

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190382

用户级综合能源仿真分析系统研究与开发

邰嘉嘉¹, 曾诚玉², 赵瑾³, 张群华⁴, 刘洪⁴

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 4. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 为了在规划阶段合理把控综合能源系统布局, 充分发挥综合能源系统高效运行优势, 结合分布式综合能源站的实际建设需求, 提出用户级综合能源仿真分析系统的逻辑构架、仿真方法和功能模块等设计思路, 并采用 Visual Studio 企业应用平台对综合能源仿真分析系统进行开发。系统的仿真分析以整体经济效益、运营环节效益、综合能效为可选优化目标, 综合考虑不同季节负荷水平、系统运行方式、系统资源配置等因素, 通过负荷分析、容量配置以及优化运行, 实现综合能源系统最优配置方案的自动生成, 并具备不同优化方案设计对比功能。以某用户级综合能源园区为例进行仿真分析, 计算分析结果与实际分布式能源站项目可行性研究报告中的拟建设规模基本一致, 充分表明了仿真分析系统的有效性实用性。

关键词: 综合能源; 仿真分析; 容量配置; 优化运行; 系统开发

Study and development of user-level integrated energy simulation analysis system

HUAN Jiajia¹, ZENG Chengyu², ZHAO Jin³, ZHANG Qunhua⁴, LIU Hong⁴

(1. Power System Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 4. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to properly control the layout of integrated energy systems in the planning stage, give full play to the advantages of efficient operation of integrated energy systems, and combined with the actual construction needs of distributed integrated energy stations, the design ideas of logical framework, simulation method and functional modules of the user-level integrated energy simulation analysis system are proposed, and the energy integrated energy simulation analysis system is developed using the Visual Studio enterprise application platform. The system takes the overall economic benefits, operational benefits, and comprehensive energy efficiency of the system as optional optimization targets, comprehensively considers the load levels of different seasons, system operation mode, system resource allocation and other factors, and automatic generation of optimal configuration schemes for integrated energy systems through load analysis, capacity configuration, and optimized operation. It also has different optimization scheme design comparison function. Taking a user-level integrated energy park as an example, the calculation and analysis results are basically consistent with the proposed construction scale in the feasibility study report of the actual distributed energy station project, which fully demonstrates the effectiveness and practicability of the simulation analysis system.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co. (No. GDKJQQ20161202).

Key words: integrated energy system; simulation analysis; capacity allocation; optimized operation; system development

0 引言

“十九大”以来, 发展清洁能源成为了改善能

源结构、保障能源安全、推进生态文明建设的重要任务, 如何保证能源绿色发展, 促进能源转型, 提高能源利用率, 仍是目前国民经济发展所要解决的重大问题之一^[1-2]。打破原有各供能系统独立规划、独立设计和独立运行的既定模式, 将能源系统一体

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(GDKJQQ20161202)

化进行规划设计和运行, 构建综合能源系统将成为人类用能的必经之路^[3-4]。

随着综合能源理念的提出和示范项目的广泛开展, 综合能源系统优化配置与协同调度成为了国内外专家学者关注的热点。文献[5-8]根据供需能量平衡, 建立了包含冷/热/电/气/储能的综合能源优化配置模型, 但未见有相应辅助决策系统的开发; 文献[9-11]对面向园区的综合能源系统进行优化, 从经济效益、环境效益等目标出发, 对综合能源系统规划方法、调度策略进行了研究, 但在系统的开发上尚未有成熟规范的操作平台嵌入到综合管理系统。目前国内综合能源示范区尚处于探索阶段, 综合能源系统的规划、设计、建设需经过科学的计算论证后才可以进行^[12]。因此, 在综合能源系统规划方法与优化模型的理论研究基础上开发其仿真分析系统, 既对综合能源系统规划业务工作起到重要作用, 为专业人员在综合能源系统设计中作出科学决策, 又能提高综合能源系统结构设计与容量优化规划中的工作效率, 降低相关工作的风险。

针对目前综合能源系统存在能源利用率低、其本身的高效优势无法发挥、运营受限和费用增加等问题。本文从用户级综合能源园区的实际需求出发, 综合考虑不同季节负荷水平、系统运行方式、系统资源配置等因素, 在综合能源系统规划对象分析技术和综合能源系统规划模型技术的基础上, 设计开发用户级综合能源仿真分析系统, 实现综合能源系统工程管理、工程信息、行业负荷特性、区内用能需求、结构设计、选定方案运行仿真、优化方案容量配置等功能, 为提高各部门协同运作效率, 提升客户服务层次提供强有力的技术支持和坚实的业务基础。

1 综合能源仿真系统需求分析

近几年, 随着相关能源政策的提出以及技术水平的提高, 国内外广泛开展了分布式综合能源系统的示范应用案例, 在满足能源负荷供给的基础上, 实现了节约能源、减少碳排放等目标^[13-17]。通过调研我国布局较早、综合能源业务发展较快的几个示范区, 总结综合能源系统存在的主要问题如下。

1) 综合能源服务涉及多种能源供应, 但是业务之间基本是物理叠加, 融合有机性较差, 在加入了可再生能源等新业态之后, 供能成本增加。而政府层面要求降低能源价格, 降低民生和企业用能成本, 提高经济活力和竞争力, 这无疑降低了综合能源系

统的经济效益。因此在综合能源系统设计之初, 应当合理规划, 提高系统经济性。

2) 综合能源系统包含冷/热/电/气等多种能源, 系统内能源网络复杂, 元件设备、能源需求种类众多, 是一个在时间、空间以及行为三个层面都极其复杂的动态系统。目前综合能源示范区规划建设主要采用人为计算的方式, 效率较低, 并且可能产生规划结果不合理、经济性不佳等问题。

3) 随着智能电网的快速发展与日渐成熟, 综合能源系统正逐步在用能预测、优化规划、优化调度等领域开展智能化建设, 积极研发相应的辅助分析工具, 但是目前未见有成熟规范的软件嵌入综合能源系统, 将负荷分析与预测、优化规划、优化调度、运行监测等功能进行集成, 实现综合能源系统设计的智能化与一体化。

根据综合能源系统的发展目标和规划要求, 构建完善全面的综合能源仿真分析系统首先应能够满足负荷分析、结构设计、优化运行、容量配置等业务需求, 确保系统正常运行所需的管理、运营、维护等; 其次, 具有强大的数据采集、管理和加工能力, 并具有良好的维护性、兼容性和可扩展性; 此外, 系统应具有良好的简体中文人机操作界面以及详细的帮助信息, 系统参数的维护与管理可通过操作界面完成, 实现综合能源的运行和服务一体化、智能化, 使各个管理单元精确、高效、协同和持续运行。

2 系统构架设计

本文针对用户级综合能源系统规划需求, 研究与开发仿真分析系统。充分考虑负荷水平, 通过结构设计, 制定合理的供能方案, 实现综合能源系统各供能元件容量的最优配置, 以提高系统能效与经济性。

2.1 整体构架

用户级综合能源系统涉及范围较小, 适用于学校、工厂、商用建筑等环节。一般来说, 不同能源系统归同一单位, 避免利益纠葛, 能源互通互联易于实现。系统包含热电联产机组、风能、太阳能等发电装置, 燃气轮机、热泵等供热设备, 溴化锂吸收机组、电制冷机等供冷设备, 以及蓄电池组、热储能、冰蓄冷等可与系统进行能量交互的设备。本文所研发的仿真分析系统以此类系统为基础, 根据实际需求对设备进行选择, 通过分析系统的冷/热/电负荷水平, 得到最佳容量配置与运行方案。用户级综合能源系统构架如图 1 所示。

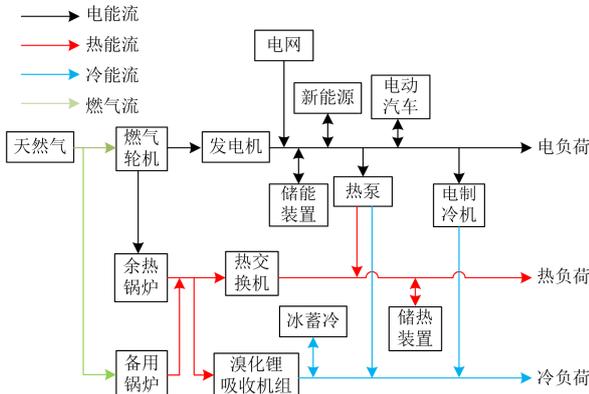


图 1 综合能源系统

Fig. 1 Integrated energy system

2.2 逻辑构架设计

用户级综合能源仿真分析系统采用四层/多层的应用逻辑构架和组建化技术，以提高系统的灵活性、可扩展性、安全性以及并发处理能力，适应系统管理和业务发展的需要。采用四/多层应用架构的综合能源仿真分析系统总体上可划分为数据层、业务层、接口层和表现层，如图 2 所示。



图 2 系统逻辑架构

Fig. 2 Logic structure of the system

1) 数据层

在数据层，系统使用标准数据访问构件操作数据，对数据进行分析校验，利用文件数据库、关系数据库等来存储系统的所有数据。

2) 业务层

在业务层，系统将构建各种综合能源元件的运行仿真组件或独立子系统，然后，通过核心的计算方法，得到用户所关注的系统运行结果。

3) 接口层

在接口层，系统通过标准化 Excel 格式数据交互式访问构件，实现与其他系统的接口，并为后续开发的辅助系统预留接口条件。

4) 表现层

在表现层，本系统各功能模块采用统一界面风

格设计。系统通过各种标准化数据展示图表组件，将各类原始数据、结果数据进行可视化展示。系统界面除了充分考虑界面布局、行业习惯、各元素设计等因素外，为了用户更好地使用本系统，还充分考虑了易用性、规范性、合理性、美观与协调性等因素。

2.3 仿真构架设计

由于综合能源系统规划属于长期优化，在较长时间尺度上解决能源设施的发展、投建问题，且系统内子能源网络之间的关系十分复杂，元件设备种类以及终端能源需求众多，因此本系统将综合能源系统规划优化分为两个层面，优化结构框架如图 3 所示。

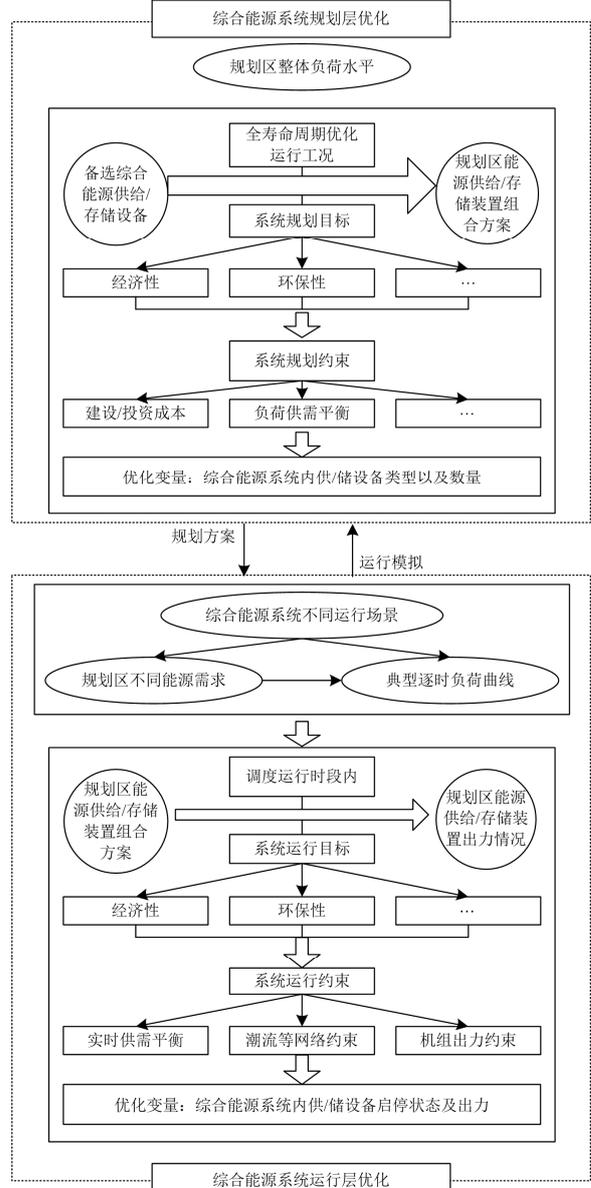


图 3 综合能源系统优化结构框架

Fig. 3 Optimization structure framework of integrated energy system

第一个层面, 对综合能源系统供给和存储设备的类型和数量进行优化。基于规划区域内综合能源的整体负荷水平, 在备选综合能源供给和存储设备中, 针对所选取的优化规划目标, 考虑全寿命周期的优化运行工况, 提出区域内的制冷装置、制热装置、储冷和储热装置的优化组合方案。

第二个层面, 对综合能源系统设备的运行控制进行优化。分别在不同能源需求期下, 基于典型日负荷需求曲线, 考虑能源供给和存储设备的系统运行约束和供需平衡约束, 对应第一层优化的经济性目标或环保性目标, 给出各设备的典型日 24 时优化控制方案, 并计算相应的经济性指标或环保性指标。第二层面的运行控制优化服务于第一层面的综合能源系统规划优化。从控制优化的结果, 可以得到某一规划方案下系统运行的经济性和环保性指标, 作为综合能源系统规划指标的重要组成部分。综合能源系统的运行控制优化是规划优化的子优化过程。

由于各类设备的能效出力模型十分复杂, 综合能源系统内的控制变量繁多, 综合能源双层规划优化模型属于非线性优化问题, 可采用智能优化算法(遗传算法、粒子群算法等)^[18-20]进行求解, 得到既定目标下的最优规划方案。由于目前国内外对智能算法研究较多, 因此本文不再赘述。

3 系统详细设计

用户级综合能源仿真分析系统主要功能模块包括: 工程管理、工程信息、行业负荷特性、区域用能需求、结构设计、选定方案运行仿真、优化方案容量配置以及基础设置, 功能架构如图 4 所示。

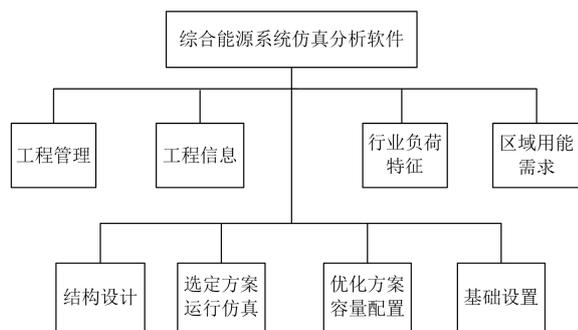


图 4 综合能源仿真分析系统功能架构

Fig. 4 Functional architecture of integrated energy system simulation analysis software

该系统主要包括五个方面的功能点, 分别为待规划区负荷分析、结构设计、优化方案容量配置、选定方案运行仿真以及数据采集与基础设置。

3.1 综合能源系统负荷分析

参考《民用建筑设计通则》(GB50352-2017)^[21]中关于建筑类型的划分原则, 对写字楼、商场、酒店、医院、政府办公、居民、场馆、工业八种典型用户的用能特性进行分析研究, 得到各行业以及整个规划区域的整体年-月、日-小时负荷特性以及需求曲线, 并计算园区全年日-小时负荷曲线及负荷指标^[22](最大/最小负荷、日峰谷差、平均负荷、日峰谷差率、不均衡系数、最大利用小时数等)、年-月最大负荷、年持续负荷曲线(负荷延时曲线)等, 从而为后续的运行与规划分析提供整体负荷曲线的数据支持。

3.2 综合能源系统结构设计

根据综合能源系统的实际情况, 基于该规划区域的资源禀赋以及设备使用条件, 在系统内选择相应元件, 设置元件参数。这些元件包括冷、热、电三联供元件(燃气内燃机、溴冷机)、常规冷机、双工况冷机、热泵、锅炉、蓄电池组、蓄冰槽、蓄冷水装置、风机、光伏等, 系统根据元件参数生成元件计算模型及特性曲线。

3.3 优化方案容量配置

综合能源系统规划可以包含多种规划目标, 例如: 经济性、环保、能效、可靠性等。本系统主要考虑全寿命周期内的经济性和环保性, 建立了 3 种优化规划目标的数学模型: 整体经济效益最优、运营环节效益最优、综合能效最优。

1) 整体经济效益最优

整体经济效益以综合能源系统全寿命周期内总成本为目标函数。总成本涉及综合能源设备初期费用(设备购置和安装)、维护费用、运行费用以及设备残值。运行费用主要是系统运行所购入市电费用, 同时考虑可再生能源发电的补贴收益。数学表达式为

$$F^{Eco} = \sum_i (B_i + Y \cdot F_i) + Y \sum_k D_k O_k^{Eco} - \sum_i R_i \quad (1)$$

式中: B_i 为第 i 种供储能源设备的初始投资费用; F_i 为第 i 种供储能设备每年的运行维护费用; Y 为整个系统的工程寿命, 年; R_i 为第 i 种供储能设备残值; D_k 为 1 年内第 k 类能源需求期的天数; O_k^{Eco} 为第 k 类能源需求期的经济性准则下系统典型日运行成本, 其数学表达式为

$$O_k^{Eco} = \sum_{t=1}^T C_t \cdot P_t^{TL} \cdot H - \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T C^n \cdot P_t^n \cdot H \quad (2)$$

式中: T 为综合能源系统优化日控制总区间数, 一

般设 $T=24$; H 为每个控制区间的小时数, 一般 $H=1$; C_t 为分时市网电价; P_t^{TL} 为区域并网联线路功率; C^n 为第 n 种可再生能源发电补贴价格; P_t^n 为第 n 种可再生能源在 t 时段的发电功率。

2) 运营环节效益最优

运行效益是衡量用户级综合能源运行性能的重要指标, 关系到用户级综合能源在实际生产中的作用与影响。考虑到用户级综合能源系统在运行过程中所产生的燃料费、设备运维费、购电费用、系统运行损耗成本以及环境污染治理成本, 运营环节效益最优是以综合能源服务商运行收益最大为目标, 其目标函数的数学表达式为

$$F^{ope} = \sum_{t=1}^T [R^E(t) + R^H(t) + R^C(t) - C_{pe}(t) - C_{fuel}(t) - C_{loss}(t) - C_{ME}(t) - C_{EP}(t)] \quad (3)$$

式中: R^E 、 R^H 、 R^C 分别为售电、售热、售冷收益; C_{pe} 为向上级电网购电费用, 该值为负时, 表示向电网售电; C_{fuel} 为 CCHP 机组燃料成本; C_{loss} 为系统运行损耗成本, 包括储能装置寿命损耗成本及能量传输损耗成本; C_{ME} 为系统运行维护成本; C_{EP} 为环境污染治理成本。各费用求解公式较多文献^[11,16]均已提及, 本文不再赘述。

3) 综合能效最优

综合能效最优将系统对外购买的电力与天然气通过标煤系数进行折算, 以综合能源系统全寿命周期内一次能源折算消耗量最小为目标函数, 数学表达式为

$$F^{Eff} = Y \sum_k E_k O_k^{Eff} \quad (4)$$

式中: Y 为整个系统的工程寿命, 年; E_k 为第 k 类能源的标煤折算系数; O_k^{Eff} 为能源需求期的能效准则下系统典型日的第 k 类能源消耗量, 由运行仿真得到。

综合能源系统规划约束主要包括系统初期投资成本约束、负荷供需平衡约束、设备运行约束、流量约束等约束形式^[6,10]。优化变量为设备类型、数量及其运行曲线。

系统支持基于不同目标自动优化设备配置, 对不同方案进行对比分析, 为规划人员提供决策依据。

3.4 选定方案运行仿真

基于待规划区域内的资源禀赋及适合使用的设备, 系统可以支持多种供能、储能设备的自主选择, 同时支持对设备关键参数进行修改与录入。在明确待规划区内已有设备容量配置的情况下, 对系统的

整体运行情况进行计算, 计算结果包括展示系统内负荷的供需平衡情况。同时, 对系统整体经济效益、运营环节效益、综合能效进行分析, 并支持不同方案的对比。

3.5 数据交互与基础设置

基于规划区域的负荷水平、用户性质以及不同用户对不同能源型式的需求, 将规划区域内各行业的用地面积、用冷面积、用热面积、用电面积、用冷指标、用热指标、用电指标以及地区能源价格等综合能源系统基础数据进行汇总输入。

运行仿真后, 系统不仅可以查看优化计算结果数据和评价指标数据, 而且可以根据优化计算结果, 生成方案整体成本数据以及典型日电、冷、热供需平衡结果数据, 以图表方式展示, 并可将其导出至电脑, 生成计算结果报表。

此外, 系统基础设置可对系统设备参数库、系统页面设置等进行更改, 支持用户管理模式, 为相关使用人员提供良好的简体中文人机操作界面。

4 系统开发与应用

研究开发具有实用性能的用户级综合能源仿真分析系统, 不仅能够辅助工作人员制定更为合理的优化调度方案, 还能够全面地评估不同目标容量配置的经济性能, 对于综合能源系统优化规划工作的效率和正确性以及保证综合能源系统的安全可靠性和运行经济性都有着重要的理论价值和现实意义。

4.1 系统开发

本文研究开发的用户级综合能源仿真分析系统根据用户对不同能源型式的需求, 利用区域内可获得的能源型式, 优化组合各种能源转换装置, 满足用户长期变化的供能需求, 确保经济、环保等方面的综合效益最大化, 系统主界面如图 5 所示。



图 5 综合能源系统仿真软件主界面

Fig. 5 Main interface of integrated energy system simulation software

本系统利用 Visual Studio 开发工具对综合能源系统进行建模, 将设备的参数、状态结合在一起。采用 Microsoft Office Access 对数据进行有效集中和分布式存储, 为数据在备份及安全管理提供强有力的支持, 减少由于数据分散所带来的日常维护问题, 同时采用 C/S 架构而不是 B/S 架构, 使得数据都存储在本地计算机中, 满足“重要数据不放到公网上”的安全性要求。采用 C#, C++ 等开发语言编程对系统算法进行编程, 利用计算机的快速计算和可视化展示功能, 服务于使用软件的电力及综合能源业务人员。充分利用可视化展示功能, 对行业负荷特性、区域用能需求、系统结构设计、运行仿真结果均可用图表形式展示。

4.2 系统应用

如图 6 所示, 本文所研发的用户级综合能源仿真分析系统的仿真分析过程分为 5 个步骤, 分别为初始化综合能源园区基础数据、查看区域用能数据、结构设计及参数设定、运行仿真以及可视化显示。

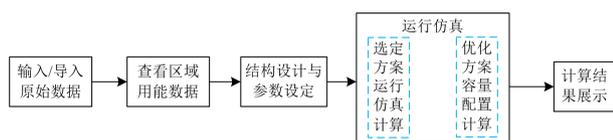


图 6 综合能源系统仿真过程

Fig. 6 Simulation process of integrated energy system

本文以南方某地区用户级综合能源示范区为例, 进行优化计算和结果分析。园区用能行业信息如表 1 所示。

表 1 示范区用能行业信息

Table 1 Energy industry information of demonstration area

行业类型	写字楼	商场	酒店
建筑面积/m ²	9 361	3 000	109 494
供冷面积/m ²	9 000	2 250	72 800
供热面积/m ²	9 000	2 250	72 800
用电指标/(W/m ²)	30	35	30
用冷指标/(W/m ²)	200	200	129.12
用热指标/(W/m ²)	40	40	36

示范区日负荷曲线可在系统里查看, 采用软件对园区全年用能情况分析如表 2 所示。

表 2 示范区用能情况表

Table 2 Energy use of demonstration area

	全年用能/ kWh	最大值/MW	利用小时数/h	不均衡 系数
电能	19 041 490	3.66	5 203	87.78%
冷能	42 141 120	11.37	3 703	77.32%
热能	8 635 640	2.98	2 830	66.36%

园区含有燃气内燃机、燃气热泵、双工况冷机、光伏机组等设备, 分别采用整体经济效益最优(方案一)、运营环节效益最优(方案二)以及综合能效最优(方案三)作为优化目标进行计算分析, 园区经济性与环保性相关指标如表 3 所示, 各方案中的供能设备容量配置如表 4 所示。

表 3 不同方案下评价指标对比

Table 3 Comparison of evaluation indicators under different schemes

方案	整体经济效益/万元			运营环节 效益/ 万元	综合 能效/ 吨标煤	
	建设 费用	运维 费用	购能 费用 合计			
方案一	187	6	2 845	3 037	2 851	11 430
方案二	162	5	3 212	3 379	3 217	12 957
方案三	335	10	2 758	3 103	2 768	9 967

表 4 不同方案下设备容量配置

Table 4 Device capacity configuration under different schemes

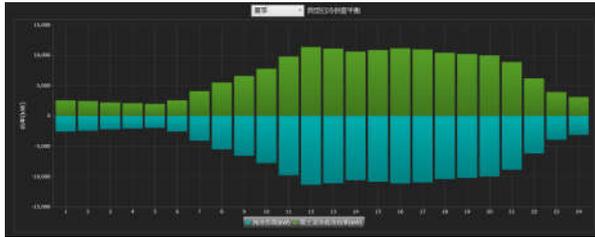
设备	kW		
	方案一	方案二	方案三
燃气内燃机	3 000	3 000	3 000
双工况冷机	12 000	—	—
燃气热泵	1 000	—	10 000
常规冷机	—	12 000	1 000
溴冷机	—	—	11 000

由表 3 可知, 在不同优化目标下, 各方案的整体经济效益、运营环节效益以及综合能效各不相同。结合表 4 可知, 方案一以整体经济效益最优为目标, 考虑到设备全寿命周期内的建设、运维以及购能成本, 配置燃气内燃机和燃气热泵供热、双工况冷机供冷; 方案二以运营环节效益最优为优化目标, 为保障运营环节售能收入最大化, 因此仅配置燃气内燃机和常规冷机, 与方案一对比虽减少了建设费用, 但同时增加了大量购能费用, 且会带来更多的环保问题; 方案三以综合能效最优为优化目标, 配置了较多节能设备, 采用燃气热泵供热、溴冷机供冷, 具有更好节能效果, 因而整体建设费用较高, 且运营环节效益指标也相对较低。

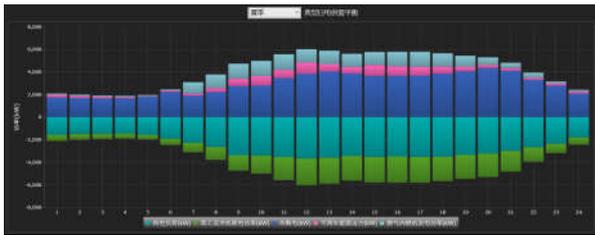
总体看来, 方案一在整体经济效益方面优于方案二、方案三, 运营环节效益和综合能效适中。考虑到该示范区由同一主体投建和运营, 主要以盈利为目的, 因而方案一对于投资方来说是比较合理的规划方案。根据该园区分布式能源站项目可研报告, 实际装机为 2 000 kW 发电机组、9 648 kW 电制冷机系统、1 050 kW 燃气热水锅炉系统, 与软件的仿

真分析结果基本一致，从而验证了本文所开发的仿真分析系统计算结果的合理性和有效性。

在该配置方案下，对系统设备的运行控制进行优化，其中，夏季典型日冷/电负荷供需平衡如图 7 所示。



(a) 冷供需平衡



(b) 电供需平衡

图 7 夏季典型日能量供需平衡图

Fig. 7 Energy supply and demand balance in summer typical day

5 结论

本文所研发的用户级综合能源仿真分析系统具备负荷水平分析、容量最优配置和优化运行等功能，同时充分考虑到不同主体的需求，具有整体经济效益最优、运营环节效益最优以及综合能效最优多个备选优化目标，能够实现综合能源系统内设备容量配置优化以及包含电/气/热/冷等多种能源的运行仿真分析。通过南方某地区用户级综合能源示范区的仿真分析结果与实际建设规模进行对比，验证了系统的有效性与实用性。

该系统以用户级综合能源系统整体构架和逻辑构架为设计思路，将界面开发技术、算法开发技术、数据库技术和综合能源系统规划技术相结合，并充分利用计算机的快速计算和可视化展示功能，能够有效提升规划设计工作的效率，为综合能源系统规划设计提供技术支撑。

参考文献

[1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
 ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al.

Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.

[2] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未來综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3023-3034.
 LIU Dichen, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3023-3034.

[3] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
 JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.

[4] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
 WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.

[5] JIANG X S, JING Z X, LI Y Z, et al. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system[J]. Energy, 2014, 64(1): 375-388.

[6] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.
 ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/ thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.

[7] ZHAO Mingjie, SHI Junhui, LIN Cheng. Optimization of integrated energy management for a dual-motor coaxial coupling propulsion electric city bus[J]. Applied Energy, 2019, 243: 21-34.

[8] MORADI S, GHAFFARPOUR R, RANJBAR A M. Optimal integrated sizing and planning of hubs with midsize/large CHP units considering reliability of supply[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 974-992.

[9] 李阳, 郇嘉嘉, 曹华珍, 等. 基于综合能源协同优化的

- 配电网规划策略[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1393-1400.
- LI Yang, HUAN Jiajia, CAO Huazhen, et al. Distribution network planning strategy based on integrated energy collaborative optimization[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1393-1400.
- [10] SANJARI M J, KARAMI H, YATIM A H. Application of hyper-spherical search algorithm for optimal energy resources dispatch in residential microgrids[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 15-23.
- [11] 郝超超, 李晓明, 刘胜, 等. 基于 MILP 模型的多主体平衡的微网日前最优调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 32-39.
- HAO Chaochao, LI Xiaoming, LIU Sheng, et al. Day-ahead optimal dispatch for multi-agent balanced micro grid based on MILP model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 32-39.
- [12] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.
- CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 9-16.
- [13] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy inter-net[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [14] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.
- SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [15] 程浩忠, 胡焱, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.
- CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13.
- [16] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1265-1279.
- [17] MOEINI-AGHTAIE M, ABBASSPOUR A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 707-716.
- [18] 刘洪, 陈星屹, 李吉峰, 等. 基于改进 CPSO 算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 193-200.
- LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional power-heat integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 193-200.
- [19] BISWAS P P, SUGANTHAN P N, MALLIPEDDI R. Optimal reactive power dispatch with uncertainties in load demand and renewable energy sources adopting scenario-based approach[J]. Applied Soft Computing, 2019, 75: 616-632.
- [20] MEHLER E D, SARIMVEIS H, MARKATOS N C, et al. A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level[J]. Energy, 2012, 44(1): 96-104.
- [21] 中华人民共和国行业标准公告[J]. 中国标准化, 2019(5): 157-178.
- People's Republic of China industry standard announcement[J]. China Standardization, 2019(5): 157-178.
- [22] 高亚静, 孙永健, 杨文海, 等. 基于非参数核密度估计和改进谱多流形聚类的负荷曲线分类研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1605-1612.
- GAO Yajing, SUN Yongjian, YANG Wenhai, et al. Load curve classification based on nonparametric kernel density estimation and improved spectral multi-manifold clustering[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1605-1612.

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-07-15

作者简介:

郇嘉嘉(1983—), 女, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划, 综合能源系统研究; E-mail: winnie5983@163.com

曾诚玉(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统。E-mail: zcytracy@hnu.edu.cn

(编辑 许威)