

综合能源系统优化运行研究现状及展望

郭创新, 丁筱

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Research Status and Prospect of Optimal Operation of Integrated Energy System

GUO Chuangxin, DING Xiao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

摘要: 为了充分消纳清洁能源、提高能源利用效率, 综合能源系统的概念应运而生, 相较于传统的能源单级利用形式, 综合能源系统对电力、冷热和天然气等多种形式能源进行多级利用, 通过多能互补提高综合能源利用效率。但是综合能源系统由于系统间耦合紧密, 能源流动变化复杂, 在优化运行方面相较于传统电网有较大差别。针对综合能源系统优化运行问题的研究现状进行了全面整理, 首先介绍了综合能源系统的组成, 对电力、热力和天然气的网络潮流模型的研究现状进行了归纳分析; 其次对优化运行方法进行了分类总结, 分析了现有方法的优缺点和难点; 最后进行了展望, 指明了综合能源系统优化运行未来的研究方向。

关键词: 综合能源系统; 电气; 电热; 优化运行; 研究现状

ABSTRACT: In order to fully consume clean energy and improve energy efficiency, the concept of integrated energy system was put forward. Compared with the traditional single-stage energy utilization, integrated energy system makes multi-level use of various forms of energy such as power, heat and cold and natural gas, and achieves the improvement of integrated energy utilization efficiency through multi-energy complementarity. However, due to the close coupling between the systems and the complex changes of energy flow, the integrated energy system is quite different from the traditional power grid in terms of optimal operation. The research status of optimal operation of integrated energy system was comprehensively sorted out. Firstly, the composition of integrated energy system was introduced. The research status of power, heat and natural gas network power flow models was summarized and analyzed. Secondly, the optimal operation methods

were classified and summarized, and the advantages, disadvantages and difficulties of existing methods were analyzed. Finally, the future research direction of the integrated energy system was pointed out.

KEY WORDS: integrated energy system; electricity-gas; electricity-heat; optimal operation; research status

0 引言

国际能源署(international energy agency, IEA)发布的《世界能源展望 2014》^[1]报告对 2040 年的全球能源图景进行了展望: 全球一次能源需求将增长 37%, 其中石油、天然气、煤炭和可再生能源的占比将平分秋色, 预测到 2030 年, 天然气将占到所有一次能源消耗的 28%, 到 2050 年将达到 50%。以电力、天然气、热力等多种网络系统闭环运行作为主要特征的能源互联网的发展, 推动了分布式可再生能源的大规模利用, 也使用户更广泛和深入地参与系统运行成为可能, 从而改变能源利用模式, 推动经济与社会可持续发展。相比于煤炭发电, 燃气机组具有发电效率高、环境友好度强及可快速启停等优点。随着中国能源需求迅猛增长以及天然气资源进入大规模开发利用阶段, 燃气机组正进入“大规模增长”阶段。根据“十三五规划”, 全国燃气轮机联合循环机组装机容量将在 2020 年达到 5 500 万 kW, 是 2000 年之前 50 年已建成同类机组装机容量的 25 倍^[2]。据统计, 从 1980 年到 2018 年, 美国天然气机组发电占比提升了 64%。天然气系统与电力系统类似, 具有对应的发输配网络, 两者之间可以通过耦合设备实现能量双向传递, 从而实现新能源的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877190)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877190).

消纳、灵活运行。除此之外,为进一步提高能源的利用率,对发电机组的余热进一步利用,即采用热泵等电-热设备进行耦合运行。电力系统与天然气系统、热力系统在生产、传输、分配、使用每个运行环节都存在深度耦合,电网的运行控制也依赖天然气网络和热力网络的配合。多种能源系统间的深度耦合构成了现代综合能源系统,可实现能源的梯级利用和互补互济。

综合能源系统相较于传统电网有较大差别,能量流动更加复杂,优化运行涉及更多的利益主体。当前,电力系统与天然气系统、热力系统是相互独立、高度自治的系统,运行控制由各自的运营机构独立执行,传统的集中式优化策略未必适用。同时随着负荷和网络复杂度增加,综合能源系统的稳定运行正面临巨大挑战,各种极端外部自然灾害给能源系统带来了严峻的挑战。这类灾难发生的概率虽小,但发生后的损失却可能极为巨大。所以,对于综合能源系统优化运行的研究具有十分重要的价值。本文针对综合能源系统的优化运行问题,对其研究现状进行了分析。首先介绍了综合能源系统的组成和元件模型,对于关键元件、关键技术做了重点阐述;其次对运行方法进行了归纳,分析了现有方法的优缺点和难点;最后对综合能源系统的优化运行进行了展望,

指明了未来的研究方向。

1 综合能源系统架构与建模

1.1 综合能源系统的架构

综合能源系统是指以先进电力电子控制技术和高级通信采集技术为基础,具有高灵活性、高韧性运行特点,多种能源协调运行的能源供给系统^[3]。综合能源系统具有3种结构类型:跨区级综合能源系统、区域级综合能源系统和园区级综合能源系统。跨区级综合能源系统主要由输电网、天然气骨干网络等远距离大容量设备组成。区域级综合能源系统主要由中压配电网、配气网、配热网组成,各网络呈现辐射状结构。园区级综合能源系统定位于小型范围内的用户侧能源管理,可以实现智能用电系统、分布式供热供水、需求侧管理等功能。本文选择区域级综合能源系统作为分析研究对象。图1为一个基本的综合能源系统,包括天然气、电力、冷热等能源的配送网络以及负荷和能源转化设备等。天然气通过热电联合(combined heat-power, CHP)转化成电力,其中余热锅炉通过燃气轮机发电过程中产生的余热提供热力供应。电力通过P2G(Power to Gas)设备转化成天然气供应,同时通过热泵转化成热供应,或通过吸收式制冷机进一步转换为冷供应。

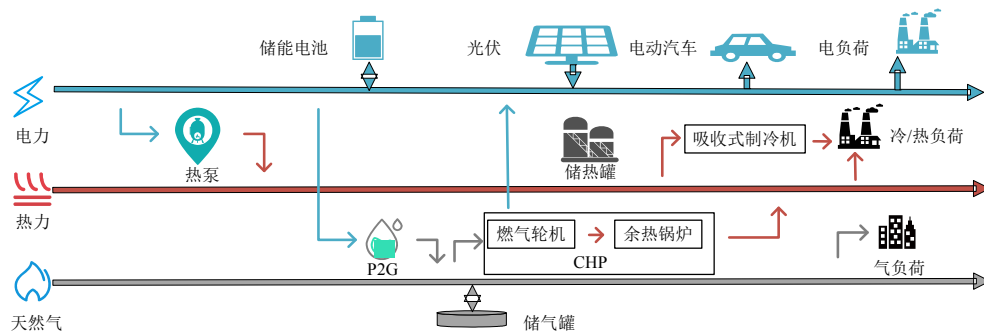


图1 综合能源系统结构图

Fig. 1 Structure of integrated energy system

1.2 综合能源系统的网络潮流分析

综合能源系统的网络潮流分析是优化运行的基础,目前主要的网络潮流分析包括电力、天然气和热力3种形式。

1.2.1 电力网络潮流模型

针对综合能源系统中电力潮流的分析方法,

大致分为2种:1)采用传统的配电网交流潮流;2)更为简单的输电网直流潮流。具体采用哪种潮流根据具体情况而定:当综合能源系统的范围在区域或园区级别时,一般采用配电网交流潮流,如图2所示;当范围扩大时,可采用对应的输电网直流潮流。

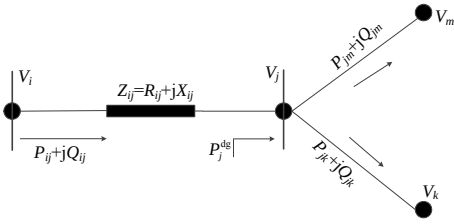


图2 电力网络潮流

Fig. 2 Power flow of electric networks

文献[4-5]采用配电网交流潮流方程对综合能源系统中的电力网络潮流进行建模,具有如下的数学形式:

$$P_{ij} = V_i \sum V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + jB_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_{ij} = V_i \sum V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - jB_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中: P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为线路上的有功功率、无功功率; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 电压的幅值; G_{ij} 为线路参数电导; B_{ij} 为线路参数电纳; θ_{ij} 为线路电压相角。

文献[6]从输电网层面对电力网络进行建模,采用了对应的输电网直流潮流方程,即不考虑电压幅值约束。线路潮流和线路两端的功角有如下关系:

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \quad (3)$$

式中: θ_i 、 θ_j 为线路两端的功角; x_{ij} 为线路电阻。

1.2.2 天然气潮流模型

天然气网络结构如图3所示,包含天然气源、管道和压缩机等设备。天然气潮流分析方法分为稳态 Weymouth 潮流模型^[7]和动态潮流模型^[8]2种。稳态潮流模型中的参数(如气体流速、管道压力)不随时间变化。而动态潮流模型中的参数随时间变化,具有如下的数学形式:

$$\frac{\pi_{m,t} - \pi_{m,t-1}}{\Delta t} = g_{mn,t} + g_{nm,t} \quad (4)$$

式中: $\pi_{m,t}$ 、 $\pi_{m,t-1}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时刻管道的气压; $g_{mn,t}$ 为管道(m,n)的正向流量; $g_{nm,t}$ 为管道(m,n)的负向流量。

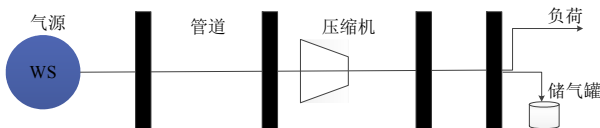


图3 天然气网络结构图

Fig. 3 Structure of natural gas networks

若不考虑节点气压的动态变化特性,式(4)等号的左侧为0,即为稳态潮流方程。虽然稳态潮流模型相对简单易解,但是对天然气网络的动态特性未加以考虑,故存在计算误差。

1.2.3 热力网络潮流模型

热力网络与电力网络建模类似,包含热源、热网以及热负荷。其中热力网络又包含供水网络和回水网络。一个热力网络的结构如图4所示。热力网络的潮流模型包含水力模型和热力模型2部分。文献[9]提出了一种简单的热力网络建模方法,但是计算精度不高,难以得到具体应用。文献[10]提出了相对精准完备的电-热联合分析模型,但是由于计算量较大,难以满足优化分析实时性的要求。现有的热力网络潮流分析大多参照电力网络潮流分析的方法,建立流量平衡方程、温度平衡方程,在计算中未考虑节点回水温度的差异和混合回水温度的影响。文献[11]虽然考虑了不同管道情况下回水温度的差异,但是需要对矩阵进行求解分析,计算量较大。文献[12]参照配电网辐射状运行的特点,采用前推回代法对热力网的潮流进行了求解,同时计及回水管道热损失对回水管道温度进行了修正。

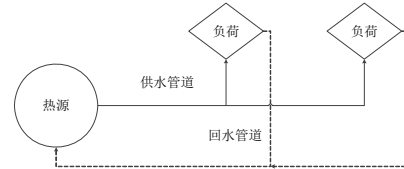


图4 热力网络结构图

Fig. 4 Diagram of heat networks

1.3 综合能源系统的耦合设备建模分析

综合能源系统中耦合设备众多,主要涉及电力-天然气耦合组件、电力-热力耦合组件两大类。具体而言,CHP机组和P2G设备实现了电-气的双向转换。而CHP机组、热泵、电锅炉等技术则可实现电转热,而CHP机组中余热锅炉的利用有助于进一步提高能源利用率,是主要的电热耦合形式,所以本文选取余热锅炉进行重点分析。

1.3.1 CHP 机组

1) 燃气轮机。

燃气轮机结构如图5所示,燃气轮机是综合能源系统中的核心部件,其实现了将天然气转化

为电-热的功能。在建模方法上主要分为2类,文献[13]直接用一次函数表示发电量 P_{gas} 与天然气消耗量 F_{gas} 的关系:

$$P_{\text{gas}} = \eta_{\text{GFT}} \times F_{\text{gas}} \quad (5)$$

式中 η_{GFT} 为燃气轮机的转化效率,由设备型号直接决定。该模型计算简单,不存在非线性项,便于后续的优化分析;但是在计算精度上存在偏差,会给最优经济性分析带来影响。文献[14]详细分析了燃气轮机转矩、转速函数,得出了精确的燃气轮机耗能方程:

$$F_{\text{gas}} = aP_{\text{gas}}^2 + bP_{\text{gas}} + c \quad (6)$$

式中 a, b, c 是常数,由实验曲线得到。虽然此模型相对于一次函数的线性模型精准度更高,但是由于其引入了二次项,会在计算求解上增加难度。

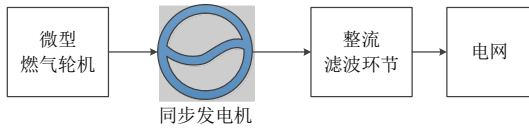


图5 燃气轮机结构图

Fig. 5 Diagram of gas turbine structure

2) 余热锅炉。

余热锅炉利用燃气轮机发电过程中产生的余热输出热能。通常来说,其输出的热功率 P_{heat} 和燃气轮机输出的电功率 P_{gas} 成比例关系:

$$V_{\text{CHP}} = P_{\text{heat}} / P_{\text{gas}} \quad (7)$$

式中 V_{CHP} 为 CHP 机组热电比。对于不带补燃装置的余热锅炉,可认为 V_{CHP} 恒定不变。带有补燃装置的余热锅炉可以控制热电比大小,虽然会提高燃料成本,但可以提高能源的利用效率。文献[15]建立了双层优化模型,通过求解最优的补燃量来提高系统的能源效率。文献[16]通过引入基于有机朗肯循环的低温余热发电装置,打破了 CHP 机组以热定电的耦合运行方式,从而有效降低了系统综合运行成本。

1.3.2 P2G 设备

电解水流程如图6所示,P2G可以和燃气轮机联合运行,从而实现电-气能量的双向流动。P2G是将水进行电解从而生成氢气和甲烷的设备,包括2个化学过程:1)电解水反应生成氢气;2)氢气与二氧化碳合成甲烷。

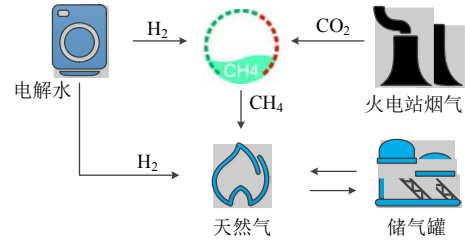


图6 电解水流程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of electrolytic water flow

P2G产生的氢气和甲烷都可以直接注入天然气网络或者存储设备进行利用。其能量转换效率可达75%~85%。现有的电解制氢方法主要有2种:碱性电解水制氢和聚合物电解质电解水制氢^[17]。电转天然气是在电转氢的基础上,在催化剂的作用下将电解水生成的氢气与二氧化碳反应生成甲烷和水,这个过程称为甲烷化过程,这个过程能量转换效率为75%~80%^[18]。甲烷化过程中所需的二氧化碳主要来自环境空气或者火电厂烟气产生的生物气体。通过上述2个阶段化学反应,电转天然气综合效率在45%~60%^[18]。目前来看,P2G装置的主要作用为消纳新能源,将价格低廉但波动性较强的绿色能源转换为可储存的气体形式,在负荷高峰时再转换为电力。P2G装置作用类似于电力系统中传统的储能设备,由前文综述可知,目前的P2G转化装置效率较低,经历过多次转换后能量损失较大。但是P2G装置能够实现快速响应,可以直接将电力转化为氢气或者甲烷注入到天然气网络中供给本地负荷,避免了储氢、运氢等复杂且危险的技术环节,具有广阔的应用前景。

2 综合能源系统的优化运行方法

2.1 综合能源系统的多时段优化控制

从时间尺度来说,综合能源系统的优化调度方法研究经历了从单一时段优化到日前-日内优化再到滚动优化的阶段。文献[19]建立了考虑多种成本的区域综合能源系统调度成本模型,并利用混沌粒子群算法加以求解。文献[20]综合考虑了电热联合系统中分布式能源的时序特征,得出了调度时段内各可控分布式电源的最优出力以及运行成本。文献[21]分析了储热消纳风电的基本机制,在调度模型中增加了储热运行约束。以上

文献都是考虑日前单一时段的优化调度,在实际运行中可能会与实际情况发生偏差,造成违反运行约束的情况。所以在日前调度的基础上,往往需要日内调度等多时间尺度调度的配合。文献[22]基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的方法,建立了多时间尺度冷热电协同优化模型,通过日前-日内调度来控制运行的经济性,通过实时调度来消除可再生能源出力波动性的问题。文献[23]为了利用热电联合系统消纳风电,建立了基于日前、滚动和实时3个时间尺度的调度模型,并改进了粒子群算法,通过参数自调节加速了算法的求解速度。

多时段的优化控制具有较好的控制准确性,但是会造成计算量增加,难以满足实时性的要求。尤其是在实时滚动阶段,对算法的时间复杂度提出了很高要求。若能对特定场景下的数学模型进行针对性优化,从而提高算法效率以达到实时性的要求,则多时段的优化控制能得到更好的应用。

2.2 综合能源系统的分布式优化控制

面向具有多个平级运营商的多能源系统,可采用分布式算法实现各系统间的协同运行,提升调度的自治性和灵活性。文献[24]采用增广拉格朗日松弛算法,将联合优化模型分解为电力系统机组组合子问题和天然气网络运行子问题,电力运营商和天然气运营商通过交换对偶乘子信息以满足耦合约束;文献[25]采用交叉乘子迭代算法,解耦电、气能量流以实现协同控制,并分析了串行分解方式和并行分解方式的差异性。文献[26]总结了近年来能源互补集成的研究成果,对多能系统规划、智能调控、协同控制等关键技术和挑战进行了归纳。尽管综合能源系统协同运行方法已有初步研究,但对综合能源系统的刻画还很基础,在建模中既未考虑天然气潮流的动态特性,也未考虑能源转换设备(如电转气装置)和需求响应策略。

2.3 综合能源系统的不确定性优化控制

综合能源系统中包含大量的不确定性因素,包括可再生能源出力的不确定性、负荷预测误差以及量测信息误差。面对这些不确定性的挑战,现有的综合能源系统优化运行研究中一般采用随

机优化^[27]、鲁棒优化^[28]、区间优化^[29]3种方法。文献[30]基于区间法和可能度的方法,对风电不确定性进行了描述,同时考虑了电气转化,得出的结论能辅助调度员对不确定性进行处理。文献[31]在采用k-means聚类方法对历史聚类的基础上,利用上下界区间描述了负荷的不确定性,通过将鲁棒优化模型转换为混合整数凸优化问题进行求解。文献[32]结合鲁棒优化和随机优化,针对电转气设备进行了精细化建模,得出的调度结果能兼顾系统的调度成本和可靠性。

随机优化基于预先假设的概率分布将不确定性优化转化为多个确定性优化问题进行求解,然而在实际中随机变量的概率分布往往难以准确刻画。鲁棒优化和区间优化则是假设随机变量的变化区间,通过求取最恶劣场景下的最优结果实现最优控制,但是得到的结果往往会过于保守。

2.4 综合能源系统优化问题的求解方法

综合能源系统复杂的结构和多种能源的相互耦合使优化问题的求解困难。求解方法主要有启发式算法和数学规划方法2类:启发式算法求解速度快,但得不到最优解;数学规划方法精准,但是求解难度较高。目前较多研究通过启发式算法对综合能源系统的优化问题进行求解,如文献[33]采用模拟退火法对热电耦合综合能源系统的优化调度问题进行求解。文献[34]则结合凸优化的最新进展,采用凸松弛的手段对多目标综合能源系统的优化调度进行求解,在保证求解质量的同时,加快了算法求解速度。文献[35]则结合了半不定量法和内点法对电-气互联综合能源系统的最优潮流进行求解。

3 综合能源系统研究方向展望

3.1 综合能源系统建模理论

计及复杂约束的综合能源系统建模理论的研究刚刚起步,还有大量问题值得深入研究,如:如何对各能源的产生、传输、转化、储存和消费等环节进行统筹协调,建立含终端能源枢纽和外部能源供应网架的综合能源系统模型;如何基于凸优化技术,对原复杂非线性气网模型进行严格凸化松弛,构建考虑气网稳态、动态特性的综

合能源系统综合模型。

3.2 综合能源系统优化方法

在综合能源系统的优化运行方面,依然有以下问题值得深入研究:1)如何考虑动态多能流和多类系统要素,基于分布式算法实现各能源网络的分散协同控制;2)如何面向分区扁平化的多区互联能源系统,实现各区域系统间的自治协调控制;3)如何精细刻画需求响应对综合能源系统运行经济性的提升,发挥用户主观能动性以促进能源的梯级利用。

3.3 综合能源系统的风险调度

风险调度旨在降低高危场景风险水平,保障电力系统的安全可靠运行。目前,国际上对综合能源系统的风险评估和风险调度理论方法研究仍处于起步阶段,相关的研究领域还有以下工作值得开展:1)如何综合考虑电力-天然气-热网能量流的损失,对综合能源系统进行整体的风险分析,构建合理的风险评估指标;2)如何面对多重不确定性因素,制定鲁棒的综合能源系统日前风险调度策略,提升风险预控手段的安全性;3)如何制定快速有效的事后校正策略,降低高危风险场景的运行风险。

4 结论

综合能源系统能提高能源利用效率和可再生能源的消纳能力,但是其高度耦合的特性给综合能源系统的调度运行带来了困难。结合国内外最新的研究进展,介绍了综合能源系统的基本组成,分析了电力、天然气、热力网络潮流的建模方法,分类总结了考虑不同因素的优化运行方法,分析了现有方法的优缺点和难点。最后指出了未来综合能源系统研究可从建模理论、优化方法和风险调度等方面开展工作。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2014 (能源技术展望)[EB/OL]. [2019-09-01]. <https://webstore.iea.org/download/summary/439?fileName=Chinese-ETP-2014-ES.pdf>.
- [2] 国务院. “十三五”国家战略性新兴产业发展规划[EB/OL]. (2016-12-19)[2019-09-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/19/content_5150090.htm.
- [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.
- [4] 潘益,梅飞,郑建勇,等. 计及静态安全因素与热电最优潮流的综合能源系统联合运行优化模型[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 50-59.
- [5] 王泽森,唐艳梅,乔宝榆,等. 气-电综合能源系统最优潮流及其环境增效研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 111-120.
- [6] 张伊宁,何宇斌,晏鸣宇,等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 1-10.
- [7] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1293-1305.
- [8] Yang J, Zhang N, Kang C, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2087-2097.
- [9] Steer K C B, Wirth A, Halgamuge S K. Control period selection for improved operating performance in district heating networks[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(2): 605-613.
- [10] Liu X, Jenkins N, Wu J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 155-159.
- [11] 于东立,曹军,屠聪为,等. 考虑线性化网络约束的电-热多能源系统最优能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 1933-1944.
- [12] 刘述欣,戴赛,胡林献,等. 计及回水管网热损失的电热联合系统潮流模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 77-81, 134.
- [13] 张儒峰,姜涛,李国庆,等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678, 5924.
- [14] 陈柏翰,冯伟,孙凯,等. 冷热电联供系统多元储能及孤岛运行优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3231-3243.
- [15] 施锦月,许健,曾博,等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [16] 魏震波,黄宇涵,高红均,等. 含电转气和热电解耦热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3512-3520.
- [17] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity:

- an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2039-2061.
- [18] Clegg S, Mancarella P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [19] 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.
- [20] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [21] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 79-85.
- [22] 王皓, 艾芊, 甘霖, 等. 基于多场景随机规划和 MPC 的冷热电联合系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 51-58.
- [23] 邓佳乐, 胡林献, 邵世圻, 等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3796-3803.
- [24] Liu C, Shahidehpour M, Wang J. Application of augmented lagrangian relaxation to coordinated scheduling of interdependent hydrothermal power and natural gas systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(12): 1314-1325.
- [25] 瞿小斌, 文云峰, 叶希, 等. 基于串行和并行 ADMM 算法的电-气能量流分布式协同优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 12-19.
- [26] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10, 46.
- [27] 雷宇, 杨明, 韩学山. 基于场景分析的含风电系统机组组合的两阶段随机优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 58-67.
- [28] 马龙华. 不确定系统的鲁棒优化方法及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [29] 丁涛, 郭庆来, 柏瑞, 等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3707-3714.
- [30] 苏永新, 聂伟棋, 谭貌. 考虑风电接入和气电转换的综合能源系统日前区间优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 63-74.
- [31] 沈欣炜, 郭庆来, 许银亮, 等. 考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 34-45.
- [32] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 116-126.
- [33] Musau M P, Otero N A, Wekesa C W. Multi area multi objective dynamic economic dispatch with renewable energy and emissions[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Leuven: IEEE, 2016: 1-6.
- [34] 陈聪, 沈欣炜, 夏天, 等. 计及烟效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 60-68, 121.
- [35] 张思德, 胡伟, 卫志农, 等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 121-128.

收稿日期: 2019-09-10。

作者简介:



郭创新

郭创新(1969), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能调度及风险调度、智能信息处理技术及其在电力系统应用的研究, guochuangxin@zju.edu.cn;



丁筱

丁筱(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化与运行, 本文通信作者, 401051634@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)