

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210747

可调负荷参与多级电网实时调控：关键技术与工程应用

兰强¹, 周宇晴², 邱燕军³, 刘永春³, 罗卫华¹, 谈超³

(1. 国家电网有限公司西南分部, 四川 成都 610041; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400014;
3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106)

摘要: 随着可再生能源和新型用电负荷的快速发展, 源-荷双侧不确定性逐步增加, 给电网调峰调频带来了更大挑战。因此, 亟需将可调负荷纳入实时调度范畴, 提升电网运行平衡和调节能力。首先, 分析了将可调负荷作为自动发电控制对象的可行性。然后, 以电动汽车参与电网调频为应用场景, 提出了可调负荷参与多级电网实时调控的系统架构。通过构建安全接入区、应用多元负荷调控终端等关键技术, 实现了多级调度对可调负荷实时感知和秒级控制, 将负荷参与电网调节的响应速度由分钟级提升至秒级。通过西南电网源网荷储多级协同调控示范工程实践, 验证了所提技术路线的有效性和优越性。最后, 针对大规模可调负荷常态化参与电网实时调控, 提出了研究方向和发展建议。

关键词: 可调负荷; 电动汽车; 多元负荷调控终端; 频率控制; 安全接入区

Adjustable load participating in real-time dispatching and control of a multi-lever power grid: key technology and engineering application

LAN Qiang¹, ZHOU Yuqing², QIU Yanjun³, LIU Yongchun³, LUO Weihua¹, TAN Chao³

(1. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China; 3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy and new-type electrical load, the uncertainty of both sides on the source and load increases. This brings more challenges to the power grid peaking regulation and frequency control. Therefore, it is important and urgent to bring adjustable load into the real-time dispatching area to improve the operational balance and regulation capacity of the power grid. First, the feasibility of taking the adjustable load as the control object of automatic generation control (AGC) is analyzed. Then, taking electric vehicles into power grid frequency control as the application scenario, the system architecture of adjustable load participating in multi-level power grid real-time regulation is proposed. Through the construction of a security access area, the application of multiple load regulation terminals and other key technologies, real-time perception and adjustable load second-level control by a multi-level dispatching center are introduced. This increases the response speed of load participating in the power grid regulation from the minute to second level. The effectiveness and superiority of the proposed technical route are verified through a demonstration project of source-grid-load-storage multi-level coordinated dispatching and control in the Southwest China Power Grid. Finally, further research directions and development suggestions are put forward for the large-scale adjustable load normally participating in the real-time dispatching and control of the power grid.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5400-202027212A-0-0-00).

Key words: adjustable load; electric vehicle; multiple load control terminal; frequency control; safe access area

0 引言

随着以风电、光伏等为代表的新能源和以电动

汽车、电采暖、智能楼宇等为代表的新型用电负荷规模化快速发展, 源-荷双侧不确定性逐步增加, 电网的物理特性、运行模式、功能形态正在发生深刻变化, 传统电网调节资源的调度空间与间歇性新能源、新型用电负荷规模矛盾日益凸显, 使得有功频率控制难度加大, 电网供需实时动态平衡面临全新

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (5400-202027212A-0-0-00)

的挑战^[1-8]。以西南电网为例：一方面在电源侧，新能源蕴藏丰富，可开发容量达 7.03 亿 kW，其大规模接入带来的强随机、难预测、反调峰等特性使得电网实时调控难度加大；另一方面在负荷侧，以电动汽车为代表的柔性负荷大规模接入，其充电时间与空间分布的不确定性，使得电动汽车充电负荷具有较大的随机性，进一步加大了电网实时调控的难度^[9]。

在我国统一电力市场建设加快推进的背景下，负荷作为电力市场不可忽略的参与者，可以通过参与辅助服务市场的交易，将其引入系统调频、调峰等场景，充分发挥用户侧可调负荷的柔性调节能力，提升电网运行平衡和调节能力^[10-11]。因此，研究可调负荷参与电网实时调控关键技术，将负荷资源纳入常态化的电力系统调度运行中，参与电网运行控制与动态平衡，推动调度模式由传统的“调电源”向“调负荷”延伸，实现源网荷储协同控制，对于保障现代电力系统的安全、稳定、经济运行有着重要的意义。

目前，国内外学者在可调负荷参与电网调控方面的研究取得了一定的成果，主要集中在需求响应^[12-17]、有序用电^[18-19]以及频率紧急控制^[20-22]等领域。文献[23]在深入分析大用户负荷特性和移峰潜力的基础上，提出了基于代理技术的大用户移峰负荷调控方法。文献[24]对有序用电中的错峰调控手段进行了深入研究，提出了错峰预案编制的优化方法。文献[25]利用可中断负荷，提出了特高压直流故障下的源网荷协调控制技术。文献[26]通过构建调控机构-聚合商-负荷资源三级业务体系，实现了负荷资源通过功率连续调节参与全网调度优化，但控制周期较长，尚不能满足实时调控需求。综上所述，现有研究成果为可调负荷参与电网调控提供了思路与技术实践，但主要集中在中长期、短期、日前调度范畴，限制了可调负荷的应用场景和规模。因此，如何将可调负荷纳入实时调度范畴，实现调度系统对可调负荷的实时感知和秒级实时控制，满足负荷资源参与电网调频要求，是当前负荷调度控制领域亟待解决的问题^[27]。

电动汽车作为一种移动储能设备，具有响应速度快、调节灵活的优势。聚合后的规模化电动汽车充放电负荷实时可调节潜力巨大，具备参与系统频率调整的能力^[28-30]。为此，本文以电动汽车参与电网调频为应用场景，依托西南电网源网荷储多级协同调控示范工程，研究并提出了可调负荷参与多级电网实时调控的系统架构，通过构建安全接入区、研发多元负荷调控终端等关键技术，实现了多级调

度系统对负荷终端的秒级连续控制，并在西南、重庆电网开展了工程实际应用，为可调负荷参与多级调频、调峰等辅助服务市场提供可靠技术支撑。

1 总体思路

要实现可调负荷参与电网调频，达到与传统水电、火电机组相似的调频能力，必须构建高效实时的技术支撑系统，使可调负荷在短时间尺度做到快速、精确的功率调节，以秒级对电力系统的频率变化做出快速响应。因此，为满足可调负荷参与电网调频要求，负荷调控技术支撑系统架构设计应遵循以下原则。

1) 直采直控。为达到秒级响应能力，应借鉴传统调节资源参与电网调频思路，依托先进的信息通信技术，按照“直采直控”原则，实现可调负荷的实时感知和高效调控。

2) 负荷聚合。可调负荷资源一般分布于电网末端配网侧，具有电压等级低、单体容量小、点多面广等特点，这些分散的单体负荷资源必须通过聚合达到一定电力规模后方能参与电网调频。

3) 安全接入。可调负荷资源大多不具备电力调度数据网方式的接入条件，需要通过互联网与调度端进行数据通信，应设置合理的物理隔离区来阻隔来自终端采集控制网络的安全风险，确保与调度接入网络的安全互联和数据交互。同时要通过硬加密，如加密卡或纵向加密装置等方式，满足信息系统安全防护等级要求。

2 系统架构

可调负荷参与多级电网实时调控系统架构如图 1 所示。该架构总体上分为三层，即调度中心层、负荷聚合层、负荷终端层。

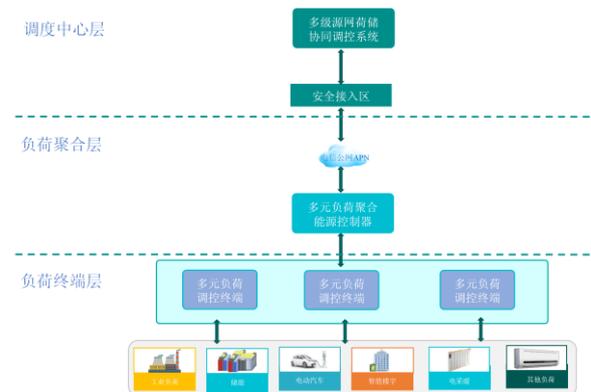


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

2.1 调度中心层

多级源网荷储协同调控系统基于 D5000 基础平台, 构建分中心、省调两级负荷调度控制系统。系统功能如图 2 所示, 包括负荷实时控制和负荷运行管理两大功能。

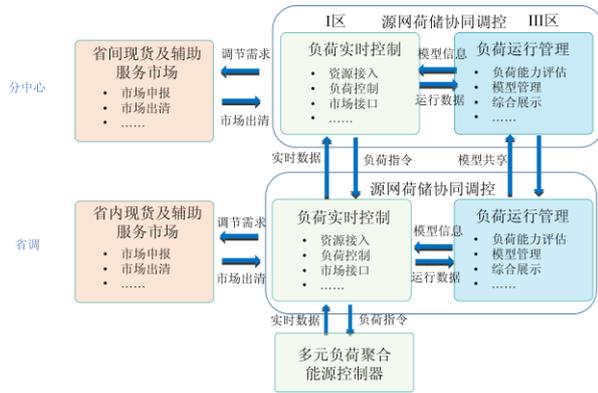


图 2 系统功能

Fig. 2 System functionality

负荷实时控制功能部署在生产控制大区 I 区, 包含负荷资源接入、负荷控制、市场接口等模块, 实现多级调度对可调负荷资源实时采集、汇聚监视和调节控制, 接收现货及辅助服务市场的出清结果, 向负荷运行管理功能提供实时及运行数据。

负荷运行管理功能部署在管理信息大区 III 区, 包含负荷能力评估、模型管理、信息发布以及综合展示等模块, 实现多级调度间可调负荷资源的模型数据共享和综合展示, 同时向负荷实时控制功能提供模型数据。

2.2 负荷聚合层

目前可调节负荷资源的聚合主要依靠各类负荷聚合商平台实现, 比如电网公司内部的智慧能源服务平台、智慧车联网平台以及社会第三方聚合商运营平台。但上述平台均部署于 IV 区或互联网, 与位于 I 区的源网荷储协同调控系统进行跨区数据交互和控制指令交互时, 存在传输环节多、交互效率低等问题, 就调节时间来说仍然处于分钟级别, 无法支撑调频等快速响应应用场景。

多元负荷聚合能源路由支撑可调负荷的实时优化调度与控制。对商业楼宇、储能、充电桩和工业企业等场景下海量离散负荷资源进行采集和汇聚, 下行对接工业 DCS、楼宇 BA 系统、储能 PCS 系统和多元负荷调控终端, 兼容多设备物理接口, 支持多协议接入功能, 具备灵活负荷可调节能力评估功能, 对基值负荷进行预测, 计算负荷可调节量上限、下限, 并编制负荷控制预案, 制定负荷控制

策略。

通过多元负荷聚合能源控制器, 实现地区电网内不同类型、不同特性的可调节单体资源汇集和区域内优化控制, 对上响应调度中心层的负荷控制指令和数据获取需求, 解决资源数量众多、种类多样、部分单体容量偏小的问题。

2.3 负荷终端层

多元负荷调控终端(图 3)支持多协议多场景应用, 实现商业楼宇、储能、充电桩和工业企业不同类型的用能设备、监测表计、传感设备的互联与信息感知, 具备能源数据采集、处理、储存、控制的功能。多元负荷调控终端采用模组化设计, 实时感知电桩运行数据, 包括当运行状态、当前负荷、可充电时间、SOC、上调裕度、下调裕度等。同时可实时响应多元负荷终端下发的调控指令。

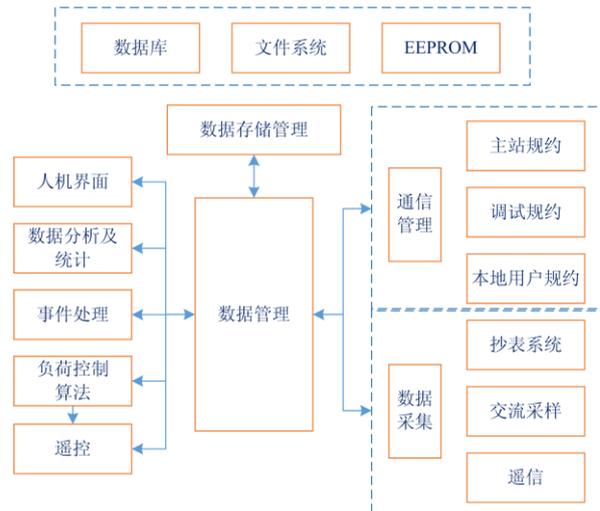


图 3 多元负荷调控终端架构图

Fig. 3 Architecture diagram of multiple load control terminal

多元负荷调控终端实现负荷“桩控”、“站控”两种方式, 支撑可调负荷参与多级调频、调峰等应用需求。“桩控”方式下, 多元负荷控制终端透明转发调控指令, 充电桩直接响应调度对充电桩调控指令; “站控”模式下, 多元负荷控制终端根据充电桩实时感知状态, 将调控指令分解后选择本地预先制定的最优策略调控充电桩充电负荷。

3 关键技术

3.1 基于 AGC 的负荷调控策略

在可调负荷参与区域电网调频辅助服务场景下, 负荷控制的主要技术路线为基于现有自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)^[31]功能, 将可调负荷纳入 AGC 控制对象的范畴。针对负荷

侧可调资源的控制特性,进行控制参数建模,以多元负荷聚合能源控制器聚合信息为虚拟功率控制机组单元。

针对西南电网频率控制的要求,可调负荷主要从以下方面参与到电网调控之中。

1) 省级电网有功平衡控制

除了 AGC 系统中设置的主要控制参数以外,实时控制还需要结合各控制单元实时上送的调节上限、调节下限、荷电状态(State of Charge, SOC)等遥测信号,以及可充电、可放电等遥信信号,使其与常规 AGC 机组共同参与到日常区域控制偏差(Area Control Error, ACE)的控制中。省级电网控制区 ACE 的计算方法为

$$E_{ACE} = -10B(f_a - f_s) + (P_a - P_s) \quad (1)$$

式中: E_{ACE} 为控制区的 ACE; B 为控制区的频率偏差系数; f_a 为电网实际频率; f_s 为电网计划频率,一般取 50 Hz; P_a 为控制区对外联络线实际潮流总和; P_s 为控制区对外联络线总计划值。

控制策略设计为:当电网频率偏高,区域控制偏差 ACE 处于正向次紧急区域时,下发向下调频指令,增加可调负荷用电功率;当电网频率偏低,ACE 处于负向次紧急区域时,下发向上调频指令,减少可调负荷用电功率。然后以调节方向、调节裕度、调节频次作为分配量化指标,按优先级,将调频指令实时分配至每个虚拟功率控制机组单元(多元负荷调控终端),最终由多元负荷调控终端完成可调负荷功率的闭环调节。

2) 多级调度故障协同控制

特高压/高压直流、国调直调电厂等西南电力调度控制分中心(以下简称“西南分中心”)管辖设备故障后,需要调用区域电网所有的可调资源对频率进行恢复,发挥多级调度协同处置能力^[32]。

在分-省两级调度协同实现上,西南分中心基于 D5000 系统的综合智能告警、辅助决策和 AGC 功能,通过事件驱动方式,结合西南电网现有控制措施,根据综合智能告警发出的故障信息驱动故障协同控制。在实时控制层面:首先,通过多级调度通信方式以直接调用省市调 AGC 系统中的可调负荷;然后,在故障发生 10~15 s 修改西南分中心直调电厂 AGC 控制模式由跟踪计划(Schedule with off-Regulation, SCHEO)转为调频(Automatic basepoint with Regulation, AUTOR);最后,通过动态 ACE 在故障发生 15~30 s 后修改联络线计划,在省级电网之间分摊故障缺额,使得各省级电网 AGC 系统承担功率缺额。则特定故障发生后,功率缺额

承担方式为

$$\Delta P_{loss} = \Delta P_{FRC} + \Delta P_{FC} + \Delta P_{EV} + \Delta P_{CG} \quad (2)$$

式中: ΔP_{FRC} 为一次调频调节量; ΔP_{FC} 为直流频率控制调节量; ΔP_{EV} 为全网可调负荷调节量; ΔP_{CG} 为分-省两级调度常规 AGC 机组调节量。

待频率恢复后,在计划层面逐步修改联络线、电厂发电计划,释放 AGC 调节空间。

3.2 基于实时规约的多级负荷信息交互技术

1) 跨安全区的负荷采集双向实时交互技术

在生产控制大区外建立安全接入区,部署正反向物理隔离,直接经纵向加密装置、电信 APN 网络和多元负荷控制终端建链通信。

下行层面由上层应用形成和发起处置策略,将调控指令通过消息发送至后置服务器,后置服务器部署 104 规约,改造为单向无返回模式,实现调控指令直接穿透正向物理隔离到多元负荷控制终端,形成直控点对点模式。

上行层面多元负荷控制终端实时获取调节结果后,形成标准化文件,落地到前置服务器,自动实时扫描,经反向物理隔离,再返送至生产控制大区。生产控制大区实时解析文件后进行分析展示处理。

借助调控指令的单向点对点直通传输结构,利用多元负荷控制终端内部通信模块的规约适应性,彻底消除跨安全区的控制指令下发时效性瓶颈,真正实现源网荷储负荷调控直控模式,可以有效支撑调频应用场景的需求。

2) 跨层级的多级协同交互技术

基于分省两级 D5000 系统间高速互联通信交互机制,构建负荷模型、实时数据和控制指令的多级协同互动体系,灵活高效支撑源网荷储体系中的各类应用需求场景。

负荷模型交互按照“源端维护,多级共享”的原则,由多元负荷聚合能源控制器发起,以文件形式按标准化格式动态上送至省调系统,实现自动解析和就地存储,同时经省调三区以小邮件方式发送至分中心系统三区,保证分中心层面负荷模型的感知和解析入库。

实时数据采集上行交互首先由省级系统负责采集本地区负荷信息,并通过 DL476 规约实时转发至分中心系统,实现分省两级负荷实时信息共享。

实时调节指令下行交互可由分中心系统根据电网调频需求,通过 DL476 规约,将功率调节量及方向下发至省调系统,再由省调系统通过直控模式传递至负荷终端层,实现对负荷的快速控制。同时

省调系统也可根据自身调频需求, 下发控制指令至负荷终端层。

3.3 基于物理隔离的网络安全防护技术

为实现调度主站安全 I 区前置服务器与可调节负荷资源单体的端到端通信数据的机密性、完整性的保护以及各网络边界的通信安全, 在调度安全 I 区与安全接入区之间部署网络安全物理隔离装置, 在安全接入区与公网边界、公网边界至终端部署相应的纵向加密认证装置, 具体结构如图 4 所示。

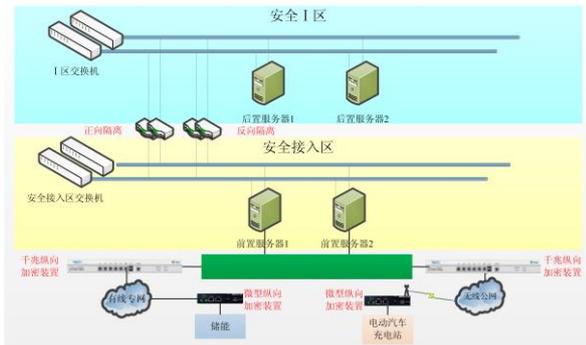


图 4 安全接入区结构

Fig. 4 Structure of secure access zone

1) 在调度安全 I 区部署两台后置服务器, 均连接至安全 I 区的局域网交换机上, 两台后置服务器实现冗余互备功能。

2) 在调度安全 I 区和安全接入区之间部署两台正向和两台反向隔离装置实现双机冗余。正向和反向隔离装置的内网侧连接至调度安全 I 区的局域网交换机上, 外网侧分别连接至安全接入区两台交换机上。正向物理隔离用于安全 I 区中的后置服务器的下行通信防护, 反向物理隔离用于前置服务器上文件信息的通信防护。

3) 在安全接入区中部署两台交换机, 实现冗余互备功能, 部署两台前置服务器, 实现双网双机。

4) 多元负荷聚合能源路由器对上借助电信公网 APN 与安全接入区相连。在安全接入区边界处部署千兆纵向加密认证装置, 在多元负荷调控终端发送侧部署微型纵向加密装置, 通过两侧加密装置的配对使用, 实现通信数据在无线公网中传输时的数据加解密。

4 工程验证

4.1 总体情况

基于本文研究成果, 试点开展了西南电网源网荷储多级协同调控示范工程建设, 完成可调负荷参与多级电网实时调控技术支撑系统部署和整体联调

测试。截止目前, 依托本文所述的直控技术路线, 完成重庆民心佳园和空港 2 座充电站、4 个充电桩直采信息接入和闭环联调, 试验结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 负荷降功率控制试验结果

Table 1 Test results of load raising power control

控制对象	初始功率/ kW	目标功率/ kW	响应功率/ kW	指令传 输时长/ s	指令执 行时长/ s	总时 长/s
民心佳园站	28.34	10	9.86	26	1	27
民心佳园站	20.02	5.5	5.43	28	1	29
民心佳园站	41	10	9.79	26	1	27
民心佳园站	29.87	5	4.83	25	1	26
民心佳园 1#桩	16.27	2	1.97	22	1	23
民心佳园 1#桩	14.97	5	4.99	23	1	24
空港站	44.44	5	4.89	17	1	18
空港站	39.96	10	9.86	17	1	18
空港站	29.93	5	4.89	18	1	19
空港 2#桩	9.97	5	5.01	23	1	24
空港 2#桩	34.97	5	4.93	28	1	29
空港 2#桩	19.99	10	9.93	17	1	18
空港 2#桩	14.98	5	4.97	22	1	23

表 2 负荷升功率控制试验结果

Table 2 Test results of load raising power control

控制对象	初始功率/ kW	目标功率/ kW	响应功率/ kW	指令接收 时长/s	指令执行 时长/s	总时 长/s
民心佳园站	10	20	19.31	26	17	43
民心佳园站	9.85	30	29.85	21	26	47
民心佳园站	4.79	40	39.92	18	47	65
民心佳园 1#桩	1.93	15	14.98	19	29	48
民心佳园 1#桩	4.91	15	14.96	21	22	43
空港站	9.9	30	29.97	30	45	75
空港 1#桩	1.93	10	9.97	17	17	34
空港 1#桩	4.93	20	19.97	30	33	63
空港 1#桩	9.94	15	14.88	22	8	30

试验结果表明, 电动汽车参与区域电网调频降负荷平均响应时间为 23.5 s, 增减负荷平均响应时间为 49.8 s。

4.2 典型案例分析

以 2020 年 12 月 2 日空港充电站参与西南电网调频试验为例, 详细分析负荷控制效果, 如图 5 所示。空港充电站初始充电功率 39.96 kW, 15:33:14

西南分中心下发调频指令,目标功率为10 kW,调节量为29.96 kW;15:33:26多元负荷调控终端接收到调度指令,并通过指令分解下发至受控充电桩;15:33:31充电桩开始响应调度指令,15:33:32完成充电负荷功率调节,下调至9.86 kW。全过程闭环

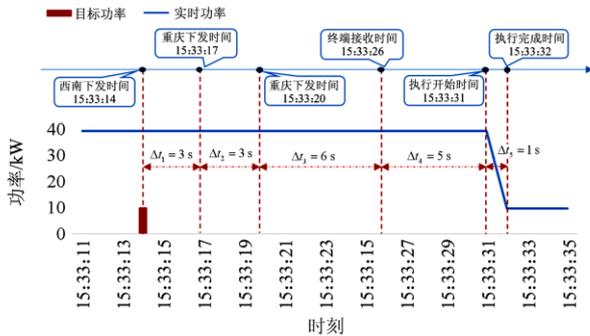


图5 全过程闭环控制响应时间

Fig. 5 Response time of whole proposes closed loop control

控制总耗时18 s,其中指令传输耗时17 s,指令执行耗时1 s,调节速率29.96 kW/s,调节精度99.53%。

由此表明,依托本文所述的负荷直采直控技术,实现了调度系统对可调负荷的实时感知和秒级连续闭环控制,达到了传统机组相似的二次调频能力。

4.3 与非直控技术的控制效果对比分析

选取重庆地区的金康充电站开展非直控验证,即通过负荷实时控制功能,将控制指令穿过安全I区、III区、IV区到负荷聚合商平台,由负荷聚合商平台再将指令通过互联网方式分解至充电桩。两种控制技术的控制效果对比分析如表3所示。

试验对比分析说明,本文所采用的直控技术明显优于传统的非直控技术,将可调负荷参与电网调节的响应速度由分钟级提升至秒级,有效拓展了负荷参与电网运行调节的应用场景。

表3 直控与非直控技术的控制效果对比分析

Table 3 Comparative analysis of control effect between direct control and non direct control technology

控制方式	控制对象	初始功率/kW	目标功率/kW	响应功率/kW	指令下发	预置返回	确认执行	执行返回	数据变化	总时长/s
直控	民心佳园1#桩	16.27	2	1.97	15:45:30	15:45:32	15:45:32	15:45:36	15:45:53	23
	空港1#桩	1.93	10	9.97	15:42:50	15:42:52	15:42:52	15:43:02	15:43:24	34
非直控	金康1#桩	15.48	2	1.96	15:57:26	15:58:12	15:58:18	15:59:06	16:04:21	415
	金康2#桩	1.96	10	9.97	16:20:12	16:21:09	16:21:17	16:22:06	16:29:36	564

5 结论

本文以电动汽车参与电网调频为应用场景,提出了可调负荷参与多级电网实时调控的系统架构和关键技术,并通过示范工程实践,对比验证了本文所提直控技术路线的有效性和优越性。

目前,国内外关于负荷调度控制领域相关研究仍处于起步阶段,要真正意义上实现大规模可调负荷常态化参与电网实时调控,还需要从技术支撑和市场机制两个方面开展深入研究。

1) 在技术支撑方面,完善多元负荷调控终端功能,攻克海量负荷汇集接入、可调能力预测评估、调度指令优化分解等关键技术,支撑海量负荷分层分区聚合接入和灵活控制;探索多元负荷调控终端高效穿透正、反向隔离装置数据传输技术,进一步提升可调负荷与电网实时互动效率,切实为海量负荷参与电网实时调控提供可靠技术支撑。

2) 在市场机制方面,目前可调负荷资源参与市场化运行的机制还不完善,主要依靠政府、电网公司补贴。下一步亟需从价格机制、奖惩机制等方面研究可持续发展的商业模式与市场机制,通过市场化方式引导负荷侧资源积极参与电网调节,支撑可

调负荷应用常态化、规模化发展。

参考文献

[1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[2] 葛维春,蒋建民,蒲天骄,等.现代电力系统功率自动控制[M].北京:中国水利水电出版社,2020.

[3] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

[4] 王灿,吴耀文,孙建军,等.基于柔性多状态开关的主动配电网双层负荷均衡方法[J].电力系统自动化,2021,45(8):77-85.
WANG Can, WU Yaowen, SUN Jianjun, et al. Bi-layer load balancing method in active distribution network

- based on flexible multi-state switch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 77-85.
- [5] DEBBARMA S, DUTTA A. Utilizing electric vehicles for LFC in restructured power systems using fractional order controller[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 2554-2564.
- [6] 王李龔, 许强, 黄开艺, 等. 计及新能源及负荷不确定性的多能微网系统两阶段随机规划方法[J]. *电力建设*, 2020, 41(4): 100-108.
WANG Liyan, XU Qiang, HUANG Kaiyi, et al. A two-stage stochastic programming method for multi-energy microgrid system considering the uncertainty of new energy and load[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(4): 100-108.
- [7] 朱溪, 曾博, 徐豪, 等. 一种面向配电网负荷恢复力提升的多能源供需资源综合配置优化方法[J]. *中国电力*, 2021, 54(7): 46-55.
ZHU Xi, ZENG Bo, XU Hao, et al. An integrated optimal allocation method of multi-energy supply and demand side resources for load resilience enhancement of distribution system[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 46-55.
- [8] 吕振华, 李强, 韩华春, 等. 计及源荷不确定性和多类储能响应的园区 IES 多目标优化调度模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 40-50.
LÜ Zhenhua, LI Qiang, HAN Huachun, et al. Multi-objective optimal scheduling model for IES in parks considering source and load uncertainties and multiple type of energy storage responses[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 40-50.
- [9] 孙宏斌, 郭庆来, 文劲宇, 等. 能源互联网[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [10] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委国家能源局关于印发《推进并网型微电网建设试行办法》的通知[Z]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice of National Energy Administration of National Development and Reform Commission on printing and distributing the trial measures for promoting grid connected micro grid construction[Z]. Beijing: National Energy Administration, 2017.
- [11] 国家能源局. 完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案[Z]. 北京: 国家能源局, 2017.
National Energy Administration. Work plan for improving compensation (market) mechanism of auxiliary power services[Z]. Beijing: National Energy Administration, 2017.
- [12] BINA M T, AHMADI D. Stochastic modeling for the next day domestic demand response applications[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 2880-2893.
- [13] 包宇庆, 王蓓蓓, 李扬, 等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4589-4599.
BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4589-4599.
- [14] 周明, 殷毓灿, 黄越辉, 等. 考虑用户响应的动态尖峰电价及其博弈求解方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(11): 3348-3354.
ZHOU Ming, YIN Yucan, HUANG Yuehui, et al. Dynamic critical peak price and its gaming approach considering customers' response[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(11): 3348-3354.
- [15] 赵玉, 徐天奇, 李琰, 等. 基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 92-101.
ZHAO Yu, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 92-101.
- [16] 阎怀东, 马汝祥, 柳志航, 等. 计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 71-80.
YAN Huaidong, MA Ruxiang, LIU Zhihang, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch of electric vehicle charging station considering demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 71-80.
- [17] 祁江浩, 李凤婷, 张高航. 需求响应分段参与的多时间尺度源荷协调调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 61-69.
QI Jianghao, LI Fengting, ZHANG Gaohang. Multi-time scale scheduling strategy for source-load coordination considering demand response block participation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 61-69.
- [18] 高赐威, 陈曦寒, 陈江华, 等. 我国电力需求响应的措施与应用方法[J]. *电力需求侧管理*, 2013, 15(1): 1-4, 6.
GAO Ciwei, CHEN Xihan, CHEN Jianghua, et al. Measures and application of China's demand response[J]. *Power Demand Side Management*, 2013, 15(1): 1-4, 6.
- [19] 张明明, 陈俊全, 王科, 等. 多时间尺度协调的有序用电集中决策方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(22): 70-77.
ZHANG Mingming, CHEN Junquan, WANG Ke, et al. A centralized decision method for multi-time scale coordinated orderly power consumption[J]. *Automation*

of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 70-77.

[20] 韩冰, 姚建国, 於益军, 等. 负荷主动响应对特高压受端电网直流闭锁故障的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 1-6.
HAN Bing, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Discussion on active load response at receiving end power grid for mitigating UHVDC blocking fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 1-6.

[21] 吴雪莲, 李兆伟, 刘福锁, 等. 大功率扰动下计及系统频率分布特性的紧急控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 104-114.
WU Xuelian, LI Zhaowei, LIU Fusuo, et al. Analysis of the emergency control strategy of system frequency considering system frequency distribution characteristics under large power disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 104-114.

[22] 史军, 王加澍, 熊峰, 等. 基于智能负载的微电网精准切负荷控制策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 103-109.
SHI Jun, WANG Jiashu, XIONG Feng, et al. Load-shedding control strategy of microgrid based on smart loads[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 103-109.

[23] 毛文博, 王珂, 刘建涛, 等. 大用户移峰负荷调控策略与建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 68-73.
MAO Wenbo, WANG Ke, LIU Jiantao, et al. Dispatching strategy and modeling of shiftable loads for large-scale electric consumers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9): 68-73.

[24] 陆婷婷, 高赐威, 苏卫华, 等. 有序用电避峰预案优化编制方法研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2315-2321.
LU Tingting, GAO Ciwei, SU Weihua, et al. Research on drafting of optimal peak averting planning for ordered power utilization[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2315-2321.

[25] 陈庆, 闪鑫, 罗建裕, 等. 特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 147-152.
CHEN Qing, SHAN Xin, LUO Jianyu, et al. Source-grid-load coordinated control strategy and its application under UHVDC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 147-152.

[26] 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): 1-6.
NING Jian, JIANG Changming, ZHANG Zhe, et al. Thinking and technical practice of adjustable load resources participating in dispatching and control power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 1-6.

[27] LOPES J A P, SOARES F J, ALMEIA P M R. Integration of electric vehicles in the electric power system[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 168-183.

[28] TENG F, DING Z, HU Z et al. Technical review on advanced approaches for electric vehicle charging demand management, part I: applications in electric power market and renewable energy integration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5684-5694.

[29] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.

[30] LIU H, HUANG K, YANG Y, et al. Real-time vehicle-to-grid control for frequency regulation with high frequency regulating signal[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 141-148.

[31] 滕贤亮, 高宗和, 朱斌, 等. 智能电网调度控制系统 AGC 需求分析及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 81-87.
TENG Xianliang, GAO Zonghe, ZHU Bin, et al. Requirements analysis and key technologies for automatic generation control for smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 81-87.

[32] 闪鑫, 王轶禹, 金一丁, 等. 特高压互联电网一体化监视和故障协同处置方案及应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 84-91.
SHAN Xin, WANG Yiyu, JIN Yiding, et al. Scheme and application of integrated monitoring and fault co-disposal technology of UHV interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 84-91.

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-10-15

作者简介:

兰强(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网自动控制、负荷调度控制; E-mail: 286413646@qq.com

周宇晴(1988—), 男, 本科, 主要研究方向为电网调度自动化、配网自动化; E-mail: 76294029@qq.com

邱燕军(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度自动化系统。E-mail: 472522841@qq.com

(编辑 葛艳娜)