

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.04.002

# 区域综合能源仿真优化系统的研制

Research and development of integrated community energy simulation-optimization system

孙浩<sup>1</sup>,傅金洲<sup>2</sup>,鄢小虎<sup>3</sup>,何国鑫<sup>2</sup>,陈永华<sup>2</sup>

SUN Hao<sup>1</sup>,FU Jinzhou<sup>2</sup>,YAN Xiaohu<sup>3</sup>,HE Guoxin<sup>2</sup>,CHEN Yonghua<sup>2</sup>

(1.中国大唐集团新能源科学技术研究院有限公司,北京 100040;2.南瑞集团有限公司,南京 211100;

3.深圳职业技术学院 人工智能学院,广东 深圳 518055)

(1.China Datang Corporation Renewable Energy Science and Technology Research Institute Company Limited,

Beijing 100040,China;2.NARI Group Corporation,Nanjing 211100,China;3.School of Artificial Intelligence,

Shenzhen Polytechnic,Shenzhen 518055 China)

**摘要:**针对区域综合能源运行仿真优化技术的研究现状,提出了仿真优化系统的技术实现构架,研制了区域综合能源仿真优化分析系统。按照能量3个梯度逐级利用的思想,在统一的平台架构下实现区域多能流的建模、仿真、优化调度,并完成各专业领域元件的建模与仿真。采用CPLEX对构建的优化模型进行求解计算,形成系统各设备在整个优化时段内的出力曲线及目标函数值。研制的仿真系统可应用于区域综合能源系统的仿真,实现区域综合能源系统中能量流与信息流之间的交互,形成最优化的调度策略。

**关键词:**区域综合能源;仿真优化;多能流;建模;功能模型接口;功能模型单元;能量梯级利用;综合能源系统

**中图分类号:**TM 732;TK 01\*8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)04-0008-06

**Abstract:** According to the research on simulation optimization technology applied in regional integrated energy operation, a technical framework built on this technology and a regional integrated energy simulation optimization system are proposed. Under a unified platform architecture, the modeling, simulation and optimization scheduling for regional multiple energy flows are realized. According to the idea of trinary-level energy cascade utilization, models in different fields are built under the unified architecture, and the simulation system is developed. Taking CPLEX to solve the optimized model, output curve and objective function values of each equipment during the optimization can be obtained. This simulation system can be applied in regional integrated energy, to achieve the communication between energy flows and information flows and acquire the optimal scheduling strategy.

**Keywords:** integrated community energy; simulation-optimization; multi-energy flow; modeling; functional mock-up interface; functional mock-up unit; energy cascade utilization; integrated energy system

## 0 引言

能源是人类赖以生存和开展各类社会活动的基础。近年来,可再生能源相关技术发展迅速,源端与受端的能源多样化发展以及能源传输与设备的革新促使能源系统进一步耦合。传统的能源系统存在不同能源独立规划、运行的问题。能源互联网的概念应运而生,为能源分析提供了全新视角,带动了多领域、多学科、多维度间的交融与革新<sup>[1-3]</sup>。

近期,在能源互联网的建设过程中,位于用户侧的区域综合能源系统(Integrated Community

Energy System, ICES)成为热点。ICES由中低压配电系统、中低压天然气系统、供热系统、供冷系统等供能网络耦合相连而成,可以对用户侧的自然资源实现充分利用。多能源系统联合运行,对于构建能源互联网、提高能源利用率、建设环境友好型社会有着显著意义<sup>[4-5]</sup>,但基础性技术问题尚未得到解决,实用化的综合能源系统统一建模仿真、优化调度技术手段尚未出现。目前学术界虽然建立了各类仿真建模模型和框架,但普遍存在元件库缺失、迭代求解算法复杂、未能得到严格验证等问题,离工程化实用尚有较大差距<sup>[6-7]</sup>。

对于综合能源系统仿真优化,国内外专家进行了一系列的研究工作。文献[8]基于瞬时系统模拟程序(TRNSYS)设计了一套冷热电联供系统,研究

收稿日期:2020-06-16;修回日期:2021-01-21

基金项目:海南省重大科技计划项目(ZDKJ2020013);深圳职业技术学院青年创新项目(6021310008K)

结果为小型冷热电联供系统的配置设计与运行管理提供了参考。文献[9-10]开发能源互联网建模仿真工具 CloudPSS, 结合互联网、云计算、人工智能等综合分析工具, 为用户提供面向交直流混联电网、可再生能源发电、微电网、配电网、供热网等多种能源网络的建模及仿真分析功能。文献[11]基于能源集线器的概念, 建立了冷、热、电三联供 (Combined Cooling, Heating and Power, CCHP) 系统的能量流模型, 提出了一种电-气耦合微能源网的能量流计算方法, 以 OpenDSS 和 MATLAB 为平台, 对含 CCHP 的微能源网进行综合仿真。文献[12]建立了统一的综合能源系统建模与仿真平台, 提出了跨平台联合数字仿真技术方案。选择开源的瞬时系统模拟程序 TRNSYS 软件, 利用其丰富的热力学元件库, 与 MATLAB/Simulink 构建综合能源联合仿真平台来满足综合能源深层次的仿真需求。

国外, 文献[13]对 ICES 中的生产、传输、转换、存储和消费环节进行了稳态建模, 提出了能源集线器的概念和数学模型, 并围绕这种能源耦合单元研究了设备配置、潮流计算和调度问题。文献[14]以耦合能源系统为研究对象, 基于能源集线器对多能流综合潮流进行系统解耦, 探究了能源互补的协同效应。文献[15]研究了美国综合能源系统的经济性依赖问题, 应用网络流建模仿真技术, 实现单独定义不同子系统的仿真时间和步长, 求解效率高, 对描述综合能源系统的高维特性具有重要意义。

针对现状, 研发了一种综合能源仿真优化系统, 面向融合电-冷-热-气等多种类型能源的综合能源系统提供建模仿真、优化分析的辅助工具。

## 1 需求分析

### 1.1 总体需求

区域综合能源仿真优化系统是针对园区终端客户的综合能源系统辅助分析工具, 在园区能源需求和综合能源供应中寻找最优的综合能源解决方案。园区级别综合能源规划的特点是电力并网, 部分区域允许向电网反送电, 需要考虑大电网的影响; 冷热等能源形式在园区内平衡消纳, 简化了部分综合能源系统的网络约束问题。

区域综合能源仿真建模是建立一组数学方程, 用来表达由电, 气, 热, 冷等多种形式能源构成的综合能源系统的运行机理。软件系统需包含光伏、燃气锅炉、CCHP、空气源热泵、储能等设备在内的面向运行优化的电、冷、热基础模型库。仿真是在给定某些系统运行参数和外部约束条件的情况下, 对用来表达系统模型的数学方程组进行求解的过程。

建模仿真软件系统需要建立集电力仿真, 冷热仿真, 联合仿真于一体的运行仿真。

运行优化是基于仿真分析的结果, 针对综合能源系统各设备在各时段的出力进行优化计算。用户可根据实际需求配置系统内设备的种类、数量与参数, 生成包括目标函数与约束条件在内的优化模型, 进行求解计算。输出结果为系统各设备在整个优化时段内的出力曲线及目标函数值。

因此, 在区域综合能源仿真分析系统开发过程中, 不同时间尺度多能流统一平台建模是仿真系统的核心, 行之有效的多能流交互机制和高效的优化求解算法是系统实现的关键技术。

### 1.2 系统功能

区域综合能源仿真分析系统分为4个功能模块: 统一建模、联合仿真、优化调度和结果展示, 如图1所示。

系统采用统一风格的用户图形界面, 辅助用户在友好的环境下完成电、气、热、冷不同物理系统模型及综合能源系统模型的建立。系统具备图形化的模型建立、修改、转换等模型管理功能, 还可以灵活方便地对仿真参数和流程进行设置, 同时具备仿真结果可视化及输出文件格式转化等功能。

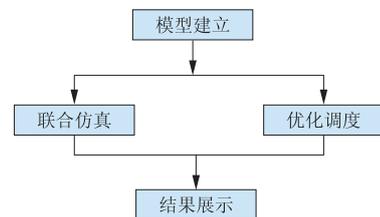


图1 区域综合能源仿真分析系统功能模块

Fig. 1 Functional modules of regional integrated energy simulation analysis system

研究如何横跨多个物理领域进行仿真分析, 如何用正确的方法融合不同类型能源, 进而正确表达综合能源系统的运行机理和特点是研究的重点之一。目前 ICES 中多能流系统之间属于松耦合, 耦合的焦点在于耦合元件。现阶段如果采用多能流求解算法, 由于多能流之间时间尺度和仿真精度之间的矛盾特性, 会降低系统的执行效率, 无法兼顾不同能量流对快速性和准确性的要求。因此, 对于技术成熟的电、冷/热、气独立仿真系统, 采用功能模型接口 (Functional Mock-up Interface, FMI) 技术, 合理定义接口, 实现相互调用, 不仅可以丰富系统功能, 提高系统运行的效率, 同时可以方便后续的扩展, 减少不必要的开发工作量。

运行优化模块可以作为一个相对独立模块运行, 主要功能为针对综合能源系统各设备在各时段

的出力进行优化计算。模块包含光伏、储能、CCHP、燃气锅炉等设备模型库,用户可根据实际需求配置系统内设备的种类、数量与参数,生成包括目标函数与约束条件在内的优化模型,并调用CPLEX对构建的优化模型进行求解计算。输出结果为系统各设备在整个优化时段内的出力曲线及目标函数值。

综合能源系统联合仿真分析流程为:基于能量梯级利用的思想,按照3级能量流动的顺序选择多能流设备,建立多能流网络耦合节点;在不同能源领域建立各自的网络和系统模型;基于FMI标准封装方法,将电力、冷/热、燃气仿真模块建立的模型封装形成可调用的功能模型单元(Functional Mock-up Unit, FMU),根据多个FMU之间的数据传递方式,确定构成的综合能源系统模型拓扑结构;通过仿真管理器,根据多个FMU的仿真步长设定最小公倍数仿真步长,后续仿真过程中将在最小公倍数仿真步长处进行数据交换;仿真调度管理器执行对应的调度管理策略,协调电力、冷/热、燃气多个FMU联合仿真运行;基于仿真模型和参数形成优化运行的约束条件,基于仿真分析数据和外部输入数据进行优化调度策略分析;最终直观展示基于仿真形成的优化调度策略,以及在此策略下各设备的运行数据。

## 2 能量梯级利用的建模方法

按照能源源流动和梯级利用的原理,构建综合能源仿真系统。将能源利用划分为3个梯度,分别为:一次能源、二次能源和终端能源。其中一次能源主要包括煤、石油、天然气、水能、太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能等;二次能源主要为电能和氢气;终端能源为冷和热,如图2所示。

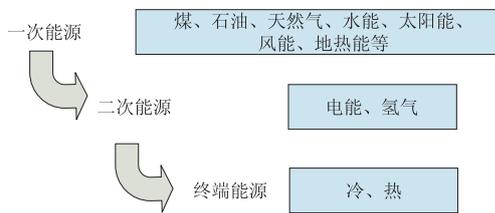


图2 能量梯级利用

Fig. 2 Cascade utilization of energy

按照能源从第1梯度向第2,3梯度流动的原则,分层次、分步骤进行综合能源仿真系统设计;同时根据不同梯度能源流动和转换的规则,编排组合编码综合能源系统中的各种能量转换系统和设备,按照预先设定的能源流动规则定义封装各类系统或装置的输入、输出,使得复杂繁琐的综合能源子系统及其装置化繁为简,有利于程序设计与开发。

## 3 联合仿真

区域综合能源仿真优化系统以“源、网、荷、储”全过程仿真模型为内核,构建对综合能源应用场景的仿真模拟、优化运行能力,采用基于国际通用的FMI技术,实现电网、冷/热网联合仿真,既保证子系统间的相对独立性、完整性,亦可进行动态组合。通过联合仿真计算引擎实现步长调节和数据交互两大功能。步长调节实现不同FMU之间仿真步长协调一致;数据交互实现交换不同FMU中的实时仿真数据,确保联合仿真过程状态及时更新与有序推进;联合仿真过程中,电力、冷/热、燃气能源系统的仿真运行数据可通过预留的数据存取接口输出,供其他系统调用处理。

联合仿真系统功能如图3所示,各功能模块建立的模型既可以单独实现电力、冷/热、燃气仿真,也可以根据联合仿真需求将模型封装成FMU的形式,实现联合仿真。FMI标准封装,既保留各专业领域系统仿真工具的专业性和完整性,还为仿真调度管理器提供标准的调用接口,方便FMU之间以及仿真系统与第三方软件的扩展,增强系统的耦合特性。

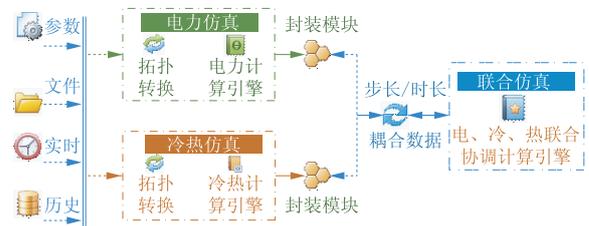


图3 联合仿真系统功能

Fig. 3 Function of joint simulation system

时间同步机制是联合仿真实实现的关键。以电力、冷/热、燃气3个FMU为例,基于FMI协议构成联合仿真系统。联合仿真系统的主步长根据电力、冷/热、燃气3个FMU独立仿真步长计算出的最小公倍数确定。在每一个主步长时刻(如 $t_1$ ),实现电力、冷/热、燃气3个FMU之间的数据交互。电力FMU和冷/热FMU仿真步长为电力FMU和冷/热FMU独立仿真步长的最小公倍数,在 $t_{01}$ 时刻实现电力FMU和冷/热FMU之间的数据交互。电力FMU和燃气FMU仿真步长为电力FMU和燃气FMU独立仿真步长的最小公倍数,在 $t_{02}$ 时刻实现电力FMU和燃气FMU之间的数据交互。在每一个主步长时刻,电力FMU、冷/热FMU、燃气FMU获得新的状态值后进行计算,如计算收敛则继续执行下一个次步长的迭代计算,直至到达第 $n$ 次数据交换时间点,联合仿真计算结束,如图4所示。

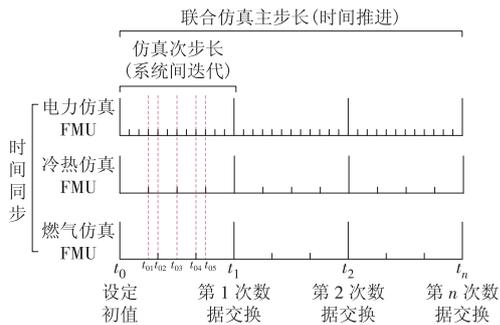


图 4 联合仿真时间同步  
Fig. 4 Time synchronization

## 4 运行优化

### 4.1 CPLEX 软件

CPLEX 是 IBM 公司推出的优化引擎,可用于求解线性规划(LP)、二次规划(QP)、二次约束二次规划(QCQP)、二阶锥规划(SOCP)等 4 类基本问题,以及相应的混合整数规划(MIP)问题。使用 CPLEX 的数学优化技术可以就综合能源的高效利用做出更佳决策,将复杂的综合能源业务问题表示为数学规划(Mathematic Programming)模型,便于用户快速找到这些模型的调度运行方案。

### 4.2 功能设计

数据输入与处理流程如图 5 所示。

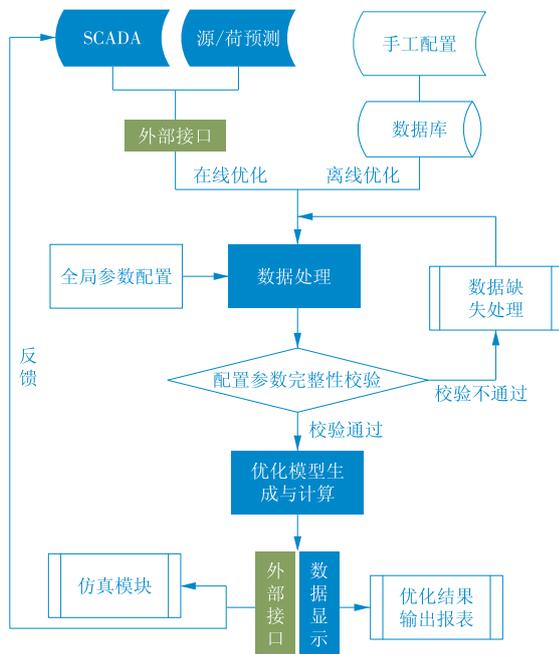


图 5 数据输入与处理流程  
Fig. 5 Data input and processing flow

由图 5 可见,用户可通过在图形界面上添加/删除设备以及编辑设备参数(离线优化),或从数据采集与监视控制(SCADA)系统中实时读取系统参数(在线优化)等方式搭建综合能源系统的运行优化模型,并在配置优化时长、计算步长以及优化目标

等全局参数后调用 CPLEX 对所构建的优化模型进行求解计算。优化计算所得结果以 .csv 格式的文件存储,可以经过处理后以报表或曲线图形式输出供用户调阅,也可以直接作为外部接口输出文件供仿真模块做仿真验证或反馈给 SCADA 系统作为系统的出力策略。

### 4.3 参数设置

本功能模块主要用于收集搭建优化运行模型所需要的各项配置参数,主要分为全局配置参数和系统配置参数。全局配置参数为运行优化工程算例的整体环境参数,其配置形式为由用户在交互界面上输入进行配置。所需配置的参数主要包括:优化时长、优化步长、电网电价、上网电价、燃气价格、多目标优化配置。其中多目标包括经济性、供电安全程度、污染物排放 3 个选项。

系统配置参数为待优化的系统参数。配置方式为用户通过直接在工程图界面上添加或删除各种设备对应的图像元素,并在图像元素之间绘制连线,配置待优化的综合能源系统设备组成及拓扑结构。

关于具体设备参数的配置方法,离线优化采用由用户直接在交互界面上输入的方法进行配置,参数存入数据库中供后续程序读取;在线优化配置方式则根据各设备编号从 SCADA 系统中直接获取或经过运算出力后获取,所需配置的参数类型与离线优化相同。

### 4.4 单目标运行优化

本模块功能为,当用户选择的优化目标仅为 1 项时,根据所配置的信息生成优化模型,并调用 CPLEX 进行求解后输出优化结果。单目标优化功能流程如图 6 所示。

优化程序运行结束后,运行结果以报表的形式输出,主要包含系统的各项信息、目标函数的值,以及各设备在优化时段内的出力曲线。用户还可通过点击设备 ID 的方式获取该设备详细的出力数值。

### 4.5 多目标运行优化

以 3 个优化目标为例介绍多目标运行优化,此时的目标函数为

$$\min f = aObj1 + bObj2 + cObj3,$$

式中:Obj1, Obj2 和 Obj3 分别为 3 个优化目标各自的目标函数, a, b, c 为目标的权重系数。三目标优化的实现方法与双目标相同,既将多目标优化问题简化为一个多次循环运行的单目标优化问题。但由于优化目标是 3 个,所以循环方式为内外双层循环,循环逻辑如图 7 所示。

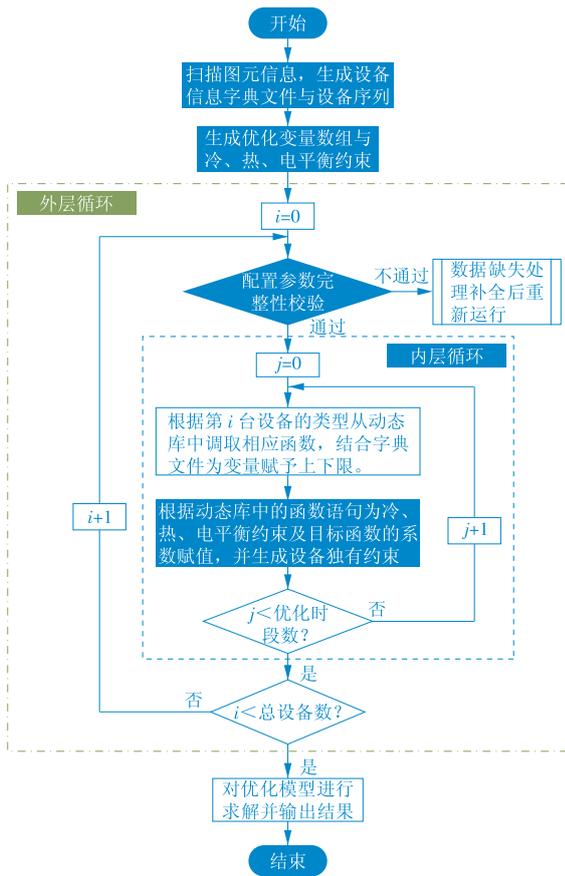


图 6 单目标运行优化流程

Fig. 6 Single objective optimization flow

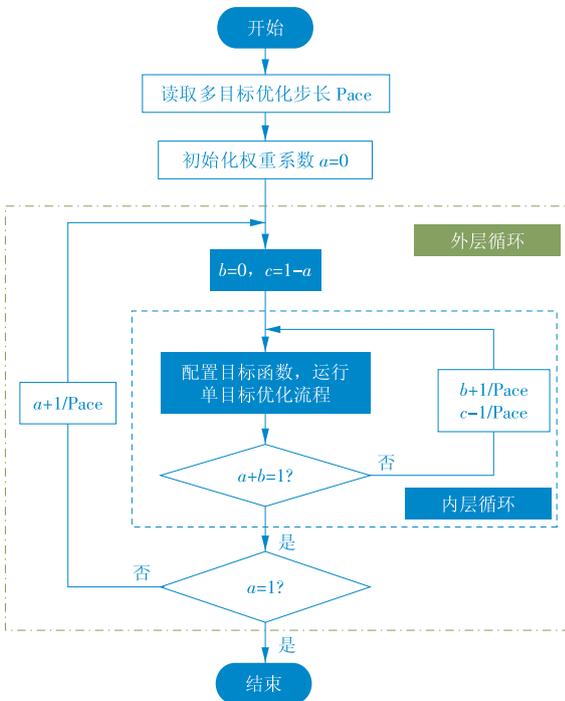


图 7 三目标运行优化流程

Fig. 7 Three-objective optimization flow

### 5 结论

研制区域综合能源仿真系统,实现电-冷-热-气系统的联合仿真和优化,统一的建模界面为用户

提供了友好的操作界面,开放的架构体系兼容第三方软件,为解决区域综合能源示范应用中的技术难点提供支撑平台,同时也为综合能源其他技术提供现实可行的仿真解决方案。本研究成果可以进一步拓展应用,实现多软件平台的数字联合仿真,也为硬件在环仿真、物理模型仿真等后续工作提供了技术支撑。

### 参考文献:

[1]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 internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.

[2]HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.

[3]韩峰,张行国,严矫平,等.综合能源服务业务和合作模式[J].华电技术,2019,41(11):1-4.  
HAN Feng, ZHANG Yanguo, YAN Jiaoping, et al. Integrated energy service and cooperation modes [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 1-4.

[4]贾宏杰,穆云飞,余晓丹.对我国综合能源系统发展的思考[J].电力建设,2015,36(1):16-25.  
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.

[5]刘爱国,张士杰,肖云汉.微燃机与小燃机在南方地区分布式联供系统中的应用比较[J].燃气轮机技术,2009,22(3):1-9.  
LIU Aiguo, ZHANG Shijie, XIAO Yunhan. Comparison of the application in CCHP between micro turbines and small gas turbines in southern China [J]. Gas Turbine Technology, 2009, 22(3): 1-9.

[6]ROSATO A, SIBILIO S, CIAMPI G. Energy, environmental and economic dynamic performance assessment of different micro-cogeneration systems in a residential application [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 59(1-2): 599-617.

[7]ZHUO C. Absorption heat transformer with TFE-Pyr as the working pair [D]. Delft: Delft University of Technology, 1998.

[8]魏大钧.小型冷热电联供系统多目标优化设计与能量管理策略研究[D].济南:山东大学,2016.

[9]SONG Y, CHEN Y, HUANG S, et al. Fully GPU-based electromagnetic transient simulation considering large-scale

control systems for system-level studies [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(11): 2840-2851.

[10] SONG Y, CHEN Y, HUANG S, et al. Efficient GPU-based electromagnetic transient simulation for power systems with thread-oriented transformation and automatic code generation [J]. IEEE Access, 2018(6): 25724-25736.

[11] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮. 含冷热电三联供的微能源网能量流计算及综合仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 22-27.

MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang. Energy flow calculation and integrated simulation of micro-energy grid with combined cooling, heating and power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 22-27.

[12] 孙浩, 陈永华. 综合能源系统多能流联合仿真技术研究[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 66-72.

SUN Hao, CHENG Yonghua. Research and development of community comprehensive energy simulation optimization system [J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 66-72.

[13] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems [D]. Graz: Graz University of Technology, 2007.

[14] MOEINI-AGHTAIE M, ABBASPOUR A, FOTUHI

FIRUZABAD M, et al. A decomposed solution multiple-energy carriers optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 707-716.

[15] QUELHAS A, MC-CALLEY J D. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 837-844.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

孙浩(1982—),男,辽宁铁岭人,高级工程师,硕士,从事综合能源仿真技术研究工作(E-mail: 2007sunhao@163.com)。

傅金洲(1988—),男,江苏南京人,工程师,从事综合能源仿真技术研究工作(E-mail: fujinzhou@sgepri.sgcc.com.cn)。

鄢小虎(1986—),男,湖北武汉人,高级工程师,从事图像处理、智能优化、综合能源仿真等技术研究工作(E-mail: yanxiaohu@szpt.edu.cn)。

何国鑫(1994—),男,江苏南京人,工程师,从事综合能源仿真技术研究工作(E-mail: heguoxin@sgepri.sgcc.com.cn)。

陈永华(1977—),男,湖北钟祥人,高级工程师,从事综合能源仿真技术研究工作(E-mail: chen Yonghua@sgepri.sgcc.com.cn)。

\*\*\*\*\*

广 告 索 引

郑州科润机电工程有限公司 .....	(后插 1)	华电重工股份有限公司(跨版) .....	(后插 12,13)
华电水务科技股份有限公司(跨版) .....	(后插 2,3)	中国华电科工集团有限公司总承包	
华电环保系统工程有限公司(跨版) .....	(后插 4,5)	分公司(跨版) .....	(后插 14,15)
中国华电科工集团有限公司新能源		华电技术(跨版) .....	(后插 16,17)
技术开发公司 .....	(后插 6)	山东华电节能技术有限公司 .....	(后插 18)
国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术		华电科工安全环境质量科学研究所 .....	(后插 19)
研发(实验)中心 .....	(后插 7)	环保公益广告 .....	(后插 20)
华电分布式能源工程技术有限公司 .....	(后插 8)	华电郑州机械设计研究院有限公司 .....	(封三)
华电通用轻型燃机设备有限公司 .....	(后插 9)	中国华电科工集团有限公司 .....	(封底)
郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版) .....	(后插 10,11)		