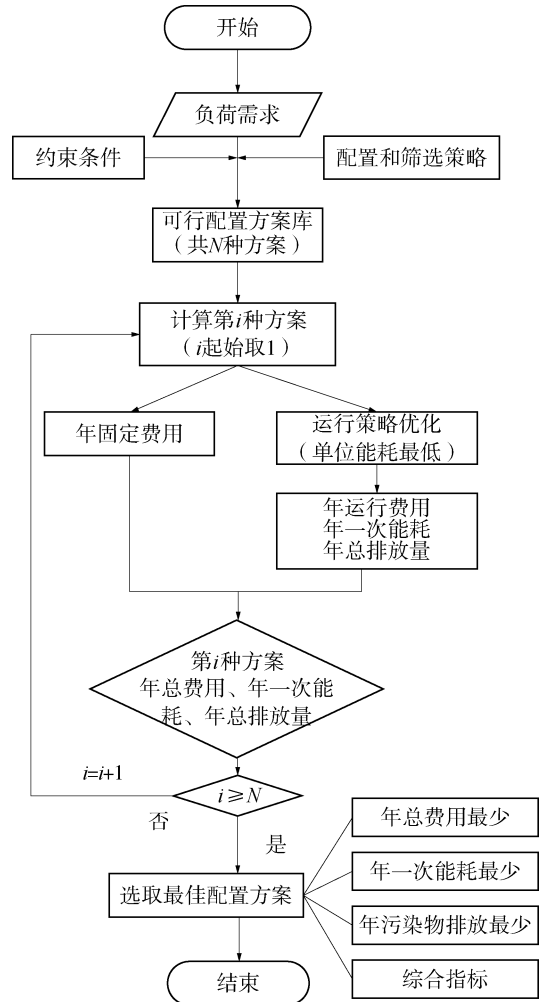


图 5 总体优化方法

Fig. 5 Illustration of overall optimization scheme

5 综合能源多能耦合优化系统人机界面

采用面向对象的程序设计方法, 借鉴大型仿真软件的经验, 开发出可视化、图形化、便于操作和使用的综合能源多能耦合优化系统人机交互界面。用户不需要具备编程技能, 即可将各功能模块按照物理流程搭接成子系统, 并进而联立形成综合能源

系统,系统组态和优化所需的各边界条件也通过人机交互界面输入,从而为综合能源系统的模拟和优化提供支撑。此外,人机界面还包括软件的一些重要辅助功能,如工程的建档、保存等功能,数据库的管理功能等。研究开发工作已实现的模型、系统模拟、系统优化以及人机界面之间的关系在计算机中的结构如图6所示。

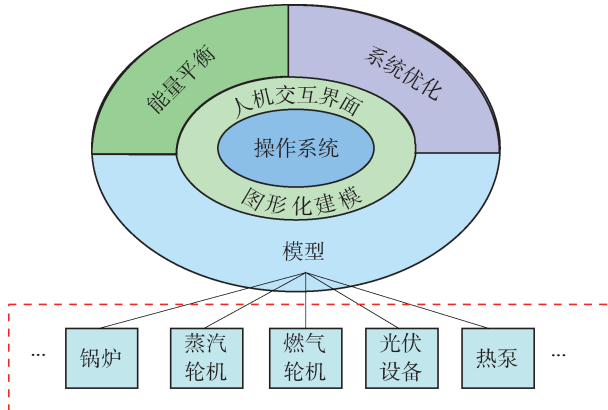


图6 综合能源多能耦合优化系统软件结构示意图

Fig. 6 Illustration of IES multi-energy complementary optimization system software structure

6 结论

本文建立了区域级综合能源多能耦合模型,并进行了系统优化研究,可得出以下结论:

1) 研究包括了常规能源和新能源,涵盖了能源梯级利用、清洁可再生能源的利用、冷热电联供等多种能源利用型式。

2) 可实现设计工况点的配置优化,同时兼顾变工况特性,从而使得系统优化更切合实际运行情况。

3) 优化目标不仅包括常规的能效指标,还包括经济指标、环保指标或者是由能效、经济、环保指标组成的综合指标,符合目前节能减排的发展趋势。

4) 研究成果已基于通用的软件开发平台和图形化人机界面,开发出完善的综合能源多能耦合系统优化软件包,可用于综合能源系统项目的规划、咨

询、投标等前期开发,并指导完成方案设计和优化等核心工作。

参考文献:

- [1] 刘建平,陈少强,刘涛. 智慧能源—我们这一万年 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
LIU J P, CHEN S Q, LIU T. Smart energy -we've been here for ten thousand years [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [2] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [3] LI T, EREMIYA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1817-1824.
- [4] SAHIN C, LI Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Impact of natural gas system on risk-constrained midterm hydrothermal scheduling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 520-531.
- [5] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Generation risk assessment in volatile conditions with wind, hydro, and natural gas units [J]. Applied Energy, 2012, 96(3): 4-11.
- [6] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1315.
GU W, LU S, WANG J, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315.
- [7] 贾宏杰,戚冯宇,徐宪东,等. 微型燃气轮机综合能源系统的建模与辨识 [J]. 天津大学学报, 2017, 50(2): 215-223.
JIA H J, QI F Y, XU X D, et al. Identification and modeling of integrated energy system containing micro gas turbine [J]. Journal of Tianjin University, 2017, 50(2): 215-223.
- [8] LIU M, SHI Y, FANG F. A New operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers [J]. Applied Energy, 2012, 95(2): 164-173.
- [9] WU Z, GU W, WANG R, et al. Economic optimal schedule of CHP microgrid system using chance constrained programming and particle swarm optimization [C]//Power & Energy Society General Meeting. Detroit; IEEE, 2011, 5(22): 1-11.
- [10] 唐沂媛. 冷热电联供/综合能源系统的规划研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
TANG Y Y. Study on planning of combined cooling, heating and power system/integrated energy system [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

(责任编辑 张春文)

中国能建广东院总承包的“互联网+智慧用能综合示范小区”建成投入使用

2017年3月28日,由广州供电局主导投资建设、中国能建广东院总承包的南方电网首个“互联网+智慧用能综合示范小区”项目在广州中新知识城建成投入使用。“互联网+智慧用能综合示范小区”是一套为用户设计的综合能源服务体系。其以电力光纤入户而构筑的通信网络为基础,通过整合电、水、气三表一体化集抄系统、智能小区综合管理系统、智能家居、分布式能源、充电设施等关键元素,将能源与信息深度融合,为用户打造智慧用电、高效便捷的生活。(中国能建广东院)