

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.09.010

光储协同综合智慧能源站自动 功率控制系统研究

Research on the automatic power control system of the photovoltaic-storage collaborative
integrated smart energy station

陈晓英¹, 楼继开¹, 邱亚鸣^{2*}, 胡静², 陆裔晨¹, 岑焱¹, 雷顶¹

CHEN Xiaoying¹, LOU Jikai¹, QIU Yaming^{2*}, HU Jing², LU Yichen¹, CEN Yao¹, LEI Ding¹

(1.上海漕泾热电有限责任公司, 上海 201507; 2.上海明华电力科技有限公司, 上海 200090)

(1.Shanghai Caojing Thermal Power Company Limited, Shanghai 201507, China; 2.Shanghai Minghua Electric Power
Science & Technology Company Limited, Shanghai 200090, China)

摘要:为使可调节负荷参与电力市场辅助服务期间收益最大化,提升可调节负荷的自动控制水平势在必行。针对可调节容量相对较大、响应速度相对较快的光储协同综合智慧能源,在分析《华东区域电力并网运行管理实施细则》《华东区域电力辅助服务管理实施细则》对可调节负荷相关考核补偿指标要求的基础上,提出综合智慧能源控制系统参与自动功率控制(APC)辅助服务应具备的基本条件,构建“多尺度负荷预测-APC响应策略寻优-底层协同控制”完整的控制系统架构,制定三层控制系统架构的程序部署方式,并给出典型系统的监控画面。项目实践表明,该控制系统能够实现光储协同综合智慧能源的全自动、经济地APC响应,为类似园区型综合智慧能源站参与APC辅助服务提供了参考,对底层控制系统层面的研究有借鉴意义。

关键词:综合智慧能源;光储协同;可调节负荷;辅助服务电力市场;自动功率控制;新型电力系统

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2023)09-0077-09

Abstract: To maximize the revenue of adjustable loads participating in power market ancillary services, it is imperative to enhance the automatic control on adjustable loads. In view of the large adjustable capacity and fast response speed of photovoltaic-storage collaborative smart energy systems, the basic requirements for the integrated smart energy's control systems participating in automatic power control (APC) ancillary services are proposed based on the adjustable load assessment and compensation indicators in the *Implementation Measures for East China Regional Power Grid Operation Management* and *Implementation Measures for East China Regional Power Ancillary Service Management*. Then, a complete three-level control system architecture is constructed, including multi-scale load forecasting, APC response strategy optimization and bottom-level collaborative control. The deployment and typical monitoring interfaces of the control system are given. Project practices show that this control system can achieve fully automatic and economic APC response for photovoltaic-storage collaborative smart energy, providing reference for similar park-type integrated smart energy stations participating in APC ancillary services and the design of bottom-level control system.

Keywords: integrated smart energy; photovoltaic-storage collaboration; adjustable load; electric auxiliary service market; automatic power control; new power system

0 引言

随着我国新型电力系统建设的推进,电力辅助服务市场中的市场主体类型正在不断发展^[1-3]。新型电力系统建设将传统单一的发电侧并网主体逐渐扩充为包括发电侧、可调节负荷和新型储能等多种共存的并网主体。在这些主体中,可调节负荷参与电力市场辅助服务的行为具有开创性意义,意味

着传统“源随荷动”的模式将被“源荷互动协同”的新模式取代^[4-6],对电力市场的发展和电网运行方式产生深远影响。目前,我国已有超过10个省(市)陆续发布相关交易规则,并开始进行模拟试运行,以激发可调节负荷资源主动参与提供电力市场辅助服务的积极性^[7-9]。

可调节负荷资源的控制系统是实现其作为稳定电网调节资源并提供辅助服务的重要基础^[10-12]。

然而,当前不同类型可调节负荷调控系统的自动化水平差异较大。2022年5月发布的DL/T 2473.3—2022《可调节负荷并网运行与控制技术规范 第3部分:负荷调控系统》对相应调控系统提出了一系列要求^[13],某些特定类型的可调节负荷仍存在实际技术问题,有待进一步研究。

当前,以负荷聚合商、虚拟电厂和电动汽车平台为代表的可调节负荷呈现出显著的集群调节潜力^[14-16]。其中负荷聚合商整合了传统可调负荷、分布式发电、储能设备等需求侧资源,是中小型用户参与电力辅助服务市场的重要载体^[17-18]。文献[19]对负荷聚合商需求响应管控平台进行了开发与应用,建立对代理用户进行负荷监测、控制的手段;文献[20]建立了面向控制的聚合变频空调负荷模型,并设计了基于反推控制的聚合变频空调功率跟踪控制算法;文献[21]构建了基于电采暖负荷聚合商的分层协调调度架构,将电采暖负荷纳入系统调度中,构建了电采暖负荷参与平抑风电波动的调度模型;文献[18]将电能储存装置与电动汽车储能技术应用于负荷聚合商日前市场运营,提出了考虑储能装置的负荷聚合商日前市场运营策略;文献[17]分析了光伏功率预测精度对负荷聚合商日前投标价格的影响;文献[22]提出基于可控裕度指标的柔性负荷状态序列控制方法,解决了异构负荷的协同控制问题。

目前,负荷聚合商参与电力辅助服务市场的研究主要集中在组成架构、调度策略、协同控制策略、综合管控平台和市场运营策略等方面^[23]。而如何在底层控制系统层面构建高效的负荷聚合商控制系统,从而提高其自动功率控制(Automatic Power Control, APC)辅助服务性能的不足,仍是需要解决的问题。因此,本文基于对APC辅助服务控制要求的分析理解,研究一种光储协同综合智慧能源负荷聚合商控制系统的构建方式,实现APC指令高性能全自动执行。该控制系统能够有效减少APC响应过程中的人为干预,提高APC响应性能,为类似的园区型综合智慧能源站参与APC辅助服务提供参考。

1 光储协同综合智慧能源站

1.1 系统结构

本文的光储协同综合智慧能源站位于某化学工业区的化工新材料创新基地。能源站基于园区内热电厂蒸汽冷凝热水余热梯级利用和光伏发电,向园区提供低价、高质的冷/热能、有功备用、无功支

撑,以打造低碳节能的绿色生态园区。

同时,作为整个园区大体量冷、热能的供应枢纽,能源站通过控制站内制冷设备的运行方式及电储能充放功率,可以对空调负荷、分布式发电和储能设备等需求侧资源进行深度整合,具有较强的电力辅助服务市场APC响应潜力。

1.2 系统配置

该光储协同综合智慧能源站(如图1所示)配置有光伏设备、2套磷酸铁锂电池、1套热水型溴化锂制冷机组、2套离心式冷水机组、1套水-水热交换设备、2套汽-水热交换设备、1套容量蓄能水罐等多种需求侧资源。相比于园区的用电负荷,能源站光伏容量和电储能容量都较小。因此,能源站电力供应依赖直接接入创新中心配电站的10 kV母线,如图2所示。能源站的母线采用分段母线方式,正常运行情况下与科创基地企业用户母线各自通过10 kV/400 V 配电变压器接入不同段的10 kV 母线中,同时,储能、光伏及能源站的制冷/制热设备均接入能源站交流母线,进而构成了一个电力微网。

光伏发电可供能源站内部自用,也可向园区、甚至电网供电。电储能设备和能源站母线可进行双向电力交互,运行方式灵活,可以快速调节园区内的电力生产和供应。园区供热分别通过汽-水板式换热器、水-水板式换热器与供热蒸汽、蒸汽回凝水实现换热,园区供冷既可用热水型溴化锂机组对蒸汽回凝水进行梯级利用获取,也可直接由离心式冷机电制冷完成,大容量的水蓄能装置为光储协同综合智慧能源站参与电力市场APC辅助服务提供了保障,能源站进行APC响应时,能够维持对外供冷、供热的稳定。

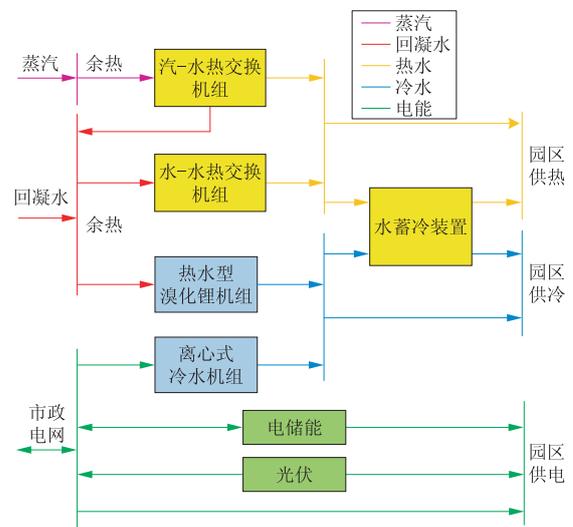


图1 光储协同综合智慧能源站能量流

Fig. 1 Energy flows of the integrated intelligent energy system with photovoltaic and energy storage units

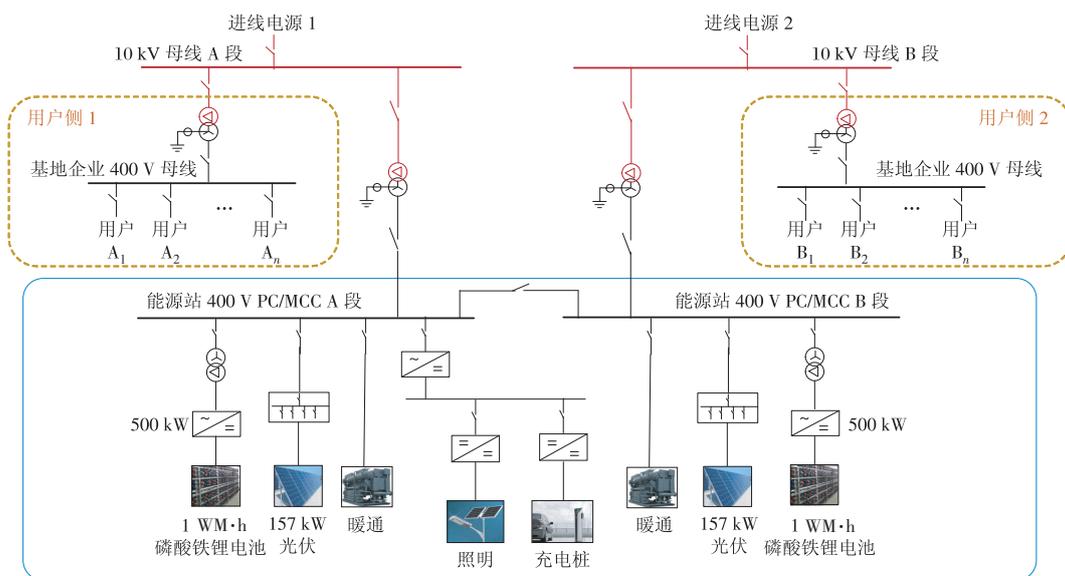


图 2 园区电力系统接入示意

Fig. 2 Layout of the power system for the park

2 电力市场 APC 控制要求

APC 已被多个地区纳入有偿辅助服务。与传统的自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 相比, APC 特指针对负荷侧聚合商平台接入的可调节负荷下达实时调节指令。

作为新的并网主体, 负荷聚合商参与 APC 既能获得补偿, 也面临着考核。以 2022 年华东地区发布

的模拟试运行版“两个细则”(《华北区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华北区域发电厂并网运行管理实施细则》)为例, 研究分析负荷聚合商参与 APC 的考核要求和补偿标准。光储协同综合智慧能源站作为负荷聚合商参与 APC, 对能源站控制系统的数据采集、通信、控制设备范围、协同控制自动化程度、调节控制正确性与精度等均提出了较高要求, 见表 1。

表 1 对参与 APC 负荷聚合商控制系统的要求

Table 1 Requirements for control system of load aggregators participating in APC

| 研究项目 | 对控制系统的要求 | |
|------|----------|--|
| 考核要求 | 反向调节 | 协调需求侧资源正确地响应调节指令 |
| | 过度调节 | 准确控制需求侧资源的响应精度 |
| | 延时响应 | 高效组织完成需求侧资源控制调节 |
| | 隐瞒虚假 | 控制系统稳定运行 |
| 补偿 | 基本补偿 | 提高能源站可调节容量 |
| | 调用补偿 | 协同控制需求侧资源, 增加单次 APC 响应的里程; 选择控制合适的需求侧资源进行响应, 提高参与 APC 响应频次 |

基于上述考核条目, 为降低考核费用, 应确保能源站控制系统数据采集正确、与调度控制主站通信正常、具备快速且准确协调需求侧资源响应 APC 调节指令的功能, 避免出现功率过调与反调, 将 APC 响应整体时间控制在 10 s 内, 保障能源站安全、稳定、高效运行; 为增加补偿收入, 应尽可能多地将需求侧可调节资源纳入控制系统, 提高能源站的可调节容量, 并通过合理的协同控制, 提高响应频次, 增加单次 APC 响应里程。

3 参与 APC 的综合智慧能源控制系统设计

本文在分析 APC 需求的基础上, 提出了综合智

慧能源控制系统参与 APC 辅助服务应具备的基本条件, 并设计了完整的控制系统架构。

3.1 基础条件

为了使综合智慧能源站更有效地参与 APC 辅助服务响应, 进一步增加 APC 补偿收入的潜能, 对负荷设备自动化控制、平台间实时双向通信以及能量表计合理布置等关键技术要素进行设计。

3.1.1 负荷设备自动化控制

综合智慧能源站内设备的远程操纵功能是其参与 APC 的重要基础。为实现提高可调节负荷容量, 增加基本补偿费用, 需要将制能、储能、供能等子系统在切换、启停顺控中涉及的所有阀门、水泵、

主机、电气开关、储能变流器 (Power Conversion System, PCS) 等设备纳入控制系统。

为实现此目标,分散控制系统 (Distributed Control System, DCS) 应配备可靠的高性能控制器和 workstation,并提供通用通信接口,以便与第三方负荷预测、响应策略寻优等应用模块交互。

3.1.2 能量表计布置合理

为分析 APC 响应过程中综合智慧能源站的响应情况,需要对能源站内部各子系统以及能源站外部各地块用户的用电、用能数据进行测量和统计。这涉及能量表计的布置和精确计量,以建立可靠的数据采集和传输系统。通过对数据进行分析 and 处理,可以更深入地了解综合智慧能源站在 APC 负荷响应过程中的情况,从而进一步优化能源站的运行。

3.1.3 平台间实时双向通信

综合智慧能源站参与 APC 控制需要能源站控制系统与负荷聚合商平台间、负荷聚合商平台与调度主站间的双向、可靠、实时通信。这种双向通信可以确保控制系统准确、及时地接收 APC 负荷控制指令并将可调节容量、APC 响应数据上传给聚合商平台,完成调度主站对综合智慧能源站的考核补偿费用计算。为实现这种通信,需要建立可靠的通信网络和数据交互机制,保障信息安全。

3.2 控制系统基本架构

在满足基本条件的基础上,根据 APC 的需求,提出了综合智慧能源站“多尺度负荷预测-响应策略寻优-底层协同控制”3 层控制系统架构,实现自动、高效、经济的 APC 响应。(1)多时间尺度的负荷预测是实现经济性响应的前提,利用历史和实时数据,在不同时间尺度上预测未来负荷,以支持控制系统对可调节负荷容量进行精准调配。(2)APC 响应策略的自动寻优是实现经济性响应的核心,通过实时调整负荷响应适应电力供需情况,在保证 APC 辅助服务响应的前提下,将经济效益最大化。(3)底层协同控制是 APC 响应全程自动执行及其响应速度和精度的保障。通过 3 层的控制系统架构,综合智慧能源站能够更好地参与 APC 控制,并实现更高效、经济的运行。

3.2.1 多尺度负荷预测

为响应不同时间提前量的 APC 调度指令,建立能源站多时间尺度的用能预测模型。基于大数据和深度学习技术,建立适用于日前短期和日内超短期的能源站用户侧冷/热水用能和用电预测模型。模型可以准确预测能源站用户侧的用能需求,为能源站的运行管理和调度提供重要参考,有助于提高能源站的运行效率和经济性。

此外,结合现场试验数据,建立含供能管网和水槽的供用能系统的多能供需平衡时间特性模型,并按照设备类别(如内燃机、溴化锂、冷冻机等)建立相应的供能设备能效模型和用能响应特性模型,为能源站的用能调度响应提供更精准的数据支撑。

3.2.1.1 冷、热负荷分析

园区内空调供冷/热系统总体分为 2 期建设,目前整体处于第 1 期。随着新用户的不断接入,供能负荷呈现出较为明显的阶梯性特征。此外,不同类型建筑的用能习惯也存在较大差异,综合智慧能源站的负荷预测应综合供能面积和建筑类型开展。除酒店有全天用能需求外,其余用户上下班时段的用能负荷存在明显差异,休息日用能负荷与工作日下班后基本相同。此外,所有地块均存在冬季防寒防冻的最小供热需求。

根据测算结果,能源站第 1 期用户的冷负荷最大值可达 9 200 kW,热负荷可达 6 200 kW(如图 3 所示);第 2 期用户的冷负荷最大值较第 1 期约增加 1 524 kW,热负荷约增加 1 182 kW。

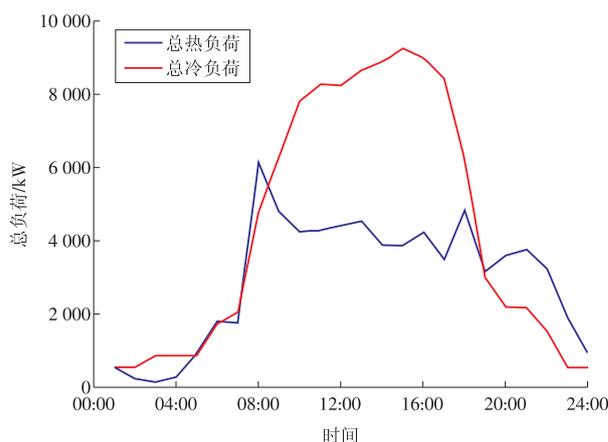


图 3 第 1 期用户典型日逐时冷、热负荷

Fig. 3 Hourly cold and hot loads of users at phase I on a typical day

3.2.1.2 电负荷分析

园区不同季节工作日与节假日的电力需求测算结果如图 4 所示。工作日用电功率变化幅度较大,节假日用电负荷相对稳定。创新中心供冷季、供热季和过渡季的工作日最大用电负荷分别约为 1 500, 1 200, 1 000 kW;而节假日最大用电负荷则分别约为 900, 700, 450 kW。园区用电高峰时段通常出现在工作日 08:00—19:00;由于夏季用冷需求较大,电价谷时段(22:00—次日 06:00)是园区的另一个用电高峰,期间能源站内制冷机组用电功率较高。

3.2.1.3 光伏功率分析

本项目能源站建设有 314 kW 容量的光伏。根

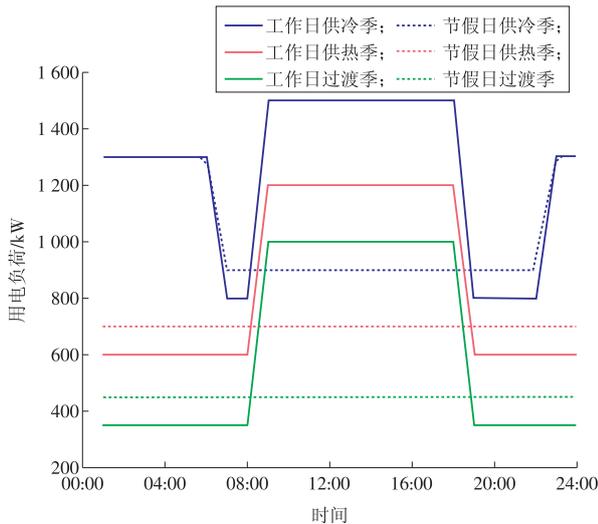


图4 各季节工作日与节假日电力需求

Fig. 4 Electricity demands on workdays and holidays in different seasons

据 PVsyst 模拟计算,全年最好条件下的光伏出力功率为 243 kW,可达装机容量的 77.39%,夏季光伏发电效率最高,逐月的最大光伏出力如图 5 所示。

根据电网公司管理要求,园区 10 kV 母线上网功率上限值为光伏装机容量。根据能源站与基地企业用户达成的协议,在电力微网内,能源站可按照电网价格的 9 折向基地企业出售电能,并按月结算。

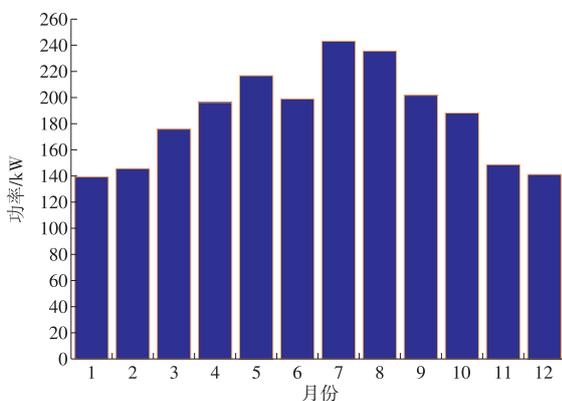


图5 逐月光伏最大出力特性

Fig. 5 Maximum monthly outputs of the photovoltaic system

3.2.2 APC 响应策略寻优

为满足不同紧急程度的用户负荷调度需求,制定能源站日前、日内 APC 经济响应策略。基于 APC 调度指令和能源站的用电、供能多时间尺度预测结果,结合设备能效模型与管网供需平衡时间特性,以能源站单日经济性最佳为目标函数,采用高级智能算法进行 APC 响应策略的寻优计算,制定能源站可执行的 APC 响应计划,以及相应的制能、供能设备运行策略。考虑到制冷设备的启、停过程时长通常在 20 min 以上,响应策略的时间间隔设置宜不小

于 30 min。

在日内响应策略方面,根据能源站内设备的实际运行方式和超短期用能负荷预测,以动态能量平衡为约束,结合冷热的慢响应特性和电的快响应特性,滚动计算未来 2 h(即 4 个间隔)APC 可响应的最大负荷。同时,根据各供能子系统的能效模型,对可响应 APC 的设备进行优先级排序,以确保能源站在响应 APC 负荷需求时能效水平更优。

在 APC 响应结束后,以尽快恢复已利用的冷热用户蓄能为目标,制定供能系统的恢复控制策略,以使供用能系统建立新的实时能量平衡。通过多时间尺度的 APC 经济响应策略,能源站能够更加高效地运行,并提高经济性和智能化水平。

3.2.3 底层协同控制

当能源站接收到 APC 指令时,为实现内部设备实时响应的控制需求,能源站应具备以下底层协同控制功能。

(1) 系统运行工况切换及设备启停的顺序控制。该过程相关设备包括制能系统、储能系统、供能系统的冷媒水泵一次泵、冷却水泵、一次泵出口阀、冷却水泵出口阀、冷却塔风机及进水门、板换阀门及输送泵、二次泵、PCS 等。

(2) 不同系统间顺序控制的相互调用,例如,制冷系统启停顺控中调用冷却塔风机系统启停顺序控制等。

(3) 根据调节目标,系统内母管制设备运行台数和控制参数可进行自动调节,例如,根据冷却塔出水温度设定值,冷却塔风机控制系统自动增减运行风机数量,自动调整风机风速挡位等。

(4) 二次泵用户负荷变化的自动匹配。该功能根据最不利压差设定值,自动增减运行台数,自动调整二次泵频率。

(5) 顺序控制的定时调用。按照 APC 响应计划时间进行定时自动启停,例如:到次日 09:00 自动执行制、供能系统的工况切换与启停。

(6) 光伏与电储能充放电功率的协同控制,使电储能的充放功率与光伏实发功率相匹配,精确控制出线功率,避免出现非预期的逆功率。

上述协同控制功能可以更加高效地控制内部设备,满足 APC 的负荷需求,缩短 APC 服务的响应时间。

4 应用案例分析

本文以前述科创基地光储协同综合智慧能源站为应用案例,设计控制架构,制定控制系统部署方案,并设计了 APC 指令交互、负荷预测、响应策略

计算、底层协同控制(以光储协同、二次泵控制为例)的监控画面。

4.1 控制系统架构设计

构建以能效模型及其优化调度为核心、光伏功率和用户站用能负荷预测为基础、底层源侧控制指令为结果的完整综合智慧能源 APC 辅助服务控制系统(如图 6 所示),全自动无缝执行能源站总体经济性最优(或综合目标最优)的 APC 响应策略。

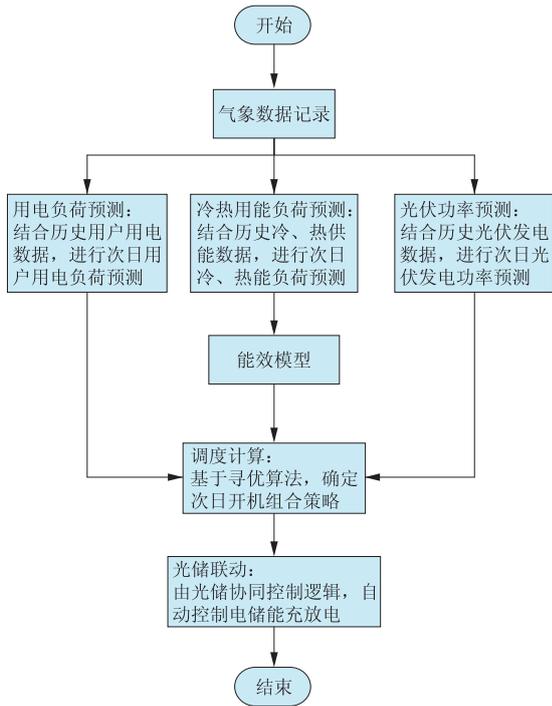


图 6 综合智慧能源站 APC 辅助服务控制系统架构

Fig. 6 Architecture of the APC auxiliary service control system in the integrated intelligent energy station

作为综合智慧能源站协同控制技术体系融合的关键桥梁,能效模型及优化调度需向上接收光伏、用户负荷预测结果,向下发送具体调度指令供源侧底层协同控制系统执行。根据光储协同综合智慧能源站 APC 辅助服务全自动运行的要求,规划了能效模型及优化调度的数据需求与接口关系。

在输入阶段,按照更新周期的长短,依次规划了设备运行参数、计算颗粒度、经济性参数、系统状态等 4 类数据。(1)设备运行参数包括设备额定功率、功率限制、功率变化速率限制、单位制能非用电成本、单位制能耗电量、启停机时长、折旧维护费用等,主要取决于设备本身且基本与投产前性能试验数据保持一直,更新周期较长。(2)根据设备调节能力及调度优化敏感性需求,设置合适的调度计算结果颗粒度,以确定调度指令的刷新间隔时长。负荷预测值的颗粒度应不低于优化调度计算结果。暖通设备的最小运行时长约为 30 min,远大于电储能

装置的调节时间,综合能源站系统整体优化调度计算采用 60 min 作为计算颗粒度较为合适。(3)购/售能源价格是影响调度计算结果的重要经济性参数,需要根据市场变化及时更新。(4)在调度计算程序执行前,需对能源站工艺系统状态进行检查,确认实际可运行系统数量及前一日蓄能水罐、储能电池储能余量,结合日前预测值参与当日调度策略的计算。

根据输入阶段确立的边界条件,建立线性等式、线性不等式及非线性约束条件,构建以供能成本和启停机惩罚费用最小为目标的混合整数二次规划模型,采用智能算法、分支定界、割平面等方法进行寻优计算。假设机组启停过程平均功率为 30% 额定功率,稳定运行功率为额定功率,等式约束包括能量供需实时平衡、储能装置剩余能量约束;线性不等式约束包括实际可运行系统数量范围、系统稳定运行制能功率范围、储能装置容量范围、调节速率范围、启停机次数;非线性约束包括母管制系统不能同时制冷制热、蓄能水罐不能同时蓄冷蓄热、储能装置不考虑边充边放。

寻优计算结果为所有制能设备的启/停机时间段计划和储能设备各个时间段的蓄/释能功率,根据寻优计算结果直接制定 APC 辅助服务响应策略,指导能源站的制能与供能。在运行人员授权后,该运行策略可以形成具体控制指令下发给控制系统,实现全自动运行。此外,可以基于优化运行策略对运行方式的经济效益进行自动统计,向运维人员提供直观的数据分析。

4.2 控制系统部署方案

考虑光储联动的园区型综合智慧能源站全自动协同控制系统的部署如图 7 所示。综合智慧能源管控系统负责完成负荷预测和优化调度计算,可采用 exe 软件格式直接安装在用于过程控制的对象链接和嵌入标准(Object Linking and Embedding for Process Control, OPC)服务器上运行,通过内部 OPC 通信完成管控系统与上位机控制软件的数据通信,上传系统运行状态边界数据,下发调度运行指令。OPC 服务器与控制器通过以太网通信,收集系统运行状态边界数据,转发下达调度运行指令。底层控制器接收调度运行指令,自动执行工况切换、启停机操作、模拟量控制,上传系统实时运行数据。

4.3 典型系统监控画面

能源站 APC 虚拟调度平台可与调度主站进行双向通信,接收 APC 的定时投退指令与负荷调节指令,上传站内可响应 APC 辅助服务的用电、供电双向容量信息及其相关设备的运行状态,APC 虚拟调

提出“多尺度负荷预测-响应策略寻优-底层协同控制”3层控制系统架构以满足综合智慧能源站高效、经济的APC控制需求,制定3层控制系统架构的程序部署方式,并给出典型系统的监控画面。项目实践表明,通过该控制系统,能够使光储协同综合智慧能源作为可调节负荷提供高性能的APC辅助服务,从而实现可调节负荷的经济价值最大化。

本文在控制系统层面探索了光储协同综合智慧能源参与电力市场APC辅助服务的升级改造方向,挖掘拓展了综合智慧能源的盈利模式,进一步释放了综合智慧能源的经济性优势,对于综合智慧能源的发展有较为重要的意义。

参考文献:

- [1]韩凝晖,周颖,石坤,等.面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析[J].电力需求侧管理,2022,24(6):70-76.
HAN Ninghui, ZHOU Ying, SHI Kun, et al. Adjustable load interaction potential oriented to power balance of new power system [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 70-76.
- [2]许高秀,邓晖,房乐,等.考虑需求侧灵活性资源参与的国内外电力辅助服务市场机制研究综述[J].浙江电力,2022,41(9):3-13.
XU Gaoxiu, DENG Hui, FANG Le, et al. A review of ancillary service market mechanism study at home and abroad considering flexible resources on demand side [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(9): 3-13.
- [3]王盛,谈健,史文博,等.英国新型电力系统建设经验以及对我国省级电网发展启示[J].综合智慧能源,2022,44(7):19-32.
WANG Sheng, TAN Jian, SHI Wenbo, et al. Practices of the new power system in the UK and inspiration for the development of provincial power systems in China [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 19-32.
- [4]姚建国,杨胜春,王珂,等.智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J].电力系统自动化,2012,36(21):1-6,12.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid "source-grid-load" interactive operation and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [5]孙惠,翟海保,吴鑫.源网荷储多元协调控制系统的研究及应用[J].电工技术学报,2021,36(15):3264-3271.
SUN Hui, ZHAI Haibao, WU Xin. Research and application of multi-energy coordinated control of generation, network, load and storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3264-3271.
- [6]周成伟,李鹏,俞斌,等.风光储微电网储能系统容量优化配置[J].综合智慧能源,2022,44(12):56-61.
ZHOU Chengwei, LI Peng, YU Bin, et al. Optimal configuration for energy storage system capacity of wind-solar-storage microgrid [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(12): 56-61.
- [7]宁剑,吴继平,江长明,等.考虑资源运行特性的可调节负荷调峰调频优化控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(15):11-19.
NING Jian, WU Jiping, JIANG Changming, et al. Optimal control strategy of peak and frequency regulation for adjustable loads considering operation characteristics of resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 11-19.
- [8]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.
- [9]陈逸涵.考虑多种需求侧可调节负荷的协同调频策略研究[D].南京:东南大学,2021.
CHEN Yihan. Research on coordinated frequency regulation strategy considering multiple demand side adjustable loads [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [10]张敏,王建学,王秀丽,等.面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J].电力自动化设备,2021,41(1):84-91.
ZHANG Min, WANG Jianxue, WANG Xiuli, et al. Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary service market for renewable energy accommodation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 84-91.
- [11]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 Peiran, LI Yanbin, JIANG Changming, 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.
- [12]周竞,耿建,唐律,等.可调节负荷资源参与电力辅助服务市场规则分析与思考[J].电力自动化设备,2022,42(7):120-127.
ZHOU Jing, GENG Jian, TANG Lv, et al. Analysis and thinking on market rules for adjustable load resources participating in power auxiliary service [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 120-127.
- [13]文旭,杨可,毛锐,等.可调节负荷调控能力评估行业标准研究及应用[J].电网技术,2021,45(11):4585-

4594.
WEN Xu, YANG Ke, MAO Rui, et al. Research and application of industry standards for evaluation of adjustable load control capacity [J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4585-4594.
- [14]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 Xiliang, JIANG Kejun, ZHAO Yingru, 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.
- [15]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[Z].2020.
- [16]徐航.综合能源系统中的综合需求响应策略研究[D].杭州:浙江大学,2019.
XU Hang. Research on integrated demand response strategy in integrated energy system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [17]蒋峰.基于光伏功率预测的聚合商投标策略研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
JIANG Feng. Research on bidding strategy of load aggregator based on forecast of PV power[D].Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [18]苏超,武小梅,田明正.考虑储能装置的负荷聚合商运营策略研究[J].宁夏电力,2017(5):17-24.
SU Chao, WU Xiaomei, TIAN Mingzheng. Research on operational strategies of demand response aggregator considering energy storage system [J]. Ningxia Electric Power, 2017(5): 17-24.
- [19]张靖琛,于鹤洋,周自强,等.面向负荷聚合商的智能合约微服务架构设计及实现[J].电力系统自动化,2022,46(21):125-133.
ZHANG Jingchen, YU Heyang, ZHOU Ziqiang, et al. Design and implementation of smart contract micro-service architecture for load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 125-133.
- [20]范亚洲.变频空调需求响应潜力评估及聚合控制研究[D].北京:华北电力大学,2021.
FAN Yazhou. Research on demand response potential evaluation and aggregated control of inverter air-conditioning [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [21]刘啸天.分散式电采暖负荷群调节能力评估及提升技术研究[D].吉林:东北电力大学,2020.
LIU Xiaotian. Research on regulation capability evaluation and improvement for distributed electric heating load group [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2020.
- [22]陈可.柔性负荷聚合建模及协调控制研究[D].南京:东南大学,2021.
CHEN Ke. Research on aggregated modelling of flexible loads and the coordination control [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [23]许志荣,张高瑞.响应用户有限理性需求的微电网优化策略[J].综合智慧能源,2022,44(11):43-49.
XU Zhirong, ZHANG Gaorui. Optimization strategy of microgrid responding users' bounded rational demand [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(11): 43-49.

(本文责编:陆华)

收稿日期:2023-05-08;修回日期:2023-05-25
上网日期:2023-08-16;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

陈晓英(1985),女,高级工程师,硕士,从事燃机安全生产管理工作,chenxiaoying@spic.com.cn;

邱亚鸣*(1992),男,工程师,硕士,从事综合智慧能源自动控制工作,qiuyaming@spic.com.cn。

*为通信作者。