

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.02.002

面向分布式资源聚合管控的虚拟电厂建模与优化控制综述

何斯强¹, 张俊岭², 顾宗奇¹, 施啸寒¹, 江 涵³

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061;

2. 山东鲁软数字科技有限公司, 山东 济南 250001; 3. 全球能源互联网发展合作组织, 北京 100031)

摘要:随着可再生能源渗透率不断提高,电力系统运行灵活性不足的问题日益突出。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)是一种融合先进通信与控制技术的分布式可控资源管理新模式,将多类型可控资源聚合为整体,对电力系统经济运行、调峰、调频、稳定控制等多方面进行支撑。从分布式资源聚合管控与运行优化视角,系统综述了VPP内涵、架构、资源聚合、运行优化等方面当前技术水平和研究现状。首先梳理虚拟电厂功能内涵与定位,总结基于端-边-网-云的分层聚合管控框架及各环节需要解决的关键技术问题;随后介绍各类资源物理建模方法及其聚合模型,并从“对外统一、对内协调”角度综述VPP内部资源优化控制及其整体参与电网互动的协同方法,总结了虚拟电厂未来的技术挑战与发展前景。

关键词:虚拟电厂;分布式资源;资源聚合;协同优化

中图分类号:TM734

文献标识码:A

文章编号:1007-9904(2024)02-0011-14

Overview of Virtual Power Plant Modeling and Optimization Control for Distributed Resource Aggregation and Control

HE Siqiang¹, ZHANG Junling², GU Zongqi¹, SHI Xiaohan¹, JIANG Han³

(1. Key Laboratory Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education, China(Shandong University), Jinan 250061, China;

2. Shandong Luneng Software Technology Co., Ltd., Jinan 250001, China;

3. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of renewable energy, the problem of insufficient flexibility of power system operation is becoming increasingly prominent. Virtual power plant (VPP) is a new distributed controllable resource management model that integrates advanced communication and control technology. It aggregates multiple types of controllable resources into a whole to support the economic operation, peak shaving, frequency regulation, and stability control of the power system in multiple aspects. In this paper, from the perspective of distributed resource aggregation control and operation optimization, the current technical level and research status of VPP connotation, architecture, resource aggregation, operation optimization and other aspects were systematically reviewed. Firstly, the connotation and positioning of virtual power plant function was sorted out, and the layered aggregation control framework based on end-edge-network-cloud and the key technical issues were summarized to be solved in each link. Then, various types of physical modeling methods of resources and their aggregation models were introduced. Moreover, from the perspective of "external unification and internal coordination", the optimization control of internal resources and their optimization in VPP were summarized. Lastly, the technical challenges and development prospects of the virtual power plant in the future were summarized.

Keywords: virtual power plant; distributed resource; resource aggregation; collaborative optimization

0 引言

近年来,全球变暖以及能源短缺问题日益严重,

基金项目:全球能源互联网集团有限公司科技项目
(SGGE0000JYJS2310047)。

Science and Technology Project of Global Energy Interconnection Group Co., Ltd. (SGGE0000JYJS2310047)。

世界各国大力发展风电、太阳能发电等非化石能源,推动能源转型而降低温室气体排放成为主流发展趋势^[1]。未来新能源占比将日益提高,风光波动性电源对火力发电的替代导致稳定优质发电资源不足而调控能力下降,可再生能源的出力不确定性与波动性带来的更高调节需求给电力系统安全稳定经济运行

行带来挑战。电力系统调度模式需要由“源随荷动”向“源荷互动”进行转变。

充分挖掘电力系统发输配用各环节灵活可调资源被认为是应对上述挑战的关键^[2]。电能替代、用电技术进步及分布式发电技术使得负荷侧向数字化、智能化、有源化方向发展,负荷侧展现出巨大调节潜力^[3]。充分挖掘负荷侧调节潜力成为研究热点和国家发展战略,“十四五”能源体系规划明确提出2035年需求侧响应能力达到5%^[1]。然而,负荷侧分布式可控资源(distributed energy resources, DER)点多、分散且单体容量小,如何实现对海量异构且出力具有不确定性的DER聚合管控,推动其与电网互动而支撑电力系统运行优化成为负荷侧调节潜力挖掘的关键^[4]。

上述背景下,一种能够实现海量分布式可控资源协调运行的虚拟电厂管控模式应运而生。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)是一种融合先进通信与控制技术的DER管理新模式,可将广泛分布、参数各异的DER聚合为统一整体,充分利用各资源互补协调潜力,参与电能量市场及辅助服务市场^[5-6]。虚拟电厂与传统发电厂类似,具备功率调节、削峰填谷、旋转备用与功率支撑的能力。虚拟电厂通过资源聚合与优化控制实现聚合体与电网之间友好互动,逐渐发展成为新能源高渗透率场景下建设新型电力系统的关键手段。

DER聚合管控是虚拟电厂的构建基础。如何考虑各类资源响应潜力、响应速度、响应时间等特征差异,通过分层聚合与协同优化形成“对外统一、对内协调”的统一整体^[7-8],利用不同特征可控资源参与多时间尺度电网互动是虚拟电厂构建需要解决的问题。DER数量多、分布广、总量大且特性各异,直接优化控制单体会产生维数灾问题而导致优化方法难以实用,如何设计适应性管控架构,准确把握各类DER调节特征,进而提出适应各类源-荷-储性质资源特征的聚合模型及优化管控算法也尚未解决。

鉴于虚拟电厂迅猛发展势头及相关研究与试点快速推进实际,本文从虚拟电厂分布式资源聚合管控与运行优化角度出发,总结了虚拟电厂内涵、系统架构、资源建模、资源聚合与优化控制等方面研究现状。首先,从虚拟电厂内涵与定位、关键技术和国内外试点工程实践应用等方面进行了归纳;随后,从虚

拟电厂工程应用角度总结了基于端-边-网-云的虚拟电厂管控架构,为虚拟电厂实践应用提供基础,并剖析了各层关键技术及研究进展;进一步,从单体建模和聚合建模两个层次整理了适应虚拟电厂分层管控的可控资源单体建模与聚合方法,单体模型采集运行状态、运行参数等信息作为聚合模型的基础,聚合模型将控制指令进行解聚合下发至各单体资源;然后,分别从虚拟电厂内部优化管控和虚拟电厂间协同角度归纳了运行优化方法,实现“对外统一、对内协调”;最后,展望了虚拟电厂未来发展前景和需要突破的关键技术领域。

1 虚拟电厂内涵及其发展

虚拟电厂的定位与内涵自其产生后不断变化,虚拟电厂作为一种新型能源管控技术,由最初简单的分布式能源管控到聚合储能、分布式电源、可控负荷等海量分布式可控资源的智慧能源管理系统。通过对虚拟电厂的深入研究,虚拟电厂关键技术不断发展,在全球范围内已有部分国家与地区开展了虚拟电厂的试点示范应用,针对不同定位的虚拟电厂进行了大量的实践探索,如图1所示。这些试点示范应用为我国“双碳”目标的实现与全球能源转型提供了应用范式,也为全球清洁能源和智能电网建设提供了新的路径。

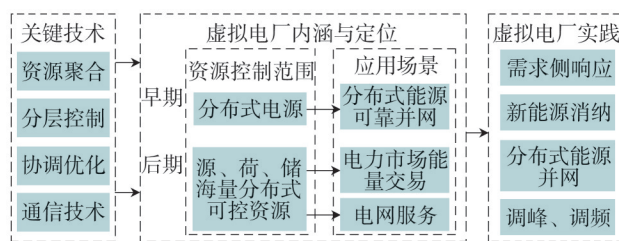


图1 虚拟电厂内涵与发展

Fig.1 Connotation and development of VPP

虚拟电厂在发展初期主要作为单一类型的分布式能源并网手段,虚拟电厂最早来源于 Shimon Awerbuch 博士 1997 年提出的虚拟公共设施概念,主要强调无资产主体在市场驱动下采用灵活合作方式为消费者提供特定公共服务^[9]。“虚拟”和“服务定制”是虚拟电厂的主要特征,按照虚拟电厂资源管控类型,早期虚拟电厂以分布式电源为聚合对象而形

成电源型虚拟电厂对中压配电网提供电压支撑服务^[10];进一步为实现“源随荷动”向“源荷互动”转变,文献[11-12]以风光电源-负荷为聚合对象,形成具有确定调节容量和爬坡率的源荷型虚拟电厂而参与日前机组组合的调节服务。为了进一步定义虚拟电厂,文献[13-14]认为虚拟电厂是可控资源与灵活控制技术的组合。在虚拟电厂的定位上主要为支撑分布式电源(distributed generation, DG)可靠并网^[6],克服 DG 出力波动性、随机性对供电平衡调整,进而为分布式电源参与电力市场交易提供媒介。

随着虚拟电厂的发展,虚拟电厂的定义与定位发生了变化,早期对虚拟电厂的定义仅停留在单一可控资源类型。如今,虚拟电厂逐渐演化为聚合海量分布式电源、储能、可控负荷的智能管理系统^[15]。虚拟电厂的定位由分布式能源可靠并网向海量分布式可控资源聚合管控进行转变。虚拟电厂成为一个独立运营的主体,整合内部可控资源参与电力市场能量交易与电网辅助服务,如文献[16]将虚拟电厂定义为电力市场驱动下,通过协调、优化和控制分布式能源集群而作为一个整体参与电力市场交易及辅助服务;文献[17]认为虚拟电厂是一种利用市场机制,对分布式能源资源进行协同优化与控制的新型运营模式。文献[18]设计了虚拟电厂作为一个独立的主体参与市场交易的体系架构,如图2所示。交易体系描述了虚拟电厂协同各可控资源参与市场交易的流程,该体系表明:通过虚拟电厂,原本不满足市场准入门槛的 DG、柔性负荷、分布式储能,能以聚合体形式参与市场交易。现阶段在资源聚合管控领域中,部分学者定义负荷聚合商作为电网与用户直接交互的媒介,虚拟电厂与负荷聚合商的区别主要体现在二者功能与资源管控范围不同。虚拟电厂通过聚合分布式可控资源在电网中既可参与发电环节,也可参与用电环节管控资源包含源-荷-储侧多类型分布式可控资源。负荷聚合商更偏向用电类型的负荷侧资源管控,利用负荷资源参与需求侧响应与电网服务环节。

随着“双碳”目标提出和新型电力系统建设推进,资源聚合、分层控制、协同优化与通信技术等 VPP 相关技术在国内不断发展,逐步由早期的聚合分布式电源参与电力交易发展为支撑源网荷储一体化、能源互联网等理念落地的重要形式,成为承载

“源随荷动”向“源荷互动”运行方式转变、发挥新型电力系统规模化灵活资源调节潜力减碳的重要技术载体。如文献[19]从动态聚合、安全通信、协同调控、可信交易等领域论述了虚拟电厂核心关键技术及关联支撑关系;文献[20]从面向碳减排和新能源消纳的虚拟电厂调度方式方面归纳了 VPP 关键技术;文献[21]针对大量分布式资源集群调度问题,论述新型配电系统调度架构并归纳了 DER 的分层聚合方法及协同调度方法。文献[22]对比了虚拟电厂与主动配电系统、微电网的特征差异,认为 VPP 在信息通信基础设施、电力市场、DER 集成方面具有良好的适用性与灵活性。文献[7, 23]探讨了 DER 以 VPP 形式参与大电网安全稳定控制的控制机制并初步验证了对频率稳定支撑效果。

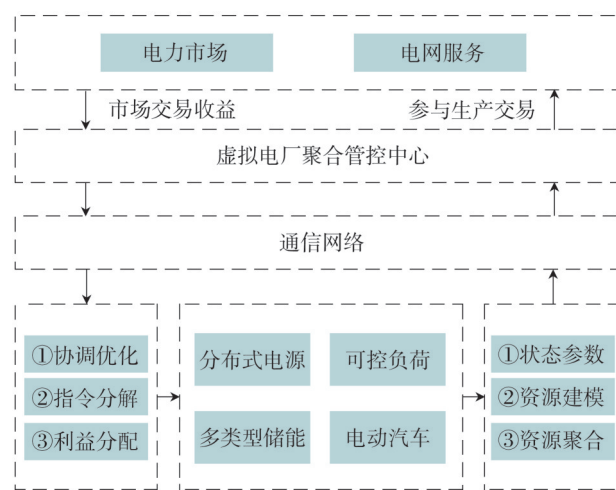


图2 虚拟电厂交易体系
Fig.2 VPP trading system

随着虚拟电厂热度的增加,全球同步推动了示范工程建设。欧洲国家侧重于分布式电源与储能设备,主要目标是实现分布式发电设备并网,提高电网稳定性^[12]。美国主要依靠可控资源实现需求侧响应,利用虚拟电厂聚合大量可控资源参与电网调度并提高能源利用效率^[13]。我国陆续在上海市、广东省与冀北地区初步开展了虚拟电厂试点,目前均有不同应用成效。上海虚拟电厂实现了商业建筑的统一控制,构建了可发可用的虚拟电厂。通过利用中央空调等灵活可控资源的用电高峰来消纳新能源电力,有效减少了碳排放。广东省深圳市虚拟电厂试

点实践中构建了“网地一体虚拟电厂运营管理平台”,实现了电网调度由“源随荷动”向“源荷互动”的转换实践,有效实现了地方分布式资源参与电网互动。冀北地区的实践应用基于物联网云平台实现,构建了云-管-边-端的控制架构,实现了虚拟电厂的分层分级管理,攻克了资源聚合、市场交易与信息交互等关键技术,在调峰调频辅助服务市场中发挥了重要作用。

2 虚拟电厂聚合管控架构

虚拟电厂在管理分布式资源参与电网互动过程中,需要对可控资源进行建模、聚合与协同控制,这其中涉及众多可控资源的复杂物理模型和优化控制问题,给虚拟电厂的聚合管控带来了挑战。为了降低资源管控的难度、提高资源建模的精度、构建可靠的资源聚合模型,构建安全、高效、稳定的数据信息交互体系是虚拟电厂系统性实现的关键。

为了解决上述问题,需要融合资源建模、聚合调控、信息通信等技术,形成完整的虚拟电厂聚合管控体系。目前虚拟电厂的控制方式主要包含集中控制、集中-分散控制与完全分散控制型三种^[24-25]。集中控制型虚拟电厂掌握各可控设备的全部信息,在电网调度过程中参与多种电网辅助服务,但该控制方式实现难度大、扩展难度大,对通信技术的要求较高^[26];集中-分散控制型虚拟电厂针对集中控制型中存在的问题进行了改进,通过本地的控制系统进行数据信息收集,但仍需要中央控制系统协调可控资源的分配问题^[27];完全分散控制型虚拟电厂是用数据交换处理器替代了分散型的控制中心,用来提供市场价格等相关信息,具有良好的扩展性^[28]。

基于现有虚拟电厂相关实践与理论研究^[8,25],提出虚拟电厂一种端-边-网-云分层控制框架,各环节如图3所示,来进行虚拟电厂资源管控,该架构主要包含四个方面。

1) 云端管控层。

云端管控平台是虚拟电厂的核心,是协调多个子虚拟电厂与火电机组等其他灵活性资源为统一整体的关键。在虚拟电厂参与调度决策过程中,云端管控平台与电网之间进行协调互动,利用各虚拟电厂的运行状态与运行特性,参与电力市场投标竞价与不同时间尺度的电网服务,实现“对外统一”。进

一步优化决策出各虚拟电厂的日前出力计划与发电计划,并将调度指令按照虚拟电厂之间的协调关系分配至各子虚拟电厂。

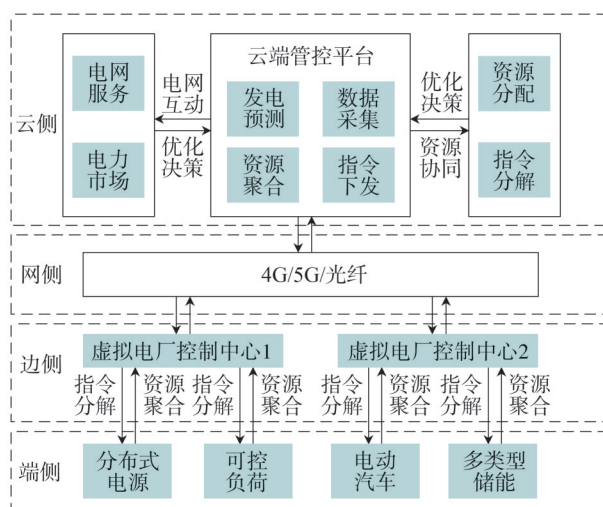


图3 虚拟电厂端-边-网-云控制架构

Fig.3 VPP end edge network cloud control architecture

云端管控中心的构建需要结合云计算、硬件系统等技术手段,通过收集管辖范围内的各子虚拟电厂的运行状态与参数,进而实现统一协调优化。现阶段针对云平台构建方案已有部分研究,文献^[29-30]分析了未来云计算在电网调度中的应用前景,提出了云平台建设方案;文献^[31]将云平台设计架构进一步细化,系统性地构建了云控平台分层运行体系,为新一代云控平台技术应用提供了范式。

2) 通信网络层。

通信网络是云端管控平台与虚拟电厂边缘控制层链接的纽带,安全可靠的通信网络是二者之间信息高效传递与指令精确下达的关键。边缘控制层汇总各子虚拟电厂运行状态与参数并上传至云端控制平台,进而实现海量DER参与电网的协同优化。在控制平台确定各子虚拟电厂的调度计划后,通过通信网络下达至各子虚拟电厂。

为了保证通信网络的安全可靠,在构建电厂通信网络系统时,要综合考虑通信延时性、可靠性、经济性与安全性四个方面。传统通信技术包含4G移动通信网络^[32]、光纤通信^[33]、电力线载波通信^[34]等通信方式,每种方式存在一定优缺点,5G作为新兴发展的移动通信网络,在未来的虚拟电厂中有很好的

应用前景^[35]。

3) 虚拟电厂边缘控制层。

虚拟电厂边缘控制层表现为局域型分布式资源管理的子虚拟电厂,每个子虚拟电厂基于硬件资源,融合大数据、人工智能等技术,对内部各可控资源进行资源建模与聚合,对可再生能源出力与电力负荷进行预测^[36]。在与电网交互的过程中,各子虚拟电厂基于各可控资源聚合模型提取出功率调节边界、爬坡速率等外特性,进而整合出自己的运行状态与运行特性并通过通信网络上传至云端管控平台。另一方面,通过本地计算系统,实现对电网调度指令的协调分配与解聚合,实现“对内协调”。

虚拟电厂边缘控制层为小型的虚拟电厂,具备一定计算能力并靠近资源终端,所以拥有出色的低延时数据采集能力,这使其能在一定程度上进行高效的就地优化决策,进而实现对资源的即时管理^[37]。而云端控制平台具有高效的计算能力,但海量资源信息使其面临巨大压力,难以实现海量资源的统一优化决策。为了提高分布式资源优化决策过程中的效率,文献[38]介绍了云边协同控制方法;文献[39]提出了一种云边协同虚拟电厂日前调度方法,利用子虚拟电厂对可控资源进行分布式优化,降低云端控制中心的优化决策压力,通过算例验证了该方法在虚拟电厂实时调控中的效果。

4) 智能终端层。

智能终端是各可控资源附带的智能监控装置,是资源调控的底层单元,包含资源控制、状态监测、安全并网等功能。各可控资源通过智能监测装置来获取设备功率、参数与工作状态等信息,通过本地局域网络上传至虚拟电厂边缘控制层,实现对海量 DER 进行建模与聚合。同时,设备终端还能够响应边缘控制层下发的控制指令,最终实现电网调度的终端控制。

在端-边-网-云控制架构下,虚拟电厂结合物联网、人工智能、5G 通信等技术,利用终端监测设备汇总海量 DER 设备信息,在边缘控制层形成各子虚拟电厂内部资源聚合模型,并上传运行状态与运行特性至云端控制平台参与电网互动。云端控制平台与子虚拟电厂形成“对外统一、对内一致”的运行优化体系,最终通过智能终端实现各可控资源的分布式控制。

3 虚拟电厂内可控资源建模

虚拟电厂中的 DER 通常具有异质性、分散性与随机性的特点,精确构建 DER 的物理模型是虚拟电厂分析自身运行状态的关键,更是虚拟电厂参与电网调度的关键。

现有资源建模方法通常由物理模型出发,基于设备物理运行原理,精细化构建资源模型,有利于提高各资源之间的协调配合能力,提高能源利用效率。针对热电联产系统,文献[40]构建了热电联产机组运行模型,结合了光伏电池、风电等可再生能源,有效降低了系统运行成本,提高了系统新能源消纳能力。然而热能传递具有延时性,为了实现对热能的精确分析,文献[41]提出了一种热能系统构建方法,能够精细化计算热网温度的变化过程;进一步将建模扩展到冷热电联供系统,文献[42]提出了一种针对不同系统组成的母线式结构模型,设计了对应的优化框架并具有很好的工程应用效果。

为了探究储能对电力系统稳定性的影响,文献[43]构建了包含电-热-氢多种储能的系统模型。文献[44]构建了储能系统模型,有效应用于平滑风电出力。针对虚拟电厂中负荷侧典型资源主要为热泵、空调、热水器等温控负荷,目前温控负荷的聚合通常基于物理模型出发,采取一阶热力学等值模型对温控负荷的运行状态进行描述,模型表示为温度与功率之间的关系^[45]。文献[46-47]对包含热泵、空调、热水器等温控负荷进行了建模,基于设备运行特性来确定模型参数与运行边界,通过经济调度验证了模型的效果。电动汽车作为近年来快速发展的负荷侧资源,其物理模型的构建已有大量研究。文献[48-49]基于电动汽车物理运行原理,构建考虑离并网时间的电动汽车数学模型;进一步,文献[50]构建了考虑充电方式的电动汽车模型,有效提高了负荷侧资源的调度灵活性与电力系统运行经济性。

目前对于可控资源的建模已经比较成熟,然而精确的物理模型往往要考虑压强、热动态过程等多种复杂因素,进而导致模型构建与求解出现困难,该情况下通常需要对模型进行一定的简化来提高求解效率。如何在考虑物理运行原理的基础上实现资源高效建模仍有待进一步研究。

4 虚拟电厂资源聚合模型构建

云端管控平台在对虚拟电厂内部可控资源优化控制的过程中,会产生大量待求解的决策变量,在优化求解问题中,模型的求解难度以决策变量的维数呈指数增加,大量的决策变量会出现维数灾的情况。另一方面虚拟电厂参与电力市场交易过程中,通常要保护内部设备模型的具体参数,进而保证自身的竞争优势^[51]。如何通过聚合手段聚合海量可控资源并进行外特性封装,是降低系统优化求解难度,保护用户隐私的关键。

4.1 新能源发电

虚拟电厂中源-荷-储端的海量可控资源的聚合是虚拟电厂多能协同的关键,是系统参与优化运行的基础。对于电源侧,风、光等分布式可再生能源具有波动性与不确定性,导致出力情况难以预测。为了实现分布式电源的聚合管控,需要基于出力不确定性进行建模,文献[52]利用概率密度函数处理不确定性问题,实现了风光资源聚合;文献[53]首先分析了分布式电源调节的灵活性,构建一种分布式电源出力随机性的定量描述方法,实现了不确定性分布式电源的聚合管控,有效提高了电网灵活性。

4.2 储能

储能资源因具有功率快速调节与供能的特点,能够有效平滑新能源出力、提高新能源消纳比例^[54]。在未来随着储能技术的深入发展,大规模分布式储能将接入电网,如何利用分布式储能来提供快速、有效的电网服务是规模化利用储能资源的关键。储能的数学模型十分相似,聚合难度小,聚合的关键在于资源的分配过程。现有研究中通常采用一致性控制方法来实现对分布式储能的控制,通过将调度指令在分布式电源间进行均分或者统一荷电状态,依据储能容量比例分配^[55]。文献[56]设计了一种多代理协调控制策略的储能功率配置方法,具有很好的扩展性,能够有效减小通信压力;文献[57]基于一致性理论提出了一种多组混合储能控制模型,实现了不同类型储能之间的功率分配。

4.3 温控负荷

对于负荷侧资源的聚合管控,现有文献大都将负荷分为可中断负荷^[58-59]、可转移负荷^[60-61]、可削减负荷^[62]三类,该类分析方法没有充分考虑负荷侧设

备的物理模型,仅在宏观的角度分析资源集群的功率响应能力,缺乏对各类资源调节能力的精确计算。为了充分利用负荷侧资源的调节能力,需要构建能够精确量化资源集群运行状态的聚合模型。在负荷侧的研究中,常见的负荷资源包含空调、热泵、热水器等温控负荷与电动汽车,现阶段学者对温控负荷的建模方法与资源聚合方法已有大量研究,按照不同需求,利用不同的聚合模型来进行资源聚合。

通过构建温控负荷一阶热力学等值模型可以实时计算各资源的运行状态,基于资源单体模型进一步可以构建资源集群聚合模型。为了衡量负荷集群的功率水平,文献[63-64]构建了状态序列聚合模型,他们将温度控制区间进行分组,通过计算各组的概率密度来计算聚合功率。为了能够反应空调集群的功率变换过程,文献[65]通过构建变状态数的状态序列模型,有效提高了聚合精度。状态序列模型原理简单,求解难度小,但聚合精度一般且不适用于参数异质性强的场景。为了提高聚合模型构建的精度与适用场景,文献[66]提出了一种基于蒙特卡洛模拟法的温控负荷集群 Fokker-Planck 聚合模型;为了实现对模型的高效求解,文献[67]提出了一种温控负荷集群 Fokker-Planck 聚合模型的拉普拉斯反变换求解方法。该模型能够有效反映负荷集群工作过程中的开关状态,精确计算聚合功率,然而模型存在求解困难或非可行解的情况,难以广泛推广应用。为了进一步反映虚拟电厂外特性,简化模型求解过程,增加模型适用范围,文献[68-69]将室温看作能量储能系统,将温控负荷功率看作储能充放电功率,构建了定频型温控负荷的虚拟储能模型,并提出了参数确定方法。虚拟储能模型具有良好的普适性,还能够实现变频空调的聚合^[70]。文献[71]进一步模拟了模型在电力市场中的运行行为,发现模型在一定程度上能够替代传统锂电池在电网服务中的作用。虚拟储能模型原理简单,能够实现异质性负荷的聚合,具有很好的推广前景。

4.4 电动汽车

电动汽车使用规模的不断扩大,在传统的集中控制模式下同样会产生维数灾的问题,如何减少优化过程中的模型求解难度是电动汽车聚合的关键。文献[72]构建了一种按照电压等级进行划分的分层聚合模型,针对同层资源进行统一调度来降低算法

求解难度;文献[73]构建了一种考虑多重不确定性因素的电动汽车聚合模型;文献[74]定义了用户满意度概念,构建了一种可扩展至各类柔性可控资源的电动汽车聚合模型,进一步实现了多类型资源的统一聚合。

通过对虚拟电厂内部源-荷-储各类可控资源的聚合,基于资源聚合模型能够进一步拟合资源集群的外特性,例如爬坡率、响应时间与调节潜力等特征。通过整合各资源集群的外特性能够生成虚拟电厂整体运行特征,进而形成虚拟电厂运行边界,为优化运行提供基础。

5 虚拟电厂内运行优化

虚拟电厂内部运行优化,即根据虚拟电厂运行目标制定最优运行决策的过程。在优化决策过程中,虚拟电厂通过各资源聚合模型,结合各智能终端采集的设备运行状态与参数等信息确定系统运行边界,进而形成虚拟电厂内部优化约束条件。虚拟电厂在电网中主要参与电力市场与电网辅助服务,参与方式如图4所示,优化调度中的目标主要为经济效益最优或电网辅助服务能力最优。

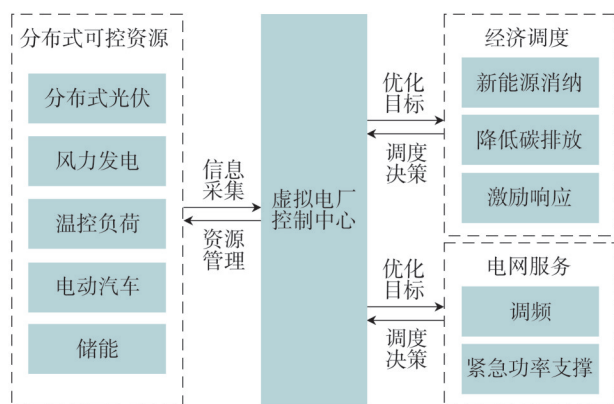


图4 虚拟电厂内运行优化

Fig.4 Optimization of operation in VPP

5.1 经济调度

虚拟电厂作为独立运营的主体,在激烈的市场竞争中,用能效率是保持竞争力和盈利能力的关键。在经济调度下,针对虚拟电厂研究的侧重点各不相同,为了提高电网对分布式能源消纳能力,文献[7]则根据虚拟电厂的组成单元特征构建虚拟电厂源-

荷-储多元备用容量系统,在降低弃风电量方面效用显著;文献[75]在经济调度中,构建了风光储分层容量配置模型,利用负荷侧可控资源,有效提高了负荷曲线与可再生能源曲线的吻合度,在提高了新能源消纳比例的同时还优化了电池配置容量;文献[76]通过动态聚合分散式可控资源,构建了电力市场双层交易互动模型,有效提高了能源利用率的同时降低了运行成本。

在“双碳”政策下,碳排放量成为虚拟电厂运行过程中的一大重要指标,碳交易和绿证交易能够有效减少虚拟电厂的运行成本^[77]。文献[78]提出了一种考虑阶梯式碳交易和综合需求响应的虚拟电厂低碳经济调度方法,建立了虚拟电厂低碳经济调度模型,有效提高了电力系统的经济性并降低了碳排放量;文献[79]将发电侧与需求侧调峰资源相结合,建立核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰模型,并引入碳交易机制,从经济性与低碳性两方面综合分析运行成本;文献[80]建立了一种碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型,使可再生能源能参与到碳交易中,并促进用户侧与发电侧的协同,提高虚拟电厂的减排效益。

在经济调度中,通常构建激励型响应的运行成本函数来引导用户行为。文献[81]考虑激励型需求响应的VPP优化调度,通过激励型响应引导用户侧柔性负荷参与调度决策,有效提高了系统运行的经济效益;文献[82]提出了一种基于激励型需求响应的多级补偿电价机制,以收益最大为目标,建立了虚拟电厂参与日前市场和日内平衡市场的两阶段经济调度模型,有效平衡了风光出力偏差,提高虚拟电厂的收益。文献[83]将电价型和激励型需求响应措施相结合,建立电热综合需求响应模型,有效提高了虚拟电厂运行中的经济效益。

虚拟电厂在经济调度的同时会受到电力市场价格机制,如分时电价的影响。文献[84]提出一种基于风电功率的分时电价划分方法,实现虚拟电厂聚合蓄热式电采暖参与基于分时电价的清洁供暖交易优化运营,达成减小弃风,提高经济效益这一目标;文献[85]基于分时电价机制以虚拟电厂经济最优为目标,增加功率平衡、风/光新能源预测出力和储能系统运行成本等系统约束条件,建立虚拟电厂经济最优调度模型。

5.2 电网辅助服务

此外,虚拟电厂运行优化另一大目标是提高虚拟电厂运行的稳定性即做到紧急功率支撑。目前常用支撑手段如调频,文献[86]采用虚拟发电厂整合分布式能源参与电力系统的一次调频,提出虚拟发电厂采用串联运行控制和并联运行控制两种控制策略,使虚拟发电厂减小新能源接入电网的冲击性。文献[87]计及VPP有功功率响应对电网频率动态的影响,构建扩展系统频率响应模型,能够有效评估并调整VPP支撑大电网频率稳定的能力,提高扰动事故后的暂态最低频率。

在紧急功率支撑方面,文献[23]提出了VPP参与电网紧急控制机制与调控策略,从而将DER纳入电网紧急控制技术体系。文献[88]则构建兼顾物理状态和用户行为的DER运行模型,提出考虑状态转移及边界约束的紧急功率多时间尺度调节能力在线计算方法,构建更加灵活的网源荷储互动的新型紧急控制系统。

6 多虚拟电厂协同优化

多虚拟电厂协同优化是指将多个虚拟电厂作为一个整体来进行管理和优化,以提高能源效率和经济效益。在这种模式下,多个虚拟电厂通过先进的信息技术和控制系统相互连接,共享资源和信息,共同对分布式能源资源进行优化调度。

虚拟电厂需要彼此之间相互配合才能更有效地发挥自身的调节能力,多个虚拟电厂之间呈现互补合作关系,此时虚拟电厂间的协同优化往往需要与博弈论手段进行结合。为了提高虚拟电厂整体配合的效果,最大程度发挥虚拟电厂的综合调节能力,文献[89]提出了一种考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法,有效提高了分布式资源的综合运行效益与能源利用率;文献[90]针对多个VPP间的交易博弈问题,考虑物理网络特性对博弈过程的影响,提出了计及配电网运行约束的多VPP合作博弈策略。文献[91]将主从博弈与Kriging模型相结合,建立DSO和VPP的一主多从博弈模型,并提出基于Kriging模型的主从博弈均衡算法。虚拟电厂作为独立运行的经济主体,往往要考虑自身运行的经济性,在多个虚拟电厂间还存在竞争关系,文献[92]则综合考虑多虚拟电厂形成的多决策主体利益关联与冲

突的局面,建立了考虑网络安全约束的多虚拟电厂主从博弈优化运行方法。文献[93]提出了多VPP日前随机博弈与变时间尺度协同优化方法,针对实时预测信息的更新和波动,考虑调度偏差减少率与综合成本增加率的博弈,有效适应多种不确定性运行场景,在保证经济性的同时提升了功率曲线跟踪能力。

鲁棒优化采用不确定集表征参数不确定性,克服随机规划中不确定参数概率分布难以准确获取的困难,且决策方案可以根据鲁棒系数灵活调节,实现经济可靠运行。文献[94]构建了多虚拟电厂非合作动态博弈日前市场优化交易模型,将确定性竞标模型扩展为两阶段鲁棒优化模型,并通过列约束生成算法对主、子问题进行交替求解,为虚拟电厂市场交易提供思路和参考。文献[95]提出了一种基于非合作博弈理论和鲁棒优化思想的多VPP参与日前市场的竞标博弈方法,通过强对偶理论和鲁棒优化方法将确定性竞标模型扩展为鲁棒优化模型,并在模型中引入了鲁棒调节系数来灵活调整VPP竞标方案的保守性。

此外,多虚拟电厂协同优化的研究除了优化手段,也针对不同场景进行了众多研究。在多时间尺度场景下,文献[96]基于多虚拟电厂参与电力市场时的双层协调机制,和减小预测不确定性这一目标,建立基于机会约束规划的多时间尺度优化模型。文献[97]考虑可再生能源出力、电力负荷和电价等一系列不确定性因素,提出了高比例可再生能源渗透下的多虚拟电厂日内两阶段优化调度模型。考虑电力市场的参与和电价不确定性场景下,文献[98]提出了满意度的概念,为多VPP之间电量交易提供合理的电价制定方案,从而为双边合同的签订提供了定量依据,同时为增量配电网投资商提供了具有参考价值的运营策略。

7 发展前景与挑战

随着我国对清洁能源的大力发展,虚拟电厂技术在提高新能源并网稳定性、提高未来新能源占比具有关键作用,具有很广阔的发展前景。现有国内外关于虚拟电厂的研究还不能完全适用于我国目前的发展状况,虚拟电厂在实际应用中的发展前景与未来的挑战可能包含以下几个方面:

1)虚拟电厂对内部各资源进行建模的过程中,精细化的模型构建能够精确反映虚拟电厂的运行特征与调节边界,能够为虚拟电厂运行优化提供有效支撑。精确的模型构建需要基于各资源物理运行原理,例如在热能传输中涉及热网的构建,气体传输的过程中涉及压力、流量等信息的建模,这无疑加大了模型构建的难度。如何在简化资源模型的过程中还能有效提高模型的精度仍有待研究。为了同时降低模型运算难度并提高模型通用性便于资源聚合,可以考虑构建资源多类型、异质性一阶通用数学模型,便于虚拟电厂的资源管理与可调能力的分析。

2)在资源聚合方面,为了构建资源聚合模型,往往需要获取单体资源的模型参数。然而海量分布式可控资源的模型参数有数量多、获取难度大的特点。如何通过合理手段模拟分布式资源中的异质性参数,进而形成聚合模型参数,是提高聚合模型精确程度的关键。未来可以采用神经网络曲线拟合能力来实现资源集群的聚合模型参数拟合,利用海量可控资源的运行状态来进行模型训练,利用拟合后的参数表征资源集群的运行情况。

同时在资源聚合过程中,低成本通信技术与海量数据实时可靠交互十分关键。还须解决在数据传输过程中产生的数据丢失与误差问题,实现不完整数据优化。

3)在运行优化方面,由于用户行为、资源参数、模型误差、通信延时等不确定性因素导致的优化过程中的优化目标确定性与优化条件不确定性之间的矛盾成为挑战。通常表现为系统运行中的多种不确定性因素对优化模型的影响,例如风光出力的不确定性、电动车用户行为的不确定性、温控负荷用户响应意愿的不确定性等。大量不确定的因素会导致系统在响应的过程中出现误差,影响虚拟电厂优化调度的结果。充分考虑各类资源中的不确定性因素使得虚拟电厂更有效地参与经济调度与电网服务。

4)虚拟电厂在运行过程中,往往需要保证自身内部资源的信息不被泄露,以此来保证自身在电力市场中的竞争力。如何系统性构建虚拟电厂信息交互环节,保证信息交互过程中的安全性十分关键。未来虚拟电厂的发展中,可以通过分层信息传输框架来保证信息的安全性,利用多个小型管控终端实现局域资源信息采集与管控,通过外特征整合后上

传至虚拟电厂云端控制中心,既能充分发挥虚拟电厂的调节能力,又能保证内部信息的安全。

8 结束语

随着可再生能源渗透率不断提高,火电机组比重逐渐下降,电网调度灵活性受到挑战。虚拟电厂通过先进的通信、聚合、控制技术,能够协同海量分布式可控资源参与电网互动,是提高电网灵活性、促进分布式资源与大电网协同优化运行、促进电力系统清洁高效稳定运行的有效技术手段。

基于虚拟电厂的定义,文中梳理了虚拟电厂的发展历程,认为虚拟电厂是协同源-荷-储多类型分布式可控资源的资源管控平台,是统一海量分布式资源参与大电网互动的重要手段。基于我国现有虚拟电厂相关研究与具体实践,梳理端-边-网-云系统分层聚合管控框架,并提出了虚拟电厂中的关键问题。按照资源类别介绍了目前虚拟电厂中各类分布式可控资源典型的建模与聚合方法;在协同优化方面,构建双层协同优化架构,形成对内部资源协调优化、外部独立参与市场交易与电网服务的“对外统一、对内协调”的运营模式;最后,各研究内容结合相关技术难点进行了展望。

虚拟电厂将成为未来高比例可再生能源场景下新型电力系统的关键技术手段,文中研究为虚拟电厂系统运行架构与相关关键技术提供理论支撑,现阶段我国的虚拟电厂发展仍处于起步阶段,在未来虚拟电厂仍需要进一步的理论与实践研究。

参考文献

- [1] 国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[EB/OL].(2022-1-29)[2023-11-28].http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- [2] 姜云鹏,任洲洋,李秋燕,等.考虑多灵活性资源协调调度的配电网新能源消纳策略[J].电工技术学报,2022,37(7):1820-1835.
JIANG Yunpeng, REN Zhouyang, LI Qiuyan, et al. An accommodation strategy for renewable energy in distribution network considering coordinated dispatching of multi-flexible resources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(7):1820-1835.
- [3] 谭鸣骢,王玲玲,蒋传文,等.考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型[J].中国电力,2022,55(10):32-44.
TAN Mingcong, WANG Lingling, JIANG Chuanwen, et al. Analysis

- of distribution network information risks based on knowledge graph and cellular automata[J].Electric Power,2022,55(10):32-44.
- [4] 李昭昱,艾芊,张宇帆,等.数据驱动技术在虚拟电厂中的应用综述[J].电网技术,2020,44(7):2411-2419.
- LI Zhaoyu, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Application of data-driven technology in virtual power plant [J]. Power System Technology, 2020, 44 (7): 2411-2419.
- [5] 刘健,刘雨鑫,庄涵羽.虚拟电厂关键技术及其建设实践[J].综合智慧能源,2023,45(6):59-65.
- LIU Jian, LIU Yuxin, ZHUANG Hanyu. Key technologies and construction practices of virtual power plants [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(6): 59-65.
- [6] 吴晓刚,唐家俊,吴新华,等.“双碳”目标下虚拟电厂关键技术与建设现状[J].浙江电力,2022,41(10):64-71.
- WU Xiaogang, TANG Jiajun, WU Xinhua, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under “dual-carbon” goals[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 64-71.
- [7] 吕梦璇,姜素华,刘建琴,等.含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2874-2882.
- LYU Mengxuan, LOU Suhua, LIU Jianqin, et al. Coordinated optimization of multi-type reserve in virtual power plant accommodated high shares of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2874-2882.
- [8] 王宣元,刘蓁.虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J].电力系统自动化,2022,46(18):158-168.
- WANG Xuanyuan, LIU Zhen. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (18): 158-168.
- [9] SHIMON A, ALISTAIR P. The virtual utility [M]. Boston, MA: Springer, 1997
- [10] BIGNUCOLO F, CALDON R, PRANDONI V, et al. The voltage control on MV distribution networks with aggregated DG units (VPP) [C]// 41st International Universities Power Engineering Conference, September 6-9, 2006, New castle upon Tyne, UK: 187-192.
- [11] PUDJANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual powerplant and system integration of distributed energy resources [J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 10-16.
- [12] BABAEI S, ZHAO C Y, FAN L. A data-driven model of virtual power plants in day-ahead unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5125-5135.
- [13] Consolidated Edison. Distributed system implementation plan [R/OL]. (2020-6-30) [2023-11-30]. <https://www.coned.com/-/media/files/coned/documents/our-energy-future/our-energy-projects/distributed-system-implementation-plan.pdf>.
- [14] HRVOJE P, IGOR K, TOMISLAV C. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy, 2013, 101(1): 134-141.
- [15] ZHAO H T, WANG X Y, WANG B, et al. Cloud-cluster hierarchical dispatch for large scale demand-side distributed resources [C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, October 22-24, 2021, Taiyuan, China: 272-276.
- [16] 王宣元,刘敦楠,刘蓁,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J].电网技术,2019,43(9):3175-3183.
- WANG Xuanyuan, LIU Dunnann, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [17] 葛鑫鑫,付志扬,徐飞,等.面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(18):129-146.
- GE Xinxin, FU Zhiyang, XU Fei, et al. Business model and key technologies of virtual power plant for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 129-146.
- [18] 钟永洁,纪陵,李靖霞,等.虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架与综合功能[J].发电技术,2023,44(5):656-666.
- ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, et al. System framework and comprehensive functions of intelligent operation management and control platform for virtual power plant [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 656-666.
- [19] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
- KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [20] 吴晓刚,唐家俊,吴新华,等.“双碳”目标下虚拟电厂关键技术与建设现状[J].浙江电力,2022,41(10):64-71.
- WU Xiaogang, TANG Jiajun, WU Xinhua, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under “dual-carbon” goals[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 64-71.
- [21] 潘美琪,贺兴,艾芊,等.新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J/OL].电网技术:1-16(2023-09-06)[2023-12-11] <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0716>.
- PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospect of distributed energy resource dispatching in new distribution system [J/OL]. Power System Technology: 1-16 (2023 - 09-06) [2023 - 12 - 11] <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0716>.
- [22] 田立亭,程林,郭剑波,等.虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J].电网技术,2020,44(6):2097-2108.
- TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants [J]. Power System Technology, 2020, 44(6):

- 2097-2108.
- [23] 曹永吉,张恒旭,施啸寒,等.规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J].电力系统自动化,2021,45(18):1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, et al. Preliminary study on participation mechanism of large-scale distributed energy resource in security and stability control of large power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 1-8.
- [24] 刘吉臻,李明扬,房方,等.虚拟发电厂研究综述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5103-5111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [25] 卫璇,潘昭光,王彬,等.云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究综述及展望[J].全球能源互联网,2020,3(6):539-551.
WEI Xuan, PAN Zhaoguang, WANG Bin, et al. Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 539-551.
- [26] GONG J, XIE D, JIANG C, et al. Multiple objective compromised method for power management in virtual power plants [J]. Energies, 2011, 4(4): 700-716.
- [27] 刘思源,艾芊.基于多代理系统的虚拟电厂协调优化[J].电器与能效管理技术,2017(3):19-25.
LIU Siyuan, AI Qian. Coordinated optimization of virtual power plant based on multi-agent system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(3): 19-25.
- [28] PETER B, BJARNE P, MORTEN D, et al. Evaluation of a generic virtual power plant framework using service oriented architecture [C]//Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International. 1-3 Dec. 2008: 1212-1217.
- [29] 曹阳,高志远,杨胜春,等.云计算模式在电力调度系统中的应用[J].中国电力,2012,45(6):14-17.
CAO Yang, GAO Zhiyuan, YANG Shengchun, et al. Application of cloud computing in power dispatching systems [J]. Electric Power, 2012, 45(6): 14-17.
- [30] 梁寿恩,胡荣,周华锋,等.基于云计算架构的新一代调度自动化系统[J].南方电网技术,2016,10(6):8-14.
LIANG Shouyu, HU Rong, ZHOU Huafeng, et al. A new generation of power dispatching automation system based on cloud computing architecture [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 8-14.
- [31] 许洪强.调控云架构及应用展望[J].电网技术,2017,41(10):3104-3111.
XU Hongqiang. Architecture of dispatching and control cloud and its application prospect [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3104-3111.
- [32] CHEN Y, ZHAO C, LOW S, et al. Approaching prosumer social optimum via energy sharing with proof of convergence [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2484-2495.
- [33] 钱君霞,罗建裕,江叶峰,等.适应特高压电网运行的江苏源网荷毫秒级精准切负荷系统深化建设[J].中国电力,2018,51(11):104-109.
QIAN Junxia, LUO Jianyu, JIANG Yefeng, et al. Deepening construction of Jiangsu source-network-load millisecond-level precise load control system suitable for UHV power grid operation [J]. Electric Power, 2018, 51(11): 104-109.
- [34] 梁志峰,叶畅,刘子文,等.分布式电源集群并网调控:体系架构与关键技术[J].电网技术,2021,45(10):3791-3802.
LIANG Zhifeng, YE Chang, LIU Ziwen, et al. Grid-connected scheduling and control of distributed generations clusters: architecture and key technologies [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3791-3802.
- [35] 刘雨佳,樊艳芳.计及5G基站储能和技术节能措施的虚拟电厂调度优化策略[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(1):8-15.
LIU Yujia, FAN Yanfang. Optimal scheduling strategy for virtual power plant considering 5G base station technology, energy-storage, and energy-saving measures [J]. Proceedings of the CSU-EPSA 2022, 34(1): 8-15.
- [36] 吕军,栾文鹏,刘日亮,等.基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J].电网技术,2018,42(10):3108-3115.
LYU Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution internet of things based on widespread sensing & software defined technology [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115.
- [37] LAMOTHE R. Edge computing [R]. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 2013.
- [38] 崔羽飞,张云勇,张第,等.基于云边协同的工业互联网实践[J].电信科学,2020,36(2):109-116.
CUI Yufei, ZHANG Yunyong, ZHANG Di, et al. Analysis and development suggestions of operators in the field of industrial internet identification analysis system [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(2): 109-116.
- [39] 祖广伟,俞海侠,张琳,等.考虑日前偏差与电网需求的虚拟电厂云边协同实时调控方法[J/OL].现代电力:1-13(2023-09-01)[2023-12-03]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0491>.
- [40] 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.

- LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [41] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199: 234-246.
- [42] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
- WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [43] TENG Y, WANG Z, LI Y, et al. 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, 2019, 5(2): 266-274.
- [44] WEI L, GEZA J, JEAN B, et al. Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1137-1145.
- [45] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5519-5528.
- LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528.
- [46] 陈张宇, 刘东, 刘浩文, 等. 基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2542-2550.
- CHEN Zhangyu, LIU Dong, LIU Haowen, et al. Optimal dispatching of virtual power plant based on refined demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2542-2550.
- [47] TURK A, WU Q, ZHANG M, et al. Day-ahead stochastic scheduling of integrated multi-energy system for flexibility synergy and uncertainty balancing[J]. Energy, 2020, 196: 117130.
- [48] 王杨洋, 茆美琴, 杨铖, 等. 面向多场景辅助服务的大规模电动汽车聚合可调度容量建模[J/OL]. 电力系统自动化: 1-20 (2023-11-23) [2024-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231122.1302.008.html>.
- WANG Yangyang, MAO Meiqin, YANG Cheng, et al. Modeling for large-scale EV aggregated dispatchable capacity considering multi-scenario ancillary services [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-20 (2023-11-23) [2024-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231122.1302.008.html>.
- [49] 潘振宁, 余涛, 王克英. 考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3528-3541.
- PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3528-3541.
- [50] 姜涛, 吴成昊, 李雪, 等. 考虑电动汽车充放电的输配协同能量-灵活性市场出清机制[J/OL]. 电力系统自动化: 1-20 (2023-12-22) [2024-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231222.1027.002.html>.
- JIANG Tao, WU Chenghao, LI Xue, et al. Clearing mechanism of energy-flexibility markets with transmission and distribution coordination considering charging and discharging of electric vehicles [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-20 (2023-12-22) [2024-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231222.1027.002.html>.
- [51] 陈会来, 张海波, 王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 15-28.
- CHEN Huilai, ZHANG Haiibo, WANG Zhaolin. A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 15-28.
- [52] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.
- FAN Songli, AI Qian, HE Xing. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4025-4034.
- [53] 李翔宇, 赵冬梅. 计及可调资源动态特性的虚拟电厂多级优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 17-24.
- LI Xiangyu, ZHAO Dongmei. Multi-level optimal configuration of virtual power plant considering dynamic characteristics of adjustable resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 17-24.
- [54] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [55] LI C, COELHO E, DRAGICEVIC T, et al. Multiagent-based distributed state of charge balancing control for distributed energy storage units in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2369-2381.
- [56] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V. Cooperative multi-agent control of heterogeneous storage devices distributed in a DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2974-2986.
- [57] 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.
- 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.
- [58] HUANG X, TAYLOR G. Multi-period service restoration of distribution systems incorporating interruptible load [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(9): 1788–1803.
- [59] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场可中断负荷合同模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005(9): 11–16.
WANG Jianxue, WANG Xifan, WANG Xiuli. Study on model of interruptible load contract in power market [J]. Proceedings of the CSEE, 2005(9): 11–16.
- [60] GRADITI G, DI S, GALLEA R, et al. Heuristic-based shiftable loads optimal management in smart micro-grids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 271–278.
- [61] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑P2G多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067–3077.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067–3077.
- [62] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35–41.
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators (DG) and energy storage units [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35–41.
- [63] NING L, CHASSIN D. A state-queueing model of thermostatically controlled appliances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1666–1673.
- [64] NING L, CHASSIN D, et al. Modeling uncertainties in aggregated thermostatically controlled loads using a state queueing model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 725–733.
- [65] 杨秀, 傅广努, 刘方, 等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699–714.
YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 699–714.
- [66] MALHAME R, CHONG C. Electric load model synthesis by diffusion approximation of a high-order hybrid-state stochastic system [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1985, 30(9): 854–860.
- [67] 刘萌, 梁雯, 张晔, 等. 温控负荷群Fokker-Planck方程聚合模型的数值拉普拉斯反变换求解方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 17–23.
LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Ye, et al. Numerical inverse Laplace transform solving method of thermostatically controlled load group's Fokker-Planck equation aggregation model [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 17–23.
- [68] SONG M, GAO C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Multi-time-scale modeling and parameter estimation of TCLs for smoothing out wind power generation variability [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 105–118.
- [69] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394–401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394–401.
- [70] SONG M, GAO C, YANG J, et al. Energy storage modeling of inverter air conditioning for output optimizing of wind generation in the electricity market [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 305–315.
- [71] SONG M, GAO C, YAN H, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5522–5534.
- [72] CALLAWAY D, HISKENS I. Achieving controllability of electric loads [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 184–199.
- [73] 周博, 吕林, 高红均, 等. 基于两阶段随机规划的虚拟电厂优化交易策略[J]. 电力建设, 2018, 39(9): 70–77.
ZHOU Bo, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Optimal bidding strategy based on two-stage stochastic programming for virtual power plant [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 70–77.
- [74] 赵本源, 熊岑, 张沛超, 等. 信息物理融合的负荷型虚拟电厂聚合方法[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 15–20.
ZHAO Benyuan, XIONG Cen, ZHANG Peichao, et al. Aggregation method of load virtual power plant based on cyber-physical system [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 15–20.
- [75] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 11–24.
BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 11–24.
- [76] XUN D, JUN W, ZHEN W, et al. A decentralized multi-energy resources aggregation strategy based on bi-level interactive transactions of virtual energy plant [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124, 106356.
- [77] 詹智民, 范玉宏, 刘翊枫, 等. 含可再生能源的虚拟电厂参与碳市场交易优化模型[J]. 可再生能源, 2023, 41(9): 1263–1269.
ZHAN Zhimin, FAN Yuhong, LIU Yifeng, et al. An optimization model of carbon market transactions of virtual power plants with renewable energy [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(9): 1263–1269.

- [78] 徐慧慧,田云飞,缪猛,等.计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J].智慧电力,2023,51(8):1-7.
XU Huihui, TIAN Yunfei, MIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 1-7.
- [79] 李旭东,艾欣,胡俊杰,等.计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J].电网技术,2019,43(7):2460-2470.
LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [80] 张立辉,戴谷禹,聂青云,等.碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):154-163.
ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 154-163.
- [81] 师阳,李宏伟,陈继开,等.计及激励型需求响应的热电互联虚拟电厂优化调度[J].太阳能学报,2023,44(4):349-358.
SHI Yang, LI Hongwei, CHEN Jikai, et al. Optimal scheduling of thermoelectric interconnection virtual power plant considering incentive demand response[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(4): 349-358.
- [82] 王朝.计及需求响应的虚拟电厂风险经济调度与互动策略优化方法研究[D].成都:电子科技大学,2023.
- [83] 江叶峰,熊浩,胡宇,等.考虑电热综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J].电力建设,2019,40(12):61-69.
JIANG Yefeng, XIONG Hao, HU Yu, et al. Optimal dispatching of virtual power plants considering comprehensive demand response of electricity and heat loads[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(12): 61-69.
- [84] 冯云辰,加鹤萍,闫敏,等.基于风电分时电价的虚拟电厂参与清洁供暖运营优化方法[J].中国电力,2024,57(1):51-60.
FENG Yunchen, JIA Heping, YAN Min, et al. Operation optimization method for virtual power plant participating in clean heating based on time-of-use tariff of wind power [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 51-60.
- [85] 王世谦,贾一博,白宏坤,等.分时电价下电动汽车参与虚拟电厂的经济优化调度方法[J].电力需求侧管理,2023,25(5):19-26.
WANG Shiqian, JIA Yibo, BAI Hongkun, et al. Economic optimization scheduling method of electric vehicle participating in virtual power plant under time-of-use price [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(5): 19-26.
- [86] 李润,徐天奇,李琰,等.不同控制策略下虚拟电厂一次调频特性研究[J].现代电子技术,2021,44(17):95-99.
LI Run, XU Tianqi, LI Yan, et al. Study on primary frequency modulation characteristics of virtual power plant using different control strategies [J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(17): 95-99.
- [87] 徐清文,曹永吉,张恒旭,等.考虑暂态调频能力的虚拟电厂预防控制方法[J].电力系统自动化,2022,46(18):83-89.
XU Qingwen, CAO Yongji, ZHANG Hengxu, et al. Preventative control method for virtual power plant considering transient frequency regulation capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 83-89.
- [88] 薛景润,施啸寒,王超,等.兼顾物理状态和用户行为的虚拟电厂紧急功率调节能力量化评估[J].中国电机工程学报,2023,43(8):2906-2921.
XUE Jingrun, SHI Xiaohan, WANG Chao, et al. Online evaluation of emergency power regulation capability for virtual power Plants considering physical characteristics and user behavior constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2906-2921.
- [89] 侯昊宇,葛晓琳,曹旭丹.考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(3):77-85.
HOU Haoyu, GE Xiaolin, CAO Xudan. Coalition game optimization method for multiple virtual power plants considering carbon trading [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 77-85.
- [90] 程雪婷,王金浩,金玉龙,等.计及配电网运行约束的多虚拟电厂合作博弈策略[J].南方电网技术,2023,17(4):119-131.
CHENG Xueting, WANG Jinhao, JIN Yulong, et al. Cooperative game strategy of multiple virtual power plants considering the operational constraints of distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 119-131.
- [91] 涂淑琴.基于博弈论的多虚拟电厂优化调度[D].北京:华北电力大学,2020.
- [92] 周步祥,张越,臧天磊,等.基于区块链的多虚拟电厂主从博弈优化运行[J].电力系统自动化,2022,46(1):155-163.
ZHOU Buxiang, ZHANG Yue, ZANG Tianlei, et al. Blockchain-based stackelberg game optimal operation of multiple virtual power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 155-163.
- [93] 葛晓琳,曹旭丹,李伶玲.多虚拟电厂日前随机博弈与实时变时间尺度优化方法[J].电力自动化设备,2023,43(11):150-157.
GE Xiaolin, CAO Xudan, LI Yiling. Day-ahead stochastic game and real-time adaptive time scale optimization method for multiple virtual power plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 150-157.
- [94] 周博,吕林,高红均,等.多虚拟电厂日前鲁棒交易策略研究[J].电网技术,2018,42(8):2694-2703.
ZHOU Bo, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2694-2703.

(下转第45页)

- [21] AGORRETA J, BORREGA M, L'ÓPEZ J, et al. Modeling and control of n-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2011, 26(3): 770-785.
- [22] 潘冬华, 阮新波, 王学华, 等. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的电容电流即时反馈有源阻尼方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 1-10.
- PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. A capacitor-current real-time feedback active damping method for improving robustness of the LCL-type grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 1-10.
- [23] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [24] CHEN X, ZHANG Y, WANG S S, et al. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid [J]. IEEE Transaction on Power Electronic, 2017, 32(1): 274-283.
- [25] LI Q, SUN P J, LAN Y F, et al. Analysis of resonance

characteristics of a multi-inverter grid-connected system based on resonance modal [C] // 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Guangdong, 2022 : 1124-1129.

收稿日期: 2023-08-08

修回日期: 2023-11-01

作者简介:

周生奇(1979), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源发电和功率变流器的可靠性;

营学辉(1991), 男, 工程师, 主要研究方向为新型电力系统控制;

钟世民(1984), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新型电力系统稳定性;

孙鹏菊(1982), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源发电系统稳定性、功率变流器的可靠性;

李 强(1996), 男, 博士, 主要研究方向为大规模新能源系统稳定性。

(责任编辑 姜婷婷)

(上接第 24 页)

- [95] 宋嘉启, 杨永标, 徐青山, 等. 多虚拟电厂参与日前电力市场的鲁棒竞标博弈方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 77-85.
- SONG Jiaqi, YANG Yongbiao, XU Qingshan, et al. Robust bidding game approach for multiple virtual power plants participating in day-ahead electricity market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 77-85.
- [96] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 753-761.
- LIU Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 753-761.
- [97] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 60-68.
- YANG Hongzhao, YANG Di, MENG Ke. Multi-time scale coordination optimal scheduling of multiple virtual power plants with high-penetration renewable energy integration [J]. Smart Power, 2021, 49(2): 60-68.
- [98] 陈好, 卫志农, 胥峥, 等. 电力体制改革下的多虚拟电厂联合优

化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 42-49.

CHEN Yu, WEI Zhinong, XU Zheng, et al. Optimal scheduling strategy of multiple virtual power plants under electricity market reform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 42-49.

收稿日期: 2023-12-26

修回日期: 2024-01-24

作者简介:

何斯强(1999), 男, 硕士在读, 主要研究方向为分布式可控资源建模与聚合方法;

张俊岭(1979), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力信息化、人工智能、现场作业安全管控;

顾宗奇(2001), 男, 硕士在读, 主要研究方向为虚拟电厂运行优化方法;

施啸寒(1986), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为虚拟电厂运行控制与交互仿真;

江 涵(1984), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为能源电力规划、电力稳定分析。

(责任编辑 王学厚)