

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.09.001

能源互联网群体智能协同控制与优化技术

Swarm intelligence collaborative control and optimization technology of Energy Internet

秦羽飞¹,葛磊蛟^{2*},王波³
QIN Yufei¹,GE Leijiao^{2*},WANG Bo³

(1.山东科技大学 电气与自动化工程学院,山东 青岛 266950; 2.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072; 3.武汉大学 电气与自动化学院,武汉 430072)

(1.College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266950, China; 2.School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3.School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要:能源互联网是实现我国能源革命目标的关键技术之一,也是源网荷储的集大成者。为推进能源互联网多能源协调发展和综合高效利用,对能源互联网群体智能协同控制与优化技术进行构思和顶层设计。聚焦于能源互联网的高效运行,重点从面向能源互联网优化运行的群体智能模型构建技术、基于群体智能的能源互联网运行优化技术、基于多智能体的能源互联网分布式协同控制技术等 3 方面对能源互联网的分布式群体智能协同控制与优化技术进行了详细设计。将该方法应用于河南省兰考县能源互联网平台,以实现全县域、全品类、全链条可观可测,可为能源互联网的优化运行提供一定理论基础和工程借鉴。

关键词:能源互联网;源网荷储;多能互补;群体智能模型;协调优化;分布式协同控制

中图分类号:TK 01[†]8;TM 734 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)09-0001-13

Abstract: Energy Internet, the integrator of generation, network, load and storage, is a key technology for realizing energy revolution in China. In order to promote the coordinated development of multiple energy sources for Energy Internet, and boost the efficient use of energy, a swarm intelligent collaborative control and optimization technology for Energy Internet is conceived, integrated and designed. Focusing on the efficient operation of Energy Internet, the swarm intelligence collaborative control and optimization technology has taking three aspects into consideration, group intelligence model construction technology for optimizing the operation of Energy Internet, Energy Internet operation optimization technology based on swarm intelligence and Energy Internet distributed cooperative control technology based on multi-agent. This technology will be applied in the Energy Internet platform of Lankao County, Henan Province, which can make the data from the whole county area, in all categories and from all links in the chain visible and measurable. It provides theoretical basis and engineering reference for optimizing the operation of Energy Internet.

Keywords: Energy Internet; generation-grid-load-storage; multi-energy complementation; group intelligence model; coordination optimization; distributed cooperative control

0 引言

在全球工业化进程中,化石能源的大量、广泛使用促进了社会发展^[1-2],但也带来了严重的能源与环境问题,严重威胁人类的可持续发展。寻求更加低碳、可持续的生活和生产方式,更加清洁和可持续的新能源供应体系是全世界人民的重要需求。

能源互联网能集成可再生能源发电,形成多能互补、高效互动的能源网络,近年来成为国家可持续发展的战略选择之一。

20 世纪 70 年代,巴克敏斯特·富勒首先提出了能源互联网概念^[3],经过多年的探索与研究,2011 年美国学者杰里米·里夫金在《第三次工业革命》中提出能源互联网是第三次工业革命的核心之一^[4],由此能源互联网的概念得到了广泛传播。现阶段的能源互联网是以电为中心,以坚强智能电网为基础平台,将先进信息通信技术、控制技术与先进能源技术深度融合,支撑能源电力清洁低碳转型、能源

收稿日期:2021-05-07;修回日期:2021-08-05

基金项目:省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学)开放课题基金资助项目(EERI_KF20200014)

综合利用效率优化和多元主体灵活便捷接入,具有清洁低碳、安全可靠、泛在互联、高效互动、智能开放等特征的智慧能源系统。能源互联网是一个正在发展的、内涵外延丰富、包容性很强的概念,是能源电力系统发展的更高阶段^[5]。

与传统的供能网络相比,城市能源互联网中冷、热、电、气等供能网络耦合度明显增强^[6]:一方面,能量网络通过形式多样的物理设备元件形成联系,不同品位的能量在生产、传输、转换、消费过程中相互影响,呈现时空尺度不同且复杂的耦合动态过程;另一方面,多能源网络的运行调度、控制保护和应急恢复等调控逻辑存在相互依赖和耦合的关系,需要协调运行和协同互补。可见,能源互联网物理与信息系统耦合的动态精细化建模和协调调控是能源互联网成功建设所需的关键技术。

能源互联网中冷、热、电、气等可控资源接入后,需要通过高效的运行优化手段来提升能源的综合能效;同时,电网的传输电量、供热网的供热量和天然气网的供气量等不同能源形式间具有时空差异性:因此,有必要研究能够横向实现电、气、热、可再生能源的多源互补,纵向实现源网荷储各环节高度协调的能源互联网运行优化技术,从而统筹规划各种能源供给计划和能源间转供计划^[7],实现能源互联网的安全、可靠、经济、高效运行。

综上所述,为推进能源互联网多能源协调发展和综合高效利用,充分发挥电网在调控、运行和转化方面的优势与主导作用,亟须分析不同动态尺度下各类能源生产设备、储能设备以及响应负荷的高维分布式建模机理;在此基础上,深入分析能源互联网设备单元对整体动态模型的影响规律,获得高精度、高可靠性冷、热、电、气分布式异构多能群体智能动态模型;结合示范工程研究及验证能源互联网运行优化技术,为能源互联网优化运行及智能化水平的提升提供重要的理论与技术支撑。简言之,主要有以下3方面的技术。

(1)分析能源互联网物理-信息解耦机理^[8],提出机理分析和数据驱动相结合的能源互联网分布式异构多能智群统一模型,解决冷、热、电、气组成的复杂能源互联网多时空尺度优化运行表征难的问题,为后续能源互联网优化运行、智能调控奠定基础。

(2)构建经济、环保、可靠和安全等运行目标的量化评估方法并分析能源互联网的运行约束体系,进而构建多目标能源互联网综合优化模型^[9-11];从连续高阶与离散动态约束降维技术2种手段入手,实现能源互联网复杂高阶非线性约束的降维分析;

最后,通过设计基于群体智能协同进化的分布式优化算法架构,实现优化运行模型的高效求解,为能源互联网的分布式智能调度提供技术支撑。

(3)提出面向分布式自治控制的边缘计算算法,通过各类型异质能源的本地智能控制与一致性信息交互,实现能源互联网集群的分布式自治控制;通过构建面向集群级多智能体协同的能源互联网分层分布式调控框架,实现能源互联网多智能体的分布式优化运行与协同控制;在此基础上,设计能源互联网分布式协同控制与优化系统,有效提升能源互联网的综合治理水平。

1 面向能源互联网优化运行的群体智能模型构建技术

从能源互联网物理-信息系统的解耦入手,通过分析能源互联网内不同动态尺度下的各类设备以及负荷的建模机理,获得高精度、高可靠性的群体智能模型,为实现多能源间的最优协同运行提供最准确的状态参量。该技术主要分为3部分,内在关系如图1所示:(1)开展能源互联网物理与信息系统解耦映射机理研究;(2)进行机理与数据融合的分析,并在此基础上进行群体智能建模;(3)在(1)、(2)的基础上构建冷、热、电、气分布式异构多能群智动态模型,进而获得高精度、高可靠性的群体智能模型。

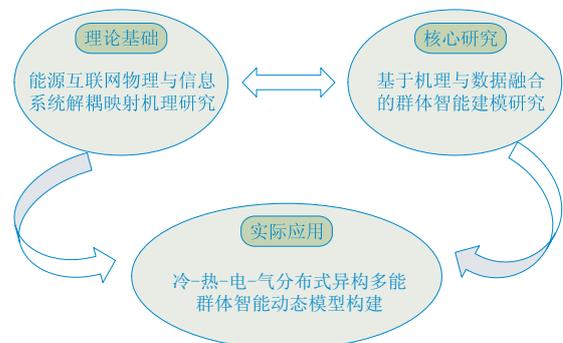


图1 面向能源互联网优化运行的群体智能模型构建框架
Fig. 1 Framework of swarm intelligence model construction for Energy Internet operation optimization

1.1 能源互联网物理与信息系统解耦映射机理

分析能源互联网的运行机理,建立能源互联网物理与信息系统的解耦映射机理体系。美国基金会最早提出信息物理系统(CPS)的概念,该系统将计算与物理资源紧密结合在一起,主要包括计算系统、大规模通信系统、大规模传感器网络、控制系统和物理系统^[12]。丹麦奥尔堡大学和国内东北大学合作提出了一种基于多智能体一致性算法的新型分布式协调控制器,该控制器可应用于能源互联网中的分布式发电机^[13]。国外对能源互联网能源管

理方面的研究颇多,但缺乏能源互联网物理信息融合方面的研究。

国内也在能源互联网信息物理融合方面进行了大量研究,提出了一些有关信息物理融合方面的设备构想。华北电力大学李存斌等结合复杂网络理论和风险传递理论,着重在拓扑层面分析了能源互联网信息物理系统(ECPS)跨空间交互机理,通过建立ECPS跨空间风险传递模型,量化描述了风险的传递和演化过程并进行了风险影响评估^[14]。上海电力大学买坤等提出了一种基于信息物理融合系统的能源路由器框架结构^[15],不但具备采集数据、智能监管以及控制能量流动等多重功能,还可有效融合不同特征的能源流及各种分布式电源,满足用户对能源的需求。国内东北大学孙秋野等提出了一种基于信息物理融合的能源互联网模型^[16]。重庆理工大学蒋东荣等研究了能量流与信息流的耦合机理,建立了基于能源互联网的能源流与信息流有限状态混成模型^[17]。但国内学者在研究过程中忽略了能源-信息关系模型的构建,对能源互联网中能源流和信息流关联的研究不够深入。

因此,基于当前已有的能源互联网物理信息融合系统的研究成果,对能源互联网中的能源流和信息流进行深入分析,分析物理侧各类功能单元以及负荷和信息侧各类传输线路、通信协议和多种网络协同作用对物理信息融合建模的影响;在此基础上,利用大数据技术深入挖掘物理、信息的历史数据关系,构建基于两者的跨空间的映射关系,并采用矩阵运算等方式处理系统离散状态与连续状态的衔接;然后,以用户需求的多元性为主要影响因素,将各类能源供能、各类信息传递通信协议等作为约束条件,建立以用户需求为主导的、考虑多因素影响的能源互联网物理-信息融合模型。

基于上述物理-信息融合模型,分析物理、信息二者之间空间风险演化机理,总结影响物理、信息融合的安全要素以及跨空间传播与演变的风险因素。基于安全要素以及风险要素的基本形式并结合细胞自动机理论,建立考虑安全风险物理-信息融合模型。

最后,结合复杂网络理论以及风险传递理论,构建基于拓扑结构的信息空间影响指数、物理空间影响指数、交互边影响指数、用户需求影响因数以及环境影响因数的风险影响系数,并将此系数加入到对物理-信息融合模型的逆向解耦中。在解耦过程中充分考虑时间序列的影响,并通过物理-信息拓扑结构的交互节点降低时间序列对信息传递造成的延迟。最终通过智能空间的表述方式,对物

理-信息的解耦映射机理进行表示。能源互联网物理与信息系统解耦映射机理如图2所示。

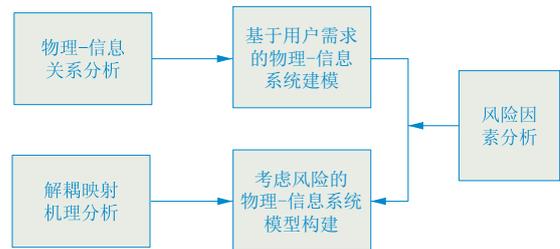


图2 能源互联网物理与信息系统解耦映射机理
Fig. 2 Decoupling mapping mechanism of Energy Internet physics and information system

1.2 基于机理与数据融合的群体智能建模

为有效应对传统物理机理建模、多能源耦合等引起的系统运行不确定问题,提出将机理分析与多源异构数据融合的群体智能模型。基于能源互联网物理与信息系统解耦映射机理,充分挖掘能源互联网内各能源生产单元、储能单元等与各类通信单元之间的关联性,从能源互联网中提取分析各能源设备数据之间的关联特征,对能源互联网中冷、热、电、气等多源异构大数据进行有效融合,以提升能源互联网的运行管理和性能优化水平,实现对能源互联网各能源设备多方面、高精度的统一认识。

在能源互联网中不同能源间的耦合关联机理方面,英国研究理事会资助的英国能源网络领域最核心的“Energy Hub”项目中专门设立了综合能源系统主题。瑞士联邦理工大学提出的Energy Hub模型^[18]通过静态的转换效率连接多种能源需求和多种能源供给,得出满足能源需求条件下的最终能源供给方式。德国的E-Energy项目重点开发基于信息与通信技术(ICT)的能源系统,其目标是通过数字网络实现发电的高效、安全供给及能源供应系统优化,同时促进能源市场的自由化和分散化。美国国家新能源实验室正在开发可以仿真单独楼宇-配电网-区域互联电网的综合能源系统模型(IESM),用于研究不同的市场模型、分布式发电、需求侧响应等对未来电力系统的影响。美国橡树岭国家实验室(ORNL)组建了一支跨学科研究团队,旨在研究如何从发电、配电、用电环节提供安全可靠的综合能源系统,内容主要集中于楼宇发电系统,储能系统以及综合能量的管理、控制及规划。国网电力科学研究院针对冷、热、电多种能源协调控制展开研究,探索热泵、蓄冷、储热锅炉等电能替代产品的简单应用模式。清华能源互联网研究院的能量管理与调控研究中心对冷、热、电多种能量的综合管理、运营模式与调控技术展开了研究^[19]。天津大学

基于奇异摄动理论的电-气耦合系统多时间尺度分层控制策略以及能源集线器模型的电-气耦合系统潮流分析与优化方法,提出了考虑电气系统动态与天然气动态的电-气耦合系统双时间尺度仿真分析模型^[20]。但以上研究只考虑 2 种能量系统的耦合,或只使用稳态网络计算模型,没有将冷、热、电、气等多种能源系统的动静特性综合考虑,因此,需要通过建立动态管网模型精细化分析能源互联网在能量传输上的差异,基于各能量系统的传输特性建立混合时间尺度优化运行模型,充分挖掘能源互补特性。

基于机理与数据融合的群体智能建模技术可分为 3 部分,如图 3 所示。

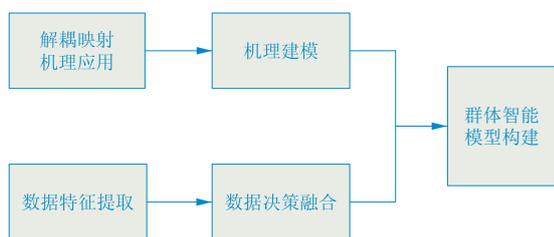


图 3 基于机理与数据融合的群体智能建模技术

Fig. 3 Swarm intelligence modeling based on mechanism and data fusion

(1) 构建机理模型并基于海量历史数据提取单元对象特征和影响因素,利用深度学习、聚类分析等数据驱动技术^[21-22],提出不确定性过程分类和自动辨识方法,在此基础上明确转移关系,同时考虑各类波动过程,以实现简约信息交互下能源系统网各设备连通关系的群体智能感知。通过融合能源互联网物理与信息系统解耦映射机理和数据信息,充分发挥机理模型和数据驱动模型的优点,更好地反映建模对象的规律与特性并对历史和实时数据进行充分挖掘,以提升能源互联网的运行管理和性能优化水平。采用互信息方法度量海量监测数据间的关联性,在数据预处理过程中筛选出关联特征,然后采用数据驱动的方式,基于回归神经网络进行多能源耦合网络的系统参数辨识,实现系统内各类能源转化系数的动态评估,对海量数据进行决策融合。

(2) 提出多能源网络系统下信息流向群体智能感知技术,分析信息流事件间的影响程度,建立概率论框架下的信息流链路代价方程,实现多系统网络链路信息流向形势的群体智能感知。在能源互联网各设备有限感知的基础上,群体智能感知模块采用离散状态获取、全局形势推理、演化趋势预测的思路,实现“由点到面、由当前到未来、由个体智慧汇聚群体智能”的多域立体协同感知。

(3) 探索全局网络形势拼接机理,针对不同时间尺度的动态特性,建立电力系统、热力系统和天然气系统等多能源耦合网络,以可靠性最佳,系统购能成本、运行维护成本以及能量损耗成本之和最小等为目标,构建基于机理与数据融合的群体智能模型,掌握能源互联网不同动态尺度下各类能源生产设备、储能设备以及响应负荷的高维分布式建模机理。

1.3 冷、热、电、气分布式异构多能群体智能动态模型构建

通过能源互联网物理信息解耦机理以及群体智能建模的研究,建立解耦后的冷、热、电、气单一系统模型,设计多能源系统联合供给系统,基于“多能互补、梯级利用”的核心理念,实现多能源系统的分布式异构建模,合理处理能源间的相关性,准确匹配能源供需关系。

目前,针对能源物联网的建模通常采用静态建模方式,主要包括电力网络建模,天然气网络建模以及供热、冷管网络建模等能源网络方面的建模。针对单种能源网络建模,英国曼彻斯特大学 Clegg 和 Mancarella 采用直流潮流模型,实现了两步优化和双层优化的能源互联经济调度求解^[23]。美国桑迪亚国家实验室提出利用识别参数敏感度相似性的方法来估计模型参数。伊朗谢里夫理工大学提出在天然气管网中,根据质量、动量和能量平衡方程建立天然气管道非等温模型,利用正交配置法对其动态方程进行求解。针对多种能源耦合建模,美国和瑞士提出了能源集线器的概念,将能源供应与用能需求高度抽象并分类,从稳态角度给出了不同能源之间的传递与转换关系,建立的模型可视为能源互联网中多种能源相互转化的中心。东南大学研究了基于冷、热、电三联供系统的多区域能源互联网规划问题,使用能量流法实现了能源互联网中供热系统和电力系统的同质化分析。天津大学对电力-天然气区域能源互联网进行了稳态建模和求解,研究了天然气系统网络状态改变对区域能源互联网的影响。华北电力大学提出了一种适用于电、热、气的能源互联网扩展 Newton-Raphson 多能潮流计算方法。由上述研究可见,目前已有的建模涉及的能源种类及相关电力设备较少,难以代表未来能源互联网的典型形态和运行特性,有必要进一步构建冷、热、电、气分布式异构多能群体智能动态模型,为实现多能源间的最优协同运行提供准确的状态参量。

因此,本文在多能源联供的基础上提出群体智能技术^[24],分析群体行为对象的运行规律与内在关

联,提出冷、热、电、气多能源分布式异构系统的统一群体智能动态模型构建方法,如图4所示。

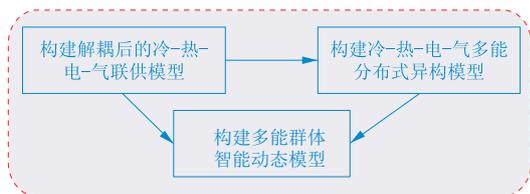


图4 冷、热、电、气分布式异构多能统一群体智能动态模型

Fig. 4 Distributed heterogeneous multi-energy unified swarm intelligence dynamic model for cold, heat, electricity and gas

(1)根据能源互联网物理与信息系系统解耦映射机理以及机理数据融合模型构建冷、热、电、气联供模型,在结构方面采用母线式进行建模,以提高模型的通用性和灵活性。系统建模过程中,除注意母线能量平衡方程式外,还需考虑各类设备自身的约束,包括各设备功率的上下限、储能设备的充放电功率和储能能量等。下面对电力网络、天然气网络、热力网络的建模方案分别进行介绍。

1)选取稳态模型,采用节点分析方法对电力网络进行稳态建模。首先利用数值积分算法将不同电气元件的暂态方程离散化,形成各电气元件的诺顿等值方程,进而构造节点矩阵进行求解;其次,通过获取输电线路网络拓扑结构,等效电路的电阻、电感、电容等参数,得到各节点负荷以及发电机输出有功、无功约束,各节点电压约束等参数,在直角坐标系下根据这些参数计算各点的有功功率和无功功率。由于分布式能源主要由风电、光伏等组成,其本身具有一定的波动性,再加上用户侧的需求以及柔性负荷的接入都可能导致负荷的大幅度变动,因此必须把不确定性问题考虑在内。可以引入随机模型预测控制法,算法主要步骤包括建立预测模型、场景生成、滚动优化和反馈矫正。随机模型预测控制方法要求明确不确定因素的概率分布模型,本文认为负荷、光伏和风电出力预测误差满足正态分布。通过时间序列法建立动态模型,降低因风力和光照以及负荷自身的不确定性造成的随机误差,使模型更具动态性和灵活性。

2)对于天然气网络,首先将是否含压缩机的输气管道分为主动式管道和被动式管道,并分别对2类管道建立稳态和动态模型。对于稳态模型,先将管道流量描述为两端压力差的Weymouth函数,同时考虑足节点潮流平衡和环路零压降等约束。对于动态模型,在稳态基础上进一步考虑天然气潮流的流体特性,将气潮流描述为对时间、空间的偏微分方程^[25]。

3)对于热力网络,建立基于支路元件特性与网

络基本定律的能量流模型,列写水力特性方程、水力网络平衡方程、热力支路特性方程、热力网络平衡方程。其中,水力特性方程中热网管道的水压与流量的平方成正比,水力平衡方程满足基尔霍夫定律,热力网络平衡方程需考虑传输过程中的网络损耗。然后建立考虑水力传输影响的热力网络方程。

(2)研究多能源分布式异构系统下的群体智能技术,扩展群体智能模型,将冷、热、电、气分供模型的各个系统模型当作个体,群体中各能源个体之间的相互作用使得群体的智慧真正得到发挥。引入可描述多能耦合关系的雅克比矩阵,并采用扩展的牛顿-拉夫逊法计算多能潮流。

(3)引入能源集线器技术,将作为智能个体的能源系统抽象为输入-输出双端口网络,各种形式的能源输入最终转化成为其他形式的能源输出。将机理与数据融合的群智理论模型应用到实际,建立高效准确的冷、热、电、气分布式异构多能统一群体智能动态模型。

2 基于群体智能的能源互联网运行优化技术

基于群体智能的能源互联网运行优化技术以能源互联网中多能流耦合关系为切入点,通过能源互联网中多维度指标的量化评估,构建计及经济性、环保性、可靠性和安全性的能源互联网优化模型,并利用群体智能思想实现模型求解,为实现安全运行前提下能源互联网效益最大化打下坚实基础,如图5所示。主要包括含多目标优化运行方法、连续高阶与离散动态约束降维技术和能源互联网优化算法等3个方面:(1)聚焦基于经济、环保、可靠和安全的多目标能源互联网优化建模技术;(2)进一步针对模型中的高阶高维约束进行简化,实现约束的可行降维;(3)基于群体智能-强化-迁移学习的思想,研究具有快速收敛性、全局搜索能力的能源互联网多目标优化求解算法。

2.1 基于经济、环保、可靠和安全的多目标能源互联网优化模型

能源互联网多目标优化运行主要包含构建多能流约束体系和建立多目标优化模型2部分。在多能流约束体系构建部分,针对电力系统和燃气系统响应时间尺度差异较大,难以统一建模的问题,丹麦奥尔堡大学提出了一种具有双向耦合设备的电气互联系统动态最优能量流计算方法^[26]。在热-电耦合运行部分,英国卡迪夫大学研究了热电联产机组、热泵和电锅炉等设备的耦合作用,提出了一种热电联合潮流计算方法^[27]。上述文献在电-气互联、热-电互联系统约束体系建模方面进行了较为

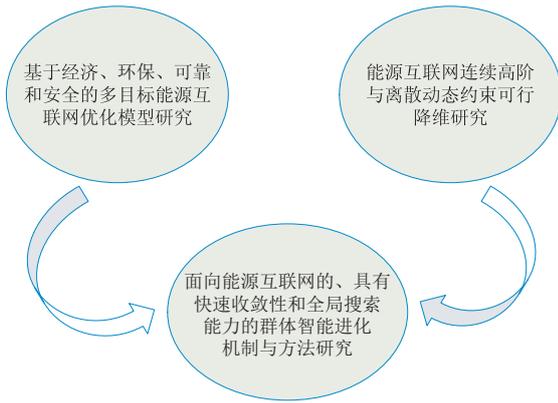


图5 基于群体智能的能源互联网运行优化技术
Fig. 5 Energy Internet operation optimization technology based on swarm intelligence

深入的研究。进一步,在多能流约束体系的基础上,伊朗学者 Shaabani 等考虑能量传输过程中的损耗,以经济性最优、环保性最佳为目标,建立了热电联产系统多目标优化调度模型^[28]。纽约大学和华北电力大学考虑风电出力的随机性和相关性,建立了电气互联系统多目标优化规划模型,优化系统运行成本、投资成本和运行可靠性^[29]。在能源互联网多目标优化方面,华中科技大学综合考虑电力系统、热力系统的能量转换和传输过程,建立考虑热网传输特性的电-热耦合系统能量流优化运行模型^[30]。国内东北大学在传统单目标调度模型的基础上,以经济性最优及环保性最佳为优化目标,建立了区域综合能源系统优化调度模型^[31]。天津大学在构建不同能源系统耦合环节的基础上,以运行成本最小和污染气体排放量最小为目标建立区域综合能源系统多目标优化调度模型^[32]。在上述文献的基础上,华北电力大学对当前综合能源系统的效益评价体系进行了梳理,对建立全面反映综合能源系统运行效益的核心评价指标体系提出指导性意见^[33]。目前,国内对于多目标优化运行的研究主要集中于经济性和环保性优化方面,仍缺乏一个全面考虑能源互联网经济效益、安全效益、环境效益和社会效益的综合优化模型。因此,本文提出基于经济、环保、可靠和安全的多目标能源互联网优化模型构建方法(如图6所示),主要内容如下。

(1)生成能源互联网运行场景集。基于优化模型求解的思想,建立场景约简模型,构建包含多种指标的能源互联网场景聚类有效性指标体系,实现能源互联网典型运行场景提取。

(2)计及设备投资成本、运行成本等指标,分别围绕系统中的独立型设备和耦合型设备的物理特性和经济特性进行研究,分别建立设备层经济性模型及网络层经济性模型,以此为基础,构建能源互

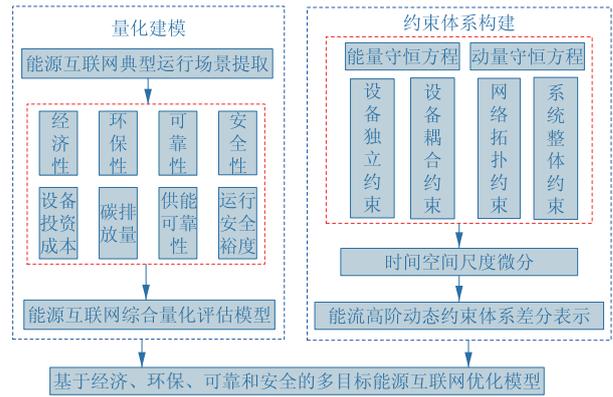


图6 基于经济、环保、可靠和安全的多目标能源互联网优化模型
Fig. 6 Multi-objective optimization model for Energy Internet based on economy, environmental protection, reliability and security

联网整体经济性量化评估模型;分析冷、热、电、气等不同能源形式间时空耦合特性对能源互联网可靠运行的影响,探究不同能源供应形式间关联故障机理,构建能源互联网可靠性量化评估模型;考虑各网络单一故障安全准则等指标,构建能源互联网安全性量化评估模型;研究能源互联网在减少碳排放量等方面的效益,构建能源互联网环保性量化评估模型。

(3)以天然气网、热网等为研究对象,基于质量守恒与动量守恒方程等构建网络拓扑及能流耦合约束,研究对应高阶动态约束的差分表示形式,获取设备独立、设备耦合、网络拓扑、系统可靠性、系统安全性、系统环保性等约束,构建能源互联网异质能流综合约束体系。

(4)以能源互联网网络独立约束体系为基础,建立能源互联网中天然气网、热网、电网等网络的等值参数模型,计及能源互联网不同能源形式的独立约束及耦合约束,以能源互联网经济性、可靠性、环保性、安全性最优为优化目标,建立多目标能源互联网综合优化模型,为实现经济、环保、可靠和安全等多目标能源互联网优化运行打下基础。

2.2 能源互联网连续高阶与离散动态约束可行降维

能源互联网优化运行为非线性规划问题,存在维数巨大、变量多、非线性强等优化难题,因此,有必要研究能源互联网优化模型的求解方法。美国学者 Manshadi 和 Khodayar 采用半定规划松弛法对模型约束条件进行简化处理^[34],有效提升了计算效率。普林斯顿大学 Norman 等提出了一种对非线性系统进行化简的主成分分析(PCA)法,通过平衡转换矩阵将系统转换为平衡模型后再进行模型降阶^[35]。美国学者 Roweis 等提出了一种局部线性嵌

入方法,假设样本点与周围数个样本点之间保持局部线性关系^[36],降低了降维后样本与原始样本之间的误差。在此基础上,康科迪亚大学提出了一种将数据从高维空间投影至低维空间的线性变换方法^[37],有效降低了数据稀疏性对算法效率的影响。能源互联网连续高阶与离散动态约束降维研究又可分为低阶近似技术研究和可行降维技术研究2个部分。在低阶近似技术研究部分,华北电力大学研究了非线性动态模型的经验 Gramian 平衡降阶原理,由 Galerkin 映射将重要奇异值对应的状态投影到子空间上^[38],以实现区域电网非线性动态模型降阶。浙江大学提出了一种稀疏扩展 Krylov 子空间的模型降阶方法^[39],以实现电力系统动态模型的快速、准确降阶。华中科技大学通过构造降阶电网分区优化模型,提高了分区算法的自适应性和灵活性^[40]。在经典平衡阶段模型降阶方法的基础上,长江大学提出了一种基于矩阵指数函数 Laguerre 多项式展开的模型降阶方法^[41]。在可行降维技术研究部分,从数据降维角度,电子科技大学利用降维 Carleman 线性化方法^[42]对电力系统传输的大数据进行降维,减少了模型求解时间。从网络拓扑分解的角度,天津大学根据图论理论将复杂电网抽象为有向加权图网络^[43],形成了有限个独立连通子图表征的输电通道,实现了复杂电网的降维分解。

以上文献对高阶约束处理和优化模型分解降维进行了一定的研究,但仍需进一步研究能源互联网中多能流耦合关系对降阶降维算法的影响。基于此,本文提出能源互联网连续高阶与离散动态约束可行降维措施,如图7所示。

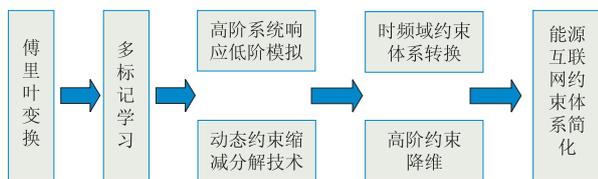


图7 能源互联网连续高阶与离散动态约束可行降维

Fig. 7 Energy Internet continuous high order and feasible dimension reduction with discrete dynamic constraints

(1)提出基于傅里叶变换的能源互联网时域-频域约束体系转化技术,将能源互联网中考虑异质能流耦合的复杂时域偏微分方程约束转化为易于优化求解的频域线性代数方程约束,简化能源互联网约束体系。

(2)针对能源互联网优化模型中大量高维、非线性约束导致的模型求解复杂度过高、收敛困难等问题,提出基于多标记学习理论的数据可视化技术、基于判别潜在子空间混合模型的数据投射技

术,实现模型异常数据辨识、滤除,同时有效避免因模型规模过大而导致的“维数灾难”问题。

(3)针对能源互联网优化模型中的连续高阶频域约束,提出高阶系统响应的低阶模拟技术,实现高阶系统响应的近似降阶,在确保求解精度的前提下提升模型求解速度。针对能源互联网中的离散动态约束,研究优化设计中基于设计变量和约束条件的缩减分解技术,实现能源互联网连续高阶与离散动态约束降维,进一步降低模型计算的复杂度。

2.3 面向能源互联网的具有快速收敛性和全局搜索能力的群体智能进化机制与方法

在能源互联网优化算法的研究中,英国卡迪夫大学针对英国电力系统的实际情况,对考虑风电预测不确定性的国标燃气电力网运行进行了研究,提出了气电一体化网络的最优经济运行策略,并利用连续线性规划解决了非线性求解问题^[44];伊朗设拉子大学基于卷积神经网络和门控递归相结合的深度学习方法,以减少能量损失和运行成本为目标,提出了一种多智能体微电网能源管理框架^[45]。华中科技大学将非线性天然气潮流方程组同构为二阶锥凸优化模型,并采用连续锥优化方法保证松弛的严格性^[46],将优化模型转化为线性模型进行求解;西华大学针对区域能源互联网引入非均衡蛛网模型,形成市场价格调节与微能源网自治优化的双层交互结构^[47],实现了各微能源网的独立自治优化;华南理工大学指出了经典数学方法应用于复杂、大规模的优化问题求解时存在的不足,并提出了基于迁移强化学习算法的优化求解方法^[48],对数学形态的依赖性更低且应用更为灵活。基于以上研究并充分考虑模型的收敛性与求解速率,本文提出了面向能源互联网的具有快速收敛性和全局搜索能力的群体智能进化机制与方法研究框架,如图8所示。

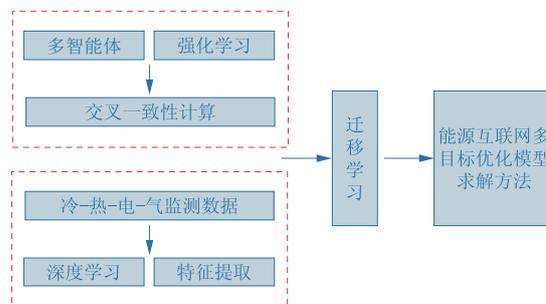


图8 群体智能进化机制与方法研究框架

Fig. 8 Research framework of swarm intelligence evolution mechanism and methods

(1)根据能源互联网协调优化模型中优化目标与约束条件的特点,构建基于群体演化的群体智能

算法求解框架。在此基础上,将群体智能优化算法与强化学习技术进行有机结合,采用交互一致性计算理论对能源互联网协调优化模型进行求解,以提高算法求解的全局搜索能力。

(2)根据能源互联网中新能源、储能、能量转化等关键设备的运行特点,生成能源互联网的典型运行场景。在此基础上,利用卷积神经网络、深度自编码器等新一代人工智能技术^[18],构建基于深度特征挖掘的能源互联网典型运行形态库。

(3)结合互动协调优化框架和典型运行形态库构建结果,采用非线性迁移学习技术对能源互联网典型运行形态库中的优化资源进行筛选,构成能源互联网当前运行状态优化问题的初始化条件。在此基础上,对初始化结果进行微调训练,得到能源互联网优化模型的求解结果,保证模型的收敛性与求解速率。

3 基于多智能体的能源互联网分布式协同控制技术

通过构建能源互联网调控框架与集群通信方式,分析群内与群间的控制目标与运行需求,提出面向群内分布式自治的边缘控制算法与面向群间协同的分布式控制方法,并最终在能源互联网中示范应用。

主要内容分为3部分,内在关系如图9所示:

(1)开展面向能源互联网集群内分布式自治控制的边缘计算算法研究;(2)针对能源互联网集群,提出集群级多智能体协同分层分布式调控框架,并进一步开展集群级多智能体分布式协同控制方法的研究;(3)以能源互联网典型园区为主要用户对象,开发能源互联网分布式协同控制与优化系统并实现示范应用。

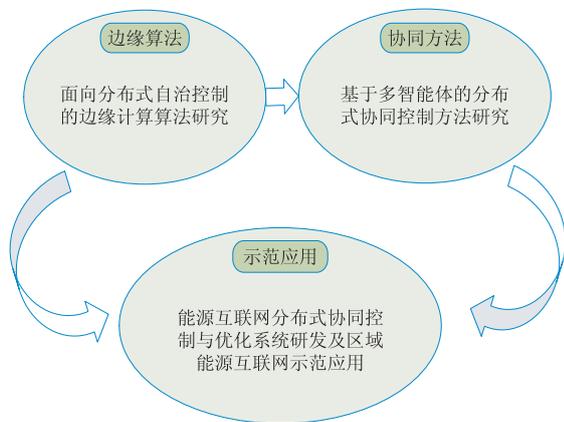


图9 基于多智能体的能源互联网分布式协同控制技术研究框架

Fig. 9 Research framework of distributed collaborative control technology for Energy Internet based on multi-agent

3.1 面向分布式自治控制的边缘计算算法

在面向分布式自治控制的边缘计算算法研究方面,目前已有较多学者针对下垂控制以及一致性控制算法展开了研究。对于下垂控制策略,重庆大学的郑永伟等提出了多种基于自适应下垂系数的控制策略,并考虑了下垂控制会引起电压、频率的偏移^[49],在此基础上提出多种消除电压、频率偏差的协同控制策略。对于一致性控制策略,武汉大学的杨志淳等提出了一种基于一致性理论的分布式优化调度方法^[50]。该方法通过自治节点与相邻分布式电源节点信息的交换,采用一致性算法进行迭代计算,使各分布式电源的增量成本趋于一致,实现自治区域发电成本的优化。华中科技大学的周建宇等提出了一种基于一致性理论的直流微电网混合储能协同控制策略^[51]。该方法通过自治节点与相邻分布式电源节点信息的交换,对超级电容器间功率和蓄电池间功率进行合理分配,实现直流微电网^[52-53]内部的协同控制。中国电力科学研究院的蒲天骄等将一致性算法应用于直流微网的控制中,提出了一种基于离散型一致性理论的自适应下垂控制策略^[54]。目前,国内的研究主要集中在控制算法方面,与能源互联网系统运行结合不够深入,因此本文提出了面向分布式自治控制的边缘计算算法,如图10所示。

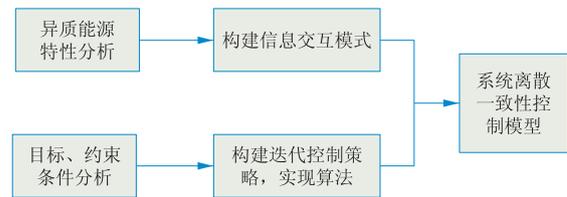


图10 面向分布式自治控制的边缘计算算法研究

Fig. 10 Research on edge computing for distributed autonomous control

(1)分析电制冷机、燃气锅炉、风电、可再生能源发电(P2G)装置等冷、热、电、气多类型资源的时空分布特性以及流量、压力、功率等不同能源形式的典型特征量,构建多类型能源协同运行的通信网络架构,考虑多类型异质能源的交互作用机理与数据交互需求,构建多类型能源信息交互模式。

(2)以维持系统能量平衡、平抑联络线能量波动、提升系统运行经济性为目标,计及各能流耦合转换约束、能量传输损耗等因素,采用离散一致性控制算法,构建面向能源互联网的一致性变量集及迭代控制策略,实现算法的快速收敛。

(3)分析冷、热、电、气等特征量的扰动变化特性,提出基于动态事件触发机制的一致性控制算

法,建立系统离散一致性控制模型,实现系统扰动时群内自治稳定及各类型资源即插即用。

3.2 基于多智能体的分布式协同控制方法

在基于多智能体的分布式协同控制方面,目前已有学者针对能源互联网的优化运行策略及协同控制策略开展了相关研究。在能源互联网优化运行方面,浙江大学的李杨等提出了电-热-气多种能源的系统优化调度模型^[55],实现了能量枢纽机组内部能效特性与外部能源分配的双层优化。华中科技大学的韩佶等提出了一种计及相关性的综合能源系统能量流概率优化方法^[30],通过多类型异质能源的协同运行来提高分布式能源的消纳水平并减轻电力线路的拥塞问题。天津大学的刘哲等提出了一种能源互联网去中心化智能调控框架^[56],通过不同建筑群智能体的协同互补,实现能源的高效利用与可靠供给。东北大学的孙秋野等基于多智体的一致性,提出实现能源互联网中多能互补与系统协调优化控制的双层控制模型^[16]。华北电力大学的曾鸣等进一步考虑了区块链技术,提出了能源区块链为支撑的能源互联网基本框架,从区块链和能源互联网角度分别提出了区块链框架下能源互联网发展的关键技术^[57]。但目前多智能体协同控制的研究主要集中在主动配电网以及微电网上,缺乏关于能源互联网多种能源形式自治控制技术的研究,针对以上缺陷,本文提出了以下研究方案,如图11所示。

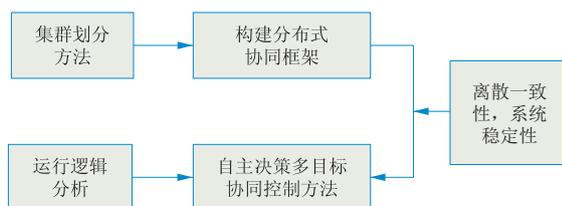


图11 基于多智能体的分布式协同控制方法

Fig. 11 Distributed collaborative control based on multi-agent

(1)计及各类型能源的分布特征与接入比例,研究能源互联网的集群划分方法,建立内部联系紧密、外部联系稀疏、能源特性互补的小区域能源互联网,实现集群间各类型异质能源的高效利用;进而分析集群间通信与控制需求,设计集群多智能体的功能,构建面向集群级多智能体协同的能源互联网分层分布式调控框架。

(2)结合冷、热、电、气多类型能源出力特征,分析能源互联网集群不同能源形式间的协同互补作用;计及潮流约束、电压约束等系统安全约束和集群运行约束,建立基于改进交替乘子算法的集群级多智能体分布式调度模型,采用随机-鲁棒优化方

法,实现能源互联网集群经济、稳定运行。

(3)基于能源互联网集群多智能体调控框架,考虑各智能体间的通信时延等因素,构建基于离散一致性协议的集群多智能体分布式控制模型,在维持集群内部安全稳定的前提下,实现各集群对调度指令的准确跟踪以及群间能量波动的合理分配,保证系统的稳定运行。

(4)调研多智能体理论和分布式协同控制理论典型应用案例,针对能源互联网中冷、热、电、气多种能源形式协同运行问题,研究区域能源互联网各自治区域的控制模式和控制策略,构建多维时间尺度和异构数据空间下的区域能源互联网分布式协调控制机制。分析区域能源互联网、配电网、微网(群)和智能终端等多智能体运行目标和控制对象的内在运行逻辑,提出具有区域智能体自主决策能力和支持多目标协同的区域能源互联网分布式协同控制方法。

3.3 能源互联网分布式协同控制与优化系统研发及区域能源互联网示范应用

在能源互联网分布式协同控制与优化方面,国外围绕多能源协同系统方面的成果以系统架构研发为主。北卡罗来纳州立大学的Huang等提出了面向大规模新能源消纳的电力在线监测与调控平台^[58]。Vermesan等提出了基于公网通信协议的电-热-气能耗监测与能效诊断平台^[59]。伊利诺伊理工学院的Zhang等引入能量路由器概念,基于此提出了微网级多能源协同系统的能量管理方案^[60]。瑞士苏黎世联邦理工学院的Hajimiragha基于对多能源耦合特性的分析,提出了多能潮流调控设备的构思^[61]。南方电网科学研究所的郑宇等设计了能源互联网分布式设备协调控制软件系统平台方案^[62];广东电网公司东莞供电局的赖伟坚等利用C#和Java编程语言设计并开发了能源互联网内多类设备协同运行的能量管理系统软件^[63]。电子科技大学的曲锋对Internet相关技术与微电网控制系统的结合进行了研究,设计开发了基于浏览器/服务器(B/S)模式的微电网能量管理软件^[64];山东大学的孙毅利用当前主流软件开发平台Microsoft.NET完成了该上位机应用软件包的编程和设计^[65],为能效理论应用到智能建筑的能量管理系统打下了基础;浙江工业大学的杨捷伦采用WIFI作为家用电器数据的传输手段,以RS485作为连接供电等设备的数据传输手段,建立了家庭能量管理系统^[66]。总体来看,目前现有的平台系统在多能源协同系统能量管理方面已具备一定经验,但上述领域的研发仍然处于起步阶段,距离落地应用尚有一定距离。本文基于

以上研究进行了深入分析,提出如下构思,大体框架如图 12 所示。

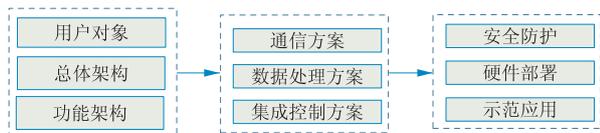


图 12 能源互联网分布式协同控制与优化系统研发

Fig. 12 Research and development of distributed collaborative control and optimization system for Energy Internet

(1)以含有冷、热、电、气等多种能源的能源互联网为用户对象,分析能源互联网中基础数据、业务数据及各个能源系统间接口数据,设计区域能源互联网分布式协调优化系统架构。

(2)设计系统的通信、安全防护以及与冷热气系统、储能系统的集成方案,进行功能模块、用户体验界面、接口等的详细设计,完成系统开发、测试与部署上线。

建立基于多智能体的分布式协同控制架构,可有效解决单一分布式能源个体容量小、波动性强、可控性差、难以集中调控等问题,从而提升能源互联网的综合治理水平。

本文所提方法将依托河南省兰考县能源互联网平台开展示范建设应用。目前,已建立政府牵头、企业广泛参与的能源数据归集机制,签订首批 15 家兰考属地能源企业数据确权协议,累计接入电、热、气、油 4 类能源数据超过 1 200 万条,实现电力、燃气、地热数据到户,完成能源监测、公共服务、协调优化三大中心功能开发,实现兰考能源全县域、全品类、全链条可观可测。

4 结束语

随着能源互联网建设的推进,运行优化控制将成为重要的核心技术之一。本文从面向能源互联网优化运行的群智模型构建技术、基于群体智能的能源互联网运行优化技术、基于多智能体的能源互联网分布式协同控制技术等方面进行了评述和设想,以期为实现能源互联网高效协调互动,实现面向能源互联网的大规模集群协同优化运行,提升能源互联网的智能化水平等提供借鉴。

参考文献:

[1]申洪,周勤勇,刘耀,等.碳中和背景下全球能源互联网构建的关键技术及展望[J].发电技术,2021,42(1):8-19.
SHEN Hong, ZHOU Qinyong, LIU Yao, et al. Key technologies and prospects for the construction of global

Energy Internet under the background of carbon neutral[J]. Power Generation Technology, 2021,42(1):8-19.

- [2]孙蔚,申洪,侯金鸣,等.欧洲能源电力发展路线研究[J].发电技术,2021,42(1):94-102.
SUN Wei, SHEN Hong, HOU Jinming, et al. Research on European roadmap for energy and electrical technology [J]. Power Generation Technology, 2021,42(1):94-102.
- [3]高峰,曾嵘,屈鲁,等.能源互联网概念与特征辨识研究[J].中国电力,2018,51(8):10-16.
GAO Feng, ZENG Rong, QU Lu, et al. Research on identification of concept and characteristics of Energy Internet[J]. Electric Power, 2018,51(8):10-16.
- [4]RIFKIN J. The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, economy, and the world[M]. New York:Palgrave MacMillan,2011:46-48.
- [5]田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on Energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [6]张国栋,刘凯.能源互联网背景下的微电网能量管理分析[J].发电技术,2019,40(1):17-21.
ZHANG Guodong, LIU Kai. Analysis of microgrid energy management under the background of Energy Internet [J]. Power Generation Technology, 2019, 40(1): 17-21.
- [7]曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. Generation-grid-load-storage coordinative optimal operation mode of Energy Internet and key technologies [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [8]刘东,盛万兴,王云,等.电网信息物理系统的关键技术及其进展[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3522-3531.
LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531.
- [9]李娜,周喜超,王冰,等.综合能源系统优化模型综述与展望[J].上海节能,2020(6):543-548.
LI Na, ZHOU Xichao, WANG Bing, et al. Research on optimization models of integrated energy system [J]. Shanghai Energy Conservation, 2020(6):543-548.
- [10]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, CHEN Yonghua. Research on multiple energy flow co-simulation technology applied in integrated energy system[J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 66-72.
- [11]杨晓已,陶新磊.综合能源技术路线研究[J].华电技术,2019,41(11):22-25.

- YANG Xiaosi, TAO Xinlei. Research on integrated energy technical route [J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(11): 22-25.
- [12] RAJKUMAR R, LEE I, SHA L, et al. Cyber-physical systems: The next computing revolution [C]//Design Automation Conference. IEEE, 2010: 731-736.
- [13] SUN Q Y, HAN R, ZHANG H, et al. A multiagent-based consensus algorithm for distributed coordinated control of distributed generators in the Energy Internet [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(6): 3006-3019.
- [14] 李存斌, 张磊, 刘定, 等. 基于复杂网络的能源互联网信息物理融合系统跨空间风险传递研究[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(4): 139-147.
- LI Cunbin, ZHANG Lei, LIU Ding, et al. Research into cross-space risk transfer of Energy Internet cyber-physical system based on complex network [J]. *Operations Research and Management Science*, 2019, 28(4): 139-147.
- [15] 买坤, 边晓燕, 张小平, 等. 基于信息物理融合系统的能源路由器[J]. *现代电力*, 2017, 34(6): 1-8.
- MAI Kun, BIAN Xiaoyan, ZHANG Xiaoping, et al. Energy router based on the cyber physical system [J]. *Modern Electric Power*, 2017, 34(6): 1-8.
- [16] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3667-3677.
- SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for Energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [17] 蒋东荣, 王瑞, 程超, 等. 能源互联网能量流与信息流耦合性研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2017, 31(7): 109-114.
- JIANG Dongrong, WANG Rui, CHENG Chao, et al. Research on coupling property of energy flow and information flow in the Energy Internet [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2017, 31(7): 109-114.
- [18] RALPH E, KRISTINA O, VIKTOR D, et al. New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints [J]. *Energy*, 2014, 73: 387-398.
- [19] 代贤忠, 韩新阳, 董益华, 等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(2): 1-9.
- DAI Xianzhong, HAN Xinyang, DONG Yihua, et al. Multi-source and multi-level coordination optimization method of Energy Internet [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(2): 1-9.
- [20] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3634-3642.
- XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [21] 朱永利, 石鑫, 王刘旺. 人工智能在电力系统中应用的近期研究热点介绍[J]. *发电技术*, 2018, 39(3): 204-212.
- ZHU Yongli, SHI Xin, WANG Liuwang. Recent research hotspot introduction on the application of artificial intelligence in power system [J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(3): 204-212.
- [22] GE L J, XIAN Y M, YAN J, et al. A hybrid method for short-term PV output forecast based on GWO-GRNN [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2020, 8(6): 1268-1275.
- [23] STEPHEN C, PIERLUIGI M. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part II: Transmission network analysis and low carbon technology and resilience case studies [J]. *Energy*, 2019, 184: 191-203.
- [24] GE L J, SONG Z S, XU X D, et al. Dynamic networking of islanded regional multi-microgrid networks based on graph theory and multi-objective evolutionary optimization [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 31(2). DOI:10.1002/2050-7038.12687.
- [25] YANG J W, ZHANG N, KANG C Q, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 33(2): 2087-2097.
- [26] FANG J K, ZENG Q, AI X M, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 9(1): 188-198.
- [27] LIU X Z, WU J Z, NICK J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1238-1250.
- [28] SHAABANI Y A, SEIFI A R, KOUHANJANI M J. Stochastic multi-objective optimization of combined heat and power economic/emission dispatch [J]. *Energy*, 2017, 141: 1892-1904.
- [29] QIN C, YAN Q Y, HE G. Integrated energy systems planning with electricity, heat and gas using particle swarm optimization [J]. *Energy*, 2019, 188: 116044.
- [30] 韩佳, 苗世洪, 李超, 等. 计及相关性的电-气-热综合能源系统概率最优能量流[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 1055-1067.
- HAN Ji, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Probabilistic optimal energy flow of electricity-gas-heat integrated energy system considering correlation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 1055-1067.
- [31] 郑超铭, 黄博南, 王子心, 等. 计及网络传输损耗的电热

- 综合能源系统多目标优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 144-157.
- ZHENG Chaoming, HUANG Bonan, WANG Zixin, et al. Multi-objective optimization dispatch for integrated electro-heating systems including network transmission losses [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 144-157.
- [32] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120, 7425.
- [33] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.
- ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation [J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1697-1708.
- [34] MANSADI S D, KHODAYAR M E. Coordinated operation of electricity and natural gas systems: A convex relaxation approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(3): 3342-3354.
- [35] NORMAN K A, NEWMAN E L, PEROTTE A J. Methods for reducing interference in the complementary learning systems model: Oscillating inhibition and autonomous memory rehearsal [J]. Neural Networks, 2005, 18(9): 1212-1228.
- [36] ROWEIS S T, SUAL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding [J]. Science, 2000, 290(5500): 2323-2326.
- [37] MASOUDIMANSOUR W, BOUGUILA N. Supervised dimensionality reduction of proportional data using mixture estimation [J]. Pattern Recognition, 2020, 105: 107379.
- [38] 时宁. 区域电网非线性动态模型降阶研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [39] 朱泽翔. 电力系统动态参数辨识与模型降阶研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [40] 徐琛. 含间歇式能源的电网分布式优化协调调度技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [41] 张任政, 肖志华, 代柳. 基于矩阵指数函数 Laguerre 多项式展开的模型降阶方法[J]. 应用数学, 2020, 33(4): 1002-1009.
- ZHANG Renzheng, XIAO Zhihua, DAI Liu. Model order reduction based on laguerre polynomials expansion of the matrix exponential function [J]. Mathematica Applicata, 2020, 33(4): 1002-1009.
- [42] 王州强, 黄琦, 张其群. 基于降维 Carleman 嵌入技术的电力系统高阶变量交互作用分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 57-64.
- WANG Zhouqiang, HUANG Qi, ZHANG Qiqun. Analysis of power system higher-order variables and interaction based on reduced Carleman embedding technology [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 57-64.
- [43] 刘喆林. 基于输电通道的复杂电网降维与运行监视[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [44] OADRAN M, WU J, JENKINS N, et al. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network considering the uncertainty in wind power forecasts [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 5(1): 128-138.
- [45] AFRASIABI M, MOHAMMADI M, RASTEGAR M, et al. Multi-agent microgrid energy management based on deep learning forecaster [J]. Energy, 2019, 186: 115873.
- [46] 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): 1-8.
- ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 1-8.
- [47] 刘奇, 周海全, 何浩, 等. 基于非均衡蛛网模型的区域能源互联网协调优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 93-107.
- LIU Qi, ZHOU Haiquan, HE Hao, et al. Coordinated optimal operation strategy of a regional Energy Internet based on the non-equilibrium cobweb model [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 93-107.
- [48] 张孝顺. 电力系统的迁移强化学习优化算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [49] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.
- ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.
- [50] 杨志淳, 刘开培, 乐健, 等. 孤岛运行微电网中模糊 PID 下垂控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 19-23.
- YANG Zhichun, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Design of fuzzy PID droop controllers for islanded microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 19-23.
- [51] 周建宇, 闫林芳, 刘巨, 等. 基于一致性理论的直流微电网混合储能协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6837-6846, 7118.
- ZHOU Jianyu, YAN Linfang, LIU Ju, et al. A cooperative control strategy for DC microgrid based on consensus

- algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6837-6846, 7118.
- [52]TAH A, DAS D. An enhanced droop control method for accurate load sharing and voltage improvement of isolated and interconnected DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1194-1204.
- [53]KHORSANDDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. A decentralized control method for a low-voltage DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 793-801.
- [54]蒲天骄,刘威,陈乃仕,等.基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37(6):1579-1590.
PU Tianjiao, LIU Wei, CHEN Naishi, et al. Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1579-1590.
- [55]李杨,刘伟佳,赵俊华,等.含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J].电网技术,2016,40(12):3680-3689.
LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3680-3689.
- [56]刘哲,刘魁星,李祺,等.无中心智能调控能源互联网[J].自动化博览,2018,35(S1):65-67.
LIU Zhe, LIU Kuixing, LI Qi, et al. No-central regulation of energy smart internet decentralized intelligent regulation of Energy Internet [J]. Automation Panorama, 2018, 35(S1): 65-67.
- [57]曾鸣,程俊,王雨晴,等.区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3672-3681.
ZENG Ming, CHENG Jun, WANG Yuqing, et al. Primarily research for multi module cooperative autonomous mode of Energy Internet under blockchain framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681.
- [58]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.
- [59]VERMESAN O, BLYSTAD L C, ZAFALON R, et al. Internet of energy: Connecting energy anywhere anytime [J]. Advanced Microsystems for Automotive Applications, 2010, 11(11):189-200.
- [60]ZHANG X P, SHAHIDEHPOU R M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [61]HAJIMIRAGHA A, CANIZARES C, FOWLER M, et al. Optimal energy flow of integrated energy systems with hydrogen economy considerations [C]//Bulk Power System Dynamics and Control-VII: Revitalizing Operational Reliability, 2007 iREP Symposium. IEEE, 2007: 1-11.
- [62]郑宇,程乐峰,孟科,等.能源互联网分布式设备协调控制软件系统平台方案设计[J].新型工业化,2016,6(11):15-34.
ZHENG Yu, CHENG Lefeng, MENG Ke, et al. Coordinated control software system platform scheme design for distributed equipment under energy interconnection [J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(11): 15-34.
- [63]赖伟坚,陈威洪,林泽宏,等.能源互联网内多类设备协同运行的能量管理系统软件设计[J].电网与清洁能源,2020,36(4):72-80.
LAI Weijian, CHEN Weihong, LIN Zehong, et al. The software design of energy management system for the collaborative operation of multiple types of devices in the internet of energy [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 72-80.
- [64]曲锋.基于B/S模式的微电网能量管理软件的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2010.
- [65]孙毅.基于能效理论的能量管理系统管理软件的开发[D].济南:山东大学,2007.
- [66]杨捷伦.家庭能量管理系统设计与实现[D].杭州:浙江工业大学,2017.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

秦羽飞(1996—),男,山东烟台人,在读硕士研究生,从事分布式光伏智能运维技术研究(E-mail:1366769402@qq.com)。

葛磊蛟*(1984—),男,湖北咸宁人,副教授,博士,从事智能配电网态势感知、智能配用电大数据云技术和新能源并网优化控制等方面的研究(E-mail:legendgj99@tju.edu.cn)。

王波(1978—),男,河南信阳人,教授,博士生导师,博士,从事电力深度视觉、边缘计算和电力大数据等方面的研究(E-mail:whwdwb@whu.edu.cn)。