

虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践

王宣元, 刘 蓁

(国网冀北电力有限公司, 北京市 100054)

摘要: 随着新能源大规模发展, 电网调节资源日趋紧缺, 调峰压力逐步增大, 亟须挖掘新型调节资源, 提升电力系统灵活调节能力。虚拟电厂通过聚合分布式电源、储能、蓄热、工商业负荷等可调节资源, 优化控制各类资源运行状态, 提供电力系统灵活调节能力。文中首先回顾了国内外虚拟电厂的发展历程, 给出了虚拟电厂的定义。然后, 介绍了虚拟电厂典型实践案例, 并提出了虚拟电厂参与电网调控与市场运营的技术架构, 探讨了聚合调控、市场交易、信息通信3个方面关键技术。最后, 对虚拟电厂的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 虚拟电厂; 可调节资源; 电网调控; 市场运营

0 引言

在“双碳”战略指引下, 中国能源清洁低碳转型全面提速。近年来, 以风电、光伏为典型代表的新能源装机容量快速增长。截至2021年底, 中国新能源发电装机容量达到634 GW·h, 占总发电装机容量的26.7%^[1]。但是, 新能源能量密度低、稳定性差, 且具有波动性、间歇性、反调峰性等特征, 导致电力系统灵活调节能力不足^[2-3]。以冀北电网为例, 风电日最大出力约80%以上出现在负荷低谷期, 且统调供热火电机组比例逐年增高。受地区负荷、电网外送能力增长不及预期的影响, 新能源消纳空间进一步被压缩, 传统火电资源的调节能力已经无法满足系统需要^[4]。因此, 亟须挖掘新型调节资源, 提升电力系统灵活性。

随着各行各业信息化、数字化、智能化转型发展, 电力用户从单一的消费者向混合型的产消者转变^[5-7]。其中, 分布式电源、储能、蓄热、电动汽车等资源都能够相对灵活地控制自身运行状态, 从而提供相当程度的系统调节能力, 但尚未纳入电网调控范围(即电网不可观、不可控), 本文将此类资源定义为可调节资源。截至2021年底, 可调节资源容量已超过37 GW。若能将这些资源纳入电网调控, 将有效提升电力系统灵活调节能力, 扩大新能源消纳空间^[8]。但可调节资源具有数量多、体量小、总量大、

地理位置分散等特征, 将其纳入调控范围, 对感知、聚合、调控、运营的技术水平、市场化激励机制和商业模式等都提出了更高要求^[9-10]。

目前, 提升电力系统灵活调节能力的措施主要包括火电灵活性改造, 配置抽水蓄能机组、燃气轮机等灵活电源, 以及配置储能等, 但是这些措施都伴随着大量基础设施新建投资, 且建设周期较长, 而虚拟电厂(virtual power plant, VPP)仅需对可调节资源原有终端设备进行改造, 具有低成本、高效率、易推广的特征^[11-15]。虚拟电厂通过先进的控制、信息、网络、计量等技术, 聚合前述可调节资源, 并将负荷侧的调节能力纳入电网调度运行和市场交易中, 可有效提升电力系统灵活调节能力。

本文梳理总结了虚拟电厂的国内外发展历程, 给出了虚拟电厂的定义; 介绍了澳大利亚、中国冀北虚拟电厂的运营情况, 给出了虚拟电厂技术架构的建议; 探讨了聚合调控、市场交易和信息通信等关键技术。本文通过介绍虚拟电厂参与电网调控与市场运营的实践经验, 希望能为中国虚拟电厂建设提供技术、工程、市场机制、商业模式等方面的综合解决方案, 为“双碳”目标下提升新型电力系统灵活调节能力提供支撑。

1 虚拟电厂发展历程及定义

1.1 国际发展历程

从世界范围来看, 欧洲、北美、澳大利亚等国家和地区均已开展了虚拟电厂工程实践。欧洲、北美自2005年起开展虚拟电厂的研究实践, 澳大利亚于2019年7月启动虚拟电厂示范工程。总体来看, 欧

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-08-15。

上网日期: 2022-09-01。

国家重点研发计划资助项目(规模化灵活资源虚拟电厂聚合互动调控关键技术, 2021YFB2401200)。

洲虚拟电厂侧重于电源侧,北美侧重于负荷侧,而澳大利亚侧重于储能侧。

欧洲虚拟电厂建设的主要目标是提高分布式电源并网友好和智能互动性,以及打造持续稳定发展的商业模式。在欧盟第六框架和第七框架计划下先后开展了 FENIX 项目和 TWENTIES 项目。FENIX 项目旨在将大量的分布式电源聚合成虚拟电厂,提高欧洲电力系统的经济性、可控性和安全性^[16-18]。TWENTIES 项目示范的重点在于如何利用虚拟电厂实现分布式电源的智能管理^[19-20],并对虚拟电厂在提供电压控制、备用等辅助服务方面进行了验证。德国 Next Kraftwerke 公司通过聚合分布式能源提供欧洲电网平衡服务、参与短期市场交易等,聚合容量已达 10.836 GW。英国 Piclohe 公司、德国 Sonnen 公司等均开展了虚拟电厂商业实践,验证了在成熟市场环境下可调节资源参与电网运行和市场运营的必要性。

北美虚拟电厂建设的主要目标是通过自动需求响应和能效管理,提高综合能源的利用效率。ConEd 虚拟电厂项目实现了用户侧光伏和储能系统集群集中并网,提高了电网调峰调频和紧急响应能力^[21]。美国加州独立系统运营商(California Independent System Operator, CAISO)在加州开展了分布式能源的智慧能量管理,通过分布式能源供应商(distributed energy resource provider, DERP)参与电力市场^[22]。美国联邦能源管理委员会(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)发布了第 2222 号命令,要求将分布式电源、储能、可调节负荷等聚合后,通过虚拟资源参加电力系统调度运行和市场,以降低电力系统的整体运行成本。

澳大利亚虚拟电厂建设的主要目标是降低用电成本,为电网提供调频辅助服务。澳大利亚能源市场运营商(Australian Energy Market Operator, AEMO)与美国特斯拉公司联合开展了虚拟电厂项目,该项目聚合分布式光伏和储能系统参与澳大利亚电力市场^[23],并进行了紧急频率响应试验^[24]。

1.2 中国发展历程

中国虚拟电厂的发展主要经历了能效电厂、紧急切负荷、基于经济补贴的需求侧管理、新型“虚拟电厂”4个阶段,在江苏省、广东省、上海市、冀北等省、市、地区初步开展了试点实践。

在第1阶段,通过对商业及民用建筑中制冷和照明设备、工业电机设备、家用器具等高耗能设备进行投资改造,提升这些设备的用电能效,并收取费用偿还贷款^[25]。该阶段主要是对用电设备本身进行改造,并收取相应费用,缺少与大电网的互动以及经

济激励,用户参与度和积极性不高。江苏省、广东省在 2005 年、2009 年分别开展了能效电厂试点实践,实践过程中暴露了配套政策不健全、缺乏持续稳定支持资金、商业模式不完善等问题,导致能效电厂在中国发展较慢^[26]。

在第2阶段,通过毫秒级的快速精准稳定控制切负荷,解决紧急情况下电力平衡出现大缺口的问题,以保障大电网安全稳定运行。该阶段主要是对电网安全稳定控制策略的优化,从传统的拉闸限电模式转变为精准实时快速的切负荷模式。江苏省在 2016 年建成了大规模源网荷友好互动系统,针对特高压直流闭锁导致的受端电网频率跌落问题,紧急切除相应数量负荷,保证电网频率稳定^[27-28]。但该模式仅在电网紧急情况下使用,动作次数少、切负荷量固定且缺乏灵活的经济激励机制。

在第3阶段,通过基于经济补贴、强制法律、营销宣传等手段的需求侧管理,调整用户用电模式,引导用户科学合理用电。该阶段一般为离线整定,时间尺度最小为日前,且整个过程需人工干预。上海市、广东省在 2019 年、2022 年分别开展了虚拟电厂试点实践,针对电网尖峰负荷问题,通过短信等方式提前向用户发出邀约,引导用户开展需求侧管理^[29-30],降低尖峰期电力负荷,并给予负荷相应的政策补贴。此阶段注重单次、大规模的调节作用,虽然相比第2阶段改善了经济激励机制,但多由政策补贴支持,社会成本很高,在经济欠发达地区难以推广。

在第4阶段,通过聚合可调节资源参与电网调控和市场运营,提升电力系统灵活调节能力。该阶段虚拟电厂作为类似火电机组的可调度单元,纳入大电网调控范围,直接参与电网电力电量平衡,同时参与电力市场运营。中国冀北地区在 2019 年开展了虚拟电厂试点实践,并于 2019 年 12 月 12 日正式投入商业运营,实现了可调节资源的感知、聚合、优化、调控与运营,为电力系统提供连续、柔性的灵活调节能力,有效促进了新能源消纳。深圳市在 2022 年建成了虚拟电厂管理平台,运行模式类似冀北,但缺乏市场机制^[31]。山西省在 2022 年明确规定了虚拟电厂参与现货市场的运行技术和运营管理规范。相比第2阶段和第3阶段,第2阶段主要支撑电网运行第二道防线、第3阶段主要支撑基于补贴的需求侧管理,未实现市场化以及与电力系统的连续闭环调度运行,该阶段虚拟电厂参与了电网闭环调度优化,可根据市场价格信号进行调节,具有连续、柔性、可持续的特征。

1.3 概念定义

伴随着国内外虚拟电厂的发展进程,虚拟电厂的概念也在不断更新。“虚拟电厂”这一术语早在1997年就被提出^[32],文献[33]认为虚拟电厂是与自治微网相同的网络。文献[16,34-37]认为虚拟电厂是发电资源的组合,可基于互联网通信,通过中央控制系统管理这些发电资源。文献[38-40]认为虚拟电厂是负荷侧资源的组合,由可接于配电网任意节点的具有丰富操作模式和可用性的一系列技术组成。文献[41]认为虚拟电厂是分布式电源、可控负荷和储能系统的集群,可聚合成一个特殊发电厂运行。可见,上述定义都强调了虚拟电厂通过聚合源、网、荷、储各类资源,形成特殊发电厂参与电力系统运行。

2018年3月,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)立项首批虚拟电厂国际标准,国网冀北电力有限公司牵头开展了虚拟电厂国际标准编制。随后,重新给出了虚拟电厂的标准定义:虚拟电厂是一种聚合电网调度中原本看不到、控制不了的负荷侧可调节资源,形成可调控、可交易单元,直接参与电网调度控制和电力市场交易的智能控制技术和商业模式^[42]。

2 虚拟电厂的典型实践经验

文献[19,43-45]对欧洲、北美虚拟电厂实践经验进行了较为详细的描述,本文主要介绍澳大利亚虚拟电厂实际运行实践经验。国内虚拟电厂正处于快速发展阶段,选取具有新型“虚拟电厂”特点的冀北虚拟电厂介绍相关经验。

2.1 澳大利亚虚拟电厂项目

澳大利亚虚拟电厂项目试点^[23-24]的目标包括以下5个主要方面:1)了解能否可靠地控制和协调资源组合,新增与频率控制辅助服务(frequency control ancillary service, FCAS)、能源和电网支撑服务相关的经济价值;2)研发虚拟电厂运行监控系统,以了解其对电力系统安全、当地电能质量的影响,以及如何与市场互动;3)评估虚拟电厂参与后的市场监管和运营管理情况,并酌情对相关规程进行新增或修订;4)了解未来如何改善电力用户对虚拟电厂的体验;5)了解虚拟电厂目前实施的信息安全措施,以及未来是否应加强这些措施。

截至2021年,澳大利亚虚拟电厂项目共有7个市场主体参与,容量共31 MW,聚合资源以储能为主,主要提供FCAS。目前,虚拟电厂可以参与紧急FCAS市场和电能量市场。澳大利亚虚拟电厂结构如图1所示。澳大利亚虚拟电厂项目通过市场价格

信号协调屋顶光伏系统、储能和可控负荷设备,如空调或水泵。实践结果表明,虚拟电厂可以有效地响应电力系统运行需求和市场价格信号。

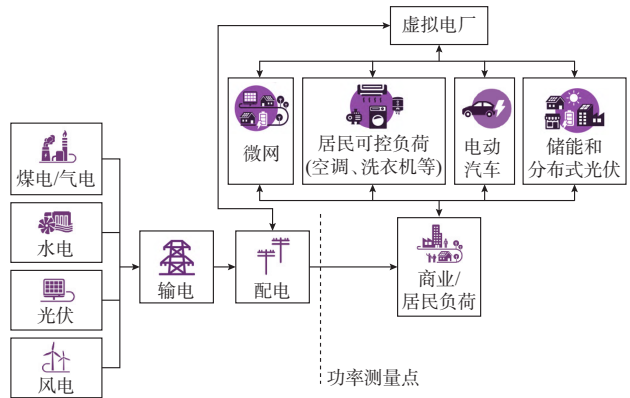


图1 澳大利亚虚拟电厂示意图
Fig. 1 Schematic diagram of VPP in Australia

2.1.1 紧急频率响应

2019年10月9日,澳大利亚国家电力市场中最大的发电机组(位于昆士兰Kogan Creek)意外脱网,当时机组出力为748 MW,导致电力系统频率降低至49.61 Hz,低于电网正常运行范围(49.85~50.15 Hz),虚拟电厂在检测到频率跌落后立即响应,向电力系统注入功率,支撑频率恢复(见附录A图A1)。

当748 MW机组脱网时,系统频率跌落至49.61 Hz,虚拟电厂开始频率响应;当频率未恢复到49.85 Hz时,虚拟电厂继续响应直至频率恢复至49.85 Hz时,停止响应,直至频率再次跌落到49.85 Hz以下时,虚拟电厂再次开始响应。

2.1.2 电能量市场价格响应

根据澳大利亚市场当前的监管要求,虚拟电厂不参与电网调度运行过程。因此,虚拟电厂通过监测市场价格信号进行响应。实践数据表明,虚拟电厂通过优化其控制算法,可实现在白天持续充电、在夜间高峰时段放电,且夜间放电时段与能量市场价格高峰时段相匹配。

2.2 冀北虚拟电厂工程

冀北虚拟电厂在攻克了聚合调控、市场交易、信息通信等关键技术后,实现了参与电网调控和市场运营的落地应用。虚拟电厂采用工业物联网“云、管、边、端”体系架构,如图2所示。

1)云侧设有虚拟电厂智能管控平台。该平台部署在公网环境中,采用成熟的基础云计算设施以及物联网(Internet of Things, IoT)平台、大数据平台等成熟服务,研发了资源建模、智能聚合、调控优化、市场交易、运营评估等核心功能算法,并与调度

D5000系统、电力交易平台、营销系统建立了数据双向安全交互接口,实现可调节资源实时连续柔性调节。

2)管侧采用运营商通信网络,通过4G、5G等移动通信网络,实现控制指令、运行状态、运营信息闭环安全传输。

3)边侧设置即插即用的边缘智能网关,通过云边协同、边缘计算和多场景业务、多网络模式自适应技术,实现可调节资源通过物联网标准协议接入平台。

4)端侧设有用户侧智能终端/用户侧管理平台,以实现可调节资源状态感知、柔性控制,包括直控和分控2种控制模式。直控是指虚拟电厂智能管控平台向用户侧智能终端/管理平台下达分解后的调控指令,终端直接对用户侧资源设备进行功率控制,这种控制模式适用于自动化程度较高的资源,如蓄热式电采暖、智能楼宇等;分控是指虚拟电厂智能管控平台向可调节资源下达分解后的调控指令,资源根据自身生产情况对各设备进行功率控制,这种模式适用于生产过程需要人为参与、控制目标需要考虑人为随机因素的资源,如工商业负荷等。上述2种控制模式可以通过移动应用程序(application,APP)开展。此外,可调节资源、虚拟电厂运营商、虚拟电厂平台运营商可以通过移动APP监测市场运营信息、系统运行情况、虚拟电厂和可调节资源运行情况及进行代理、运行、运营、分析等。

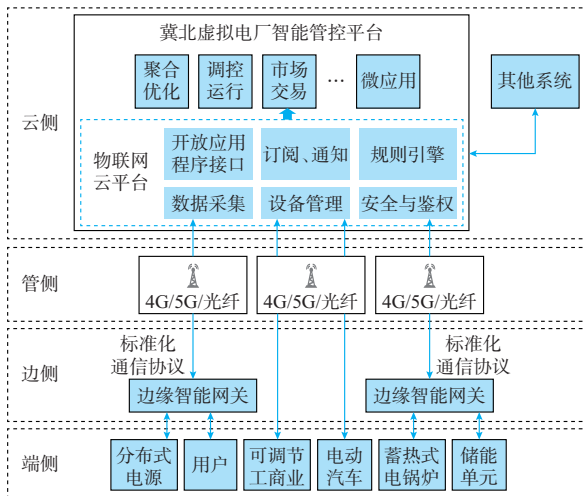


图2 冀北虚拟电厂架构

Fig. 2 Architecture of Jibei VPP in China

截至目前,冀北虚拟电厂示范工程接入了张家口、秦皇岛、承德、廊坊地区蓄热式电采暖、智慧楼宇、可调节工商业等11类可调节资源,总容量为358 MW,最大调节能力为204 MW,占总容量的

57%。以冀北虚拟电厂参与华北调峰辅助服务市场典型日运行情况为例,如图3所示,可调节资源在参与虚拟电厂聚合优化前,其运行功率曲线总和与尖峰平谷时段划分基本一致,即虚拟电厂集中在平/谷时段用电,不考虑电网运行情况;在参与虚拟电厂聚合优化后,冀北虚拟电厂一直投入自动发电控制(automatic generation control, AGC)受控模式,控制期间积极追踪调控指令,在电网晚高峰时期将用电延后,到后半夜低谷调峰困难时期(新能源大发期间),快速抬升低谷用电负荷。

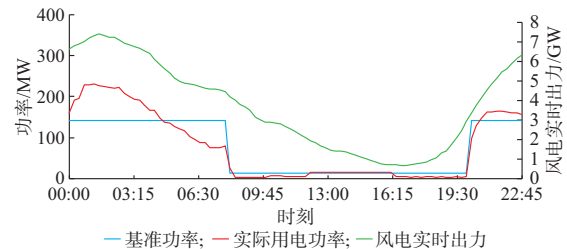


图3 冀北虚拟电厂典型日运行曲线

Fig. 3 Typical daily operation curve of Jibei VPP in China

定义虚拟电厂调节速率为可调节资源响应调度指令的速率,冀北虚拟电厂实际最大调节功率为154 MW,最大调节速率为15.7 MW/min,为虚拟电厂额定有功功率的4.4%,调节性能良好。

冀北虚拟电厂参与华北调峰辅助服务市场(主要参与华北电力调峰辅助服务市场京津唐市场,每年11月至次年4月开展)的流程主要包括注册、日前运行、日内运行、结算4个阶段。在注册阶段,虚拟电厂运营商/负荷聚合商上报企业信息、可调节资源明细等,调控机构审核虚拟电厂运营商/负荷聚合商入市资格并公布入市名单;在日前运行阶段,虚拟电厂运营商/负荷聚合商申报功率曲线、价格、调节能力等信息,调控机构进行市场预出清,并下发虚拟电厂次日96点功率计划等,虚拟电厂运营商/负荷聚合商接收功率计划并分解;在日内运行阶段,调控机构每15 min完成市场出清并下发实时功率计划,虚拟电厂运营商/负荷聚合商接收功率计划并分解;在结算阶段,调控机构根据历史运行功率、电量数据等核定虚拟电厂调节电量及收益,虚拟电厂运营商按照合同约定将收益分解至各个可调节资源。

冀北虚拟电厂自2019年12月投运以来,全程参与了华北调峰辅助服务市场出清,已在线连续提供调峰服务超过3 200 h,累计增发新能源电量34.12 GW·h,单位电量收益为183元/(MW·h),虚拟电厂运营商/负荷聚合商和用户总收益为624.2万元。其中,虚拟电厂运营商/负荷聚合商收益为395.95万元,

用户侧资源收益为228.25万元。目前,冀北虚拟电厂智能管控平台上已有2家虚拟电厂运营商/负荷聚合商代理可调节资源参与调峰市场运营。

3 虚拟电厂的关键问题

虚拟电厂聚合的可调节资源呈现总体数量多、单点容量小、特性差异大、空间分散的特点,这些资源如果直接接受电网调控中心的集中调控,会增加运行成本。因此,需要在可调节资源和电网之间引入虚拟电厂作为中间层,由虚拟电厂对可调节资源进行建模、聚合、调控和优化,电网调控中心直接对虚拟电厂进行调控。同时,引入虚拟电厂运营商作为新兴市场主体,代理可调节资源直接参与电力市场交易。根据国内外虚拟电厂实践经验,在虚拟电厂总体技术架构、聚合调控、市场交易、信息通信关键技术方面仍面临挑战。

3.1 技术架构

基于冀北虚拟示范工程实践经验,本文建议采用如图4所示的虚拟电厂总体技术架构,该技术架构分为3级。第1级为可调节资源层级,采集、感知并与上层通信实时的运行信息,自动接收响应第2级下发的调控指令和价格激励,并通过用户侧终端/用户侧管理平台实现;第2级为虚拟电厂级,负责动态聚合各类可调节资源,在线接收电网调控中心下发的调控指令并分解至虚拟电厂内各类可调节资源,以及接收电力市场价格信号,同时向电网调控中心、电力交易中心上报相关数据信息,可通过虚拟电厂智能管控平台实现;第3级为电网级,虚拟电厂与电网调控中心、电力交易中心进行信息决策互动。

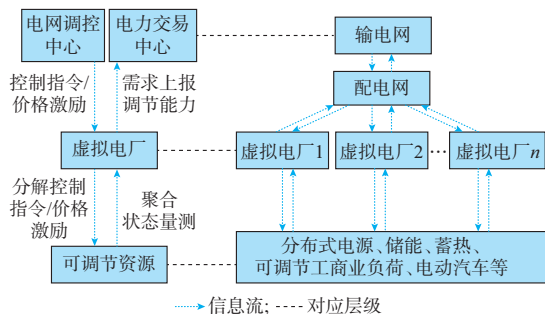


图4 虚拟电厂总体技术架构
Fig. 4 Overall technological architecture of VPP

3.2 聚合调控

虚拟电厂需要聚合可调节资源参与电网调控,以发挥其规模化效应,而虚拟电厂聚合调控面临能量、空间和时间维度3个方面技术挑战。虚拟电厂动态响应特性如图5所示,从能量维度来看,为响应电力系统的调节需求,需要将电、热、冷、气各类能源

系统耦合起来,提高能源综合利用效率;从空间维度来看,可调节资源布局分散,需要合理规划虚拟电厂的聚合范围,当涉及电网阻塞等问题时,需考虑网络拓扑等因素;从时间维度来看,不同种类可调节资源的调节速度、调节范围、调节时间等调节特性差异大,而且还需要为电网提供调峰、调频、备用等多类型多时间尺度的辅助服务^[43,46]。

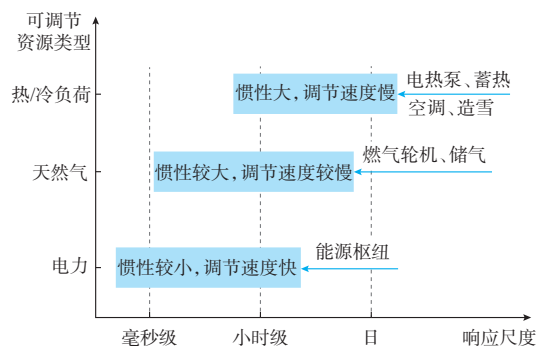


图5 虚拟电厂动态响应特性
Fig. 5 Dynamic response characteristics of VPP

为应对上述挑战,需要从可调节资源建模、聚合优化、协同调控几个方面开展关键技术研究攻关,如图6所示。

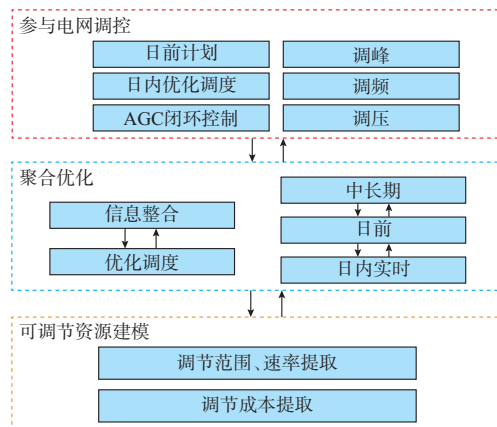


图6 虚拟电厂聚合调控关键技术
Fig. 6 Key technologies of aggregation and regulation of VPP

可调节资源建模是虚拟电厂参与电网调控的基础,由于这些资源大多具有离散性、随机性、异质性的特点,需要对其进行标准化的模型描述,便捷刻画调节成本、范围、速率等资源模型和参数,实现模型交互与数据结构的通用化。之后,将可调节资源聚合为满足实际控制需求的虚拟电厂等值模型,虚拟电厂对外等值为类似火电机组的调节特性,提取可调功率上下限、响应时间、爬坡速率等技术参数,对内设置相应的控制策略,涵盖中长期、日前、日内、实时多时间尺度。同时,考虑电功率平衡约束、热功率

平衡约束、可调节资源运行约束等约束条件,实现可调节资源的优化控制。最后,虚拟电厂上报的聚合模型应严格可行,且包含等值模型、基准功率、成本函数等部分,进而纳入电网日前、日内优化调度和AGC闭环控制,为电网提供调峰、调频、调压等运行支撑。

虚拟电厂等值模型可考虑随机优化、鲁棒优化等技术,约束条件包括:1)虚拟电厂聚合后的所有变量约束,包括但不限于每个调度时刻有功功率上下限、电量上下限、向上和向下爬坡速率等;2)可调节负荷资源出力和爬坡范围约束,包括但不限于每个调度时刻可调节负荷出力上下限、向上和向下爬坡范围等;3)分布式电源有功功率的范围约束,包括但不限于每个调度时刻出力范围等;4)蓄电池运行的范围约束,包括但不限于电池充放电功率上限、电量上下限等;5)能量平衡约束等。

3.3 市场交易

虚拟电厂市场化运营受到电力市场规则、电力系统运行需求、内部可调节资源利益3个方面驱动。其中,虚拟电厂运营商/负荷聚合商作为独立的市场主体代理可调节资源参与电力市场交易。国内原有虚拟电厂实践主要是基于经济补贴的需求侧管理模式,缺乏对虚拟电厂参与市场化运营的框架研究、流程设计和商业实践^[43]。本文建议虚拟电厂采用如图7所示的“对外统一、对内协调”的市场化运营模式。

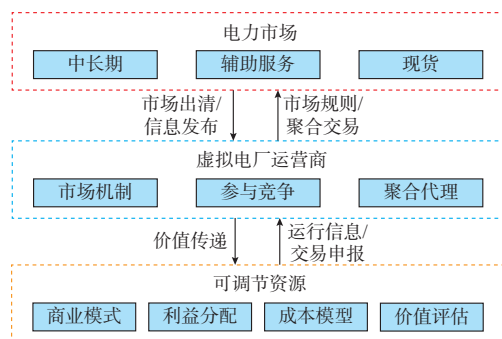


图7 VPP市场运营模式

Fig. 7 Market operation modes of VPP

对外,需建立虚拟电厂运营商参与的电力市场机制和交易规则,虚拟电厂运营商代理可调节资源参与中长期、辅助服务、现货市场,进行市场注册、竞价申报、计量结算,接收电力市场出清结果和相关信息,实现“对外统一”。

对内,需建立虚拟电厂运营商代理可调节资源的商业模式,通过聚合可调节资源,形成虚拟电厂运营商代理交易基础,虚拟电厂运营商通过考虑各可

调节资源对虚拟电厂的价值贡献度进行价值分配。其中,需要考虑的因素包括响应时间、调节速率、调节电量等,通过虚拟电厂内部可调节资源主体的博弈,实现“对内协调”。

3.4 信息通信

可调节资源点多面广、海量分散,如何实现可调节资源的大规模安全高效接入,是虚拟电厂参与电网调控和市场运营的关键技术挑战之一。如果采用光纤接入的方式,虽然能够保证信息通信的实时性和安全性,但通信成本较高;如果采用无线公网通信的方式,则对信息传输的实时性、安全性、高效性提出了更高要求。国内虚拟电厂信息通信的主要流程如下。

1)采用光纤接入调度控制系统^[28-29]的主要流程为:省调控中心 \rightleftharpoons 切负荷中心站 \rightleftharpoons 大用户就近变电站 \rightleftharpoons 大用户10 kV配电房/智能负荷控制终端。

2)采用无线公网接入交易平台和营销需求响应平台^[30-31]的主要流程为:电力交易平台 \rightleftharpoons 用户侧管理平台1/虚拟电厂平台1(一般为用户自建,用于管理其园区/楼宇等内部资源)、用户侧管理平台2/虚拟电厂平台2、 $\cdots \rightleftharpoons$ 资源计量点。

可见,在中国虚拟电厂发展的前3个阶段,主要的信息通信方式为光纤、无线公网^[42,46],其中,光纤通信主要用于紧急切负荷,采用这种方式,虚拟电厂通信成本较高;无线公网通信主要用于需求侧管理,调控中心不直接向虚拟电厂下发实时调控指令,这种方式下虚拟电厂未纳入电网调度范围。

基于此,本文建议采用基于无线公网的电网、虚拟电厂、可调节资源信息双向交互架构,实现可调节资源的即插即用和安全高效连接,如图8所示。信息交互数据分为上行数据和下行数据2种,可采用4G/5G移动网络。其中,下行数据包括调控中心校核后的日前/日内计划值、市场出清结果、调控指令、虚拟电厂分解计划及指令等相关信息;上行数据包括虚拟电厂运营商注册信息、上报信息、虚拟电厂调节资源运行状态等相关信息。

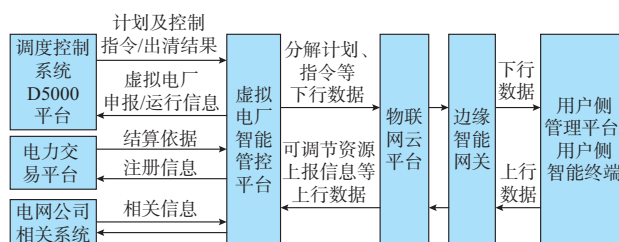


图8 虚拟电厂信息交互架构

Fig. 8 Information exchange architecture of VPP

调度控制系统的 AGC 等核心应用利用消息转发机制,将虚拟电厂的调度计划及 AGC 指令等下行数据发送到虚拟电厂智能管控平台;虚拟电厂智能管控平台将计划及指令分解后,通过物联网云平台、边缘智能网关,将下行数据下发至用户侧智能终端/用户侧管理平台。用户侧智能终端将实时功率、三相电压电流等上行数据,通过边缘网关、物联网云平台上送至虚拟电厂智能管控平台,虚拟电厂智能管控平台将聚合优化后的结果上送至调度控制系统。电力交易平台和电网公司相关系统(营销、财务等)与虚拟电厂智能管控平台的通信链路同理。

此外,虚拟电厂智能管控平台与电网以及可调节资源终端的通信链路需要保证安全性,在互联网边界、业务应用、数据存储与传输等方面需要强化安全措施。在互联网边界安全方面,需要在原有安全防护设备基础上,增加访问控制、入侵检测、日志记录和审计等安全策略,强化信息外网安全。在业务应用安全方面,需要加强用户角色分类,采用独立的统一权限管理实现用户身份鉴别和授权,重点加强外网服务端应用、移动应用、系统间接口安全防护,确保数据传输、存储的安全性。在存储方面,需要使用 SM2、SM3、SM4 算法进行加密。在传输方面,需要采用 HTTPS 技术,由国家认证机构颁发证书,请求参数使用 SM2 进行数据加密,SM3 保障数据传输一致性、完整性。

4 虚拟电厂的发展展望

引入虚拟电厂后将进一步提升电力系统灵活调节能力,对构建新型电力系统具有重大意义^[47-48]。若要充分发挥虚拟电厂对电力系统的支撑作用,实现可调节资源纳入新型电力系统调控运行,需要在虚拟电厂控制、交易、信息通信关键技术^[49-50]以及市场机制与商业模式方面展开深入研究。

4.1 关键技术展望

1)在聚合调控技术方面,需要持续优化虚拟电厂建模聚合、调控优化、分析预测等方面核心技术,完善可调节资源参与电力系统调控运行的标准体系。研究可调节资源、虚拟电厂的建模技术,如虚拟电厂运行基线、虚拟电厂和可调节资源可信调节能力等关键技术参数的辨识,建立可调节资源接入的标准体系;研究考虑多重因素的可调节资源柔性控制策略,电网、虚拟电厂、可调节资源协调自动功率控制技术,以及考虑虚拟电厂接入的安全校核方法和动态评估技术,提升虚拟电厂运行控制的可靠性;

考虑历史运行、自然天气、资源需求等多重因素,研究基于人工智能技术的负荷资源预测技术,通过稀疏建模、集成学习、模拟学习等方法对调节能力、持续时间等关键参数进行准确预测,提升虚拟电厂运行效率。

2)在市场交易技术方面,虚拟电厂交易模型、出清、结算、计量等技术有待深入研究。需要研究优化虚拟电厂参与电能量、辅助服务等多种类市场的多时间尺度交易模型;研究不同种类可调节资源通过虚拟电厂聚合参与电力市场的标准化准入规则;研究考虑系统运行约束、虚拟电厂运行约束等多重约束条件的电力市场联合出清技术,实现系统灵活调节能力、调节成本最优;考虑边际成本、运行情况等多重因素,研究基于复杂目标的虚拟电厂多元主体动态定价技术,实现不同类型可调节资源价值最优分配。在计量方面,需要对精细化智能计量技术进行研究,提升可调节资源/虚拟电厂实际调节量的准确性。

3)在信息通信技术方面,随着可调节资源接入规模的增长,对信息网络的高效性、安全性等方面提出新的要求,需要建立安全、高效的信息通信体系。需要研究虚拟电厂安全通信、低成本接入技术,如可调节资源设备直通(device to device, D2D)通信技术、高效身份认证技术、标准化接口技术等;考虑虚拟电厂海量数据通信规模,研究虚拟电厂网络资源优化和控制技术、云边协同计算技术等;考虑可调节资源计量数据缺损和失真等问题,研究可调节资源运行数据恢复、补全和修正等技术;挖掘虚拟电厂和可调节资源数据价值,提高信息网络安全性、可靠性。

4.2 市场机制与商业模式展望

目前,虚拟电厂商业化运营的应用场景以调峰为主,在无现货市场的地区参与调峰辅助服务市场,提升系统灵活调节能力。随着全国统一电力市场体系建设提速,现货、辅助服务、容量等市场建设不断深化,需进一步完善虚拟电厂参与电力市场的运营体系^[51-53]。

1)在市场机制方面,完善虚拟电厂参与市场类型及机制设计。一是参与电力现货市场,通过实时市场价格信号引导虚拟电厂可调节资源进行功率调整,促进资源优化配置,提升系统运行能效。二是参与调频辅助服务市场,考虑由于光伏等资源大规模接入导致区域调频资源缺失,亟须挖掘储能等快速调节资源调节潜力,为系统提供调频能力。三是参

与调压辅助服务市场,考虑配电网运行问题,激活虚拟电厂可调节资源提供无功调节服务。除上述场景外,虚拟电厂还可参与容量市场、中长期市场等。虚拟电厂可参与的电力市场类型及优质资源如表1所示。

表1 虚拟电厂可参与的电力市场类型及其优质资源
Table 1 Types of electricity market for VPP to participate in and its high-quality resources

市场类型	优质资源类型
现货	源网荷储各环节可以柔性控制出力的资源
调峰辅助服务	源网荷储各环节可以柔性控制出力的资源
调频辅助服务	分布式电源、储能等具备调频能力的资源
备用、无功等辅助服务	分布式电源、储能等可以提供相应辅助服务的资源
中长期双边、集中交易	大工业、工商业等用电曲线和电量较稳定的资源
容量	大工业、工商业等用电曲线和电量较稳定的资源
绿证交易、金融交易等	分布式电源、电化学储能、大数据中心等具有相关交易需求的资源

2)在商业模式方面,虚拟电厂运营商/负荷聚合商可在聚合可调节资源参与电力市场的基础上,拓展虚拟电厂商业模式。目前,中国已经明确虚拟电厂与储能等并列成为市场主体,提供系统调节服务。结合国内外虚拟电厂实践经验,虚拟电厂运营商可以按照市场规则要求与可调节资源签订代理合同,并与可调节资源约定价值分配比例。后续,虚拟电厂还可基于聚合可调节资源类型和参与市场机制的不同,探索开展能源金融、大数据增值等多类型服务,拓展虚拟电厂商业模式。

5 结语

本文系统回顾了虚拟电厂的发展历程,根据国内外典型项目实践经验,总结了虚拟电厂发展面临的问题挑战,进而归纳出虚拟电厂参与电网调控与市场运营的技术架构与关键技术,主要结论如下。

1)将中国虚拟电厂发展过程总结为4个阶段,即能效电厂、紧急切负荷、需求侧管理、新型“虚拟电厂”。同时,提炼出虚拟电厂的标准定义。虚拟电厂为一种聚合电网调度中原本看不到、控制不了的负荷侧可调节资源,形成可调控、可交易单元,直接参与电网调度控制和电力市场交易的智能控制技术和商业模式。

2)建议虚拟电厂采用可调节资源、虚拟电厂、

电网3级技术架构。提出虚拟电厂聚合调控技术,将虚拟电厂聚合等值为类似火电机组参与大电网运行控制;提出虚拟电厂“对内协调、对外统一”的市场运营模式,引入虚拟电厂运营商作为独立的市场主体代理可调节资源参与市场;建立基于无线公网的电网、虚拟电厂、可调节资源信息双向交互流程,实现虚拟电厂低成本、安全地纳入电网闭环调控。

3)介绍了澳大利亚虚拟电厂项目和冀北虚拟电厂示范工程的建设和运营情况。

4)随着新型电力系统建设进程的加速,需求侧可调节资源调节潜力巨大,为充分发挥虚拟电厂在电力系统调度运行和运营中的作用,需要在虚拟电厂的关键技术、市场机制、商业模式等方面开展进一步研究和落地应用。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 国家能源局2022年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. [2022-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm.
Records of the online press conference of the National Energy Administration in the first quarter of 2022[EB/OL]. [2022-01-28]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm.
- [2] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [3] 郭剑波.以新能源为主体的新型电力系统发展及挑战[R].北京:中国电力科学研究院有限公司,2021.
GUO Jianbo. Development and challenges of a new electric power system based on renewable energy sources[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2021.
- [4] 宁剑,江长明,张哲,等.可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J].电力系统自动化,2020,44(17):1-8.
NING Jian, JIANG Changming, ZHANG Zhe, et al. Thinking and technical practice of adjustable load resources participating in dispatching and control of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 1-8.
- [5] 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.
- [6] FENG C, WANG Y, WANG X Y, et al. Device access optimization for virtual power plants in heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1478-

- 1489.
- [7] WANG X Y, LIU Z, ZHANG H, et al. A review on virtual power plant concept, application and challenges [C]// 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, May 21-24, 2019, Chengdu, China: 4328-4333.
- [8] 陈宋宋. 双碳背景下负荷发展趋势与互动响应标准化进展[R]. 北京: 中国电力科学研究院有限公司, 2021.
- CHEN Songsong. Load development trend and interactive response standardization progress under the background of carbon emission peak and carbon neutrality [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2021.
- [9] 陈玥, 刘锋, 魏韡, 等. 需求侧能量共享: 概念、机制与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 1-11.
- CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 1-11.
- [10] CHEN Y, WEI W, WANG H, et al. An energy sharing mechanism achieving the same flexibility as centralized dispatch [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3379-3389.
- [11] WANG S Y, WU W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [12] GOUGH M, SANTOS S F, LOTFIM, et al. Operation of a technical virtual power plant considering diverse distributed energy resources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2547-2558.
- [13] NAUGHTON J, WANG H, CANTONI M, et al. Co-optimizing virtual power plant services under uncertainty: a robust scheduling and receding horizon dispatch approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 3960-3972.
- [14] KORAKI D, STRUNZ K. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 473-485.
- [15] ZHAO H T, WANG B, PAN Z G, et al. Aggregating additional flexibility from quick-start devices for multi-energy virtual power plants [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 646-658.
- [16] JEAN K. Virtual power plants, real power [J]. IEEE Spectrum, 2012, 49(3): 13-14.
- [17] KIENY C, BERSENEFF B, HADJSAID N, et al. On the concept and the interest of virtual power plant: some results from the European project Fenix [C]// 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-6.
- [18] MARTI J, ABARRATEGUI O, GONZALEZ A. Real experience with active DER in distribution networks [C]// CIRED 2009-20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1, June 8-11, 2009, Prague, Czech Republic: 1-4.
- [19] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂欧洲研究项目述评[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 196-202.
- WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Review on European research projects of virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 196-202.
- [20] TWENTIES project-final report [R]. Brussels, Belgium: European Wind Energy Association (EWEA), 2013.
- [21] Consolidated Edison. Distributed system implementation plan [R/OL]. [2022-02-10]. <https://www.coned.com/-/media/files/coned/documents/our-energy-future/our-energy-projects/distributed-system-implementation-plan.pdf>.
- [22] CASEY K E. Virtual power plant-California practice [R]. Portland, USA: California Independent System Operator, 2018.
- [23] AEMO virtual power plant demonstrations-knowledge sharing report 1 [R]. Sydney, Australia: Australian Energy Market Operator, 2020.
- [24] AEMO NEM virtual power plant demonstrations-knowledge sharing report 4 [R]. Sydney, Australia: Australian Energy Market Operator, 2021.
- [25] CALDON R, PATRIA A R, TURRI R. Optimisation algorithm for a virtual power plant operation [C]// 39th International Universities Power Engineering Conference, September 6-8, 2004, Bristol, UK: 1058-1062.
- [26] 吴鹏, 谭显东, 单葆国, 等. 我国能效电厂建设试点分析[J]. 能源技术经济, 2010, 22(9): 27-33.
- WU Peng, TAN Xiandong, SHAN Baoguo, et al. Study on construction of experimental efficiency power plants in China [J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(9): 27-33.
- [27] 李海峰. 大规模源网荷友好互动系统创新与工程实践[R]. 南京: 国网江苏省电力有限公司, 2018.
- LI Haifeng. Innovation and engineering practice of the large-scale interactive control system with source-grid-load friendly coordination [R]. Nanjing: State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., 2018.
- [28] 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.
- [29] LYU R, HUANG B, GAO C W, et al. Research on capacity allocation method of virtual power plant with communication base station energy storage [C]// 2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON), December 8-9, Haikou, China: 883-886.
- [30] 屠盛春, 刘晓春, 张皓. 上海市黄浦区商业建筑虚拟电厂典型应用[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 52-57.
- TU Shengchun, LIU Xiaochun, ZHANG Hao. Typical implementation of commercial building virtual power plant in Huangpu district of Shanghai [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 52-57.
- [31] 深圳: 国内首个网地一体VPP运营管理平台试运行[EB/OL]. [2022-02-10]. <https://www.163.com/dy/article/GPRLKNS70>

- 550AXYG.html.
Shenzhen: trial operation of management and operation platform of the first grid-area integration VPP in China[EB/OL]. [2022-02-10]. <https://www.163.com/dy/article/GPRLKNS70550AXYG.html>.
- [32] 卫志农,余爽,孙国强,等.VPP的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [33] 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, Newcastle upon Tyne, UK: 187-192.
- [34] PUDJANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 10-16.
- [35] SCHULZ C, RODER G, KURRAT M. Virtual power plants with combined heat and power micro-units [C]// 2005 International Conference on Future Power Systems, November 18, 2005, Amsterdam, Netherlands: 1-5.
- [36] DONDI P, BAYOUMI D, HAEDERLI C, et al. Network integration of distributed power generation [J]. Journal of Power Sources, 2002, 106(1/2): 1-9.
- [37] MORAIS H, KADAR P, CARDOSO M, et al. VPP operating in the isolated grid [C]// 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-onversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 1-6.
- [38] PANDŽIĆ H, KUZLE I, CAPUDER T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy, 2013, 101(1): 134-141.
- [39] LOMBARDI P, POWALKO M, RUDION K. Optimal operation of a virtual power plant[C]// 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-6.
- [40] MORAIS H, CARDOSO M, CASTANHEIRA L, et al. VPPs information needs for effective operation in competitive electricity markets [C]// 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics, June 23-25, 2007, Vienna, Austria: 1183-1188.
- [41] 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.
- [42] Virtual power plants-Part 2: use cases: IEC TS 63189-2 ED1 [S]. 2018.
- [43] CHEN Y, LI T X, ZHAO C H, et al. Decentralized provision of renewable predictions within a virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2652-2662.
- [44] ZHAO H T, WANG B, WANG X Y, et al. Active dynamic aggregation model for distributed integrated energy system as virtual power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 831-840.
- [45] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.
- [46] CHEN Y, ZHAO C H, LOW S H, et al. Approaching prosumer social optimum via energy sharing with proof of convergence[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2484-2495.
- [47] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [48] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [49] CHEN J R, LIU M Y, MILANO F. Aggregated model of virtual power plants for transient frequency and voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4366-4375.
- [50] ZHANG Y F, LIU F, WANG Z J, et al. Robust scheduling of virtual power plant under exogenous and endogenous uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1311-1325.
- [51] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: a price-taker robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2676-2687.
- [52] MACDOUGALL P, KOSEK A M, BINDNER H, et al. Applying machine learning techniques for forecasting flexibility of virtual power plants[C]// 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference, October 12-14, 2016, Ottawa, Canada: 1-6.
- [53] HAN Y X, WANG W, YU T, et al. Analysis of economic operation model for virtual power plants considering the uncertainties of renewable energy power generation[C]// 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), December 23-25, 2021, Nanjing, China: 1980-1985.

王宣元(1979—),女,博士,正高级工程师,主要研究方向:电力市场、电网运行、新能源并网与消纳、电力电子。E-mail:wang.xuanyuan@jibei.sgcc.com.cn

刘 蓁(1994—),女,通信作者,硕士,主要研究方向:电力市场、柔性直流输电。E-mail:lilu.zhen.sgcc@outlook.com

(编辑 顾晓荣)

Development and Practice of Virtual Power Plant Participating in Power Grid Regulation and Market Operation

WANG Xuanyuan, LIU Zhen

(State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China)

Abstract: With the large-scale development of renewable energy, the regulation resources of the power grid are becoming increasingly scarce and the pressure of peak regulation is gradually increasing. It is urgent to tap new regulation resources to enhance the flexible regulation capability of power systems. By aggregating the adjustable resources such as distributed energy sources, energy storage, thermal storage, and industrial and commercial loads, the operation status of various resources is optimized and controlled, and the virtual power plant can provide the flexible regulation capabilities of power systems. Firstly, in this paper, the development of the domestic and overseas virtual power plants is reviewed, and the definition of the virtual power plant is given. Then, the typical practice cases of virtual power plants are introduced. Secondly, the architecture for virtual power plants for participating in the power grid regulation and market operation is proposed, and three aspects of the key technologies of aggregation and regulation, market trading, and information communication in virtual power plants are discussed. Finally, the future development trend of virtual power plants is prospected.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFB2401200).

Key words: virtual power plant; adjustable resource; power grid regulation; market operation

