

# 虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架与综合功能

钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 左建勋, 王紫东, 吴世伟

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏省 南京市 211153)

## System Framework and Comprehensive Functions of Intelligent Operation Management and Control Platform for Virtual Power Plant

ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, ZUO Jianxun, WANG Zidong, WU Shiwei

(Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, Jiangsu Province, China)

**摘要:** 虚拟电厂成为推动新型电力系统建设、实现“双碳”目标的重要手段, 而虚拟电厂智慧运营管控平台系统则有效地实现对虚拟电厂灵活可调资源的管理和监控。从系统框架和综合功能角度对虚拟电厂智慧运营管控平台进行了总体阐述, 首先, 在分析虚拟电厂运营管控框架和参与市场框架的基础上概述虚拟电厂能源生态系统; 基于平台体系框架和平台结构框架2个方面特征, 分析了虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架; 从功能结构蓝图、功能物理结构、功能场景应用3个方面分析了虚拟电厂智慧运营管控平台的综合功能。

**关键词:** 虚拟电厂; 智慧运营; 管控平台; 能源互联网; 源网荷储; 负荷聚合商; 能源系统

**ABSTRACT:** Virtual power plant has become an important means to promote the construction of new power system and achieve the goal of “double carbon”. The intelligent operation management and control platform of virtual power plant effectively realizes the management and monitoring of flexible and adjustable resources in virtual power plant. The intelligent operation management and control platform of virtual power plant was described from the perspective of system framework and comprehensive functions. Firstly, the energy ecosystem of virtual power plant was analyzed and summarized based on framework of operation management and control, and market participation of virtual power plant. The intelligent operation management and control platform of virtual power plant was analyzed based on characteristics of platform system framework and platform structure framework. Then, the comprehensive functions of intelligent operation management and control platform of virtual power

plant were analyzed from three aspects of functional structure blueprint, functional physical structure and functional scenario application.

**KEY WORDS:** virtual power plant; intelligent operation; management and control platform; energy internet; source, network, load and storage; load aggregator; energy system

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”背景和目标的驱动下, 我国大力推动能源绿色转型, 控制化石能源总量, 实施可再生能源替代, 以坚强智能电网为枢纽平台<sup>[1-3]</sup>, 以源、网、荷、储互动与多能互补集成为支撑<sup>[2-5]</sup>, 集中式发电与分布式发电结构并举<sup>[1, 3-5]</sup>, 构建以新能源为主体的, 更加清洁低碳、安全可控、灵活高效、智能友好、开放互动的新型电力系统<sup>[2, 4-6]</sup>。因此, 未来能源领域中, 电力需求侧必将重视多能综合, 使分布式能源规模化, 加强对用户侧灵活性资源的开发和利用<sup>[4, 7-10]</sup>。

传统电力系统基于同步发电机组, 采取“源随荷动”的组织形式<sup>[5-6, 11-13]</sup>, 而在以新能源为主体的新型电力系统中, 风电、光伏大规模接入, 其出力具有随机性、波动性特征, 对系统运行影响巨大<sup>[2-4, 14-16]</sup>。同时在负荷侧, 分布式发电、储能等资源的引入, 出现了大量产销者, 电力潮流由单向向多向转变, 用电随机性上升, 给电网调度带来困扰<sup>[6, 17-20]</sup>。因此, 必须摒弃采用传统措施的固有定式, 采用创新发展的思维模式, 寻求多元互动、多方参与的解决措施<sup>[9, 21-24]</sup>。

《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发

基金项目: 中国华电集团“揭榜挂帅”项目(CHDKJ21-01-107)。

Project Supported by China Huadian Corporation “Unveiling and Commanding” System Projects (CHDKJ21-01-107).

展的指导意见》中提出：强化“源、网、荷、储”各环节协调互动，充分挖掘系统灵活性调节能力和需求侧资源，提升系统运行效率和电源开发综合效益。通过虚拟电厂等一体化聚合模式，参与电力中长期交易、辅助服务、现货市场交易等，为系统调节提供支撑能力<sup>[6, 18, 25-27]</sup>。

虚拟电厂通过传感、通信、预测、能量管理、市场交易等技术手段，聚合规模小、地理位置分散的分布式发电、储能、可控负荷、电动汽车等资源，与大电网友好互动，参与电力系统运行和电力市场交易<sup>[15, 28-30]</sup>。在提升电网安全运行水平和提高可再生能源消纳的基础上，实现资源的优化配置，为参与各方带来增值收益<sup>[8, 28-30]</sup>。新型电力系统的发展成为未来趋势，在新的发电、输电、配电、用电势态下，虚拟电厂是当前国家开展新型电力系统建设，实现“碳达峰、碳中和”目标的一个重要建设方向<sup>[6, 18, 28-30]</sup>，在破解清洁能源消纳难题、绿色能源转型方面发挥重要作用，它能够提升能源服务，实现对分布式能源的响应分配、灵活潜力挖掘、实时协调控制，参与电力交易市场和需求响应<sup>[13, 27, 29-30]</sup>。

目前，国内外学者在虚拟电厂的需求响应、优化调度、控制策略、综合服务、运营管理等方向已经有一些基础性研究，文献[2]针对可再生能源消纳的问题进行了分析，在对虚拟电厂的基本概念进行详细阐述的基础上提出了基于虚拟电厂的消纳可再生能源能力提升措施；文献[7]对需求响应模式、负荷分类建模的研究成果进行了总结，并根据负荷用电特点总结出各类负荷通用模型，以期实现大规模负荷群控制；文献[11]引入了集群服务商对包含多类型资源虚拟电厂的集群进行合理管控，构建虚拟电厂集群系统架构，为解决虚拟电厂“源-荷”资源差异性和可再生能源波动性问题提供了解决思路；文献[21]构建了虚拟电厂“批发-零售”两级市场交易体系，并建立了虚拟电厂协调优化机理，为营造合理的商业模式提供了理论参考；文献[26]采取了虚拟电厂同时参与直接电力交易市场与调峰市场的运营模式，提出了基于条件风险价值理论的虚拟电厂日前优化运行模型，实现了对期望成本进行合理分配。

综合以上分析，已有研究相对缺乏对虚拟电厂智慧运营管控平台的研究，尤其缺乏从系统框架与综合功能视角对虚拟电厂智慧运营管控平台的分析，亟需进一步开展相关方面研究。

基于此，本文将从系统框架和综合功能2个视角，对虚拟电厂智慧运营管控平台进行深度剖析和阐述。在分析虚拟电厂运营管控框架及其参与市场框架的基础上，对虚拟电厂能源生态系统进行分析，基于平台体系框架和平台结构框架2个维度分析虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架，并进一步剖析虚拟电厂智慧运营管控平台综合功能，最后从多个方面对虚拟电厂智慧运营管控平台建设目标进行总结与展望。

## 1 虚拟电厂能源技术框架

### 1.1 虚拟电厂运营管控框架

虚拟电厂其实不是一个新概念或新事物，它的提出已有20余年，21世纪初在德国、英国、法国、荷兰等欧洲国家兴起，并已拥有多个成熟的示范项目，其在主要关注分布式能源可靠并网的同时，构筑电力市场中稳定的商业模式<sup>[13-15, 21]</sup>。虚拟电厂顾名思义就是虚拟化的电厂，它不是一个真实的物理电厂，但起到了电厂的作用：发出电能，参与能量市场；通过调节功率来参与辅助服务市场调峰、调频等<sup>[16-17, 22-23]</sup>。虚拟电厂内部通过信息技术将发电、用电、储能等资源进行梳理聚合，与外部集控系统、管理平台配合，进行协同控制、协同优化，实现数据分析、运行策略调整<sup>[15-16, 24]</sup>。

虚拟电厂对外进行能量传输，根据市场变化需求进行碳市场、电力市场交易<sup>[8, 13, 27]</sup>。因此，可以将虚拟电厂理解为一种能发挥电厂作用的某种“黑匣子”<sup>[6, 14-16, 24]</sup>，它不需要新建一个物理电厂，但是对外既可以作为“正电厂”向系统供电，也可以作为“负电厂”接收系统的电力<sup>[2-4, 16, 29]</sup>。“黑匣子”包含分布式电源、多元化储能设施、电动汽车、可控负荷等资源<sup>[4, 16, 20]</sup>。但只有这些资源还不足以使之成为有效的能源系统，虚拟电厂还需要一套技术和系统来将它们智能地聚合起来<sup>[16-17, 23-25]</sup>。

虚拟电厂依托现代信息通信和先进的智能控制技术,把分布式电源、储能、负荷等分散在电网的各类资源相聚合,进行协同优化运行控制和市场交易<sup>[4, 16, 26-28]</sup>,构建以电为中心,多类型、多能流、多主体资源的聚合,实现电源侧的多能互补、负荷侧的灵活互动,对电网提供调峰、调频、备用等辅助服务,并为用户和分布式能源等市场主体提供参与电力市场交易的途径<sup>[3-6, 18-20]</sup>。

正因为虚拟电厂聚合了多种能源资源,包括可调灵活负荷、储能、微电网、电动汽车、分布式能源等,所以才可以在电网中扮演“正电厂”或“负电厂”的角色,配合系统填谷,快速响应指令,配合保障系统稳定并获得经济补贴,甚至可进一步等同于电厂参与容量、电量、辅助服务等各类电力市场,获得经济效益<sup>[5, 16, 22]</sup>。以往传统的电力系统削峰填谷,基本是通过火电厂实现的,满足峰值负荷需要大量投资电厂和配套电网;而通过虚拟电厂只需要在建设、运营、激励等环节满足较少投资,就可以实现有效的削峰填谷功能,是一种相对省钱的解决思路<sup>[7, 16, 27-28]</sup>。可见,通过虚拟电厂来进行电力调峰,将有助于少建或不建传统的火力发电厂调峰,大力推动电力行业“碳达峰、碳中和”目标的落地<sup>[14-16, 19]</sup>。虚拟电厂作为新型电力系统转型中的重要配置,在政策扶持、技术验证、商业模式等方面都日趋成熟。可预见,虚拟电厂成为未来解决能源变革的重要手段,即将迈入快速增长期<sup>[16, 19, 30]</sup>。

虚拟电厂通过分布式能源管理系统将分散安装的清洁能源、可控负荷和储能聚合作为一个特别的电厂参与电网运行<sup>[9, 16, 19-20]</sup>。汇聚的资源可以是发电侧的“正电厂”,也可以是用户侧的“负电厂”,还可以是包含发电、用电的综合电厂,其核心思想就是把各类分散可调电源、可控负荷、储能聚合起来,通过数字化的手段形成一个虚拟的电厂来做统一的管理和调度,同时作为聚合主体参与电力市场<sup>[16-18, 22, 30]</sup>。所以,虚拟电厂本质上是一套软件平台系统,它聚合了现有的分布式资源,并通过协同控制参与电力市场,从而起到真实的物理电厂作用<sup>[3, 14-16, 27]</sup>。

## 1.2 虚拟电厂参与市场框架

虚拟电厂以价值为驱动,整合各柔性灵活资源、参与电力批发市场各类交易,为电网运营提供容量和辅助服务,提高电力系统的经济性和可靠性,并促进可再生能源的高效优化整合<sup>[2, 8, 15, 21, 26]</sup>,虚拟电厂参与市场框架如图1所示。

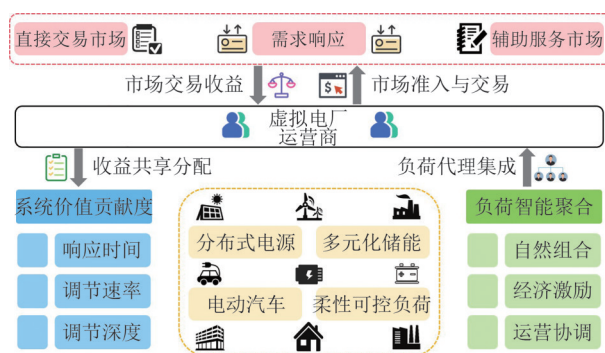


图1 虚拟电厂参与市场框架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of participation market framework of virtual power plant

基于屋顶光伏、分布式风电等大量分散式发电资源,虚拟电厂通过整合包括分布式光伏、风电等在内的分散式发电资源,在电力市场运营中参与电能量市场与辅助服务市场,并且提高电力系统与光伏、风电等清洁能源波动性的相互适应性<sup>[9, 12, 15, 24]</sup>。在低碳运行方面,虚拟电厂通过市场利益分配,提高分散式风电、分布式光伏等可再生能源、储能系统、柔性灵活负荷等各类分布式发电市场参与积极性和便利性,增加分布式发电规模效应,促进供需互动,减少分布式发电随机性、波动性对电力系统的影响,提高电力系统可再生能源接纳能力,提供系统低碳环保运行能力<sup>[6-8, 11, 28]</sup>。在新能源消纳方面,通过虚拟电厂的运行机制实现传统能源与新能源之间的互补协同调度与电网的优化运行,以最大程度地平抑新能源电力的强随机性、波动性,提高新能源的利用率<sup>[15-19, 24, 30]</sup>。

在电力市场交易方面,虚拟电厂主要通过调度灵活性资源提供辅助服务。随着电力市场机制的逐步完善,以及售电市场的建设,以虚拟电厂为核心的售电公司将逐步参与电力市场交易。虚拟电厂运营商作为一个独立的市场主体,代理自己服务范围内的分布式能源、柔性负荷、储能系

统等灵活性资源与电力市场<sup>[3-6, 15, 28]</sup>。

通过虚拟电厂智慧运营管控平台实现柔性灵活负荷与分布式能源的聚合管理,通过资源整合进行统一的经济调度,结合各试点区域售电侧“开放”与发电侧“竞价”上网的电力市场改革现状,对虚拟电厂的交易策略进行建模。针对虚拟电厂同时具备分布式能源的发电特征,以及柔性负荷的用户特征,赋予虚拟电厂聚“售电商”和“发电商”的双重角色,通过现有竞争报价系统中的电力市场交易模型,对多场景下的虚拟电厂的竞价策略进行优化和利益均衡,实现利益最大化。同时,通过虚拟电厂的集中整合与优化调度,可以作为响应资源参与电力系统的削峰填谷等辅助服务,以及针对性的需求侧响应服务<sup>[4-6, 12, 24]</sup>。

### 1.3 虚拟电厂能源生态系统

目前,我国电力系统主要是以火力发电为主,水电、风电、光伏发电、核电等发电形式作为补充的电力能源系统。传统电力能源生态系统总体上围绕电力的生产和消耗<sup>[16]</sup>,大体上可分为发电侧、输配侧、用电侧,传统电力能源生态系统发电、输电、配电、用电界限较为清晰,生产者与消费者关系也是相对明确,能源系统为典型的“源随荷动”运行模式<sup>[3, 16, 19-21]</sup>。相对于传统电力能源生态系统,虚拟电厂的能源生态系统出现了明显变化,发电、输电、配电、用电界限相互交叉,生产者与消费者的角色同时兼有,根据需求可以改变角色身份特征,运行方式特征为“源荷互动”<sup>[5, 16, 19, 27]</sup>。

分布式电源具有高效、低排放、发电灵活、靠近负荷中心等优势,但随着大量分布式电源接入电网,新能源出力的随机性给系统供需平衡带来了更大的不确定性,制约可再生能源电源有效利用<sup>[16, 23-25]</sup>。高渗透率的可再生能源电源可造成系统实时运行的供需不平衡,传统的运行调度方式所遵循的“发电跟踪负荷”的思路不符合“源荷双侧调度”的未来电网的发展<sup>[16-18]</sup>。在我国能源低碳转型的道路上,虚拟电厂也将作为支撑电力系统稳定运行的一个重要抓手<sup>[16, 18-20]</sup>。

虚拟电厂系统和服务平台将发、输、配、用电聚合在一起,内部的每一部分都是一个小能源系统,虚拟电厂丰富了智能电网的内涵,也扩展

了智能电网的外延,为保证安全、可靠、优质、高效的电力供应,满足经济社会发展对电力的多样化需求,解决能源与环保问题提供了可行的解决方案。

电网对运行安全有着严格要求,而电网安全的首要目标就是保证发、用电的实时平衡,需要发电侧的不断调节去拟合负荷曲线<sup>[17-20, 24]</sup>。但是,新能源发电严重依赖于光照强度、风力强度等自然资源,具有随机性、间歇性和波动性的特点,对负荷的支撑能力不足<sup>[4, 12, 20-23]</sup>。若规模化直接并入电网发电,将会对电网造成巨大冲击,威胁电力系统安全以及供电的稳定性<sup>[9, 13-14, 22]</sup>。另外,由于小型分布式新能源发电设施、储能设施、可控制用电设备、电动汽车等的持续发展普及,在用电侧,很多电力用户也从单一的消费者转变为混合形态的产销者,并且各类激增的大功率用电设备(如充电桩)也使电网供应尖峰负荷时压力倍增,不能任由其尖峰负荷集中叠加出现。因而,在新的发用电背景下,虚拟电厂技术应运而生,虚拟电厂技术为保障电力能源的安全高效利用开辟了一条新的路径<sup>[3-5, 13, 23]</sup>。

随着分布式能源发电技术的逐步成熟与推广,越来越多的分布式能源被广泛运用于电力系统用户侧,作为配网中不可或缺的清洁能源,分布式能源的加入既有效降低了用户侧的碳排放水平,又缓解了电力供需间的不平衡现象<sup>[7-9, 18, 30]</sup>。另外,如何实现“源网荷储”电力电量平衡、储能管理、策略运营和优化协调运行等功能,成了未来价值投资的关键技术<sup>[5, 12-13, 24]</sup>,而虚拟电厂作为分布式能源管理的重要技术手段,在工业界和学术界都得到了广泛的研究和运用,其以技术可行、经济合理、互利共赢的模式实现低碳、经济转型,推动“碳达峰、碳中和”目标实施<sup>[18-20, 26]</sup>。

## 2 虚拟电厂智慧运营管控平台系统框架

### 2.1 虚拟电厂智慧运营管控平台体系框架

虚拟电厂是聚合优化“源、网、荷、储、售、服”清洁发展的新一代智能控制技术和互动商业模式。在传统电网物理架构上依托互联网和现代信息通信技术,把分布式电源、储能、

负荷等分散在电网的各类资源聚合,进行协同优化运行控制,参与电力系统运行和电力市场交易,实现电源侧的多能互补、负荷侧的灵活

互动,对电网提供调峰、调频、备用等辅助服务。虚拟电厂智慧运营管控平台体系框架<sup>[14-16]</sup>如图2所示。

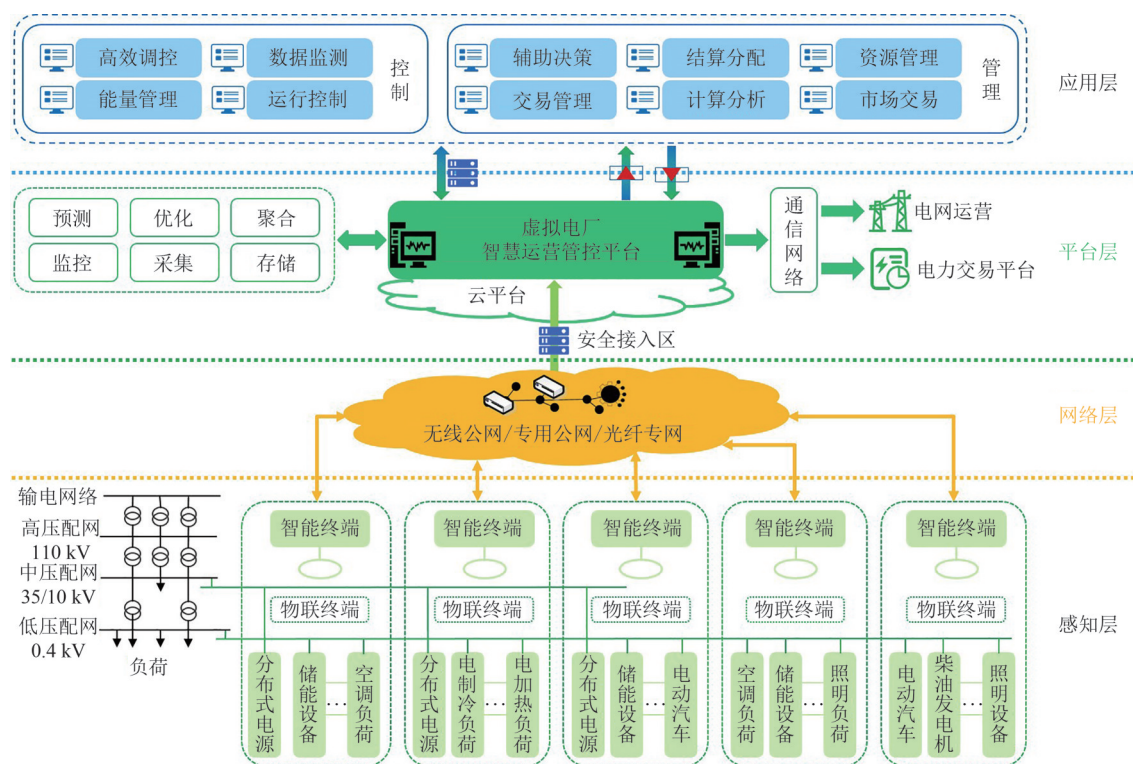


图2 虚拟电厂智慧运营管控平台体系框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of system framework of intelligent operation management and control platform for virtual power plant

虚拟电厂智慧运营管控平台系统架构主要从安全性视角进行设计,分为感知层、网络层、平台层和应用层。由于负荷侧、分布式电源物理网络接入类型众多,包括无线公网、专线公网、光纤专网等,这些资源接入平台时,需经过“安全接入区”进行隔离和防护。平台与电网运营系统、电力交易平台交互时,须经过防火墙隔离。在平台内部,控制大区和管理大区之间,通过正反向隔离装置进行隔离。

## 2.2 虚拟电厂智慧运营管控平台结构框架

虚拟电厂智慧运营管控平台主要可分为资源管理中心、计算分析中心、运行控制中心和交易管理中心等,虚拟电厂智慧运营管控平台结构框架<sup>[10, 16, 22]</sup>如图3所示。资源管理中心负责对用户和资源的管理。运行控制中心完成对资源的控制。计算分析中心完成对资源的可调度潜力分析等分析计算功能。交易管理中心负责虚拟电厂与电力

交易中心以及虚拟电厂与资源用户的交易管理、竞价策略制定和申报等功能<sup>[16-18, 26]</sup>。

虚拟电厂智慧运营管控平台结构框架包括1个平台、2张网络、4个中心和多方应用<sup>[16]</sup>。

1) 1个平台: 基于云平台部署虚拟电厂智慧运营管控平台,采用云平台架构部署,可实现设备数据和互动信息的计算、存储、集成能源运行管理、交易、服务功能,聚合优化各类可调度资源与电力系统实时交互,参与电网调度、调峰、调频、辅助服务和电力市场交易。

2) 2张网络: 构建以智能配电网、园区微电网为核心的多能流网络和以“云管边端”架构为核心的电力物联网,通过电力物联网实现电力能量网络的贯通、聚合,构建园区虚拟电厂智慧运营管控平台。

3) 4个中心: 包括资源管理中心、计算分析中心、运行控制中心和交易管理中心,根据业务分类,

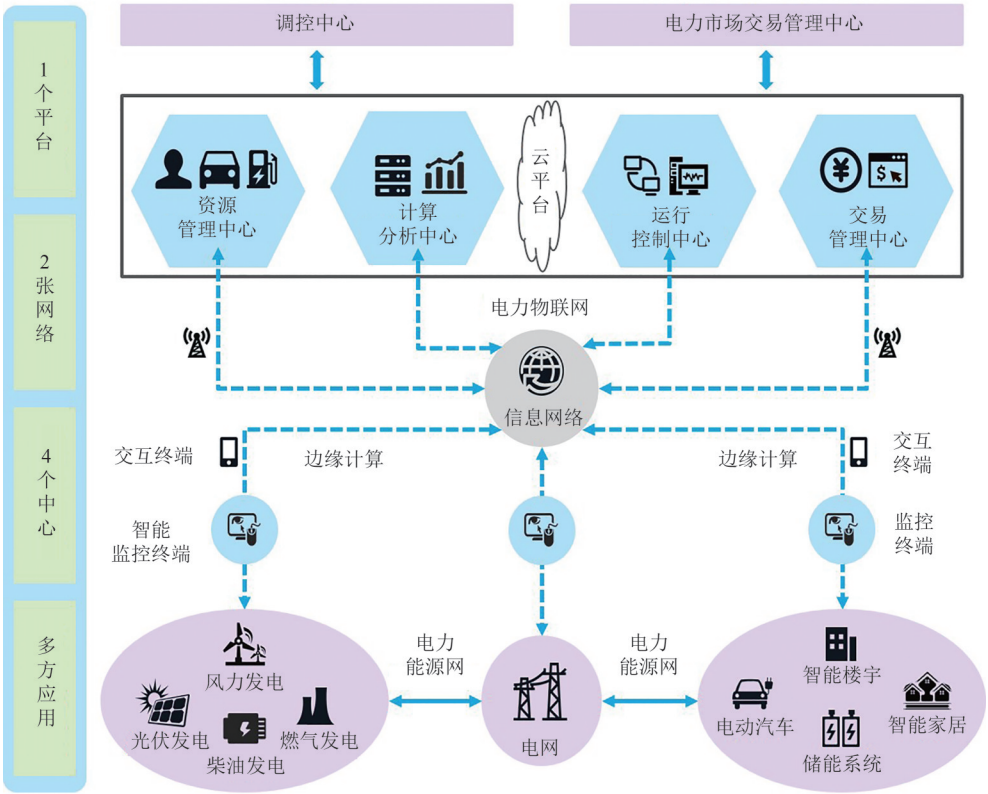


图3 虚拟电厂智慧运营管控平台结构框架示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structural framework of intelligent operation management and control platform for virtual power plant

基于“微应用”服务架构的多方应用分别部署于各中心，支持应用弹性伸缩，即快速部署和快速下线。根据应用需求，可扩展能量管理中心，能量管理中心实现基于资源状态和市场信息的资源监视和控制策略制定，实现多能流全程掌控、监视、调配。

4) 多方应用：对电力系统，提升系统灵活调节和新能源消纳能力；对售电公司、电力用户，提供便捷参与电力互动的技术手段、市场化参与的渠道与可持续的商业模式；对电网公司，提高资源可观可控性，提升电网安全稳定运行水平；对发电企业、园区企业，提升存量机组利用效率，促进新能源消纳；对新兴市场主体，拓展业务模式，形成商业新业态。

虚拟电厂智慧运营管控平台基于电力物联网可接入风力发电、光伏发电、柴油发电、燃气发电、储能等分布式电源和电动汽车等柔性负荷，同时基于平台的运行控制中心，可控制电力能量的合理流动。同时，平台支持和调度中心、电力

市场交易管理中心进行信息交互。

3 虚拟电厂智慧运营管控平台综合功能

3.1 综合功能结构蓝图

虚拟电厂智慧运营管控平台是对虚拟电厂主站管辖下的虚拟电厂终端进行监控和管理的平台。智慧运营管控平台与虚拟电厂终端之间进行信息交互，对含电动汽车、储能设备、可控资源在内的各类用户柔性负荷、分布式发电资源进行数据采集和调节控制。

通过智慧运营管控平台，可实时了解用户负荷以及分布式发电资源的运行情况，并对信息进行分类、处理，以不同的形式(如报表、曲线、饼图、柱状图等)进行展示，方便运行维护人员实时了解资源的运行状态，基于不同的调控策略对虚拟电厂终端进行调控，同时，智慧运营管控平台通过用户管理、发电运营和售电运营，参与电力系统辅助服务市场，其具体综合功能结构如图4所示。

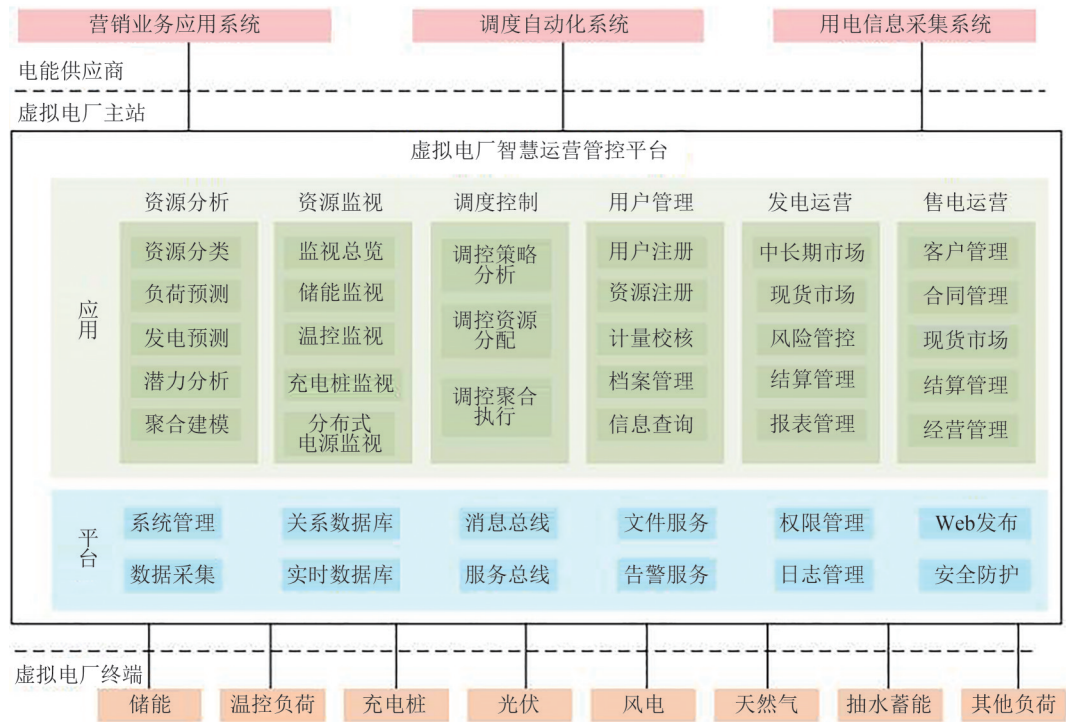


图4 虚拟电厂智慧运营管控平台功能结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of functional structure of intelligent operation management and control platform for virtual power plant

虚拟电厂智慧运营管控平台通过公网或者电力专网，与用户负荷及分布式发电资源进行信息通信。系统与营销业务应用系统交互电力市场信息，包括电力价格、用户合同等；与调度自动化系统交互电网调控信息，包括接收电网负荷信息、电网调控指令，发送调控结果等；与用户采集终端交互用户电量数据，包括接收所有电力用户的电量数据，发送聚合电力用户的电量数据等。

3.2 综合功能物理结构

虚拟电厂智慧运营管控平台一般部署在负荷聚合商机房，其综合功能物理架构如图5所示。

从安全分区上分为安全Ⅰ区和安全Ⅳ区。安全Ⅰ区包括监控和能量管理服务器、前置服务器、时间同步装置、安全接入区、监控工作站等设备，通过“无线物联专网”，接入各类用户资源(包括风力发电、光伏发电、电动汽车、智慧楼宇、储能系统等)。安全Ⅳ区包括电力市场交易服务器、Web发布服务器、安全接入网关、安全隔离装置、交易工作站等设备，通过互联网向用户终端发布电力交易信息、用户资源运行状况等信息。

3.3 综合功能场景应用

- 1) 面向电力系统，提升新型电力系统的灵活调节、“源网荷储”互动和新能源消纳能力。
- 2) 面向发电企业，为新能源机组提供新增调峰辅助服务能力，降低调峰市场总成本，促进新能源消纳；缓解传统火电机组深度调峰压力，提升存量机组利用效率。
- 3) 面向电网公司，提高分散在配电网负荷侧中可调节资源的可观性、可控性和实时响应能力，提升电网安全稳定运行水平；提高设备使用效率，减少电网的投资与建设。
- 4) 面向电力用户，为分布式光伏、充电汽车、用户侧储能等产销结合的新型用户提供“售电”的途径，提供参与电力市场的交易渠道、可持续的商业模式；蓄热式电锅炉、智能楼宇、工商业用户可根据价格信号主动选择用电行为，降低用能成本。

4 结论

作为“虚拟电厂聚合商”的资源管理和监控、

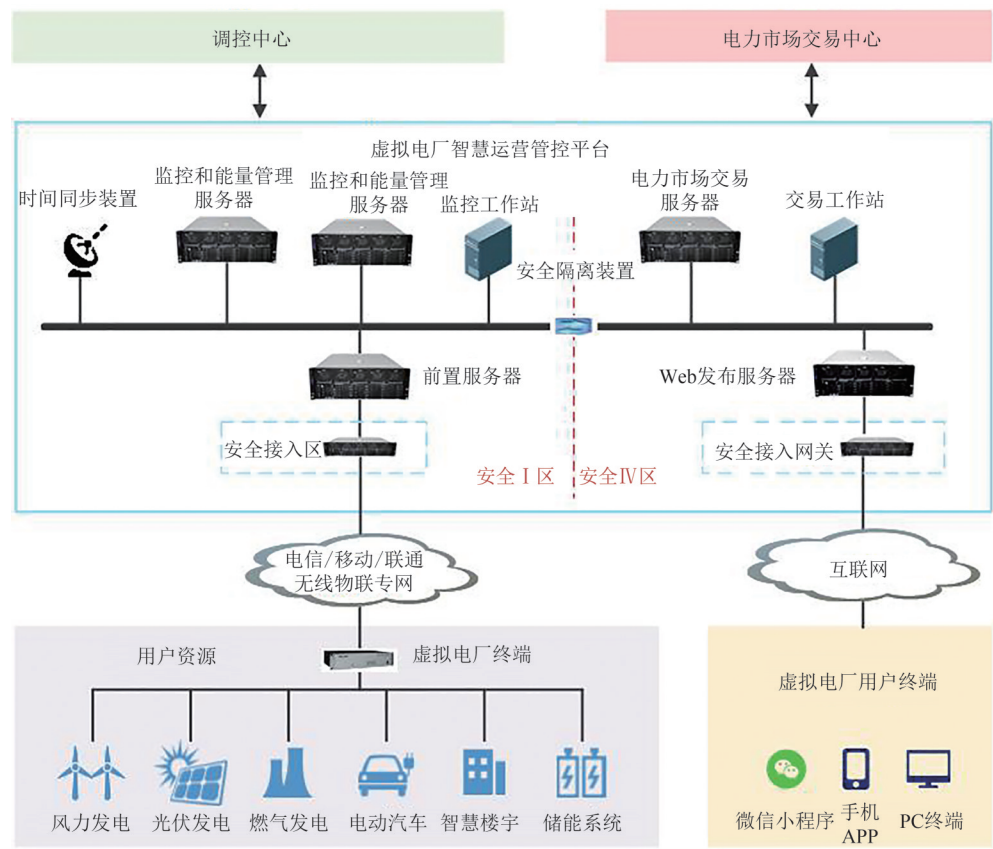


图5 虚拟电厂智慧运营管控平台物理结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of physical architecture of intelligent operation management and control platform for virtual power plant

智慧运营、管控、参与电力市场的重要技术平台，虚拟电厂智慧运营管控平台具有很大的市场潜力，发展应用前景广阔。

虚拟电厂智慧运营管控平台在国内研究刚起步，目前尚未有可批量推广的产品。各省正在筹建智慧运营管控平台，此平台是未来虚拟电厂省级主站的基础，基于此平台也可以扩展虚拟电厂能量管理系统。由于电力市场的不断发展，虚拟电厂在省级电力市场规则下的发展和应用需进一步摸索和完善，在推进虚拟电厂智慧运营管控平台建设中，需要重点关注并实现如下目标。

1) 技术性目标：通过虚拟电厂智慧运营管控平台建设，以最低的经济和环境成本保证电网平衡，为解决电力供需平衡提供技术手段。

2) 经济性目标：虚拟电厂智慧运营管控平台是连接零售市场与批发市场的智能化桥梁，帮助分布式能源所有商、负荷聚合商、负荷代

理商及终端用户等实现价值最大化、利润最大化。

3) 角色定位：作为数字虚拟发电厂，通过配电网参与电力系统整体运行调度；在电力批发市场竞争模式下，可以作为独立的辅助服务提供商；在电力零售竞争模式下，可以作为零售商、负荷聚合商、负荷代理商参与电力零售市场。

4) 未来发展：发挥数字化和互联网技术优势，通过智能化地管理多样性分布式电源、作为网络资源的协同共享体，利用大数据分析海量能源数据，创造新的商业模式。

随着能源革命与数字革命的推进，虚拟电厂获得了前所未有的发展机会。其中，大数据、云计算、边缘技术、人工智能技术使得虚拟电厂获得了智能化资源识别、场景资源适配、广域调度能力；移动互联、物联网技术使得分布式资源的

规模化聚合问题得以解决。丰富化、共享型的应用场景,使得用电客户参与意愿更强、参与机会更多、参与收益更高。可以预期,虚拟电厂的发展前景十分广阔,而虚拟电厂智慧运营管控平台关键技术研究和发展应用程度将直接决定虚拟电厂发展前景。

## 参考文献

- [1] 王晓海,徐静静,胡永锋,等.新形势下发电企业在综合能源服务领域的业务分析[J].综合智慧能源,2022,44(3):9-16.  
WANG X H, XU J J, HU Y F, et al. Business analysis on integrated energy services of power generation enterprises under the new circumstances[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(3): 9-16.
- [2] 宣文博,李慧,刘忠义,等.一种基于虚拟电厂技术的城市可再生能源消纳能力提升方法[J].发电技术,2021,42(3):289-297.  
XUAN W B, LI H, LIU Z Y, et al. A method for improving the accommodating capability of urban renewable energy based on virtual power plant technology[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(3): 289-297.
- [3] ZHONG Y J, ZHOU H W, ZONG X J, et al. Hierarchical multi-objective fuzzy collaborative optimization of integrated energy system under off-design performance[J]. Energies, 2019, 12(5): 1-27.
- [4] 何宇斌,张伊宁,马光,等.输配一体化综合能源系统的运行多指标评估方法[J].电力自动化设备,2019,39(8):120-127.  
HE Y B, ZHANG Y N, MA G, et al. Multi-index evaluation for integrated energy system operation connecting transmission and distribution levels[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 120-127.
- [5] 钟永洁,李玉平,胡兵,等.园区与区域能源互联网需求互动的动态协同优化运行分析[J].电机与控制学报,2022,26(12):128-139.  
ZHONG Y J, LI Y P, HU B, et al. Dynamic cooperative optimization and operation analysis of interaction demand between community and regional energy internet[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 128-139.
- [6] HUI H X, DING Y, SHI Q X, et al. 5G network-based internet of things for demand response in smart grid: a survey on application potential[J]. Applied Energy, 2020, 257: 113972-113986.
- [7] 王燕,杨秀媛,徐剑锋,等.民用可控负荷参与需求响应的控制策略[J].发电技术,2020,41(6):638-649.  
WANG Y, YANG X Y, XU J F, et al. Control strategy of civil controllable load participating in demand response[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 638-649.
- [8] 张凯杰,丁国锋,闻铭,等.虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述[J].综合智慧能源,2022,44(2):60-72.  
ZHANG K J, DING G F, WEN M, et al. Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plants[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(2): 60-72.
- [9] 王晔,张华君,张少华.风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J].电力系统自动化,2019,43(3):155-164.  
WANG X, ZHANG H J, ZHANG S H. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-164.
- [10] 黄超,卜思齐,陈麒宇,等.元电力:新一代智能电网[J].发电技术,2022,43(2):287-304.  
HUANG C, BU S Q, CHEN Q Y, et al. Meta-power: next-generation smart grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 287-304.
- [11] 刘方,徐耀杰,杨秀,等.考虑电能交互共享的虚拟电厂集群多时间尺度协调运行策略[J].电网技术,2022,46(2):642-656.  
LIU F, XU Y J, YANG X, et al. Multi-time scale coordinated operation strategy of virtual power plant clusters considering power interactive sharing[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 642-656.
- [12] 秦羽飞,葛磊蛟,王波.能源互联网群体智能协同控制与优化技术[J].华电技术,2021,43(9):1-13.  
QIN Y F, GE L J, WANG B. Swarm intelligence collaborative control and optimization technology of energy internet[J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 1-13.
- [13] 艾芊.虚拟电厂:能源互联网的终极组态[M].北京:科学出版社,2018.  
AI Q. Virtual power plants: the ultimate configuration of the energy internet[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [14] 钟永洁,孙永辉,谢东亮,等.含电-热-气-冷子系统的区域综合能源系统多场景优化调度[J].电力系统

- 自动化, 2019, 43(12): 76-84.
- ZHONG Y J, SUN Y H, XIE D L, et al. Multi-scenario optimal dispatch of integrated energy system with power, heating, gas, and cooling subsystems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 76-84.
- [15] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 952-960.
- ZHANG T, WANG C, WANG L Y, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 952-960.
- [16] 钟永洁, 纪陵, 李靖霞, 等. 虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 25-36.
- ZHONG Y J, JI L, LI J X, et al. Overview on the characteristics, connotation and development status of virtual power plants in China[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 25-36.
- [17] 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 H, ZHOU Q Y, LIU Y, 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.
- [18] LI W, LIN Z, ZHOU H, et al. Multi-objective optimization for cyber-physical-social systems: a case study of electric vehicles charging and discharging[J]. IEEE Access, 2019(7): 76754-76767.
- [19] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 37-48.
- WANG C X, SHI Z Y, LIANG Z F, et al. Key issues and prospects of demand-side resource utilization for power systems with new energy as the mainstay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48.
- [20] XIE K, HUI H X, DING Y. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-13.
- [21] 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 X Y, LIU D N, LIU Z, 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.
- [22] 欧阳斌, 袁志昌, 陆超, 等. 考虑源-荷-储多能互补的冷-热-电综合能源系统优化运行研究[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 19-29.
- OYANG B, YUAN Z C, LU C, et al. Research on optimal operation of cold-thermal-electric integrated energy system considering source-load-storage multi-energy complementarity[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 19-29.
- [23] 牛东晓, 赵东来, 杨尚东, 等. 考虑不确定性和储能系统的虚拟电厂与能效电厂联合调度优化模型及仿真应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1736-1743.
- NIU D X, ZHAO D L, YANG S D, et al. Cooperative scheduling optimization model and simulation application for virtual power plant and efficiency power plant considering uncertainty and energy storage system[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(7): 1736-1743.
- [24] 陈厚合, 王子璇, 张儒峰, 等. 含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2615-2624.
- CHEN H H, WANG Z X, ZHANG R F, et al. Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2615-2624.
- [25] CHAUDHARI K, KANDASAMY N K, KRISHNAN A, et al. Agent-based aggregated behavior modeling for electric vehicle charging load[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(2): 856-868.
- [26] 李嘉媚, 艾芊. 考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 1-7.
- LI J M, AI Q. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-7.
- [27] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1332-1346.
- [28] 肖白, 周文凯, 姜卓, 等. 泛在电力物联网研究现状分析[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 88-93.
- XIAO B, ZHOU W K, JIANG Z, et al. Analysis of

research status for ubiquitous power Internet of things [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 88-93.

- [29] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 55-64.

ZHONG Y J, LI Y P, HU B, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in energy internet based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 55-64.

- [30] TENG Y, WANG Z D, 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.

收稿日期: 2022-12-15。

作者简介:



钟永洁

钟永洁(1990), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为虚拟电厂技术、综合能源系统、能源互联网建模与优化, ZhongYongJieEMail@163.com;



纪陵

纪陵(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、智能变电站技术、虚拟电厂技术, lingji@sac-china.com;



李靖霞

李靖霞(1973), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为虚拟电厂技术、智能变电站技术、电力系统自动化技术, jingxia-li@sac-china.com;



左建勋

左建勋(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为虚拟电厂技术、智能变电站技术、电力系统自动化技术, jianxun-zuo@sac-china.com;



王紫东

王紫东(1991), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为虚拟电厂技术、智能变电站技术、电力系统自动化技术, zidong-wang@sac-china.com;



吴世伟

吴世伟(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为虚拟电厂技术、智能变电站技术、电力系统自动化技术、电力自动化软件开发, shiwei-wu@sac-china.com。

(责任编辑 杨阳)