

考虑风光出力不确定性的含电制氢装置的电-气耦合配网系统经济运行分析

斯琴卓娅, 许晓敏, 郑世鹏, 王之怡, 牛东晓

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 高效节能的电-气耦合配网系统能够同时考虑经济效益和环境成本,对提升配电网系统的经济性具有重要作用。本文提出了一个两阶段分布式鲁棒优化模型来解决经济运行问题,运用 Wasserstein 测度刻画风光出力预测误差概率分布的模糊不确定集,并构建了考虑风光出力不确定性的含电制氢装置的电-气联合系统分布式鲁棒优化运行模型。仿真结果表明:①电制氢装置的引入可以有效改善配网系统的电-气耦合,提高系统运行的稳定性和经济性;②考虑到环境成本,含电制氢装置的电-气耦合配网系统的污染物排放显著降低,保证了系统的低碳运行;③分布式鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)模型能够抵抗不确定风电和光伏输出的干扰,保守性和计算复杂度相对较低,具有数据驱动的特点。

关键词: 电-气耦合配网系统; Wasserstein 测度; 分布式鲁棒优化; 环境成本

中图分类号: G203 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2022)11-0024-16

一、引言

目前,全球能源系统主要以化石燃料为主,由此引发了能源危机、全球变暖、污染排放等问题,减少二氧化碳排放成为社会共识,发展清洁能源和节能减排刻不容缓。电力部门产生的温室气体占有所有温室气体排放量的四分之一。尽管自2011年以来,发电中煤炭和原油的利用率持续下降,但在其他能源中仍占主导地位。因此,为了促进低碳电力,有必要发展清洁能源,以减少污染物排放。氢能作为一种零碳燃料,被认为是化石燃料的一种有吸引力的替代品。日本、美国等多个国家已开始高度重视氢能产业的发展。中国在2022年北京冬奥会期间,为保障清洁低碳用能需求,张家口等地建设多个风光制氢工程项目,而储能设施也为可再生能源消纳等提供了保障。因此,对于以可再生能源(如风能)制氢为特征并辅之以储能的联合能源系统的研究将在未来起到极为重要的作用。

随着我国能源结构的转型及分布式能源的发展,传统能源系统发展模式即以单一系统纵向延伸为主的发展模式已不能满足现如今能源发展的要求。为了提高能源效率、保障能源安全、促进新能源消纳和推动环境保护,需要构建多能系统,促进电、气等多种能源互补互济和多系统间的协调优化。因此,多能系统将成为未来能源系统的一大发展趋势,在中国能源变革中占据重要地位。

可再生能源(renewable energy, RE)资源将在向清洁和可持续能源系统过渡的过程中发挥关键作用。但过渡的主要挑战是这些资源的不确定性和间歇性。分布式风、光出力,电、热、冷、气负荷等的不确定性及各能流之间相互耦合的特点均为其运行优化带来了极大的挑战。含电制氢装置的配网系统运行存在各干扰因素主要是由于影响其变化的环境因素众多,且无法进行全面量化与准确估计,从而导致预测误差难以避免。事实上,干扰因素的不确定性不仅体现在对其取值难以准确预测(值预测不确定性),还体现在对其所服从的概率分布规律难以精准把握(分布预测不确定性)。无论是值预测还是分布预测的不确定性,都可能对系统的实际运行结果产生不利影响。鉴于此,有必要在提出并构建一种描述各因素联合概率分布函数变化范围的模糊集合,并对集合的覆盖范围(集合边界)进行优化,从而为全面刻画微能源网运行干扰因素值预测及分

收稿日期:2022-05-30

基金项目:北京市社会科学基金“‘双碳’目标下北京市氢能发展模式及消纳利用策略研究”(21JCC105)

作者简介:斯琴卓娅,华北电力大学经济与管理学院博士研究生,研究方向:新能源预测与决策,电力市场价格机制;许晓敏,博士,华北电力大学经济与管理学院副教授,研究方向:新能源预测与决策,电力市场管理;郑世鹏,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:新能源预测与决策;王之怡,华北电力大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:新能源预测与决策;牛东晓,博士,华北电力大学经济与管理学院教授,研究方向:电力技术经济。

布预测的不确定性提供科学的理论模型与方法。

本文根据氢能 and 可再生能源系统的不同特点,构建了含电制氢装置的综合能源联合系统,以降低氢能提取成本,提高可再生能源利用率并实现能源的清洁供给。以分布式鲁棒优化(distributed robust optimization, DRO)理论为基础,以联合收益最大化为目标,构建了含电制氢装置的电-气耦合配网系统优化模型,解决风光等可再生能源出力的不确定性问题,提高了含电制氢装置的电-气耦合配网系统的总体收益。

二、文献回顾

氢能是新型的可以替代汽油和柴油的二次能源,不会产生温室气体排放导致环境污染。电制氢可以作为一种富裕电能的能源储备形式,将弃置的清洁电力就地转化为氢气并储存,有效解决弃电带来的装置效率浪费及三弃问题,提高社会总体的能源利用(王赓等,2017;邵志刚和衣宝廉,2019)。以氢能为能量转换媒介的综合能源系统可以弥补不同能源形式的灵活性不足问题,提高能源利用率(孙鹤旭等,2019)。

计及电制氢装置的综合能源系统在未来的能源互联网中将会起到相当重要的作用。通过对其进行经济运行分析,能够提高各个能源系统的效率,实现多能互补、能源梯级利用、促进新能源消纳。郭梦婕等(2020)考虑到不同负荷的供需情景及系统内各机组运行状态,分析验证了含电制氢装置的综合能源系统消纳富裕风电并降低运行成本的能力。陈锦鹏等(2021)通过对电转气环节进行精细化建模、通过考虑电转氢气的过程,均对综合能源系统进行协调优化,提高了其对于新能源的消纳能力并增强了经济性和环保性。Xiao et al (2020)提出了一种参与电氢市场销售电氢的风电电解储氢系统,提出了以利润最大化为目标的最优运行策略。Kafetzis et al(2020)提出了考虑不同的可再生能源与电池和氢气的组合的模式的管理策略。基于可再生能源制氢站参与需求响应和辅助服务,分别构建私人储氢站优化调度模型和基于监督的分布式储氢站优化调度模型(EI-Taweel et al,2018;Khani et al,2019)。Xu et al(2020)提出建立一个仅由太阳能光伏供电的氢能/电力混合加油站(hydrogen/electricity refueling station,HERS),并提出最佳的运营策略。Teng et al (2021)根据新能源波动特征和电网不同的峰谷参数,提出了一种电-热-氢复合储能系统(electricity heat hydrogen multi-energy storage system,EHH-MESS)及其协调优化运行模型,以减少弃风弃光量,提高电网的灵活性。以上文献的研究重点主要集中在氢能对风电资源的消纳问题,对风电出力不确定性的刻画研究较少。

随机优化和鲁棒优化是处理不确定优化问题的两种常用方法。随机优化是基于不确定变量的概率分布来构造随机场景,实现微电网系统的经济运行,而鲁棒优化主要依靠变量的波动区间来描述微电网中的不确定性,并在不确定参数范围内满足约束条件,在最坏情况下实现最优决策。随机优化模型需模拟复杂不确定环境的干扰。因此要构造大量随机情景。随着情景数量的增加,变量和约束条件也会大量增加,从而使得模型复杂、计算难度增加以至于难以求解。为了平衡抵抗随机干扰与计算复杂度这两方面的要求,鲁棒优化方法也被引入到微能源网运行优化问题中来。鲁棒优化通常仅在干扰因素影响目标函数的最坏情景下进行优化求解,故其计算的复杂程度与难度较之随机优化模型大大减少。与此同时,鲁棒优化以因素可能取值的连续空间区域(不确定集合)替代随机情景,能够确保系统在离散情景以外可靠运行,在这一点上优于随机优化,使模型决策结果的鲁棒性得以提高。然而,前述最坏情景往往发生的可能性较小,这使得鲁棒优化模型常常过于保守,欠缺经济效益等方面的优化效果。在随机优化方面,张高航和李凤婷(2020)利用条件风险价值建立计及灵活性的日前随机优化经济运行模型处理电力系统的灵活性问题。王会超等(2019)基于自回归滑动平均模型和场景分析,建立跨区域日前-日内经济运行模型,解决新能源预测不确定性问题。祁晓敏等(2021)采用非参数核密度估计与概率场景抽样相结合的方法,建立随机优化模型,解决源荷储协调的冷热电综合能源系统的运行优化问题。裴蕾等(2022)提出计及间歇性光伏不确定性的交直流混合配电网多阶段随机优化调度模型,解决间歇性光伏的就地消纳及系统的削峰填谷问题。张海波等(2022)基于两阶段随机规划建立了交直流互联电网日前两阶段随机优化调度模型,应对风电输出的不确定性问题。在鲁棒优化方面,戴璐平等(2019)建立了分布式家庭并网光伏系统能量优化调度基本模型,通过鲁棒优化框架和改进的萤火虫算法求解。凌万水和刘刚(2020)基于鲁棒优化建立了主动配电网优化配置模型解决分布式光伏发电和风力发电的不确定性。邹云阳等(2019)运用不确定集量化分布式风、光出力等因素对能量调度的干扰,建立微能源网的协调调度模型,采用鲁棒线性优化理论进行求解。算例仿真验证了模型能够有效提升微网的灵活性和经济性。Moretti et al(2020)提出一种基于线性仿射的冷热电联产(combined cooling heating and

power, CCHP)微网日前调度鲁棒优化模型,该模型采用线性仿射方法以简化最坏情景的搜寻途径,从而进一步提升了模型的求解速度。张治等(2022)将随机规划方法与鲁棒优化相结合,建立基于鲁棒机会约束优化的综合能源系统模型,处理风电出力不确定性的问题。岑有奎等(2022)采用鲁棒优化盒式集合描述风电出力,建立基于氢储能的含大规模风电电力系统经济调度模型,解决风电消纳困难的问题。臧海祥等(2022)建立了电力市场下风电-光热-生物质混合电站鲁棒优化调度模型,解决混合电站运行的不确定性(风电和光热功率、负荷及电力市场价格等)问题。

然而,在实践中,往往很难获得足够精确的概率分布,这使得随机优化抵御风险的能力不足。而在使用随机优化方法时,场景数量较多可能会造成数据维数灾难,从而使计算变得复杂。在鲁棒优化过程中,发生最坏情况的可能性通常较小,从而使鲁棒优化结果过于保守,缺乏最优性。考虑到这两种方法的局限性,分布式鲁棒优化(DRO)作为不存在上述不足的新兴不确定优化方法,逐渐应用于近些年的研究中。

目前,已经有多个研究集中在综合能源系统运行中的分布式鲁棒优化应用,包括机组组合问题、经济运行问题和分布式能源系统的最优规划问题。分布式鲁棒优化不同于鲁棒优化,在区间内搜索不确定变量的最坏情况时,考虑不确定变量发生的概率分布来建立模糊集。因此,有效地降低了保守程度,便于优化目标的实现。高海淑等(2020)改进了场景聚类算法,基于多离散场景的分布式鲁棒优化方法,构建基于储能、微型燃气轮机结构、调整网络拓扑结构的分布鲁棒综合优化模型,处理配电网中的分布式电源和负荷不确定性问题。高晓松等(2020)基于KL散度(Kullback-Leibler divergence)建立鲁棒机会约束优化模型,用于电-气-热综合能源系统中处理风电不确定性的问题。夏鹏等(2020)建立了风电高阶不确定性云模型,并以此为基础,建立分布式鲁棒经济运行模型,以系统的综合运行成本最低为优化目标,通过算例验证模型对于提升系统经济运行程度及提升风电消纳能力方面的有效作用。陈泽雄等(2021)建立了分布式光伏电站接入配电网的分布鲁棒优化配置模型,采用了基于KL散度的分布式鲁棒优化方法处理光伏发电的不确定性,并采用Benders分解算法求解,获得兼具解决光伏发电不确定性波动的有效性与鲁棒优化结果保守性的优化配置方案。司杨等(2021)基于Wasserstein散度的分布鲁棒方法对风电场功率的不确定性建立模型,考虑到氢储能的平衡问题,对于氢储能容量配置进行优化。易文飞等(2022)建立了计及气网管存效应的综合能源系统优化调度模型,并分别采用分布概率集合和模糊函数构建风电与负荷对应的不确定集,建立分布鲁棒优化调度模型,通过算例验证合理利用管存效应可以有效提高系统调度灵活性,为如微电网的能量管理提供参考。

然而,现有研究还存在以下不足:①目前,有关储能装置在综合能源系统上的应用,多针对氢、热、电单种或两三种储能参与系统优化调度,而对于含风电制氢及氢-热-电多储能装置相互配合应用在综合能源系统调度的研究较少;②尽管在各类能源系统运行的优化问题中,分布式鲁棒优化方法的应用已经存在很多案例,但是在含电制氢装置的综合能源联合系统优化运行研究中并未使用过此方法。鉴于分布式鲁棒优化方法在处理不确定优化问题方面的上述各类优点(相对于随机优化、鲁棒优化)。因此有必要在含电制氢装置的综合能源系统中引入分布式鲁棒优化方法已处理系统中的不确定性问题。

本文深入探究电-气能源转化、储存与调度问题,平衡含风电等可再生能源在不确定性条件下的鲁棒性、经济性和低碳性,构建了含电制氢装置的电-气耦合配网系统优化模型,填补了分布式鲁棒优化方法在电-气耦合综合能源系统中应用的空白。

三、系统结构及数学模型

(一)系统结构

考虑风光出力特性的约束及节能减排的现实需要,文章将含电制氢装置融入电力、天然气能源系统中,形成一种含电制氢的综合能源系统模型,充分考虑电、气柔性负荷的用能特征的前提下,建立电-气柔性负荷模型。该集成模型利用氢能及相关能源设施,将废弃的风光电接入综合能源系统,以电解水制备氢气,然后将氢气与常规发电废气中的二氧化碳转化为人造天然气,实现氢能与电、气等不同能源形式的耦合,在清洁生产的同时大幅提升能源利用效率,减少能源浪费。拟议的系统包含三个主要组件,即能量转换装置、储能

装置和各种能量负荷。电解槽、甲烷反应器、氢燃料电池、微型燃气轮机均为综合能源系统的能量转换装置,用来完成电力系统、氢气系统、天然气系统之间的能量闭环流动。储能装置包括储电(electricity storage, ES)、蓄气(gas storage, GS)、储氢(hydrogen storage, H2S)三种形式,以满足多情景的不同应用需求。在该系统中风电厂主体的电能需要对外销售;电制氢主体需要从外部购买电能以用于电解水以制氢,并通过燃料电池发电;储能主体通过峰谷差套利等行为进行盈利。各种能量负载包括电、气负载,有效抑制电网的负载波动,保障电力系统的稳定运行。配网系统末端与需求侧相连,通过调整电价等手段引导用户回应,从而达到源-荷交互作用。含多能电制氢系统的综合能源系统能量流图如图1所示。

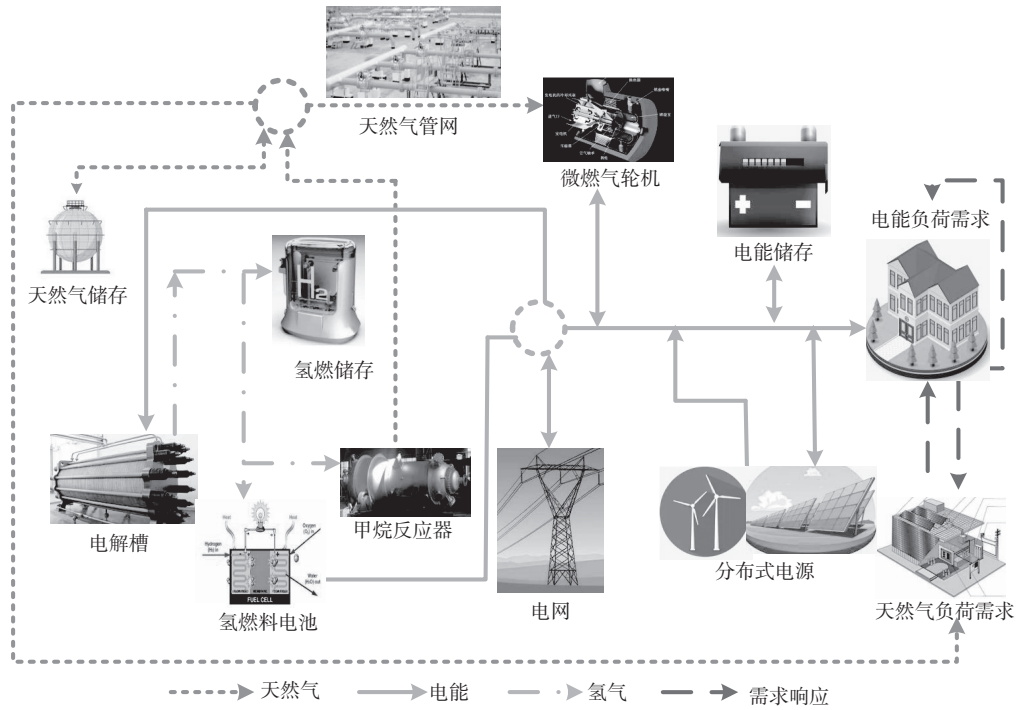


图1 综合需求响应下含氢能源的综合能源系统模型系统结构图

(二)多能电制氢系统的计算模型

电制氢即 $H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ 过程,

该过程只产生氢气和氧气,无任何污染物产生,具有生产过程简单且投资成本低的优势。当风光出力无法全部消耗有富裕电量时,电解制氢单元将电能转换为氢能储存到氢储能系统中,或直接供应给氢负荷,若还有剩余电量无法消纳的电量,则通过电转气利用氢捕获大气中的 CO_2 合成甲烷,进行储存,或供给给天然气;当电网功率出现缺电情况时,启动燃料电池单元或微燃机进行放电,这样电转氢与氢燃料电池发电构成电-氢双向耦合的能量闭环,电转气与燃气轮机构成电-气双向耦合能量闭环。含电制氢的综合能源系统结构图如图2所示。

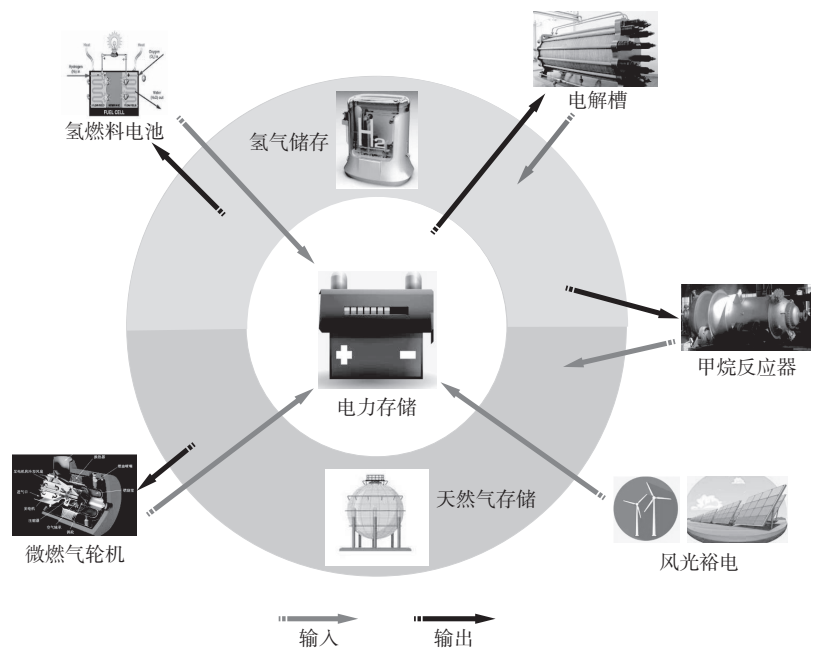


图2 含电制氢的综合能源系统结构图

1. 电解槽(DJC)

质子交换膜电解槽效率高,且电解过程无污染,其运行效率随输入电功率呈现非线性变化,质子交换膜电解槽的产氢效率及输出氢能可表示为

$$L_{\text{DJCh},t} = \eta_{\text{DJCh},t} P_{\text{DJC},t} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{DJCh},t} = \sum_{a=1}^2 \sigma_{\text{DJC},a} \left(\frac{P_{\text{DJC},t}}{P_{\text{DJC},N}} \right)^a \quad (2)$$

其中: t 为单位时间; $L_{\text{DJCh},t}$ 为单位时间电解槽产氢功率; $\eta_{\text{DJCh},t}$ 为单位时间电解槽产氢效率; $\sigma_{\text{DJC},a}$ 为产氢效率函数的多项式系数,系数值为 a ; $P_{\text{DJC},t}$ 为单位时间电解槽的用电功率; $P_{\text{DJC},N}$ 为电解槽额定功率函数的多项式系数,系数值为 N 。

2. 氢气压缩机(YSJ)

压缩机消耗的电功率 $P_{\text{YSJ},t}$ 需满足:

$$P_{\text{YSJ},t} = \frac{R_h L_{\text{DJCh},t} T_{\text{in}} \varrho}{3600 \eta_{\text{YSJ}} (\varrho - 1)} \left[\left(\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right)^{\frac{\varrho-1}{\varrho}} - 1 \right] \quad (3)$$

其中: R_h 为氢气比热容常数; $L_{\text{DJCh},t}$ 为单位时间压缩机压缩氢气流量; T_{in} 为压缩机输入氢气的温度; η_{YSJ} 为压缩机工作效率; ϱ 为氢气等熵指数; $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$ 为压缩比。

3. 甲烷反应器模型(JW)

甲烷反应器是氢制甲烷的主要设备,其可利用电解槽产出的氢气实现氢气甲烷化,并注入综合能源系统中的天然气管网满足用户气负荷需求。甲烷反应器的输入输出能效模型如式(4)所示:

$$F_{\text{JW},t} = \frac{\eta_{\text{JW}} L_{\text{JWh},t} \chi_{\text{CH}_4} s_{\text{mol}}}{m_{\text{CH}_4}} \quad (4)$$

其中: $F_{\text{JW},t}$ 为单位时间甲烷反应器输出的天然气功率; $L_{\text{JWh},t}$ 为单位时间甲烷反应器的耗氢功率; η_{JW} 为甲烷反应器的甲烷转化效率; χ_{CH_4} 为天然气的低位热值; s_{mol} 表示氢气转甲烷的摩尔折算系数; m_{CH_4} 为单位体积的甲烷质量。

4. 氢燃料电池模型(QD)

氢燃料电池作为综合能源系统中的重要氢电联产设备,可实现氢能与电能的耦合。氢燃料电池的发电效率与负载率之间呈现非线性的关系,计算模型如下:

$$P_{\text{QDe},t} = \eta_{\text{QDe},t} L_{\text{QDin},t} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{QDe},t} = \sum_{a=1}^n \sigma_{\text{QDe},a} \left(\frac{P_{\text{QDe},t}}{P_{\text{QD},N}} \right)^a \quad (6)$$

其中: $\eta_{\text{QDe},t}$ 为单位时间氢燃料电池发电效率; $\sigma_{\text{QDe},a}$ 为发电效率函数的多项式系数; $P_{\text{QD},N}$ 为产热效率函数的多项式系数; $P_{\text{QDe},t}$ 为单位时间氢燃料电池的发电功率; $L_{\text{QDin},t}$ 为单位时间氢燃料电池的耗氢功率; $P_{\text{QD},N}$ 为氢燃料电池额定功率。

5. 微型燃气轮机(QLJ)

以天然气为主要能源的微型燃气轮机在 t 时段需要的燃料消耗量如下:

$$F'_{\text{QLJ}} = \frac{H'_{\text{QLJ}}}{\chi_{\text{CH}_4} \eta_{\text{QLJ}}}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

微型燃气轮机在 t 时段产生的电量如下:

$$P'_{\text{QLJ}} = \frac{H'_{\text{QLJ}} \eta_{\text{QLJ}}}{1 - \eta_{\text{QLJ}} - \eta_1}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

其中: F'_{QLJ} 为微型燃气轮机单位时间的天然气消耗量; P'_{QLJ} 为微型燃气轮机单位时间的标准产电量; H'_{QLJ} 为微型燃气轮机在单位时间回收的热功率; η_{QLJ} 为微型燃气轮机热能生成效率; χ_{CH_4} 为天然气的低位热值; T 为总时长; η_1 为热能损失效率。

6. 储能设备 (CN)

储能设备是本文系统中重要供能调节设备,主要储能设备包括电储能设备、气储能设备、氢储能设备。不同类型储能设备充放能原理相同,储能设备模型可统一表示为

$$E_{\kappa,t} = S_{\kappa}^0 + \sum_{i=1}^T E_{\kappa,ed}^i \eta_{\kappa,ed} \Delta t - \sum_{i=1}^T \frac{E_{\kappa,fd}^i}{\eta_{\kappa,fd}} \Delta t \quad (9)$$

其中: κ 为系统中储能设备类型,即电储能设备ES、气储能设备GS、氢储能设备H₂S; i 为输入系数; S_{κ}^0 为电储能设备ES、气储能设备GS、氢储能设备H₂S中的初始剩余能量; $E_{\kappa,ed}^i/E_{\kappa,fd}^i$ 指 t 时段电储能设备ES、气储能设备GS、氢储能设备H₂S充放能量值; $\eta_{\kappa,ed}/\eta_{\kappa,fd}$ 指电储能设备ES、气储能设备GS、氢储能设备H₂S的充放能量效率。

四、含电制氢装置的综合能源系统优化运行的DRO模型

(一) 分布式鲁棒优化模型

分布式鲁棒优化(DRO)是随机优化和鲁棒优化的结合,常见的二阶段DRO模型如下:

$$\min_{x \in X} c^T x + \sup_{\mathbb{P} \in D} E_{\mathbb{P}}[Q(x, \xi)] \quad (10)$$

约束条件为

$$Ax \leq b \quad (11)$$

其中: ξ 为不确定变量; c^T 为第一阶段目标函数决策变量 x 的系数向量;系数 \mathbb{P} 隶属于模糊集 D ;A为第一阶段约束条件的系数矩阵; b 为第一阶段约束条件的参数向量。这个目标函数意味着将 $c^T x$ 和 $Q(x, \xi)$ 的预期运营成本最小化。 $Q(x, \xi)$ 的期望是指在构造的模糊集 D 中最坏分布的期望。 $Q(x, \xi)$ 和第二阶段约束的紧凑形式可以表示为

$$Q(x, \tilde{\omega}) = \min [d^T y(x, \xi)] \quad (12)$$

约束条件为

$$Zy(x, \xi) \leq g(\xi) \quad (13)$$

其中: $y(x, \xi)$ 包含第二阶段中所有决策变量; d^T 为第二阶段对应的系数向量; Z 为第二阶段约束条件的系数矩阵; $g(\xi)$ 为第二阶段约束条件的参数向量。

(二) 含电制氢装置的综合能源系统目标函数

1. 第一阶段目标函数

为实现综合能源系统的经济运行、环境友好及节能减排,建立了计及经济、环境多目标经济运行分析模型,多目标经济运行模型的目标函数如下:

$$F_C = \min(F_A + F_B) \quad (14)$$

其中: F_A 为经济目标函数; F_B 为环境目标函数; F_C 为能效目标函数。

目标 1: 系统运行成本最小。主要包括系统的外部购电成本、购气成本、燃料成本、电制氢成本、运维成本、弃风成本。

$$F_A = F_{\text{QLJ}} + F_{\text{SC}} + F_{\text{TRQ}} + F_{\text{pena}} + F_{\text{LOSS}} \quad (15)$$

$$F_{\text{QLJ}} = \text{open}_{\text{QLJ}} \mu_{\text{open, QLJ}}^{i,t} + \text{down}_{\text{QLJ}} \mu_{\text{down, QLJ}}^{i,t} \quad (16)$$

$$F_{\text{SC}} = p_{i,t}^{\text{SC}} (P_{\text{SC,b}}^{i,t} - P_{\text{SC,s}}^{i,t}) \quad (17)$$

$$F_{\text{TRQ}} = \left(\frac{H_{\text{MQ}}^{i,t}}{\eta_{\text{MQ}} L_{\text{NG}}} + \frac{P_{\text{QLJ}}^{i,t}}{\eta_{\text{QLJ}} L_{\text{NG}}} - F_{\text{JW}}^{i,t} \right) C_{\text{TRQ}} \quad (18)$$

$$F_{\text{pena}} = \varepsilon (P_{\text{cut}}^{i,t} + H_{\text{cut}}^{i,t} + FAN_{\text{cut}}^{i,t} + GF_{\text{cut}}^{i,t}) \quad (19)$$

$$F_{\text{LOSS}} = \sum_{t=1}^T \lambda_t \left\{ \left(1 - \eta_{\text{DJCh},t} \right) \sum_{i=1}^{N_{\text{EL}}} P_{\text{DJC}}^{i,t} + \left(\frac{1 - \eta_{\text{QDe},t}}{\eta_{\text{QDe},t}} \right) \sum_{i=1}^{N_{\text{rc}}} P_{\text{QD,e}}^{i,t} + \left(\frac{1 - \eta_{\text{JW}}}{\eta_{\text{JW}}} \right) \sum_{i=1}^{N_{\text{nc}}} F_{\text{JW}}^{i,t} \right\} \quad (20)$$

其中: F_{QLJ} 为燃料成本; F_{SC} 为外部购电成本; F_{TRQ} 为购气成本; F_{pena} 为惩罚成本; F_{LOSS} 为弃风成本; open_{QLJ} 为开

启汽轮机的成本; $down_{QLJ}$ 为关闭汽轮机的成本; $\mu_{open, QLJ}^{i,t}$ 与 $\mu_{down, QLJ}^{i,t}$ 为二进制变量, 若汽轮机在 t 时段中开机, 则 $\mu_{open, QLJ}^{i,t}$ 为 1, 否则为 0。若汽轮机在 t 时段中关机, 则 $\mu_{down, QLJ}^{i,t}$ 为 1, 否则为 0。 $p_{i,t}^{sc}$ 指在单位时间电力市场的电力交换价格; $P_{SC,b}^{i,t}$ 为买入价; $P_{SC,s}^{i,t}$ 为卖出价; $H_{MQ}^{i,t}$ 为单位时间燃气锅炉热功率; η_{MQ} 为燃气锅炉热效率; L_{NG} 为天然气热效率; $P_{QLJ}^{i,t}$ 为单位时间燃气轮机的标准输出功率; $P_{DJC}^{i,t}$ 为单位时间电解槽的标准输出功率; $P_{QD,c}^{i,t}$ 为单位时间氢燃料电池的标准输出功率; η_{QLJ} 为燃气轮机热效率; $F_{JW}^{i,t}$ 为单位时间甲烷反应器的天然气消耗量; C_{TRQ} 为天然气价格; ε 为惩罚成本系数; $P_{cut}^{i,t}$ 指单位时间放弃的电功率; $H_{cut}^{i,t}$ 指单位时间放弃的热功率; $FAN_{cut}^{i,t}$ 指单位时间放弃的风电功率; $GF_{cut}^{i,t}$ 指放弃的光电功率; N_{EL} 为电力负荷输入值; N_{PC} 为电动制冷机输入值; N_{H2G} 为氢转气装置输入值; t 时段系数为 λ_t 。

目标 2: 系统碳排放量最小。综合能源系统具有灵活选择能源输入的特性。因此可以达到控制碳排放的目标。环境成本主要来源于向电网购电和向气网购气产生的二氧化碳排放。

$$F_B = \left[T_t^{CO_2} P_{QLJ}^{i,t} + B_t^{CO_2} H_{MQ}^{i,t} + R_t^{CO_2} (P_{SC,b}^{i,t} - P_{SC,s}^{i,t}) \right] \Delta t \quad (21)$$

其中: $T_t^{CO_2}$ 、 $B_t^{CO_2}$ 、 $R_t^{CO_2}$ 分别指单位时间微燃气轮机、煤气锅炉、电力市场交易的 CO_x 排放。

各单位污染物排放参数见表 1。

表 1 各单位污染物排放参数

排放因子 (克/千瓦时)	电力市场	微型燃气轮机	燃气锅炉
CO_x	543	724	254

同时考虑系统运行成本最小和环境成本最小两种目标下的最有经济运行策略问题, 本质上是典型的多目标规划问题, 最优解为一组有众多 Pareto 最优解组成别的均衡解, 本文采用权重系数法对运行成本和环境成本进行加权, 从而转化为单目标优化问题进行求解。

2. 第二阶段目标函数

由于每日预测输出与实时输出存在误差, 为保证系统内部能量均衡, 需要对微电网中的柔性设备进行调整, 比如风光互补和能量平衡的调节成本, 以满足能源供需平衡要求。因此, 第二阶段即实时阶段的目标是在极端情况下优化调整成本, 可以用式 (22) 表示:

$$\sup E_p \left[Q(x, \xi) \right] = \sup E_p \left[\sum_{t=1}^T \left[\tilde{F}_{QLJ}^{i,t} + M \left(\tilde{P}_{QLJ, cut}^{i,t} + \tilde{P}_{GF, cut}^{i,t} + \tilde{P}_{FAN, cut}^{i,t} \right) \right] \right] \quad (22)$$

其中: $\tilde{P}_{QLJ, cut}^{i,t}$ 为单位时间微燃气轮机削减功率中值; $\tilde{F}_{QLJ}^{i,t}$ 为微型燃气轮机单位时间天然气消耗量中值; $\tilde{P}_{GF, cut}^{i,t}$ 为单位时间光伏削减功率中值; $\tilde{P}_{FAN, cut}^{i,t}$ 为单位时间风电削减功率中值; M 为弃置风电和光伏罚款的单位成本。

因此, 该系统的一些柔性资源应对 ξ_t 进行调整。本文将仿射策略应用于多电源调整建模, 具体的调整模型如下:

$$\xi_{i,t} = \tilde{P}_{FAN}^{i,t} - \hat{P}_{FAN}^{i,t} + \tilde{P}_{GF}^{i,t} - \hat{P}_{GF}^{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (23)$$

$$\tilde{P}_{FAN, cut}^{i,t} = P_{FAN, cut}^{i,t} + \alpha_{FAN, cut}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (24)$$

$$\tilde{P}_{GF, cut}^{i,t} = P_{GF, cut}^{i,t} + \alpha_{GF, cut}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (25)$$

$$\tilde{P}_{QLJ}^{i,t} = P_{QLJ}^{i,t} - \alpha_{QLJ}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (26)$$

$$\tilde{F}_{JW}^{i,t} = F_{JW}^{i,t} - \alpha_{JW}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (27)$$

$$\tilde{P}_{QDe}^{i,t} = P_{QDe}^{i,t} - \alpha_{QDe}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (28)$$

$$\tilde{P}_{ES, fd}^{i,t} = P_{ES, fd}^{i,t} - \alpha_{ES, fd}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (29)$$

$$\tilde{P}_{ES, ed}^{i,t} = P_{ES, ed}^{i,t} + \alpha_{ES, ed}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (30)$$

$$\tilde{E}_{GS, ed}^{i,t} = E_{GS, ed}^{i,t} - \alpha_{GS, ed}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (31)$$

$$\tilde{E}_{GS, fd}^{i,t} = E_{GS, fd}^{i,t} + \alpha_{GS, fd}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (32)$$

$$\tilde{E}_{H2S, ed}^{i,t} = E_{H2S, ed}^{i,t} - \alpha_{H2S, ed}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (33)$$

$$\tilde{E}_{H2S, fd}^{i,t} = E_{H2S, fd}^{i,t} + \alpha_{H2S, fd}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (34)$$

$$\tilde{P}_{DJC}^{i,t} = P_{DJC}^{i,t} + \alpha_{DJC}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (35)$$

其中: $\tilde{P}_{FAN}^{i,t}$ 和 $\tilde{P}_{GF}^{i,t}$ 为单位时间风电、光伏实际输出功率中值; $\hat{P}_{FAN}^{i,t}$ 和 $\hat{P}_{GF}^{i,t}$ 为单位时间风电、光伏输出功率估计

值； $P_{\text{FAN, cut}}^{i,t}$ 和 $P_{\text{GF, cut}}^{i,t}$ 为单位时间风电、光伏的削减功率； $\alpha_{\text{FAN, cut}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 和 $\alpha_{\text{GF, cut}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 为单位时间风电、光伏的削减不确定变量； $P_{\text{QLJ}}^{i,t}$ 、 $P_{\text{QDe}}^{i,t}$ 和 $P_{\text{DJC}}^{i,t}$ 为单位时间微燃气轮机、氢燃料电池和电解槽的输出功率； $F_{\text{JW}}^{i,t}$ 为单位时间甲烷反应器的天然气输出功率； $\alpha_{\text{QLJ}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 、 $\alpha_{\text{QDe}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 和 $\alpha_{\text{DJC}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 为单位时间微燃气轮机、氢燃料电池和电解槽的输出功率不确定变量； $\alpha_{\text{JW}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 为单位时间甲烷反应器天然气输出功率的不确定变量； $P_{\text{ES, cd}}^t/P_{\text{ES, fd}}^t$ 为单位时间电力储存的充、放功率； $E_{\text{GS, cd}}^t/E_{\text{GS, fd}}^t$ 为单位时间天然气储存的充、放功率； $E_{\text{H2S, cd}}^t/E_{\text{H2S, fd}}^t$ 为单位时间氢气储存的充、放功率； $\alpha_{\text{ES, cd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 、 $\alpha_{\text{GS, cd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 和 $\alpha_{\text{H2S, cd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 为单位时间电力储存、天然气储存和氢气储存的流入不确定变量； $\alpha_{\text{ES, fd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 、 $\alpha_{\text{GS, fd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 和 $\alpha_{\text{H2S, fd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}$ 为单位时间电力储存、天然气储存和氢气储存的流出不确定变量。

因此,第二阶段的目标函数可以转化为如式(36)所示形式:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sup E_p \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\tilde{F}_{\text{QLJ}}^{i,t} + \tilde{F}_{\text{QLJ, cut}}^{i,t} + \tilde{F}_{\text{GF, cut}}^{i,t} \right] \right\} \\ &= \sup E_p \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\frac{\tilde{P}_{\text{QLJ}, i, t}}{\eta_{\text{QLJ}} L_{\text{ng}}} c_{\text{TRQ}} + M \left(\tilde{P}_{\text{QLJ, cut}}^{i,t} + \tilde{P}_{\text{GF, cut}}^{i,t} \right) \right] \right\} \\ &= \sup E_p \left\{ \sum_{t=1}^T \left[\frac{P_{\text{QLJ}}^{i,t} + \alpha_{\text{QLJ}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t}}{\eta_{\text{QLJ}} L_{\text{ng}}} c_{\text{TRQ}} + M \left(P_{\text{FAN, cut}}^{i,t} + \alpha_{\text{FAN, cut}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + M \left(P_{\text{GF, cut}}^{i,t} + \alpha_{\text{GF, cut}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

其中： $\tilde{F}_{\text{QLJ}}^{i,t}$ 为单位时间微燃气轮机的成本中值； $\tilde{F}_{\text{QLJ, cut}}^{i,t}$ 为单位时间微燃气轮机弃置成本中值； $\tilde{F}_{\text{GF, cut}}^{i,t}$ 为单位时间光伏弃置成本中值。

线性仿射策略在基于分布式鲁棒优化的电力系统决策中较为常见。线性径向算法解决非线性问题的优势在于,它可以在相当多的模糊集合中提供可操作的等价变换,包括基于矩的模糊集合和基于 Wasserstein 的模糊集合。同时线性仿射易于理解和求解。因此被广泛应用于电力系统运行优化中。

(三)第一阶段约束条件

1. 电解槽与甲烷反应器运行约束

电解槽运行时需分别满足最大功率约束和功率爬坡约束:

$$\begin{cases} |P_{\text{DJC}, t} - P_{\text{DJC}, t-1}| \leq P_{\text{DJC}}^{\text{up}}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \\ 0 \leq P_{\text{DJC}, t} \leq P_{\text{DJC}, t}^{\text{max}} \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} |F_{\text{JW}, t} - F_{\text{JW}, t-1}| \leq F_{\text{JW}}^{\text{up}}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \\ F_{\text{JW}, \min}^{i,t} \leq F_{\text{JW}}^{i,t} \leq F_{\text{JW}, \max}^{i,t} \end{cases} \quad (38)$$

其中： $P_{\text{DJC}, t}^{\text{max}}$ 为电解槽最大输入电功率； $P_{\text{DJC}}^{\text{up}}$ 为电解槽最大爬坡/下坡功率； $F_{\text{JW}}^{\text{up}}$ 为甲烷反应器最大爬坡/下坡功率； $F_{\text{JW}, \max}^{i,t}$ 和 $F_{\text{JW}, \min}^{i,t}$ 为甲烷反应器输出的天然气最大/最小功率。

2. 氢气压缩机、燃料电池约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{YSJ}, t} \leq P_{\text{YSJ}, t}^{\text{max}}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \\ \begin{cases} -u_{\text{QDe}, t}^{\text{down}} \leq u_{\text{QDe}, t} - u_{\text{QDe}, t-1} \leq u_{\text{QDe}, t}^{\text{open}} \\ 0 \leq u_{\text{QDe}, t}^{\text{open}} + u_{\text{QDe}, t}^{\text{down}} \leq 1 \\ P_{\text{QDe}, t}^{\text{min}} u_{\text{QDe}, t} \leq P_{\text{QDe}, t} \leq P_{\text{QDe}, t}^{\text{max}} u_{\text{QDe}, t} \end{cases}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \quad (40)$$

其中： $P_{\text{YSJ}, t}^{\text{max}}$ 为氢气压缩机功率最大值； $P_{\text{QDe}, t}^{\text{min}}$ 和 $P_{\text{QDe}, t}^{\text{max}}$ 分别为燃料电池输出功率的最小值和最大值； $u_{\text{QDe}, t}$ 为燃料电池运行状态的 0-1 变量； $u_{\text{QDe}, t}^{\text{open}}$ 为燃料电池是否开机的二进制变量； $u_{\text{QDe}, t}^{\text{down}}$ 为燃料电池是否关机的二进制变量。

3. 能量平衡约束

为了保证含电制氢装置的综合能源系统供电与用户需求之间的平衡,系统运行应满足能量平衡约束。

电力平衡约束可表示为

$$P_{\text{grid}}^{i,t} + P_{\text{QLJ}}^{i,t} + E_{\text{ES, fd}}^{i,t} + \hat{P}_{\text{FAN}}^{i,t} + \hat{P}_{\text{GF}}^{i,t} + P_{\text{QDe}, t} = P_{\text{FAN, cut}}^{i,t} + P_{\text{GF, cut}}^{i,t} + E_{\text{ES, cd}}^{i,t} + P_{\text{EL}}^{i,t} + P_{\text{DJC}, t} + P_{\text{YSJ}, t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (41)$$

燃气功率平衡约束:

$$F_{\text{grid}}^{i,t} + F_{\text{JW}}^{i,t} + E_{\text{GS, fd}}^{i,t} = F_{\text{QLJ}}^{i,t} + F_{\text{MQ}}^{i,t} + E_{\text{GS, cd}}^{i,t} + F_{\text{GL}}^{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (42)$$

氢功率平衡约束:

$$L_{DJCh,t} + E_{H2Std,t} = L_{JWh,t} + E_{H2Sed,t} + L_{QDin,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (43)$$

其中: $P_{grid}^{i,t}$ 为单位时间与电网进行电能交换的值; $F_{grid}^{i,t}$ 为单位时间与天然气管网进行天然气交换的值; $E_{ES,cd}^{i,t} / E_{ES,fd}^{i,t}$ 为单位时间电力储存的充、放电量; $P_{EL}^{i,t} / F_{GL}^{i,t}$ 指单位时间电力负荷、天然气负荷功率。

4. 外部电网交换功率约束

$$-\mu_{grid}^{i,t} P_{grid,max} \leq P_{grid}^{i,t} \leq \mu_{grid}^{i,t} P_{grid,max}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (44)$$

$$-\mu_{TRQ}^{i,t} F_{grid,max} \leq F_{grid}^{i,t} \leq \mu_{TRQ}^{i,t} F_{grid,max}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (45)$$

其中: $\mu_{grid}^{i,t}$ 和 $\mu_{TRQ}^{i,t}$ 为二进制变量; $\mu_{grid}^{i,t}$ 的值为 0 或 1 时, 分别表示系统与外部电网开启或关闭电能交换; $\mu_{TRQ}^{i,t}$ 的值为 0 或 1 时, 分别表示系统与外部天然气管网开启或关闭天然气交换。

5. 微型燃气轮机约束

式(47)和式(48)表示起停时间限制的最小值, 式(46)和式(51)定义了容量和爬坡率限制。

$$\mu_{QLJ}^{i,t} P_{QLJ,min} \leq P_{QLJ}^{i,t} \leq \mu_{QLJ}^{i,t} P_{QLJ,max}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (46)$$

$$-\mu_{down,QLJ}^{i,t} \leq \mu_{o,QLJ}^{i,t} - \mu_{o,QLJ}^{i,(t-1)} \leq \mu_{open,QLJ}^{i,t}, \quad \forall t = 2, 3, \dots, T \quad (47)$$

$$0 \leq \mu_{open,QLJ}^{i,t} + \mu_{down,QLJ}^{i,t} \leq 1, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (48)$$

$$T_{open,QLJ}^{min} u_{open,QLJ}^{i,t} \leq \sum_{h=t}^{i,(t+T_{open,QLJ}^{min}-1)} u_{o,QLJ}^{i,t}, \quad \forall t \leq T - T_{open,QLJ}^{min} + 1 \quad (49)$$

$$T_{down,QLJ}^{min} u_{down,QLJ}^{i,t} \leq \sum_{h=t}^{i,(t+T_{down,QLJ}^{min}-1)} (1 - u_{o,QLJ}^{i,t}), \quad \forall t \leq T - T_{down,QLJ}^{min} + 1 \quad (50)$$

$$-r_{QLJ} \leq P_{QLJ}^{i,t} - P_{QLJ}^{i,(t-1)} \leq r_{QLJ}, \quad \forall t = 2, 3, \dots, T \quad (51)$$

其中: $\mu_{QLJ}^{i,t}$ 为单位时间中微燃气轮机是否正在运行的二进制变量; $\mu_{open,QLJ}^{i,t}$ 和 $\mu_{down,QLJ}^{i,t}$ 为单位时间微燃气轮机启停状态的二进制变量; $T_{open,QLJ}$ 和 $T_{down,QLJ}$ 为微燃气轮机的开启和关闭时长; r_{QLJ} 为微燃气轮机爬坡率。

6. 光伏发电的约束条件

$$0 \leq P_{GF}^{i,t} \leq P_{GF,max}^{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (52)$$

7. 风力机约束

$$0 \leq P_{FAN}^{i,t} \leq P_{FAN,max}^{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (53)$$

8. 储能装置的约束

$$0 \leq E_{\kappa,cd}^{i,t} \leq \mu_{\kappa,cd}^{i,t} P_{\kappa,cd}^{max}, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (54)$$

$$0 \leq P_{\kappa,fd}^{i,t} \leq \mu_{\kappa,fd}^{i,t} P_{\kappa,fd}^{max}, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (55)$$

$$0 \leq \mu_{\kappa,cd}^{i,t} + \mu_{\kappa,fd}^{i,t} \leq 1, \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (56)$$

$$W_{\kappa}^{min} \leq W_{\kappa}^{i,t} \leq W_{\kappa}^{max}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (57)$$

$$W_{\kappa}^T = W_{\kappa}^0 \quad (58)$$

其中: $E_{\kappa,cd}^{i,t}$ 为单位时间储能装置流入能量值; $P_{\kappa,fd}^{i,t}$ 为单位时间储能装置能量流出功率; $\mu_{\kappa,cd}^{i,t}$ 和 $\mu_{\kappa,fd}^{i,t}$ 为储能装置充放状态的二进制变量; $P_{\kappa,cd}^{max} / P_{\kappa,fd}^{max}$ 为储能装置充放功率最大值; $W_{\kappa}^{i,t}$ 为单位时间中储能装置的能量值; W_{κ}^0 为储能装置初始能量; W_{κ}^T 为储能装置的剩余能量。

9. 弃风约束

$$0 \leq P_{FAN,cut}^{i,t} \leq \hat{P}_{FAN}^{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (59)$$

10. 弃光约束

$$0 \leq P_{GF,cut}^{i,t} \leq \hat{P}_{GF}^{i,t}, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (60)$$

(四) 模糊集与第二阶段约束构造

1. 基于 Wasserstein 度量的模糊集

假设存在一个随机变量(向量) $\hat{\psi}$, 如风光等清洁能源出力不确定性问题, 其离散分布概率未知, 但具有 N 个独立分布的历史样本数据。设这 N 个历史样本分别为 $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2, \dots, \hat{\psi}_n$, 则 $\hat{\psi}$ 的经验分布函数 F_n 可以表述为

$$F_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_{\hat{\psi}_i} \quad (61)$$

其中： $\gamma_{\hat{\psi}_i}$ 为 $\hat{\psi}_i$ 的狄拉克测度。

式(61)的约束条件如下：首先， F_n 应该 $\tilde{\psi}$ 包含尽可能多的真实分布；其次，当 n 无限趋近于正无穷时， F_n 应该收敛至 F ；最后， F_n 应可求解。基于上述特征，本文构建基于 Wasserstein 度量的综合能源系统第二阶段 $\tilde{\psi}$ 模糊集。

设定一个紧支撑集 Π ，两个概率分布之间的距离 $F_n, F_n \in Z(\Pi), Z(\Pi)$ 即所有支持概率的集合 Π ，利用 Wasserstein 度量表示如式(62)所示：

$$W(F_n, F) = \inf_{\varphi} \left\{ \int_{\Pi} \|\hat{\psi}_n - \tilde{\psi}\| \varphi(d\hat{\psi}_n, d\tilde{\psi}) \right\} \quad (62)$$

其中： $\hat{\psi}_n$ 服从 $F_n, \tilde{\psi}$ 服从 $F, \|\cdot\|$ 代表标准，即 Wasserstein 度量中的 L1 范数； φ 为具有边际分布 F_n 和 F 的联合概率分布。总体来说， φ 可以理解为将概率分布从 F_n 到 F 的运输方案。因此，两个概率之间的 Wasserstein 度量等于将概率分布从一个位置转移到另一个位置的最优成本。因此，模糊集合 \mathbb{C} 可以表示为

$$\mathbb{C} = \left\{ F \in Z(\Pi) \mid W(F_n, F) \leq \epsilon(n) \right\} \quad (63)$$

可以将 \mathbb{C} 看做一个半径 $\epsilon(n)$ 和中心 F_n 的 Wasserstein 球。 $\epsilon(n)$ 可以控制相应分布式鲁棒优化模型的保守性。

提出一种基于统计学的 $\epsilon(n)$ 推导方法：

$$\text{hpnin} \left[W(F_n, F) \geq \epsilon(n) \right] \leq 1 - \exp \left[-n \frac{\epsilon(n)}{\nu^2} \right] \quad (64)$$

其中： $\text{hpnin} \left[W(F_n, F) \geq \epsilon(n) \right]$ 表示事件 $W(F_n, F) \geq \epsilon(n)$ 发生的概率； ν 是一个常数，可由求解下列优化方法得出：

$$\nu = \min_{\varpi > 0} 2 \sqrt{\frac{1}{2\varpi} \left\{ 1 + \ln \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \exp(\varpi \|\hat{\psi}_i - \hat{\eta}\|) \right] \right\}} \quad (65)$$

其中： ν 为参数分布所属空间的直径，即空间内两分布之间 Wasserstein 距离的上限； $\hat{\eta}$ 为样本均值； ϖ 为辅助参数变量， $\varpi > 0$ 。

2. 数据驱动支持集

目标支持集 Π 可以通过使用样本数据 $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2, \hat{\psi}_3, \dots, \hat{\psi}_n$ ，导出，首先需要对其进行标准化：

$$\hat{\Phi}_i = \hat{\Xi}^{-\frac{1}{2}} (\hat{\psi}_i - \hat{\eta}), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (66)$$

其中： $\hat{\Xi}$ 为样本协方差矩阵； ϑ 的支持集 $\tilde{\Phi}$ 可以表示如下：

$$\vartheta = \left\{ \tilde{\Phi} \in R^r \mid |\Phi_t| \leq l, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \right\} \quad (67)$$

其中： Φ_t 为 $\tilde{\Phi}$ 的第 t 个元素，约束范围为 $\forall t = 1, 2, \dots, T$ 。 ϑ 的假设目的为推导出一个合理的 1 距离，在保证随机事件 $\tilde{\Phi} \in \vartheta$ 发生概率较大的同时，使 ϑ 足够小以确保持守性偏低。假设 ψ_n^{std} 为 $\tilde{\Phi}$ 的经验分布、 ψ^{std} 为 $\tilde{\Phi}$ 的真分布， A^{std} 为 $\tilde{\Phi}$ 的歧义集，通过求解以下优化问题可以得到一个合理的 1 距离。

$$\min_{0 \leq l \leq l_{\max}} l \quad (68)$$

服从于：

$$\sup_{\psi^{\text{std}} \in A^{\text{std}}} \psi^{\text{std}}(\tilde{\Phi} \notin \vartheta) \leq 1 - \Lambda \quad (69)$$

其中： Λ 为高度置信水平。

在得到最优的 l 值后，数据驱动的支持集可以作为

$$\Phi = \hat{\Xi}^{-\frac{1}{2}} \vartheta + \hat{\eta} \quad (70)$$

3. 第二阶段约束

(1) 电解槽与甲烷反应器运行约束。

$$\begin{cases} \left| \left(P_{\text{DJC},t} - \alpha_{\text{DJC}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) - \left(P_{\text{DJC},t-1} - \alpha_{\text{DJC}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t-1} \right) \right| \leq P_{\text{DJC}}^{\text{rp}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \\ 0 \leq \left(P_{\text{DJC},t} - \alpha_{\text{DJC}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) \leq P_{\text{DJC},t}^{\text{max}} \end{cases} \quad (71)$$

$$\begin{cases} \left| \left(F_{\text{JW},t} - \alpha_{\text{JW}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) - \left(F_{\text{JW},t-1} - \alpha_{\text{JW}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t-1} \right) \right| \leq F_{\text{JW}}^{\text{rp}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \\ F_{\text{JW},\text{min}}^{i,t} \leq F_{\text{JW}}^{i,t} - \alpha_{\text{JW}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \leq F_{\text{JW},\text{max}}^{i,t} \end{cases} \quad (72)$$

(2) 燃料电池约束。

$$P_{\text{QDe}}^{\text{min}} u_{\text{QDe},t} \leq \left(P_{\text{QDe}}^{i,t} - \alpha_{\text{QDe}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) \leq P_{\text{QDe}}^{\text{max}} u_{\text{QDe},t}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (73)$$

(3) 能量平衡约束。电力平衡约束可表示为

$$\begin{aligned} & \left(P_{\text{QLJ}}^{i,t} - \alpha_{\text{QLJ}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + P_{\text{grid}}^{i,t} + \hat{P}_{\text{FAN}}^{i,t} + \hat{P}_{\text{GF}}^{i,t} + \left(P_{\text{QDe}}^{i,t} - \alpha_{\text{QDe}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + \left(P_{\text{ES,fd}}^{i,t} - \alpha_{\text{ES,fd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) = P_{\text{FAN,cut}}^{i,t} + P_{\text{GF,cut}}^{i,t} + \\ & P_{\text{EL}}^{i,t} + \left(P_{\text{DJC},t} + \alpha_{\text{DJC}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + \left(P_{\text{ES,cd}}^{i,t} + \alpha_{\text{ES,cd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + P_{\text{YSJ},t}, \forall t = 1, 2, \dots, T \end{aligned} \quad (74)$$

燃气功率平衡约束：

$$F_{\text{grid}}^{i,t} + \left(F_{\text{JW}}^{i,t} - \alpha_{\text{JW}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + \left(E_{\text{GS,fd}}^{i,t} + \alpha_{\text{GS,fd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) = F_{\text{QLJ}}^{i,t} + F_{\text{MQ}}^{i,t} + \left(E_{\text{GS,cd}}^{i,t} - \alpha_{\text{GS,cd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + F_{\text{GL}}^{i,t}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (75)$$

氢功率平衡约束可表示为

$$L_{\text{DJCh},t} + \left(E_{\text{H2S,fd}}^{i,t} + \alpha_{\text{H2S,fd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) = L_{\text{JWh},t} + \left(E_{\text{H2S,cd}}^{i,t} - \alpha_{\text{H2S,cd}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) + L_{\text{QDin},t}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (76)$$

(4) 微型燃气轮机约束。

$$\mu_{\text{QLJ}}^{i,t} P_{\text{QLJ},\text{min}} \leq \left(P_{\text{QLJ}}^{i,t} - \alpha_{\text{QLJ}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) \leq \mu_{\text{QLJ}}^{i,t} P_{\text{QLJ},\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (77)$$

$$-r_{\text{QLJ}} \leq \left(P_{\text{QLJ}}^{i,t} - \alpha_{\text{QLJ}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) - \left(P_{\text{QLJ}}^{i,t-1} - \alpha_{\text{QLJ}}^{i,t-1} \tilde{\xi}_{i,t-1} \right) \leq r_{\text{QLJ}}, \forall t = 2, 3, \dots, T \quad (78)$$

$$-r_{\text{QLJ}} \leq \alpha_{\text{QLJ}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \leq r_{\text{QLJ}}, \forall t = 2, 3, \dots, T \quad (79)$$

(5) 储能装置的约束。

电储能约束：

$$0 \leq E_{\text{ES,cd}}^{i,t} \leq \mu_{\text{ES,cd}}^{i,t} P_{\text{ES,cd}}^{\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (80)$$

$$0 \leq P_{\text{ES,fd}}^{i,t} \leq \mu_{\text{ES,fd}}^{i,t} P_{\text{ES,fd}}^{\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (81)$$

气储能约束：

$$0 \leq E_{\text{GS,cd}}^{i,t} \leq \mu_{\text{GS,cd}}^{i,t} P_{\text{GS,cd}}^{\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (82)$$

$$0 \leq P_{\text{GS,fd}}^{i,t} \leq \mu_{\text{GS,fd}}^{i,t} P_{\text{GS,fd}}^{\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (83)$$

氢储能约束：

$$0 \leq E_{\text{H2S,cd}}^{i,t} \leq \mu_{\text{H2S,cd}}^{i,t} P_{\text{H2S,cd}}^{\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (84)$$

$$0 \leq P_{\text{GS,fd}}^{i,t} \leq \mu_{\text{GS,fd}}^{i,t} P_{\text{GS,fd}}^{\text{max}}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (85)$$

(6) 弃风约束。

$$0 \leq \left(P_{\text{FAN,cut}}^{i,t} + \alpha_{\text{FAN,cut}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) \leq \hat{P}_{\text{FAN}}^{i,t}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (86)$$

(7) 弃光约束。

$$0 \leq \left(P_{\text{GF,cut}}^{i,t} + \alpha_{\text{GF,cut}}^{i,t} \tilde{\xi}_{i,t} \right) \leq \hat{P}_{\text{GF}}^{i,t}, \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (87)$$

为了更好地理解本文方法,图3中展示了建模过程。

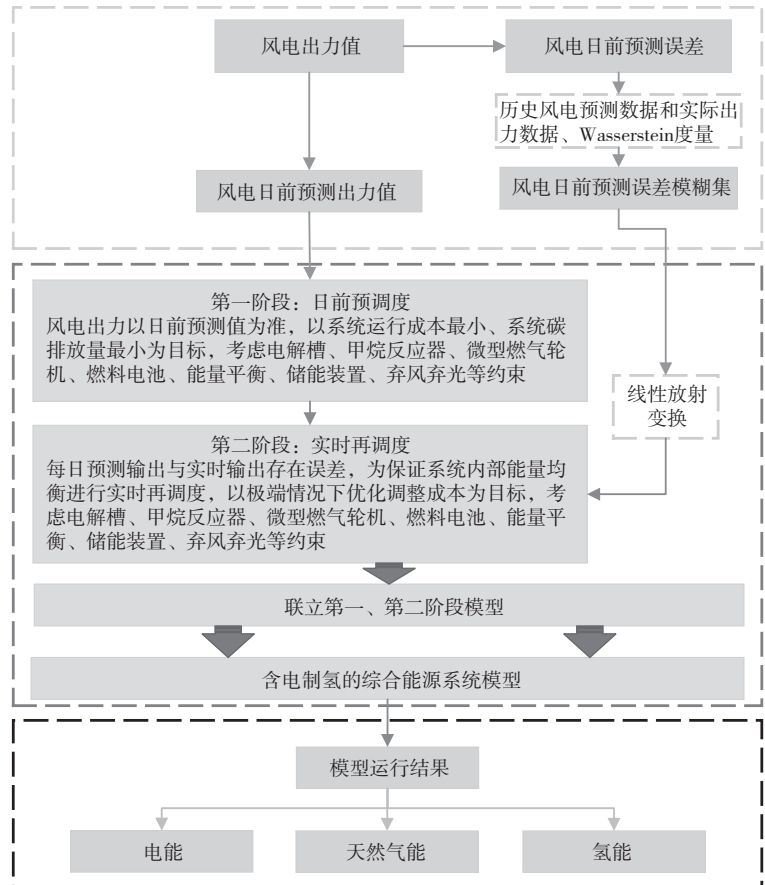


图3 含电制氢的综合能源系统建模过程的示意图

五、系统仿真

(一)数据描述

为了验证所提及模型的有效性并根据模型运行结果对电-气耦合系统的相关运行情况进行分析,本文将分布式鲁棒模型应用于一个典型的含电制氢装置的电-气耦合配网系统中,系统仿真的风电、光伏误差数据来自: <https://www.tennet.eu/>。从电力市场购买的 hourly 电力价格变化及趋势如图 4 所示。图 5 显示了燃气和电力的负荷数据,风力/光伏发电日前预测输出如图 6 所示。运行日的时间范围为 24 小时,时间步长为 1。硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i7-9700K CPU @ 3.60GHz 3.60 GHz 16.0GB RAM 的计算机进行仿真,软件运行环境为 MATLAB R2019a 版本下采用 CPLEX 结合 YALMIP 进行求解。

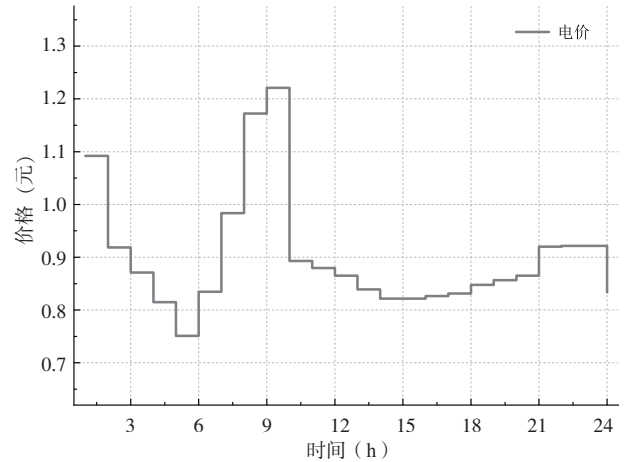


图 4 小时级电价数据

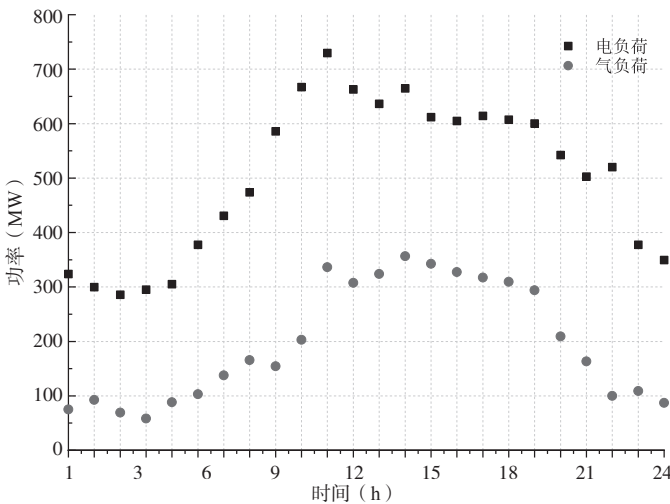


图 5 24点电负荷及气负荷图

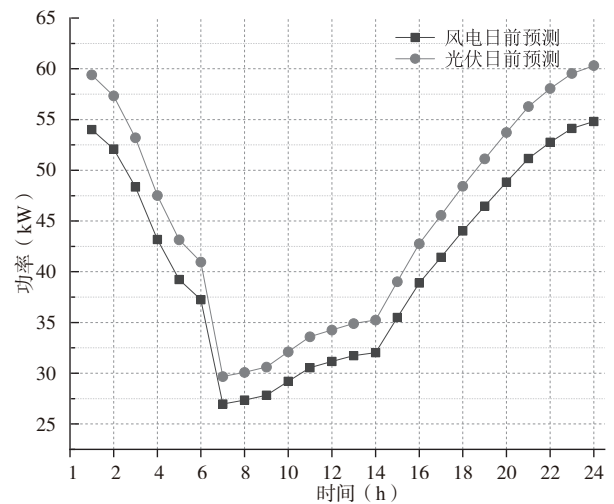


图 6 24点出力预测图

(二)场景设置

为了验证本文构建的含电制氢装置的综合能源系统的优势,本节设置了以下场景:

场景 1:使用本文提出的分布式鲁棒优化经济运行模型来调度含电制氢装置的综合能源系统,这是本文建立的主要的模型。

场景 2:从含电制氢装置的综合能源系统中移除电制氢机组,即使用分布式鲁棒优化模型来调度传统综合能源系统。

场景 3:使用鲁棒优化模型来调度含电制氢装置的综合能源系统,与本文提出的模型进行对比。

场景 4:使用随机优化模型来调度含电制氢装置的综合能源系统,与本文提出的模型进行对比。

其中:场景 2 的设置用于验证电制氢装置对多能源系统的影响。因此,电制氢装置被移除,使其成为传统的综合能源系统。在场景 2 中,需要忽略模型中电制氢装置的约束条件[式(37)~式(40)]。

本文设置场景 3 和场景 4 用来验证分布式鲁棒优化模型的有效性。因此分别与鲁棒优化和随机优化两种方法进行对比。

1. 场景 1 运行结果分析

图 7、图 8 显示了使用分布式鲁棒优化模型对含电制氢装置的电-气耦合配网系统的优化经济运行结果,其中,图 7 为最优电力经济运行结果,图 8 为最优天然气经济运行结果。含电制氢装置的电-气耦合配网系统的运行策略如下。

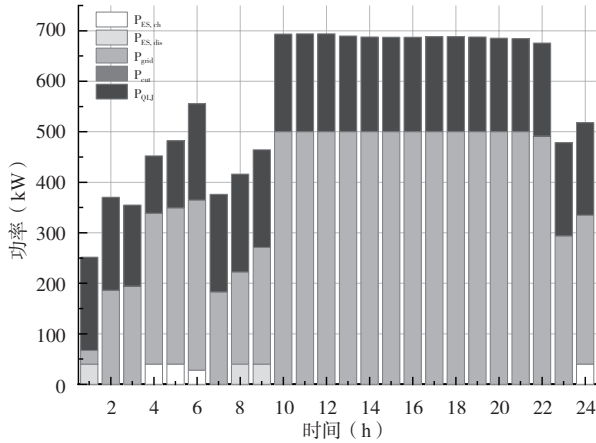


图9 场景2最优电力经济运行结果

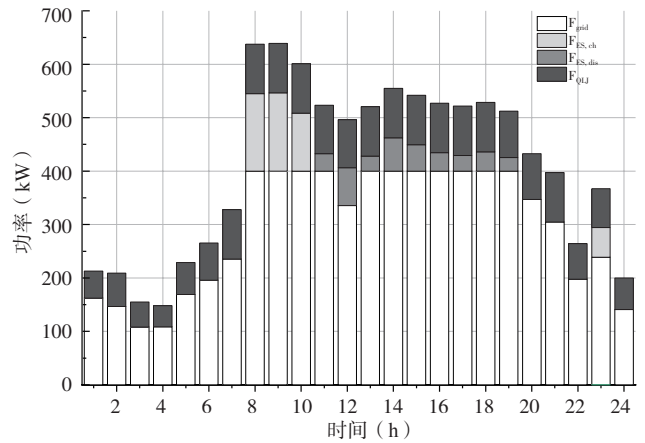


图10 场景2最优天然气经济运行结果

图 11 进一步比较了三种优化方法在不同样本值下获得的目标函数值。如图所示,当样本数较小时,分布式鲁棒优化的目标函数值趋于鲁棒优化模型的解。当样本数足够时,趋于随机优化模型的解。这表明,分布式鲁棒优化模型可以通过历史数据样本的规模,有效地平衡经济运行结果的鲁棒性和经济性。从图中可以发现,不论样本集如何变化,鲁棒优化模型求解的系统经济运行成本总是最高,而随机优化模型所求解的系统经济运行成本总是最低,而分布式鲁棒优化方法求得的系统运行成本介于两者之间,因为随机优化是在已知不确定参数的分布下求解,而鲁棒优化是在不确定参数最劣情况下求解。

3. 模型适用性的验证分析

为了验证分布式鲁棒优化模型的鲁棒性、经济性及数据驱动方面的表现及适用性,我们比较了不同风电功率输出样本下的计算时间。由表 3 可知,样本总体计算时间在 8~13 秒,且不随样本的变化而显著变化。因此证明了本文模型具有很好的鲁棒性和数据驱动性。

4. 环境成本分析

表 4 主要显示了含电制氢装置的电-气耦合配网系统在两种情况下的污染物排放情况。通过场景 1 和场景 2 的比较可以看出,在系统中添加电制氢装置作为电耦合元件可以降低系统的污染物排放。其原因在于不考虑碳排放成本的情况下,系统运行时优先考虑运行成本较低的机组,这最终可以保证系统的经济运行成本较低,此外含电制氢装置的电-气耦合配网系统运行时消耗一定量的 CO₂,这样含电制氢装置的电-气耦合配网系统能有效实现经济性和低碳性的平衡。

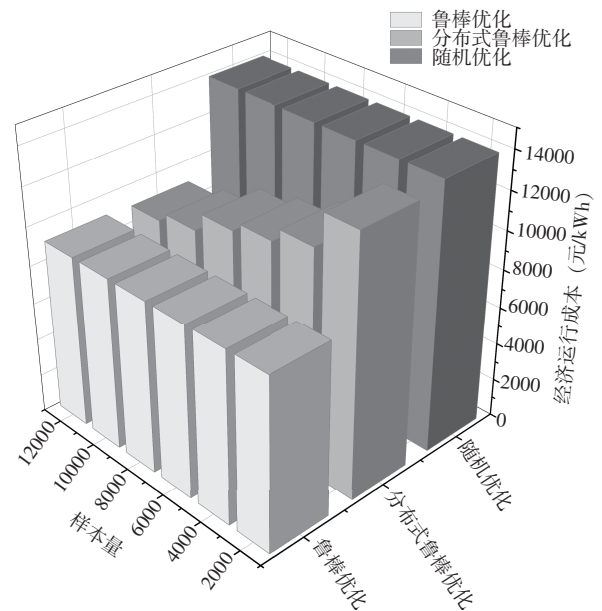


图 11 分布式鲁棒优化与其他优化方法的比较

表 3 不同误差样本值下模型的计算时间

样本量	计算时间	样本量	计算时间
1000	8.43	8000	10.21
2000	8.61	10000	12.73
4000	9.57	12000	12.36
6000	9.71		

表 4 场景 1 和场景 2 碳排放量对比

场景	CO _x 排放(克)	SO _x 排放(克)	NO _x 排放(克)
场景 1	5892.03	34.17	3.02
场景 2	6025.12	39.92	3.52

六、结论

本文围绕电-气耦合系统中的经济运行问题展开研究,构建了含电制氢装置的电-气耦合配网系统结构,给出了各机组设备及网络的数学模型,提出了一种基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒优化模型,用于解决含风电等可再生能源的不确定性条件下的鲁棒性、经济性和低碳性之间的平衡问题,基于历史数据建立了日前

出力预测误差这一不确定因素的模糊集和支撑集,在风电日前预测误差模糊集和支撑集的基础上提出了气-电耦合系统的日前实时两阶段经济运行模型,利用增量线性化、仿射变换和强对偶理论将模型转化为易于求解的形式,最后基于测试系统和测试数据对进行了算例分析,得出了如下结论。

(1)以 Wasserstein 度量为半径的模糊集描述不确定变量是一种可行的方法。随着历史数据的增加,模型解趋于如此解。结果表明,与传统的鲁棒优化相比,该模型具有较低的保守性,在保证系统运行安全的前提下,可以大大降低运行成本。

(2)与鲁棒优化和随机优化模型相比,一方面,分布式鲁棒优化模型相对较低的保守性保证了含电制氢装置的电-气耦合配网系统在不确定干扰下运行的经济性;另一方面,相对较低的运行时间表明,基于强对偶理论的模型重构方法使分布式鲁棒优化模型在实践中可行。因此,所提出的分布式鲁棒优化经济运行模型可以克服随机优化模型和鲁棒优化模型方法的缺点,从而将模型的保守性和计算复杂度保持在相对较低的水平。

(3)从分布式鲁棒优化经济运行模型的综合经济运行结果可以看出,该策略能够保证系统的经济、低碳运行。该系统的主要性能是在经济运行系统时优先考虑运行成本较低的机组或电源。例如,随着电力市场价格的变化,配网和电力市场的能源交易量也在变化。当价格较低时,将从 EM 处购买,当价格较高时,将使用系统的内部电源单元发电或将剩余电力出售给电网。

此外,本文围绕多元随机干扰下微能源网运行优化的相关问题展开研究。研究成果既可为微能源网在各类因素的随机干扰下提升经济、环境综合效益,促进分布式风、光消纳等提供重要的运行优化及能量管理技术,也可为能源市场环境下保障微能源网合理取得供能收益,实现自负盈亏提供有力的支持。在理论贡献方面,在考虑风光出力不确定性因素的前提下,拟构建一种描述各因素联合概率分布可能变化范围的模糊集合模型,并提出关于集合边界(覆盖范围)的优化策略。本部分研究可为全面刻画微能源网运行各干扰因素值预测及分布预测的不确定性提供科学的理论方法及思路。在各因素联合概率分布模糊集合的基础上,构建相应的微能源网运行优化模型,并提出模型的求解方法。一方面,可为微能源网提供一套合理抵抗多元随机干扰,提升经济、环境综合效益,并促进分布式可再生能利用的运行优化理论方法;另一方面,还可为解决其他复杂能源系统运行优化问题提供借鉴与参考。

本文的研究也存在一定的局限性:本文提出的综合能源系统主要涉及氢、电两种能源形式,而在系统运作过程中产生的热能未被有效运用,仍需进一步在多能源系统耦合方向进行更为细致深入的研究工作。未来可以通过加入热能转换组件来完善综合能源系统的完整性,充分考虑热能的用能特征以适应多场景运用需求;坚持系统效益最大化为导向,进一步提高耦合配网系统的总体收益,确保最佳经济性。

参考文献

- [1] 岑有奎,任建文,张豪林,2022.基于氢储能的含大规模风电电力系统经济调度[J].科学技术与工程,22(20): 8727-8733.
- [2] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等,2021.考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J].电力自动化设备,41(9): 48-55.
- [3] 陈泽雄,张新民,王雪峰,等,2021.分布式光伏电站接入配电网的分布鲁棒优化配置方法[J].电力系统保护与控制,49(13): 30-42.
- [4] 戴璐平,吴薇,黄蓓雯,2019.考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J].电力系统保护与控制,47(3): 48-55.
- [5] 高海淑,张玉敏,吉兴全,等,2020.基于场景聚类的主动配电网分布鲁棒综合优化[J].电力系统自动化,44(21): 32-41.
- [6] 高晓松,李更丰,肖遥,等,2020.基于分布鲁棒优化的电-气-热综合能源系统日前经济调度[J].电网技术,44(6): 2245-2254.
- [7] 郭梦婕,严正,周云,等,2020.含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J].中国电力,53(1): 115-123, 161.
- [8] 凌万水,刘刚,2020.基于鲁棒优化的主动配电网分布式电源优化配置方法[J].电力系统保护与控制,48(15): 141-148.
- [9] 裴蕾,卫志农,陈胜,等,2022.交直流混合配电网多阶段随机优化调度模型[J].电力系统保护与控制,50(14): 20-33.
- [10] 祁晓敏,孔力,熊煌,等,2021.源荷储协调的冷热电综合能源系统随机优化运行[J].电工电能新技术,40(3): 10-21.
- [11] 邵志刚,衣宝廉,2019.氢能与燃料电池发展现状及展望[J].中国科学院院刊,34(4): 469-477.

- [12] 司杨, 陈来军, 陈晓毅, 等, 2021. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 41(10): 3-10.
- [13] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等, 2019. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 34(19): 4071-4083.
- [14] 王赓, 郑津洋, 蒋利军, 等, 2017. 中国氢能发展的思考[J]. 科技导报, 35(22): 105-110.
- [15] 王会超, 秦昊, 周昶, 等, 2019. 计及新能源预测不确定性的跨区域日前-日内调度模型[J]. 电力系统自动化, 43(19): 60-67.
- [16] 夏鹏, 刘文颖, 张尧翔, 等, 2020. 考虑风电高阶不确定性的分布式鲁棒优化调度模型[J]. 电工技术学报, 35(1): 189-200.
- [17] 易文飞, 卜强生, 路珊, 等, 2022. 计及气网管存效应的综合能源系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力自动化设备, 42(6): 53-60, 83.
- [18] 臧海祥, 马铭欣, 周亦洲, 等, 2022. 电力市场环境下风电-光热-生物质混合电站鲁棒优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 50(5): 1-11.
- [19] 张高航, 李凤婷, 2020. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 40(12): 159-167.
- [20] 张海波, 申杰, 王国荣, 等, 2022. 考虑无功设备动作的交直流电网日前两阶段随机优化调度[J]. 电力系统自动化, 46(8): 133-142.
- [21] 张治, 董润楠, 魏振华, 等, 2022. 考虑风电不确定性和旋转备用容量配置的综合能源系统鲁棒机会约束优化[J]. 热力发电, 51(6): 25-33.
- [22] 邹云阳, 杨莉, 李佳勇, 等, 2019. 冷热电气多能互补的微能源网励棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 43(14): 65-77.
- [23] EL-TAWEEL N A, KHANI H, FARAG H E Z, 2018. Hydrogen storage optimal scheduling for fuel supply and capacity-based demand response program under dynamic hydrogen pricing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 10(4): 4531-4542.
- [24] KAFETZIS A, ZIOGOU C, PANOPOULOS K D, et al, 2020. Energy management strategies based on hybrid automata for islanded microgrids with renewable sources, batteries and hydrogen[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134: 110118.
- [25] KHANI H, EL-TAWEEL N A, FARAG H E Z, 2019. Supervisory scheduling of storage-based hydrogen fueling stations for transportation sector and distributed operating reserve in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(3): 1529-1538.
- [26] MORETTI L, MARTELLI E, MANZOLINI G, 2020. An efficient robust optimization model for the unit commitment and dispatch of multi-energy systems and microgrids[J]. Applied Energy, 261: 113859.
- [27] TENG Y, WANG Z, LI Y, et al, 2019. Multi-energy storage system model based on electricity heat and hydrogen coordinated optimization for power grid flexibility[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 5(2): 266-274.
- [28] XIAO P, HU W, XU X, et al, 2020. Optimal operation of a wind-electrolytic hydrogen storage system in the electricity/hydrogen markets[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 45(46): 24412-24423.
- [29] XU X, HU W, CAO D, et al, 2020. Optimal operational strategy for an offgrid hybrid hydrogen/electricity refueling station powered by solar photovoltaics[J]. Journal of Power Sources, 451: 227810.

Economic Operation Analysis of Integrated Electric-Gas Distribution System Considering E2H Conversion Process and Uncertainty

Siqin Zhuoya, Xu Xiaomin, Zheng Shipeng, Wang Zhiyi, Niu Dongxiao

(School of Economy and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The use of high-efficiency and energy-saving electricity gas coupling distribution network system provides an opportunity to consider increasing economic benefits and reducing environmental costs at the same time. In order to solve the problem of economic operation, a two-stage distributionally robust optimization model is proposed. The ambiguity uncertainty set of the probability distribution of wind power output prediction error is described by Wasserstein measure, and the distributionally robust optimization operation model of the combined electricity gas system of the electric hydrogen production plant considering the uncertainty of wind power output is constructed. The simulation results show that: Firstly, the introduction of electric hydrogen production device can effectively improve the electric gas coupling of distribution network system and improve the stability and economy of system operation. Secondly, considering the environmental cost, the pollutant emission of the electric gas coupling distribution network system of the electric hydrogen production unit is significantly reduced, ensuring the low-carbon operation of the system. Thirdly, distributionally robust optimization model can resist the interference of uncertain wind power and photovoltaic output, has relatively low conservatism and computational complexity, and has the characteristics of data-driven.

Keywords: integrated electric-gas distribution system; Wasserstein measure; distributionally robust optimization; environmental costs