

可调节负荷并网运行标准研究与应用

冷喜武¹, 刘闯^{2,3}, 何蕾^{2,3}, 邢健^{2,3}

(1. 国家电网有限公司, 北京市 西城区 100032; 2. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏省 南京市 210000; 3. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京市 海淀区 100192)

Research and Application of Grid-Connected Operation Standard for Adjustable Load

LENG Xiwu¹, LIU Chuang^{2,3}, HE Lei^{2,3}, XING Jian^{2,3}

(1. State Grid Cooperation of China, Xicheng District, Beijing 100032, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu Province, China; 3. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100192, China)

摘要:“双碳”目标下,可调节负荷作为电网新兴调节资源,对丰富电网调节手段具有重要意义。在此背景下,国家电力调度中心依托SAC/TC446全国电网运行与控制标委会,组织开展了《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列13项电力行业标准的编制工作。基于该系列行业标准,首先,通过梳理国内外可调节负荷标准的研究概况,分析了可调节负荷13项标准制定的整体思路、标准定位及标准边界;其次,给出了13项标准的主要研究内容和关键技术;最后,通过西南地区负荷调控试验和华中负荷参与市场的典型试点,分析了标准应用落地的实际情况,对标准的有效性进行了验证。研究内容可为可调节负荷大规模并网的实现提供依据和行动准则,对可调节负荷调控能力的提升提供有力支撑。

关键词:可调节负荷;调控能力;负荷评估;指标体系;行业标准

ABSTRACT: In the “dual carbon” campaign, adjustable load is an emerging adjustable resource for power grids. 13 power industry standards in the series of “Technical Specifications for Adjustable Load Grid-connected Operation and Control” was organized and carried out by the National Power Transmission Center relying on SAC/TC446 National Power Grid Operation and Control Standards Committee. Based on the standards, in this paper, the overall thinking, positioning and boundary of the 13 adjustable load standards were analyzed by reviewing the recent studies of domestic

and foreign adjustable load standards. Then, the research focus and key technologies of the 13 standards were proposed. Finally, combined with typical pilots of load regulation and load participation in the market, the actual situation of application of the standards was analyzed, and the effectiveness of the standard was verified. This work can provide strong support for the improvement of adjustable load regulation capability.

KEY WORDS: adjustable load; regulation and control capacity; load assessment; index system; industry standard

0 引言

在“碳达峰、碳中和”构建以新能源为主体的新型电力系统的背景下^[1],新能源(风电、光伏)呈现集中式和分布式并举的快速发展趋势,大量新能源代替传统机组,使得电网整体调节能力呈现下降趋势,大规模新能源消纳面临较大压力^[2-5]。加强负荷调控能力建设的顶层设计,全面提升可调节负荷调控能力,推动传统的“源随荷动”电网调控模式向“源荷互动”转变成为必然^[6-7]。

标准的制定将对可调节负荷并网运行技术的应用和产业发展起到支撑作用。国际上IEC、IEEE、CENELEC等标准化组织对分布式电源、电动汽车、储能等分别制定了相关标准。国家电网运行与控制标委会SAC/TC446推动国家能源局下达2020年、2021年能源领域行业标准制修订计

基金项目: 国家电网有限公司指南项目(5400-202011441A-0-00)。

Project Supported by State Power Grid Corporation of China (5400-202011441A-0-0-00).

划,《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列13项电力行业标准已于2021年12月17日通过审查,正式进行报批程序。

2020年1月,国家电网公司正式启动了负荷侧调控能力提升3年行动计划^[6];2021年2月,国家发改委提出要加快源网荷储一体化建设^[8],对可调节负荷参与电网调节提出了更高要求。在国网公司顶层设计指导下,我国华北、东北、西南、江苏、山西、重庆等地区相继开展了可调节负荷参与电网调节试点^[9-12],对《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列13项电力行业标准进行了技术实现论证,确保了系列行业标准的落地。本文旨在通过梳理国内外可调节负荷标准和标准体系研究现状,为可调节负荷大规模并网的实现提供依据和行动准则。

1 可调节负荷并网运行与控制标准的意义

1.1 标准先行支撑“双碳”目标

“碳达峰、碳中和”背景下,新能源将迎来跨越式发展的历史机遇,成为电能增量的主力军,实现从“补充能源”向“主体能源”的转变。传统电网调节资源的调度空间与间歇性新能源规模矛盾凸显,为有效挖掘电网调节资源,亟需推动“源随荷动”调控模式向“源荷互动”转变。预计2025年我国最大负荷将达到15.7亿kW^[13],通过对可调节负荷的调节,可有效促进消纳清洁能源,减少CO₂排放。

因此,国家能源局开展了《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列行业标准的编制,从顶层设计出发,促进负荷调节形成可复制、可推广的成熟模式,为我国“双碳”目标提供支撑。

1.2 确保可调节负荷资源参与调控的安全和规范

目前电网调度控制系统主要是对火电、水电、抽蓄以及储能等调节资源具备调节控制能力,对于负荷侧的相关资源,特别是分布式电源、电动汽车、自备电厂以及综合能源等不同类型、不同接入方式、不同调节特性的负荷资源参与电网调控缺乏系统设计和整体方案,《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列行业标准从资源接入、负荷建模、调节控制、安全防护以及市场交互等

关键问题入手,全面覆盖并规范可控负荷资源参与电网调控业务各环节。

据此,制订可调节负荷并网运行与控制技术规范系列标准可保障可调节负荷并网运行的安全与规范。

1.3 助力可调节负荷产业健康有序发展

随着电力体制改革的深入开展,各级电网正在加紧建设电力现货市场,通过市场机制创新,可调节负荷可参与电力中长期、现货、调峰、调频、备用市场等^[14],市场收益为负荷参与调控提供了资金保障,使得车联网平台(电动汽车)、智慧能源服务平台(营销)、第三方独立主体聚合商(虚拟电厂)、大用户等多元市场主体跃跃欲试。《可调节负荷并网运行与控制技术规范》严格规定了可调节负荷资源的接入方式、市场准入门槛及调节贡献量化评估等,使得各类聚合商明确了电网适应性升级的方案和路径。

据此,制订可调节负荷并网运行与控制系列标准,规范各类负荷参与电力市场的技术路径,为各类负荷聚合商提供参与电网调节动力,有助于可调节负荷产业健康有序发展。

2 可调节负荷并网运行与控制标准体系框架

2.1 整体思路

当前,电源侧调节资源行业标准已较为成熟^[15],遵循这些行业标准实现对常规电源的调节,保障了当前电力系统的实时平衡,满足大电网安全运行和市场运营的需要。可调节负荷作为新型调节资源,国内外在负荷资源的特性分析、聚合建模、调度控制及市场调节等方面尚处于理论研究和初步试点应用阶段,可调节负荷系列标准比照传统电力系统同步机调控技术规范要求,借鉴传统电源并网运行控制技术标准体系,开创性提出和编制《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列13项行业标准,从“可观、可测、可控、可调”4个维度提升负荷调节资源的调控能力。

2.2 标准体系结构

遵循电网运行与控制标准体系,制定可调节

负荷并网运行与控制标准，标准内容主要涉及基础与通用、并网调度、系统运行、继电保护、自动化、电力通信这6个领域，这6个领域本身既相互关联又具有较高的独立性，以此划分制定了可调节负荷并网运行标准的界面，在此基础上，统一规范系列标准的术语及定义，各项标准不交叉、不重叠，具体的标准体系结构如图1所示。

标准体系结构分3层：第1层为业务领域层，主要分为基础与通用、电网调度、系统运行、继电保护、自动化和电力通信等6类；第2层为业务细分层，将各自领域的业务进行细分，主要包括调度运行、安全稳定、仿真分析、设备技术规范等具体业务；第3层为各项标准在标准体系中的具体定位。

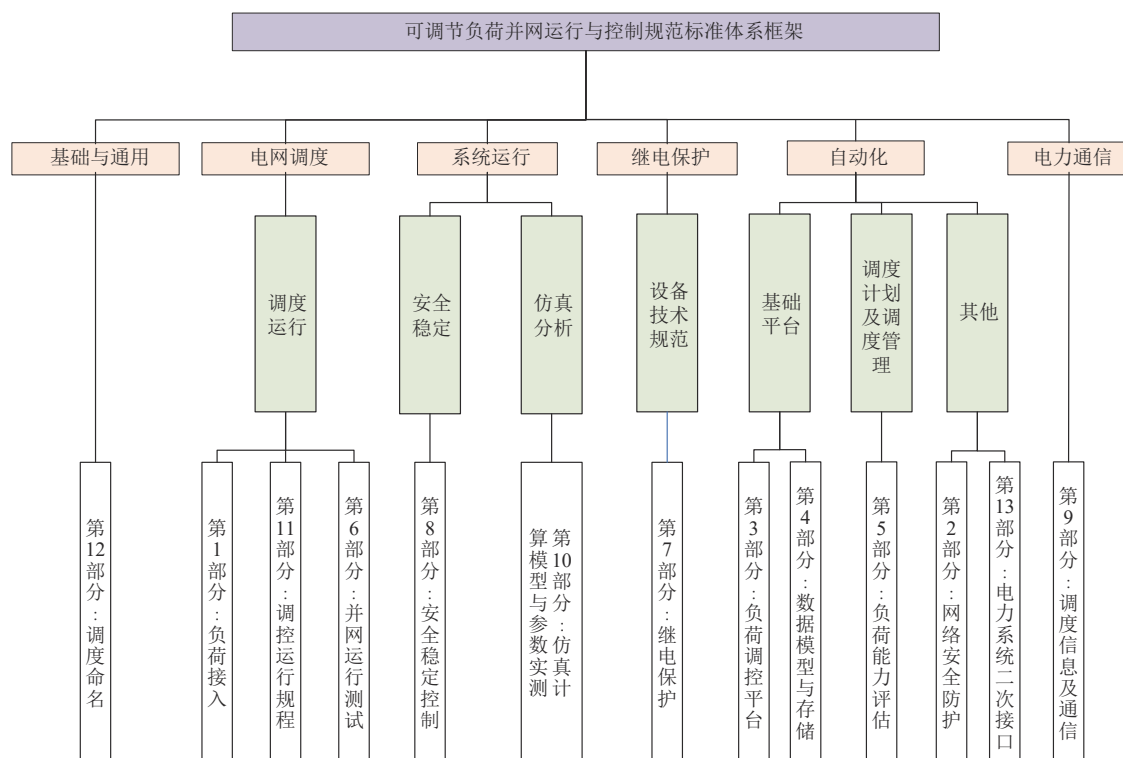


图1 可调节负荷并网运行与控制规范标准体系框架

Fig. 1 Evaluation index framework of adjustable load regulate capability

2.3 可调节负荷并网运行与控制技术规范系列标准现状

国家电网调控中心统筹推进源网荷储工作已有6年，按照定标准、建市场、提能力、推重点的工作决策和部署，持续发力，坚持有序推进源网荷储协同互动工作，在全国电网调控系统及科研、技术开发单位的支持下，此项工作取得了阶段性成果。

定标准方面，全国电网运行与控制标委会SAC/TC446推动国家能源局下达2020年、2021年能源领域行业标准制修订计划，按照《电力行业标准制定管理细则》的有关规定，由SAC/TC446归口的《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列13项电力行业标准，历时2年完成了标准的

立项、编写，已于2021年12月17日通过审查，正式进行报批程序。

可调节负荷并网运行与控制技术规范系列标准是一个动态的系统，在使用过程中不断优化完善，并随着业务需求、技术发展的不断变化，适时维护更新^[16]。

3 关键技术

3.1 标准主要内容

《可调节负荷并网运行与控制技术规范》系列13项电力行业标准，全面覆盖并规范负荷可控资源参与电网调控业务各环节，确保可调节负荷资源参与调控的安全性和规范性，指导后续系统建设及电网运行，其主要技术内容如下。

1) 资源接入

该部分规定了各类可调节负荷资源与地区及以上调度机构开展业务交互时的技术要求,对可调节负荷资源的聚合商平台技术性能、资源调节能力、接入范围和技术管理要求进行统一明确的规范。

2) 网络安全防护

该部分规定了可调节负荷并网运行与控制的网络安全防护基本规定、总体架构、本体安全、基础设施安全、数据安全、应急备用、安全管理等要求。

3) 负荷调控平台

该部分规定了负荷调控系统的体系架构、平台管理、人机交互、模型管理、数据采集、分析决策、负荷调节、聚合商管理等功能及性能技术要求,可作为智能电网调度控制系统平台及功能的扩展,支撑可调节负荷资源参与电网调控运行各项业务的全面开展。

4) 数据模型与存储

该部分规定了可调节负荷资源在电网调度侧的数据模型和存储要求,包含车联网平台(电动汽车)、智慧能源服务平台(营销)、第三方独立主体(虚拟电厂)聚合商、大用户四大类可调节负荷的基本信息、量测数据、计划预测数据模型及存储要求。

5) 负荷能力评估

该部分规定了可调节负荷并网调控后接入能力、调度运行能力及自动功率控制能力的评估范围、评估指标及其评估方法。

6) 并网运行调试

该部分规定了可调节负荷接入电网并网运行调试方案、单体调试项目及方法、系统调试项目及方法。

7) 继电保护

该部分规定了可调节负荷并网时电网继电保护应满足的总体原则、配置原则和整定原则等要求。

8) 安全稳定控制

该部分规定了可调节负荷参与电力系统安全稳定控制的基本要求、预防控制、稳定控制、稳

定计算分析、控制策略和运行管理。

9) 调度信息及通信

该部分规定了可调节负荷并网运行与控制调度信息通信的基本架构、负荷聚合商内部信息传输及负荷聚合商与电力调控机构信息传输要求。

10) 仿真计算模型与参数实测

该部分规定了电力系统稳定分析计算中可调节负荷的模型、参数实测与建模方法。

11) 调控运行规程

该部分规定了可调节负荷的调控运行管理、运行调节与控制、设备监视、调度计划、事故处理、通信及自动化管理、继电保护及安全自动装置管理等要求。

12) 调度命名

该部分规定了各类可调节负荷资源与地区及以上调度机构开展业务交互时命名的技术要求,明确了可调节负荷资源命名的总体原则以及电网及调度机构、负荷聚合商、厂站、电压等级、线路、区域等值负荷、主要一次设备、属性命名要求。

13) 电力系统二次接口

该部分规定了负荷聚合商平台、数据采集与监视(supervisory control and data acquisition, SCADA)应用、自动功率控制(automatic power control, APC)应用、现货市场应用与负荷调控系统间的接口交互内容、接口交互方式、接口交互要求。

3.2 标准关键技术

3.2.1 可调节负荷安全子区

构建“可调节负荷安全子区”,在控制区的基础上,构建相对独立的“可调节负荷安全子区”子分区,实现与原有控制区电网控制功能模块逻辑隔离,并部署负荷调控系统。部署在“可调节负荷安全子区”的负荷调控系统与负荷聚合商纵向联接中采用电力无线专网、外部公用数据网的虚拟专用网络VPN等通信方式的,应设立安全接入区,安全防护架构如图2所示。图2中,在电网控制区建设可调节负荷安全子区,通过防火墙与传统控制业务进行分离,在可调节负荷安全子区内建设负荷调控系统,实现可调节负荷控制功能。

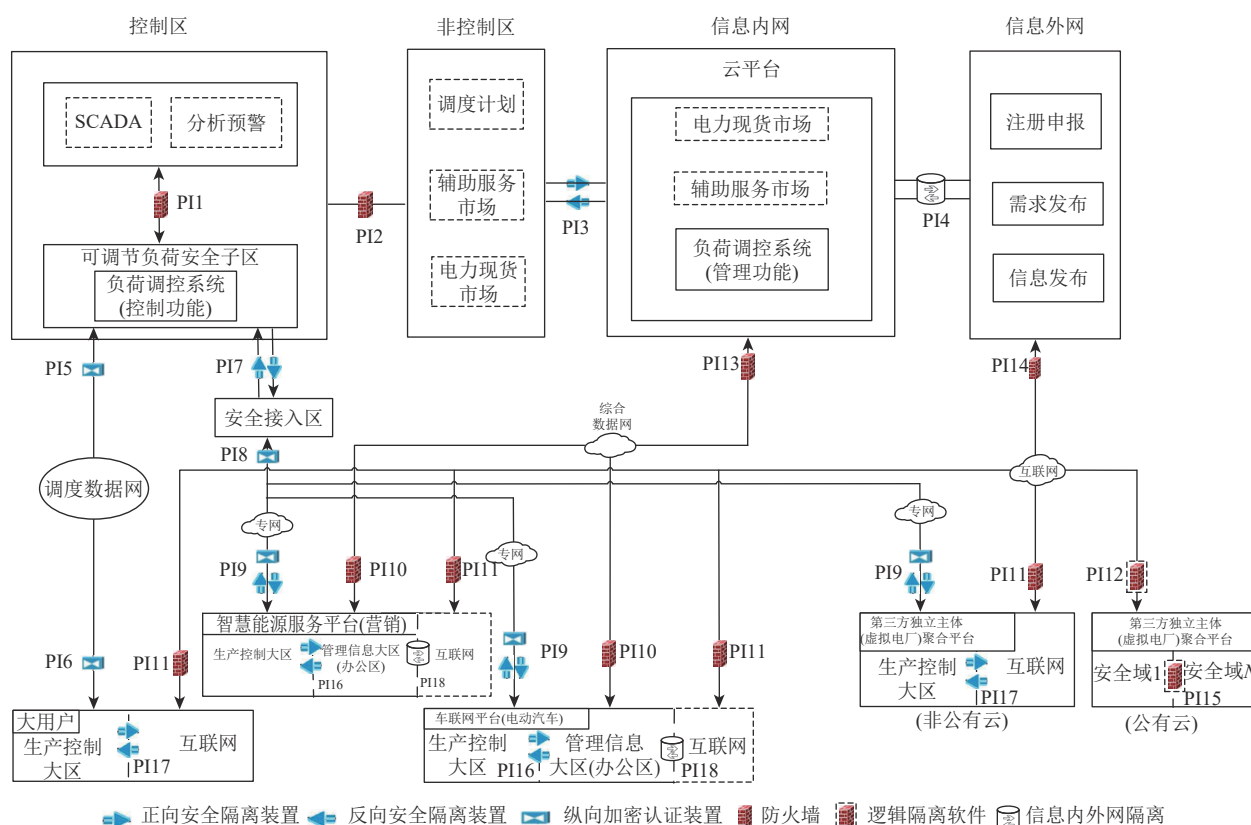


图2 安全防护架构

Fig.2 Security protection architecture

3.2.2 自动功率控制

首次提出并实现了适应源网荷多类型资源协同的APC控制技术，将传统的电网自动发电控制(automatic generation control, AGC)范畴拓展至负荷侧资源，将可调节负荷纳入源网荷储全网资源池，实现负荷侧与发电侧在日前、日内和实时层面的联合优化控制，解决负荷侧资源功率的实时连续调节难题，充分挖掘并释放负荷侧的灵活调节能力，增强公司对大电网驾驭能力的深度和广度，助力清洁能源消纳水平和电网实时平衡能力的提升。

3.2.3 负荷能力评估

从可观、可测、可调、可控4个维度构建可调节负荷调控能力评估指标体系，根据可调节负荷的调峰、备用、调频等应用场景，在资源接入、调度运行、自动功率控制等环节设计相应评估指标并制定指标计算方法，解决可调节负荷在参与市场过程中与传统电源侧调节资源、与调度运行机构间存在的市场准入、调节量计算等问题^[1]。

本文选取控制偏差率和控制延时时长进行具体说明。

1) 控制偏差率

控制偏差率表征可调节负荷接受电网实时控制指令执行量与控制目标偏差情况，指负荷控制偏差量占负荷控制总量的比率，从可调节负荷参与电网调峰实际执行出力与下达计划偏差不应大于30%，大于30%应视为该时刻未执行，计算方法为

$$V = |Q_i - Q_p| / Q \times 100\% \quad (1)$$

式中： V 为可调节负荷控制偏差率； ΔQ_i 为负荷控制实时量测值； ΔQ_p 为负荷执行计划目标值； Q 为负荷控制总量。

2) 控制延时时长

控制延时时长表征可调节负荷接受电网实时控制响应的能力，指控制指令下发时间到控制指令执行完成时间差，计算方法为

$$\Delta t = t_f - t_i \quad (2)$$

式中： Δt 为可调节负荷控制延时时长； t_f 为控制

指令执行完成时间; t_i 为下发控制指令时间。

3.2.4 全路径命名

遵循《电网设备通用模型数据命名规范》对设备全路径命名要求, 制定车联网平台、智慧能源服务平台、第三方独立主体聚合商、大用户 4 类负荷聚合平台调度全路径命名规范, 按照接入厂站类可调节负荷设备的全路径名称结构和接入馈线类可调节负荷设备的全路径名称结构两种方式进行全路径命名建模, 支撑可调节负荷快速构建与主网拓扑连接关系, 实现可调节负荷分区控制、精准控制, 确保可调节负荷参与电网调控的规范性和实效性。

4 标准应用实践

4.1 应用实践概况

在国调中心顶层设计指导下, 各单位结合实际和现有可能情况, 严格按照系列标准要求, 积极开展可调节负荷并网调控实践。

华北区域完成网省两级负荷调控模块互联和数据交互, 接入电动汽车、综合智慧能源等 13 家负荷聚合商, 聚合负荷终端 97 980 个, 接入可调节负荷 854 万 kW; 华东区域汇聚可调节负荷容量 410 万 kW, 并结合新一代调控技术支持系统建设开展负荷监视和分析; 东北区域接入吉林地区 110 户共计 17.8 万 kW 蓄热式电采暖等资源; 西北区域接入可控负荷调节规模达 361 万 kW; 华中区域汇聚总容量 19.5 万 kW(电动汽车容量 6.3 万 kW, 储能容量 13.2 万 kW); 西南区域汇聚可调负荷 111.5 万 kW(电动汽车 11.9 万 kW, 省级智慧能源服务平台 87.1 万 kW, 大工业 12.5 万 kW)。

4.2 典型应用案例

4.2.1 可调节负荷调控实践

2020 年 11 月 30 日—12 月 2 日, 在成都市西南调控分中心跨省对重庆电动汽车充电站开展共 7 次 APC 功率调节控制试验^[17]。在这一试验中对标准的《第 1 部分: 资源接入》《第 2 部分: 网络安全防护》《第 4 部分: 数据模型与存储》《第 5 部分: 负荷能力评估》《第 12 部分: 调度命名》等标准内容进行了验证。

试点应用建设过程中, 电动汽车可调节负荷

资源通过车联网平台(电动汽车)接入调控系统中的负荷安全子区, 其接入方式如图 3 所示。图 3 中, 车联网平台内部建设生产控制大区和信息管理大区, 生产控制大区通过安全接入区接入负荷安全子区实现负荷控制功能, 信息管理大区通过综合数据网或互联网接入电网安全三区。在全路径命名建模模块中采用“电网. 负荷聚合商. 运营商. 厂站/电压等级. 充电站名称/属性. 充电桩编号/属性. 充电桩”的命名方式, 有效支撑电动汽车(车联网平台)负荷的统一接入以及快速构建与主网拓扑连接关系。

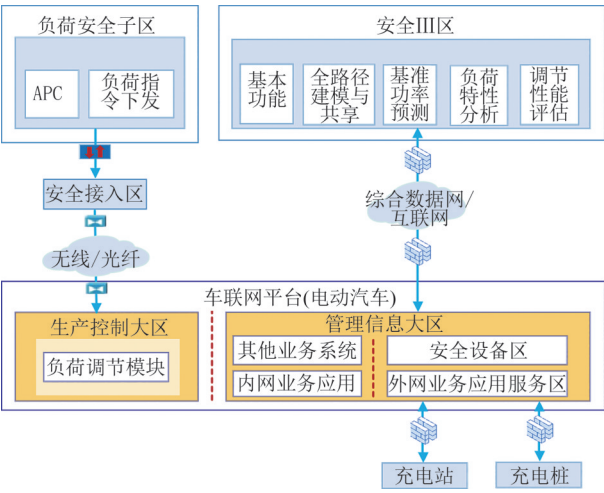


图 3 车联网平台接入方式

Fig. 3 Internet of vehicles platform access method

在 APC 功率控制试验中, 对充电站 1(EVCS1)进行了 6 次调节, 根据负荷能力评估标准中响应功率、控制偏差率、控制延时时长的计算方法得到了如表 1 所示的评估结果。

由表 1 可见, 当对电动汽车负荷进行功率下调试验时, 在开始响应后迅速达到目标功率,

表 1 充电站 1 功率调节控制试验评估结果

Tab. 1 Evaluation results of power regulation control test for EVCS1

试验名称	初始功率/ kW	目标 功率/kW	响应 功率/kW	控制 偏差率/%	控制延时 时长/s
下调试验 1	51.0	20.0	9.79	0.68	23.0
上调试验 1	19.85	40.0	29.85	0.74	39.0
下调试验 2	39.87	15.0	4.83	0.68	22.0
上调试验 2	14.79	50.0	39.92	0.23	56.0
下调试验 3	38.34	20.0	9.86	0.76	23.0
上调试验 3	10.0	20.0	19.31	6.9	35.0
统计均值	—	—	—	1.67	33

响应时长均为1 s; 当进行功率上调试验时, 有明显缓慢爬坡现象, 响应时间较长, 为35~95 s。

综上所述, 可调节负荷系列行业标准可以在负荷参加电网调控中落地, 对可调节负荷参加电网调控具有指导意义。

4.2.2 可调节负荷市场实践

可调节负荷资源根据其响应时间、可控时长、可调容量等资源特性分析, 可以参与电网调峰、调频、需求侧响应等典型应用场景, 现阶段各地区都积极推进政府部门出台负荷侧资源参与市场的相关政策, 相继开展负荷侧资源参与电网调峰辅助服务市场运行。

以华中市场为例, 2021年11月华中能源监管局正式印发《新型市场主体参与华中电力调峰辅助服务市场规则(试行)》, 2021年12月31日, 华中区域首次实现市场方式下的源网荷储跨省协同互动, 新型市场主体通过参与省间调峰辅助服务交易, 跨省帮助消纳清洁能源13.5万kW·h, 获得市场补贴1.13万元。华中新型主体参与调峰市场建设过程中, 市场运行、负荷侧资源、实时数据采集监视系统的接口数据流如图4所示。

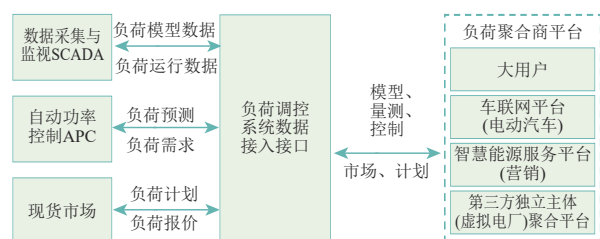


图4 二次接口数据流

Fig. 4 Secondary interface data flow

图4中, 负荷调控系统接口交互对象包括大用户、车联网平台(电动汽车)、智慧能源服务平台(营销)、第三方独立主体(虚拟电厂)聚合平台等负荷聚合商平台, 以及数据采集与监视、自动功率控制、现货市场等应用。接口交互信息包括模型、量测、控制类基础数据及市场、计划类经济数据。在实际应用过程中标准《第13部分: 电力系统二次接口》的规范要求能够指导可调节负荷参与电力现货市场的接口建设。

综上所述, 可调节负荷系列行业标准在负荷

参与市场实践中也有广泛应用, 建立标准化的资源接入和数据交互接口, 为负荷参与市场规模的扩大提供前提保障, 助力可调节负荷调节市场的健康发展。

5 结论

结合我国负荷侧资源参与电网调节建设的需要, 开展了可调节负荷并网运行标准及其应用的研究, 结论如下:

1) 可调节负荷13项系列行业标准, 全面覆盖并规范可控负荷资源参与电网调控业务各环节, 为可调节负荷资源参与调控的安全性和规范性提供标准支撑。提出的车联网平台(电动汽车)、智慧能源服务平台(营销)、第三方独立主体聚合商(虚拟电厂)和大用户4种接入方式及安全防护策略、建模存储、调度命名、负荷能力评估等内容为负荷大规模接入提供了技术保障。

2) 可调节负荷13项系列行业标准已经在华北、西南、华中等源网荷储示范工程中应用, 验证了其适应性和合理性, 对负荷侧调节市场的规范、培育和发展具有指导作用。

3) 后续研究应结合负荷调控实际情况, 补充完善标准内容, 现有标准对可调节负荷接入电网运行的关键设备研究较少, 后续可以有针对性地对负荷接入电网的设备进行研究, 以保证大规模可调节负荷并网后电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 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 Y B, CHEN G P, HE J B, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [2] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Y B, ZHANG Z G, GUO J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,

- 37(1): 1-8.
- [3] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5505.
- CHEN G P, DONG Y, LIANG Z F. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.
- [4] 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): 20-26.
- CHEN G P, LI M J, XU T, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [5] 郭杉, 张源渊, 贾俊青, 等. 基于蒙特卡洛的配电网光伏消纳能力评估[J]. 浙江电力, 2021, 40(6): 8-14.
- GUO S, ZHANG Y Y, JIA J Q, et al. Evaluation of photovoltaic consumption capacity of distribution network based on Monte Carlo method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 40(6): 8-14.
- [6] 张希良, 姜克隽, 赵英汝, 等. 促进能源气候协同治理机制与路径跨学科研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 1-4.
- ZHANG X L, JIANG K J, ZHAO Y R, et al. Boost interdisciplinary research on development pathway and synergy governance of energy and climate[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 1-4.
- [7] 国家电网有限公司. 能源互联网情境下负荷调控能力提升工作三年行动计划[R]. 北京: 国家电网有限公司, 2020.
- State Grid Corporation of China. Three-year action plan for improving load regulation and control capacity in the context of energy internet[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2020.
- [8] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[Z]. 北京: 国家能源局, 2021.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guidance on promoting the development of load-storage integration and multi-energy complementary development of power source network[Z]. Beijing: National Energy Administration, 2021.
- [9] 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): 1-9.
- NING J, JIANG C M, ZHANG Z, 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): 1-9.
- [10] 史沛然, 李彦宾, 江长明, 等. 第三方独立主体参与华北电力调峰市场规则设计与实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 168-174.
- SHI P R, LI Y B, JIANG C M, et al. Rule design and practice for third-party independent entities participating in electric power peak regulation auxiliary service market of north China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 168-174.
- [11] 国家能源局江苏监管办. 江苏电力市场用户可调负荷参与辅助服务市场规则(试行)[Z]. 南京: 国家能源局江苏监管办, 2020.
- Jiangsu Supervision Office of the State Energy Administration. Rules of Jiangsu power market users' adjustable load participation in auxiliary service market (for trial implementation) [Z]. Nanjing: Jiangsu Supervision Office of the State Energy Administration, 2020.
- [12] 国家能源局山西监管办. 山西独立储能和用户可控负荷参与电力调峰市场交易实施细则(试行)[Z]. 太原: 国家能源局山西监管办, 2020.
- Shanxi Supervision Office of the State Energy Administration. Detailed rules for the implementation of Shanxi independent energy storage and user controllable load participation in power peak shaving market (for trial implementation)[Z]. Taiyuan: Shanxi Supervision Office of the State Energy Administration, 2020.
- [13] 全球能源互联网发展合作组织. 中国“十四五”电力发展规划研究[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2020.
- Global Energy Internet Development Cooperation Organization. Research on electric power development planning of China during the 14th five-year plan[R]. Beijing: Global Energy Internet Development Cooperation Organization, 2020.
- [14] 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): 37-55.
- LI J M, AI Q, YIN S R. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-55.
- [15] 施贵荣, 孙荣富, 丁华杰, 等. 大规模风电电网的评估指标体系构建与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(3):

841-848.

SHI G R, SUN R F, DING H J, et al. Construction and application on evaluation index system of large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 841-848.

- [16] 文芳, 卢江海, 陈丽辉, 等. 我国光伏标准和标准体系建设现状研究及完善建议[J]. 中国标准化, 2022(3): 69-76.

WEN F, LU J H, CHEN L H, et al. Research on the current situation of photovoltaic standards and standard system construction in China and suggestions for improvement[J]. China Standardization, 2022(3): 69-76.

- [17] 国网重庆市电力公司电力科学研究院. 西南电网源网荷储负荷直控测试报告[R]. 重庆: 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 2020.

Electric Power Science Research Institute of Chongqing Electric Power Company. Test report on direct control of load storage load in southwest power grid[R]. Chongqing: Electric Power Science Research Institute of Chongqing Electric Power Company, 2020.

收稿日期: 2022-03-18。

作者简介:



冷喜武

冷喜武(1962), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为大电网运行与控制标准化、可调负荷并网运行、网厂协调机制建设、调控机构安全监管体系和管理能力提升等, xiwu-leng@sgcc.com.cn;



刘闯

刘闯(1989), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网调控运行、调度计划、电能量计量和电力现货市场等, lcdlut@126.com.cn;



何蕾

何蕾(1978), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调控运行、运营技术的研究与开发工作, helei6@sgepri.sgcc.com.cn;



邢健

邢健(1990), 男, 工程师, 主要研究方向为电力控制系统、电力现货市场、辅助服务市场、可调节负荷调度控制等, syflxj@126.com。

(责任编辑 辛培裕)