

引用格式:颜勤,余国翔.光储充建一体站微电网研究综述[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):1-12.

Citation: YAN Qin, YU Guoxiang. Research review on microgrid of integrated photovoltaic-energy storage-charging station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 1-12.

光储充建一体站微电网研究综述

颜 勤, 余国翔

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为解决电动汽车及新能源大规模接入带来的电力系统运行稳定和新能源高效利用的问题,光储充一体化模式应运而生,其各单元间源荷储协同交互机理及优化调控策略也成为智能电网亟待解决的关键问题。“光储充放+智能建筑”的光储充建一体站微电网模式因其源荷储一体化、供需互补、灵活调度等特征,成为中国节能减碳、能源转型的发展重点。考虑到其微电网运行模式所要面对的分布式能源强不确定性、孤岛并网运行状态下交互机理不明等挑战,对光储充建一体站微电网各单元模块、关键技术、运行状态等方面进行综述,并对光储充建的研究现状进行总结,探讨其未来的发展趋势和需要面临的挑战。研究成果对挖掘经济激励下各类需求响应资源的调控潜力,保障电网供电可靠性,具有重要理论和实际参考意义。

关 键 词:微电网;需求侧响应;电动汽车;分布式储能;光伏功率预测

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.001 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)01-0001-12

Research review on microgrid of integrated photovoltaic-energy storage-charging station

YAN Qin, YU Guoxiang

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To address the challenges posed by the large-scale integration of electric vehicles and new energy sources on the stability of power system operations and the efficient utilization of new energy, the integrated photovoltaic-energy storage-charging model emerges. The synergistic interaction mechanisms and optimized control strategies among its individual units have also become key issues urgently needing resolution in smart grid development. Due to the characteristics of integrated generation, load, and storage, mutual complementarity of supply and demand, and flexible dispatch, the photovoltaic-energy storage-charging (PV-ESS-EV) integrated station micro-grid (ISM) mode, incorporating "PV- PV-ESS-EV + intelligent building" features, has become a focal point for energy conservation, carbon reduction, and energy transition in China. In consideration of the challenges faced by the operational mode of microgrids, such as the strong uncertainty of distributed energy sources and the unclear interaction mechanisms during islanded and grid-connected operation, various aspects of the PV-ESS-EV ISM are reviewed, including its unit modules, key technologies, and operational states. Additionally, the current research status of PV-ESS-EV is summarized while future development trends are discussed, and the challenges that need to be addressed are examined. The research findings have important theoretical and practical implications for exploring the regulatory potential of various demand-response resources under economic incentives, ensuring the reliability of power grid supply, and serving as valuable references for both theory and practice.

Key words: micro grid; demand response; electric vehicle; distributed energy storage; photovoltaic power forecasting

收稿日期: 2022-06-25; 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52307080); 湖南省教育厅优秀青年项目(22B0318); 长沙市自然科学基金(kq2208230)

通信作者: 颜 勤(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事电动汽车及新能源接入电力系统运行优化等方面的研究; E-mail: qin.yan@csust.edu.cn

随着中国“碳达峰、碳中和”节能减排战略的逐步实施,高渗透率新能源并网将成为电力系统的基本特征及发展形态。其出力间歇性及不确定性特征给电力系统灵活运行提出了新挑战。为促进新能源汽车与可再生能源高效协同,鼓励“光储充放”(分布式光伏发电+储能系统+充放电)多功能综合一体站建设^[1]。随着社会经济的发展,能源需求在不断增加,提高能源利用率和用户舒适度的智能建筑成为未来建筑行业发展的方向之一,但考虑到智能建筑的节能效率主要依赖于能量的管理方法。因此,“光储充放+智能建筑”形成光储充建一体站微电网(integrated station micro-grid, ISM)模式会是未来发展的热潮。针对这一现象,本文将总结光储充放原有的基础框架上,增加对智能建筑的探讨。

然而,光储充建一体站微电网在发展过程中遇到了以下问题。

1) 储能和供能平衡难度大。分布式光伏发电具有强烈的不确定性和波动性,可能导致电力系统峰时消纳难、谷时保供难、波动时调度难的问题。而电动汽车充放电也具有随机性,甚至会加剧系统的峰谷差。当下储能效率有限,难以保证满足储能经济效益的情况下,满足系统的用能需求。

2) 运营管理难度大。光伏发电的量化指标困难,无法准确预测光伏发电功率,难以做到实时监测和调度,缺乏合适的优化调度机制。电动汽车难以参与到电力系统的调度优化工作中。

3) 资源统筹难度大。考虑到智能建筑中大量分布式储能处于浮充状态,却未能利用起来,导致资源利用率低。

ISM融合建筑物用电、光伏发电、电动汽车、储能等灵活资源,形成“分布式光伏+电动汽车充电站+固定储能系统+智能建筑”的微电网和源荷储一体化的灵活互动运行模式。具有资源统筹能力,考虑到不同时段用电高峰时段特定场景,深入研究微电网各单元精细化模型和多目标优化方法,量化各单元的能源结构,揭示微电网协同调控机理,充分挖掘多元资源的需求侧响应潜力,提高可再生能源的消纳能力及电网调度模式的灵活性,提高电力系统的经济运行及供电可靠性,促进中国能源转型和经济社会发展具有重要意义。

1 ISM的基本框架

1.1 光伏发电单元

分布式光伏是ISM的重要能源,能源组织IEA

预测2030/2050年光伏装机量将达到5 TW/15 TW。由于日照的昼夜交替性和季节周期性导致光伏发电成为一种典型的间接性电源。光伏发电功率受气象、地理环境等条件影响,这就导致光伏发电具有强烈的随机波动性和间歇性^[2]。在雨雪和阴霾天气下,地表接收到的太阳辐射水平较低。另外,积雪还有可能覆盖在光伏面板表面导致其光伏发电能力受限。同时,随着季节性的极端高温也可能会使得光伏组件效率下降,极端低温也容易导致相关元器件故障损坏^[3]。文献研究主要集中在对光伏功率的预测上,在预测形式上可分为确定性和概率性预测方法^[4]。前者旨在预测光照气象参数或设备功率等具体数值;后者的预测结果中包含概率分布参数,更加注重不确定性因素。常见的概率性预测方法有分位数回归、蒙特卡罗模拟、贝叶斯统计方法、核密度估计、马尔可夫链模型和使用数值天气预报(numerical weather prediction, NWP)结果的预测方法等。

光伏功率预测的预测过程可分为直接法和间接法;根据时间尺度的不同又可分为超短期(0~6 h)、短期(6~24 h)和中长期(1~12月)预测方法^[2]。直接预测是根据光伏功率的历史数据进行预测;间接预测先预测地表或光伏电池板接收的太阳辐照度,再预测光伏功率。超短期预测方法可提供功率的瞬变信息,短期则可用于调度计划制定、负荷跟踪预测、电力市场等领域,中长期预测可用于建筑物上光伏阵列的容量规划、光伏电站新建规划等。

光伏功率预测的关键是根据不同时间尺度下光伏功率的主要影响因素及作用,确定恰当的算法建立预测模型^[2]。文献[5]提出了将不同波段的卫星遥感数据进行融合预测,将多光谱图像特征应用于光伏预测建模,提取历史光伏和预测图像对光伏预测误差的影响,进而有效地降低了预测结果的不稳定性,满足区域间电网的实时调度需求。文献[6]基于高阶马尔可夫链和高斯混合模型的光伏电站短期出力概率预测方法,与实际值相对误差小于10%,且预测结果能够给电网运行调度人员的决策提供更多预测信息;文献[7]提出分位数线性插值和深度自回归循环网络的光伏出力概率预测方法,采用实际公开数据与模型对比验证,光伏出力观测值几乎完全落在90%区间预测范围内。

1.2 储能技术单元

随着新能源发电和电力电子设备在源—网—荷侧占比的提高,传统电力系统正在经历深刻的变

革。这种变革将给系统的稳定性、经济性和运行管理带来巨大的挑战^[8]。储能作为微电网的重要组成部分,可以有效解决高渗透可再生能源带来的负面影响。储能不仅可以缓解供电和负荷需求之间时间上的冲突,提高系统的灵活性,还可以稳定系统电压,推动新型电力系统的安全运行^[9]。

当前分布式储能种类丰富,包括电储能、储气、储氢、蓄热、蓄冷等更加多元的分布式储能已成为当前研究的热点^[10]。其中电储能应用最为常见,在微电网安全稳定运行中发挥的主要作用如下。

1) 针对新能源功率波动,储能技术可以提供或吸收额外的功率,维持整个系统的功率平衡。储能还可以存储间歇性能源产生的过剩电能,再根据用户需求调度分配电能。当检测到电网故障时,储能设备可提供暂时的备用能量,确保微电网连续供电,维持微电网运行安全稳定。文献[11]选用超级电容和蓄电池组成的混合储能平抑不同频率波段风光功率差值,文献[12]以多微电网互补特点,租赁共享储能,节省储能容量,降低了储能成本,并有效平抑新能源的功率波动。

2) 针对系统频率波动,储能技术通过调节充放电状态和充放功率,可以快速进行系统频率的响应,有助于维持稳定的电网频率。文献[13]建立了基于惯量支撑和一次调频两大功能的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)储能单元出力模型,合理配置VSG储能容量,准确反映电网频率波动对储能单元的影响。

3) 针对系统电压,储能系统可以通过逆变器功率有功和无功出力,改变系统潮流分布,对系统电压进行控制。文献[14]建立储能元件有功功率和光伏逆变器无功功率的三相四线制线路多时段协同控制模型,基于最优潮流的控制方法平抑电压越限,改善电网三相不平衡。

1.3 电动汽车单元

目前,新能源汽车已成为全球汽车产业转型发展的主要方向和促进世界经济持续增长的重要引擎^[1]。近年来,中国电动汽车的保有量迅速增加,至2021年已达到912.4万辆,可以储存约450 GW·h电能,巨大的储能容量使电动汽车(electric vehicle, EV)成为一种新的移动分布式储能资源^[15]。

EV的类型根据功能不同,可分为个人交通部分和公共交通部分^[16]。其中公共部分主要由电动公交车(electric bus, EB)为主,EB具有电池容量更大、更加固定的排班表和行驶路径。文献[17]分析

了不同时间尺度下电动公交车负荷(electric bus load, EBL)调峰能力,并提出经济分配模型,最大化负荷聚合商的收益。个人交通部分有电动出租车,其具有出行和充电行为上的随机性,出租车司机需要随机寻客以及载客至随机目的地,这就导致出租车位置的时常不确定性。文献[18]根据电动出租车的位置进行K-means聚类,将聚类点与供电区相匹配,识别出可以提供车网互动(vehicle-to-grid, V2G)放电服务的区域,调用部分车辆以V2G模式参与削峰,提高电网的安全稳定性。

中国EV近年来发展迅速,已经被列入“新基建”七大领域之一。EV的充电行为难以管控,这不仅难以发挥其灵活性资源的优势,而且还会给配电网带来诸多问题,EV的无序充电行为会增大系统的峰谷差,甚至可能导致夜间出现“二次高峰”的现象^[10]。

为了管控EV的充放电行为,需要研究EV的充电需求及电池种类与特性,分析其充放电属性并建立负荷模型。其中行驶路径、电池特性、驾驶习惯、充电开始时间、充电等级、实时电池状态、充电质量等都是评估EV充电需求需要考虑的因素^[19-20]。EV同时具备路网交通及电网负荷的双重属性,对其行驶、充电行为的有序管控不仅可以降低EV用户的行驶时间、充电成本,还可以避免节点充电桩的超负荷运行。文献[21]利用动态路网模型和主从博弈模型,以“车一路一网”3个主体利益最大为目标,利用改进的Floyd算法求得EV到充电站的最短路径,同时也实现了充电站间负荷均衡分布。文献[22]提出了一种低成本的EV路线策略,考虑充电站的位置和电价,以及其周围的交通拥堵情况,利用Dijkstra算法求得最合理的行驶路径,更符合实际生活中EV用户充电的情况。

1.4 智能建筑单元

建筑是城市最大的能源消耗者之一。据统计,全国建筑运行阶段能耗占全国能源消费总量的比重为21.3%,碳排放占比21.7%^[23]。建筑用电负荷呈大都市化趋势,具有可调度性大、负荷波动性强及用电峰谷差较大等特征。此外,建筑物也具有安装屋顶光伏及光伏玻璃的潜在前景,是未来建筑能耗的重要来源。

对家庭住宅或商业建筑中用户侧能量管理研究主要集中于源—储—荷的协同优化。建筑能源管理主要包括可调节光照系统、电动汽车、暖通空调系统、储能等多种柔性负荷进行优化调度,参与

需求响应。建筑内负荷在参与调控中,一方面需要考虑用户的舒适程度,另一方面需要考虑系统的经济性和环保性。文献[24]通过提出的调度策略,使建筑物中的柔性负荷积极参与电力市场的交易,与传统的非柔性调度策略相比,所提策略的成本可降低26.1%,且有效降低了建筑物的峰值需求,提出的灵活性调度满足了用户舒适度及充电需求。文献[25]利用改进区间多目标粒子群优化算法,学习建筑模型状态、动作、奖励之间的隐性关系,进而指导负荷区间种群运动,高效求解多重不确定性因素下智能建筑低碳优化调度问题。

光伏在建筑中应用具有巨大的发展潜力和广阔的市场前景。到2025年、2030年,中国太阳能光电建筑应用总装机预计分别达100 GW、215 GW,累计碳减排量分别达8 800万吨、19 000万吨^[26]。随着光电建筑的大规模应用,智能建筑上的容量配置也成为核心问题^[27]。合理的储能容量不仅可以提高智能建筑的可靠性水平,同时也可以提高经济收益。文献[28]以双层目标函数,利用改进粒子群算法更快的收敛速度和全局寻优能力,追求最优的光伏、储能容量配置和储能充放电运行策略,充分挖掘储能系统“峰谷套利”获利机制。

2 ISM 主要特征及关键技术

2.1 主要特征

随着光伏、风电等新能源占比得提升,电力系统功率波动随之增大,尤其是当用电高峰期负荷激增时,如何高效利用可再生清洁能源、确保电力系统运行稳定性已成为研究热点和需要解决的关键问题。ISM在现有研究基础上,综合考虑光伏发电、储能、电动汽车、智能建筑的功能和可调度性^[29]。ISM的各组成单元及运行模式如图1所示。



图1 ISM组成单元及其运行模式

Figure 1 ISM components and its operating mode

从各组成单元具有相互关联、能源互济等特点的角度看,光储充建ISM具有以下特点,如图2所示。

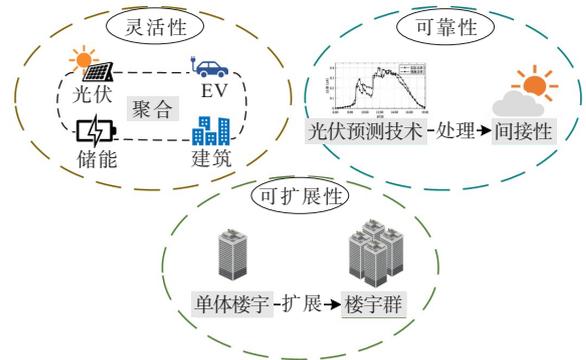


图2 光储充建ISM特点

Figure 2 Features of integrated station micro-grid

1) 灵活性。对于单一的能源系统网络,但能源供应中断,整个系统将面临瘫痪,造成巨大的损失,而ISM将EV、新能源、储能及可控建筑物负荷聚合为一个ISM,既可作需求侧“柔性负荷”,又可作电源侧“可控电源”。

2) 可靠性。分布式光伏由于自身的间接性和波动性,使得很多地区被迫采用弃光策略。但是ISM可以聚合可控建筑物负荷、储能、电动汽车,并可以通过光伏预测技术,充分保障自身用电的可靠性。

3) 可扩展性。以单体建筑物为模块的ISM可以上传自身的购售电信息、外部的天气信息及电价信息给集群运营商(cluster operator, CO),CO再根据收集的预测、采集信息,在满足用户需要的前提下,促使整个建筑群内的ISM实现电能共享,并制定调度策略。

2.2 关键技术

2.2.1 群观群控技术

群观群控技术是指集中采集多个ISM的信息,集中协调控制各个ISM的运行状态,从而实现协调优化、能量互济等功能。在电能交易过程中,考虑分布式资源的就近消纳,减小微电网与主网之间交互引起的频率波动。采用集中共享模式,以建筑集群为对象,通过建立区域能量管理系统对住宅小区或建筑集群中的灵活性资源进行优化调度。

文献[30]将缺电和余电的建筑物整合起来形成智能建筑群,由CO进行统一调度控制,减少系统向外部的购电量,让余电尽可能在系统内部得到消耗,从而提高集群整体总收益,同时也让余电建筑

自身的售电收益提高,降低缺电建筑自身的购电成本。文献[31]提出净零能耗的楼宇能源聚合共享模型,建立计及激励信号的多目标自治模型,激励和引导各共享楼宇群自治优化,实现各楼宇群能源共享协调,在建模过程中考虑不同楼宇群的设备结构和用户需求差异,对未来楼宇群能源共享具有一定参考意义。

群观群控技术的应用需要考虑用户信息安全,采用点对点能源共享可以使智能建筑群直接进行产品与信息交换的协议,不需要第三方的参与干涉。这种去中心化的交易机制使得产消者之间只需要交换很少的信息就可以完成点对点匹配,很好地保护了用户的隐私,提高了智能建筑群参与交易市场的主动性^[32]。文献[33]构建以P2P电能共享为核心的智能建筑群运行框架,降低智能建筑群对外部资源的依赖,并提高了对分布式光伏的消纳能力。考虑到ISM中分布式资源和负荷聚类并不单一,且ISM中的电动汽车可能存在爆发式增长导致电动汽车无序充放电状况,文献[34]构建多园区联盟P2P电能共享模型,分析园区内电动汽车充放电的不同场景,构建相应的充放电模型,最后采用自适应的交替方向乘子法求解电能最优分配策略,保护了用户的交易信息,促进建筑参与能源合作的积极性。

2.2.2 需求响应技术

为了响应市场价格或激励机制的实时变化,用户改变其正常的消费模式,以此保障用户本身的经济效益^[35]。需求响应是鼓励用户积极参与市场调度,激发市场潜力的一种方式。在ISM中,多种资源相互耦合,需求响应作为一种高效负荷管理工具,不仅可以保证电力系统在用电高峰时刻运行的稳定性,也有助于电网更好地消纳新能源发电^[35]。文献[36]提出了负荷聚合商(load aggregator, LA)的管理模式,将微电网视为可控的聚合负荷,简化了负荷参与需求调度的复杂性。文献[36]基于LA模式下的需求响应信号建立了可中断电负荷、可转移负荷、光伏储能单元以及供暖型热负荷的优化模型,以更好地预测负荷聚合商模式下的负荷变化。随着深度学习的发展,基于神经网络^[37]、随机森林^[38]等算法,可以实现更准确的负荷预测。精确的负荷预测能够更好地为区域负荷提供需求侧激励。

需求响应机制主要分类如图3所示,一种是价格型需求响应,即消费者面对不同时间段的电价差异,主动增加或减少用电,以获取一定的经济收益;

另一种是激励型需求响应,即消费者在给定激励或奖励的情况下,自觉调整负荷大小,以赚取相应的经济补贴^[9]。

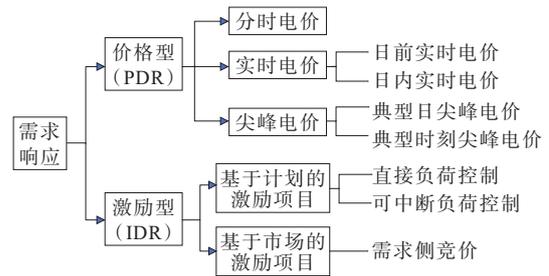


Figure 3 Classification of demand response mechanisms

国内外学者已经对价格型需求响应和激励型需求响应展开了深入研究。文献[39]将EV负荷分为2个集群,根据其用途和是否受电网或价格调控进行分类,并采用固定电价对EV集群进行引导。文献[40]根据需求价格弹性矩阵对峰谷电价进行日前优化,通过实时更新电价来引导EV充放电行为,以实现最低成本和最小系统负荷波动。文献[41]提出了一种基于V2B技术和本地光伏发电协调的建筑能源管理系统,通过价格激励引导电动汽车的行为,实现对过剩光伏发电的处理,并充分考虑了电动汽车的电池退化成本。

随着分布式能量存储需求的增加,储能设备的高价格成为影响需求响应的关键因素。文献[42]提出了一种虚拟储能形式:云储能(cloud energy storage, CES),通过构建虚拟储能聚合分布式储能资源,并向用户提供储能服务并收取服务费用。用户根据自身用电需求向云储能提交租用时段和租用容量,但未充分考虑云储能投资和运行的决策方案。文献[43]采用云储能参与者决策模型,从投资和运营两个方面优化云储能运营商和消费者的充放电需求决策,有效提高了双方的经济收益,降低了购买设备的成本。

2.2.3 态势感知技术

态势感知一词最早由美国 Endsley 教授于1995年提出,并应用于太空领域。Endsley将态势感知分为“觉察”“理解”和“预测”3个阶段。随着时代的发展,态势感知的概念被广泛接受,并应用于军事、网络安全、国际关系等多个领域^[44]。配电网的态势感知可分为态势觉察阶段、态势理解阶段、态势预测阶段和态势引导阶段。在态势觉察阶段,针对清洁能源发电和负荷的时序变化和不确定性进行数学

建模;在态势理解阶段,建立成本最低、网损最小的目标函数;在态势预测阶段,利用收集到的信息总结当前电网状态并预测后续时段的状态;最后,在态势引导阶段,根据当前和预测结果选择最优调度策略,实现利益最大化。

针对态势感知技术已经进行了深入研究。文献[45]提出了一种基于态势感知技术的高渗透率EV参与电压调节的策略。该策略利用态势感知技术提前预测电网状态,并实时感知当前电网状态,通过无功补偿装置和充电桩结合的二次调压策略提高配电网的韧性。仿真结果显示,随着EV渗透率的提高,该策略的调压效果越好。随着数据驱动的机器学习方法的发展,深度强化学习广泛应用于需求响应业务。文献[46]针对需求响应的显著不确定性,基于马尔可夫决策过程模型将其数学模型映射到态势感知元组,并利用深度强化学习算法自适应用户行为和电网状态的不确定性。通过不同数据样本实现自适应优化决策,为平抑规模化分布式能源接入带来强不确定性提供参考。

3 ISM的运行状态和交互关系

ISM的运行状态和各单元的交互关系如图4所示。当配电网发生故障时,ISM可以通过保护动作和解列控制,转变为孤岛运行状态,独立为其内部负荷供电^[47]。这种转变充分发挥了ISM的自主性和灵活性。切换至孤岛运行状态可以保护ISM内部负荷的安全稳定供电,但长时间的孤岛运行同样危及内部负荷的正常供电。一旦故障解除,可通过并网控制恢复并网状态,确保内部负荷得到持续供电。



图4 ISM的运行状态和交互关系

Figure 4 ISM operational states and interaction relationship

3.1 孤岛运行状态下的交互

近年来国内外停电事故显示,冬季特别是在极寒低温条件下,停电事故更容易发生。美国加州近4年的停电危机主要归因于绿色能源政策,包括激进的可再生能源政策、净负荷“鸭子曲线”情况、极

端天气导致负荷激增、新能源供应受限、电网灵活性资源不足以及总装机容量不足等因素,这些导致了停电事件频发。当微电网发生故障而非计划性地转为孤岛运行时,微电网需要独立应对因闭合或开端公共连接点处联络开关中断而带来的有功冲击,以保持频率变化在可容忍范围内。随着分布式能源的高渗透,微电网的惯性水平逐渐降低,导致系统频率稳定性问题凸显。文献[48]提出,在微电网内存在大量灵活性负荷时,将需求响应纳入频率调控体系,有助于“削峰填谷”、确保供需平衡,并对维护微电网频率稳定性具有重要意义。调控中心可以根据已知信息预测不同时间尺度上的负荷水平,并统筹用户侧可响应负荷量,制定相应需求响应控制预案。当扰动发生时,各受控对象将按照激励合同和事先预案来调节自身的功率,并积极参与系统的频率紧急控制,以及时响应系统频率的变化。文献[49]基于风险价值理论提出了孤岛最长运行时间风险评估模型,该模型考虑了微电网内光伏发电失效的情况,为保证关键负荷的供电,通过有序管理发挥EV的储能潜力,建立激励机制调动用户参与孤岛自治的积极性,延长孤岛运行时间,降低孤岛运行风险。

合理的孤岛划分可以有效提高系统的鲁棒性,降低对外部电网的依赖。文献[50]提出了在极端灾害下考虑动态重构的微网划分策略,该策略旨在最大化利用燃气轮机、燃料电池等分布式电源在极端灾害下对负荷供电的支持能力,从而提高配电网应对极端灾害的能力。文献[51]采用深度优先搜索算法确定分布式电源的最大供电范围,利用光伏和风电的概率密度函数求解孤岛备用需求,考虑备用需求的前提下利用柔性负荷参与孤岛调整,并使恢复孤岛的等效价值最大化。文献[52]在单时段孤岛划分的基础上,提出了多时段动态最优孤岛划分的方法,充分考虑了新能源在时间上的波动性和随机性,实现了恢复负荷最大化。

智能建筑是由多种负荷集合而成的载体,如照明负荷、电动汽车充电桩、温控负荷等。在极端情况下,城市负荷的用能行为与配电网高度相似,呈多元、复杂、时变等特性^[53]。随着屋顶光伏与储能技术在智能建筑中的应用,智能建筑逐渐从电力消费者演变为电力产消者。在极端情况下,城市建筑中的应急发电机组能够为配电网输送电能,缓解供电压力。城市建筑在配电网中不仅扮演着主要恢复对象的角色,其潜在的柔性负荷和发电能力也可

以加快配电网的自愈过程。文献[54]利用电动汽车接入建筑楼宇V2B(vehicle to building)技术,耦合用户心理预期满意度和价格激励的关系,设置EV价格激励模型,有助于建筑物的经济运行。在极端天气下,V2B技术能够有效缓解负荷高峰压力。

3.2 并网运行状态下的交互关系

并网运行是指微电网接入系统后,与系统共同运行,将微电网视为系统的负荷或电源,根据实际的发电和用电情况来调整与系统的供给关系。当微电网所需电能大于自身产生的电能时,可以从系统中吸取所需电能;相反,若微电网自身产生的电能大于所需电能,可以将产生剩余的电能传输至系统中^[29]。因此,当微电网处于并网运行状态时,微电网与系统相互补充,从而提高整个电网运行的稳定性和安全性。

随着光伏发电逐渐朝着大规模分布式并网方向发展,整个配电系统发展成一个有源网络,从而引起系统潮流、电压和频率的变化^[55]。ISM的并网运行可以降低间歇性光伏发电对配电网带来的不利影响,最大限度地利用光伏发电,并提高其供电可靠性和电能质量。储能作为ISM优化运行的关键。针对高密度分布式光伏接入配电网后引起的电压越限问题,文献[56]通过集群划分的分布式储能调压控制策略,有效控制节点电压,取得了良好的经济效益。文献[57]提出了一种基于配电网划分的双层电压控制策略,优化光伏机组的有功和无功输出,实现最小化光伏功率损失和网损。

为解决可再生能源的间歇性和随机性问题,国内外已有诸多相关研究,但其侧重的方向不同,如表1所示。这类研究从优化目标函数、时间尺度等不同角度出发,提出了多种储能、电动汽车(EV)和新能源协同设计、运行优化的方法和技术。

表1 ISM的优化运行的方法技术

Table 1 Methods and techniques of ISM optimal operation

优化类型	文献	优化运行方法
优化目标选择	[58]	最小化能源交换成本的混合整数规划方法
	[59]	最小化充电成本及电池退化的遗传算法
	[60]	设置购电成本最低和光伏利用率最高两个目标函数,多目标粒子群算法求解
优化调度时间	[61]	日前优化调度
	[62]	日前调度模型和日内滚动优化模型
	[63]	在日前调度及日内滚动优化的基础上,再进行实时修正

通过合理有序的调度安排,以及电动汽车和电网双向互动技术的应用,可以有效减少并网运行状态带来的负面影响。文献[64]采用一种分层分组调度方法,使用基于指标评价体系的车辆聚类模型,减少大规模电动汽车并网对电力系统稳定性的影响。EV用户的用电方式和用电结构会根据市场电价制定的策略来调整,基于电价制定的EV管理方式可以有效地引导EV用户。文献[65]针对大量电动汽车并网后灵活调度困难和多主体利益冲突问题,构建了以配电网和聚合商利益最大化的多主体两阶段低碳优化运行模型,分别为日前主从博弈模型和实时分配、调整偏差模型,提高了EV集群调度的灵活性和准确性。文献[66]提出了EV聚合商的模型预测方案,在不损害电动汽车用户便利性的前提下,基于季节性自回归积分移动平均模型的调节容量电价的预测方法,以参与系统频率调节。

4 ISM研究的不足与展望

4.1 ISM现有研究存在的不足

1) 预测尚不及时。随着电力调度的发展,当前电网日前电力调度时间间隔已从1 h缩短到15 min。在这一背景下,如何有效应用于15 min时间尺度的光伏出力概率预测问题,有待进一步研究。随着高质量、高分辨率的光伏数据采集、时间序列分析方法,以及基于深度学习的模型的发展中,如何更好地整合这些方法以提升15 min光伏出力预测模型的性能,也是一个亟待解决的问题。

2) 分布式储能市场尚存空白。现阶段,中国对分布式储能市场的运用并不成熟,这不仅仅是因为对分布式储能探索开发得不够到位,同时也是因为暂未制定合适的分布式储能参与市场运行的准则及机制。随着电池管理系统的发展,储能电池的寿命安全在得到保障的前提下,储能用户需要相应的市场利益作为驱动,参与到市场需求的调度中去。

3) 不确定因素尚存较多。随着智能建筑系统的不断复杂化及各种新型负荷的出现,未来用户的意愿会更加多样化,空调的精确控制、电动汽车的优化调度等不同情况的出现,智能建筑的能源调度共享会迎来更大的挑战,随着电力市场的不断开放、越来越多的建筑群会以产消者的角色参与能源共享,这将给配电网的运行安全带来更多挑战。

4.2 ISM对未来的展望

随着电力物联网和人工智能技术的发展,人工智能技术有望成为解决未来预测不及时的有效方法。利用人工智能技术的超强算力和学习能力可以预测大气中的云层分布和运动,捕捉云量在空间上的细微差异,特别是涉及云量快速变化的情况。随着机器学习、大数据、深度学习等技术广泛运用于光电预测,可结合不同模型的优势建立组合模型以提高光伏预测的精度。

随着优化调度和控制算法的不断迭代,云计算能力的不断跟进,优化目标函数会逐渐全面,负荷分类方式会更加精准,时间尺度的考虑也会更加完善。进一步研究考虑系统的经济运行成本、用户满意度、负荷损失、碳排放成本/收益等多因素的多目标优化方法,使得ISM在规划与运行层面进一步协同优化,有望实现系统环环相扣、万物互联的状态,为负荷需求进行准确定位进行动态分析,提供可靠的数据保障。

新一代5G通信技术会成为未来发展的趋势,考虑到5G通信基站建设时均装设了储能电池作为不间断电源,且5G基站的储能具有“大容量、高可靠性、低延迟、低功耗”的特点^[67],站内储能资源有望参与到云端储能应用,扩大云储能的业务范围。不仅如此基于5G平台的车—路—网模型,有望实时监控智能建筑中充电桩的拥挤程度,实现车辆有序寻桩、智能充电等物联模式^[68]。

5 结语

在构建新型电力系统的目标下,光储充建一体站微电网应运而生。本文初步探索了光储充建各个单元的特性及研究现状,具体地总结了ISM的特点及关键技术,最后对ISM两种运行状态相关研究进行阐述,介绍了关于孤岛和并网运行状态下ISM的交互关系。ISM统筹了光伏发电、EV、储能设备、智能建筑各个单元,ISM将在新型电力系统构建、未来智慧能源与智能建筑系统的良性协同发展等方面发挥重要作用。

参考文献:

[1] 严欢,胡俊杰,黄旦莉,等.考虑电动汽车虚拟电厂灵活性和高比例光伏接入的配电网规划[J].电力建设,2022,43(11):14-23.
YAN Huan, HU Junjie, HUANG Danli, et al. Distribution network planning considering the flexibility of EV

virtual power plants and high penetration of PV[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 14-23.

[2] 叶林,程文丁,李卓,等.光伏集群有功功率分层预测控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(2):42-52.
YE Lin, CHENG Wending, LI Zhuo, et al. Hierarchical prediction control strategy of active power for photovoltaic cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 42-52.

[3] 贾学勇,董晓明,孙宏文,等.考虑气象和地理因素的电网传输特性计算及灵敏度分析[J].电力系统自动化,2022,46(21):106-115.
JIA Xueyong, DONG Xiaoming, SUN Hongwen, et al. Calculation of power grid transmission characteristics and sensitivity analysis considering meteorological and geographic factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 106-115.

[4] 李承周,王宁玲,窦潇潇,等.多能源互补分布式能源系统集成研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2023,43(18):7127-7150.
LI Chengzhou, WANG Ningling, DOU Xiaoxiao, et al. Review and prospect on the system integration of distributed energy system with the complementation of multiple energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7127-7150.

[5] 刘晓艳,王珏,姚铁锤,等.基于卫星遥感的超短期分布式光伏功率预测[J].电工技术学报,2022,37(7):1800-1809.
LIU Xiaoyan, WANG Jue, YAO Tiechui, et al. Ultra short-term distributed photovoltaic power prediction based on satellite remote sensing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1800-1809.

[6] 刘洁,林舜江,梁炜焜,等.基于高阶马尔可夫链和高斯混合模型的光伏出力短期概率预测[J].电网技术,2023,47(1):266-275.
LIU Jie, LIN Shunjiang, LIANG Weikun, et al. Short-term probabilistic forecast for power output of photovoltaic station based on high order Markov chain and Gaussian mixture model[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 266-275.

[7] 林帆,张耀,东琦,等.基于分位数插值和深度自回归网络的光伏出力概率预测[J].电力系统自动化,2023,47(9):79-87.
LIN Fan, ZHANG Yao, DONG Qi, et al. Probability prediction of photovoltaic output based on quantile interpolation and deep autoregressive network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 79-87.

[8] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1):158-169.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of

- energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. *Proceedings of the CSEE*,2023,43(1):158-169.
- [9] 梁海峰,丁政,李鹏.基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J].*电力系统保护与控制*,2023,51(16):59-71.
LIANG Haifeng,DING Zheng,LI Peng,et al.Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J].*Power System Protection and Control*,2023,51(16):59-71.
- [10] 赵冬梅,徐辰宇,陶然,等.多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J].*中国电机工程学报*,2023,43(5):1776-1799.
ZHAO Dongmei,XU Chenyu,TAO Ran,et al.Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J].*Proceedings of the CSEE*,2023,43(5):1776-1799.
- [11] 张宇华,李青松,王丛,等.区域风光低频相关性互补与高频混合储能平抑的并网方法研究[J].*中国电机工程学报*,2023,43(4):1492-1504.
ZHANG Yuhua,LI Qingsong,WANG Cong,et al.Grid-connected method of regional wind-solar low-frequency correlation complementation and high-frequency hybrid energy storage stabilization[J].*Proceedings of the CSEE*,2023,43(4):1492-1504.
- [12] 王涛,钟浩,李世春,等.基于主从博弈的多微电网储能容量优化配置[J].*智慧电力*,2023,51(1):9-15+68.
WANG Tao,ZHONG Hao,LI Shichun,et al.Optimal allocation of energy storage capacity in multi-microgrid based on master-slave game[J].*Smart Power*,2023,51(1):9-15+68.
- [13] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].*发电技术*,2022,43(3):476-484.
LIU Jianwei,LI Xuebin,LIU Xiaou.Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J].*Power Generation Technology*,2022,43(3):476-484.
- [14] 唐巍,李天锐,张璐,等.基于三相四线制最优潮流的低压配电网光伏-储能协同控制[J].*电力系统自动化*,2020,44(12):31-40.
TANG Wei,LI Tianrui,ZHANG Lu,et al.Coordinated control of photovoltaic and energy storage system in low-voltage distribution networks based on three-phase four-wire optimal power flow[J].*Automation of Electric Power Systems*,2020,44(12):31-40.
- [15] 裴振坤,王学梅,康龙云.电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J].*电力系统自动化*,2023,47(18):17-32.
PEI Zhenkun,WANG Xuemei,KANG Longyun.Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid[J].*Automation of Electric Power Systems*,2023,47(18):17-32.
- [16] 张夏韦,梁军,王要强,等.电动汽车充电负荷时空分布预测研究综述[J].*电力建设*,2023,44(12):161-173.
ZHANG Xiawei,LIANG Jun,WANG Yaoqiang,et al.Overview of research on spatiotemporal distribution prediction of electric vehicle charging[J].*Electric Power Construction*,2023,44(12):161-173.
- [17] 章锐,于继来.电动公交车负荷参与新型城网调峰的能力评估[J].*中国电机工程学报*,2022,42(S1):82-94.
ZHANG Rui,YU Jilai.Capacity evaluation of electric bus load participating in peak shaving of new urban network[J].*Proceedings of the CSEE*,2022,42(S1):82-94.
- [18] 任峰,向月.辅助负荷削峰的电动出租车V2G协同策略与效益分析[J].*电力自动化设备*,2022,42(2):63-69.
REN Feng, XIANG Yue.V2G coordinated strategy and benefit analysis of electric taxis to assist peak load shifting[J].*Electric Power Automation Equipment*,2022,42(2):63-69.
- [19] EBRAHIMI M, RASTEGAR M, MOHAMMADI M, et al. Stochastic charging optimization of v2g-capable PEVs: a comprehensive model for battery aging and customer service quality[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*,2020,6(3):1026-1034.
- [20] 肖丽,谢尧平,胡华锋,等.基于V2G的电动汽车充放电双层优化调度策略[J].*高压电器*,2022,58(5):164-171.
XIAO Li, XIE Yaoping, HU Huafeng, et al. Two-level optimization scheduling strategy for EV's charging and discharging based on V2G[J]. *High Voltage Apparatus*,2022,58(5):164-171.
- [21] 郑远硕,李峰,董九玲,等.“车一路一网”模式下电动汽车充放电时空灵活性优化调度策略[J].*电力系统自动化*,2022,46(12):88-97.
ZHENG Yuanshuo,LI Feng,DONG Jiuling,et al.Optimal dispatch strategy of spatio-temporal flexibility for electric vehicle charging and discharging in vehicle-road-grid mode[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2022,46(12):88-97.
- [22] HADI AMINI M, KARABASOGLU O. Optimal operation of interdependent power systems and electrified transportation networks[J]. *ArXiv e-Prints*,2017:1701.03487.
- [23] 中国建筑节能协会.中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J].*建筑*,2023(2):57-69.
China Association of Building Energy Efficiency. Research report on building energy consumption and carbon emissions in China (2022) [J]. *Construction and Architecture*,2023(2):57-69.
- [24] TANG H, WANG S W. A model-based predictive dispatch strategy for unlocking and optimizing the building energy flexibilities of multiple resources in

- electricity markets of multiple services[J]. Applied Energy,2022,305:117889.
- [25] 侯慧,何梓姻,陈跃,等.基于深度强化学习区间多目标优化的智能建筑低碳优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(21):47-57.
HOU Hui, HE Ziyin, CHEN Yue, et al. Low-carbon optimal dispatch of smart building based on interval multi-objective optimization with deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems,2023, 47(21):47-57.
- [26] 姚春妮,马欣伯,罗多.碳达峰目标下太阳能光电建筑应用发展规模预测研究[J].建设科技,2021(11):33-35.
YAO Chunni, MA Xinbo, LUO Duo. Prediction research on mid-and long-term development goals of solar photovoltaic application in buildings under carbon peak target[J]. Construction Science and Technology,2021(11): 33-35.
- [27] 崔俊昊,田桂珍,刘广忱,等.独立运行直流微电网混合储能系统功率分配控制策略研究[J].电网与清洁能源,2023,39(4):129-136.
CUI Junhao, TIAN Guizhen, LIU Guangchen, et al. A study on the power distribution control strategy of hybrid energy storage system in the isolated DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39 (4): 129-136.
- [28] 陈柯蒙,肖曦,田培根,等.一种建筑集成光储系统规划运行综合优化方法[J].中国电机工程学报,2023,43(13): 5001-5012.
CHEN Kemeng, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. A comprehensive optimization method for planning and operation of building integrated photovoltaic energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(13): 5001-5012.
- [29] 颜勤,涂晓帆.新型电力系统下综合电动汽车充电站的优化运行[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(2): 176-182.
YAN Qin, TU Xiaofan. Optimized operation of an integrated electric vehicle charging station with renewables and storage under new power system[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2022, 49 (2):176-182.
- [30] 任文诗,高红均,刘友波,等.智能建筑群电能日前优化共享[J].电网技术,2019,43(7):2568-2577.
REN Wenshi, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. Optimal day-ahead electricity scheduling and sharing for smart building cluster[J]. Power System Technology, 2019, 43 (7):2568-2577.
- [31] 蔡文辉,高红均,李海波,等.净零能耗驱动的楼宇群能源共享对等聚合模型[J].中国电机工程学报,2022,42 (24):8832-8844.
CAI Wenhui, GAO Hongjun, LI Haibo, et al. Net zero energy driven power sharing for aggregated buildings:a peer aggregation model[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(24):8832-8844.
- [32] 陈冠廷,张利,刘宁宁,等.基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J].电力自动化设备,2020,40(8): 9-17.
CHEN Guanting, ZHANG Li, LIU Ningning, et al. Blockchain-based transaction mechanism for residential users demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(8):9-17.
- [33] 程杉,陈诺,徐建宇,等.考虑综合需求响应的楼宇综合能源系统能量管理优化[J].电力工程技术,2023,42(2): 40-47+57.
CHENG Shan, CHEN Nuo, XU Jianyu, et al. Optimal energy management of residential integrated energy system with consideration of integrated demand response [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 40-47+57.
- [34] 刘可真,董敏,杨春昊,等.基于纳什谈判的智能园区P2P电能交易优化运行[J].电力自动化设备,2023,43(5):45-53.
LIU Kezhen, DONG Min, YANG Chunhao, et al. Optimal operation of P2P electric power trading in smart park based on Nash negotiation[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(5):45-53.
- [35] 杨旭英,周明,李庚银.智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J].电网技术,2016,40(1):220-226.
YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid [J]. Power System Technology,2016,40(1):220-226.
- [36] LI B S, SHEN J S, WANG X, et al. From controllable loads to generalized demand-side resources:a review on developments of demand-side resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,53:936-944.
- [37] CHEN K J, CHEN K L, WANG Q, et al. Short-term load forecasting with deep residual networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(4):3943-3952.
- [38] XUAN Y, SI W G, ZHU J, et al. Multi-model fusion short-term load forecasting based on random forest feature selection and hybrid neural network[J]. IEEE Access, 2021,9:69002-69009.
- [39] ZHANG J P, WANG Y, LI J X, et al. Day-ahead operation of EV charging station in a logistics center considering charging behaviors of different types of EVs[C]//2021 IEEE 11th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Jiaxing, China: IEEE, 2021.
- [40] 叶文浩,陈耀红,颜勤等.基于动态分时电价引导的电动汽车需求侧响应[J/OL].电力科学与技术学报:1-8 [2023-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1475.TM.20230310.1543.002.html>.

- YE Wenhao, CHEN Yaohong, YAN Qin, et al. Demand response of charging and discharging electric vehicle load based on dynamic time-to-use electricity price[J]. Journal of Electric Power Science and Technology: 1-8 [2023-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1475.TM.20230310.1543.002.html>.
- [41] NEFEDOV E, SIERLA S, VYATKIN V. Internet of energy approach for sustainable use of electric vehicles as energy storage of prosumer buildings[J]. Energies, 2018, 11(8):2165.
- [42] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: a business case study[J]. Applied Energy, 2017, 188: 226-236.
- [43] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Decision-making models for the participants in cloud energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):5512-5521.
- [44] 于群, 李浩, 屈玉清. 基于深度神经网络和内外因素的大电网安全态势感知研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 16-23.
- YU Qun, LI Hao, QU Yuqing. Research on security situation awareness of large power grid based on deep neural network and internal and external factors[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 16-23.
- [45] 刘宗, 何俊, 黄文涛, 等. 基于态势感知的高渗透率电动汽车接入电网后电压调整策略[J]. 中国电力, 2023, 56(2):32-44.
- LIU Zong, HE Jun, HUANG Wentao, et al. Voltage adjustment strategy for high-penetration electric vehicles connected to power grid based on situation awareness[J]. Electric Power, 2023, 56(2):32-44.
- [46] 明威宇, 李妍, 程时杰, 等. 基于态势利导的需求响应自学习优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 109-116.
- MING Weiyu, LI Yan, CHENG Shijie, et al. Self-learning optimal scheduling method of demand response based on situation orientation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23):109-116.
- [47] 姚玉永, 张立臣, 穆勇, 等. 基于自适应虚拟电机策略的微电网储能控制研究[J]. 供用电, 2022, 39(7): 84-92.
- YAO Yuyong, ZHANG Lichen, MU Yong, et al. Research on energy storage control in microgrid based on adaptive virtual machine strategy[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 84-92.
- [48] 文云峰, 林晓煌. 孤岛与并网模式下微电网最低惯量需求评估[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6):2040-2053.
- WEN Yunfeng, LIN Xiaohuang. Minimum inertia requirement assessment of microgrids in islanded and grid-connected modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6):2040-2053.
- [49] 张明锐, 谢青青, 李路遥, 等. 考虑电动汽车能量管理的微网储能容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4663-4673.
- ZHANG Mingrui, XIE Qingqing, LI Luyao, et al. Optimal sizing of energy storage for microgrids considering energy management of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18):4663-4673.
- [50] 张瑞曦, 徐青山, 程煜, 等. 极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1):56-63.
- ZHANG Ruixi, XU Qingshan, CHENG Yu, et al. Microgrid formation strategy considering dynamic reconstruction under extreme disasters[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):56-63.
- [51] 詹红霞, 肖竣文, 邓小勇, 等. 计及柔性负荷的高比例风光渗透下配电网孤岛划分策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4):108-116.
- ZHAN Hongxia, XIAO Junwen, DENG Xiaoyong, et al. Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/photovoltaic penetration considering flexible load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4):108-116.
- [52] 李振坤, 周伟杰, 王坚敏, 等. 基于风光荷功率曲线的有源配电网动态孤岛划分方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14):58-64+71.
- LI Zhenkun, ZHOU Weijie, WANG Jianmin, et al. Dynamic islanding method of active power distribution network based on wind-photovoltaic-load curve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 58-64+71.
- [53] 宋梦, 周佳妮, 高赐威, 等. CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行: 研究述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23):105-121.
- SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, et al. High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23):105-121.
- [54] 余苏敏, 杜洋, 史一炜, 等. 考虑V2B智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):95-101.
- YU Sumin, DU Yang, SHI Yiwei, et al. Optimal scheduling of low-carbon building considering V2B smart charging pile groups[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):95-101.
- [55] 王颖, 文福拴, 赵波, 等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5):1200-1206.
- WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5):1200-1206.
- [56] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储

- 能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2023,47(10):47-56.
- LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(10):47-56.
- [57] CHAI Y Y, GUO L, WANG C S, et al. Network partition and voltage coordination control for distribution networks with high penetration of distributed PV units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3396-3407.
- [58] TUSHAR W, YUEN C, HUANG S S, et al. Cost minimization of charging stations with photovoltaics: an approach with EV classification[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2016,17(1):156-169.
- [59] PETRUSIC A, JANJIC A. Renewable energy tracking and optimization in a hybrid electric vehicle charging station[J]. Applied Sciences,2021,11(1):245.
- [60] 朱珈汛,刘德宝,张钰. 电动公交车光储充电站的分层分级充电优化控制策略[J]. 吉林电力,2022,50(5):36-40.
- ZHU Jiaxun, LIU Debao, ZHANG Yu. Optimal control strategy of hierarchical charging for electric bus optical storage charging station[J]. Jilin Electric Power,2022,50(5):36-40.
- [61] 孟宇翔,马刚,李豪,等. 基于绿证-阶梯式碳交易交互的源荷互补调度优化[J]. 中国电力,2023,56(9):149-156.
- MENG Yuxiang, MA Gang, LI Hao, et al. Optimal scheduling of source-load complementation based on green certificate-step carbon trading interaction[J]. Electric Power,2023,56(9):149-156.
- [62] 薄利明,邹鹏,郑惠萍,等. 考虑源荷储联合调峰的日前-日内两阶段滚动优化调度[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-10[2023-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20230227.1908.002.html>.
- BO Liming, ZOU Peng, ZHENG Huiping, et al. two-stage day-ahead and intra-day rolling optimal scheduling considering source-load- storage joint peak shaving[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition: 1-10[2023-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20230227.1908.002.html>.
- [63] 金力,房鑫炎,蔡振华,等. 考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源储荷协调调度策略[J]. 电网技术,2020,44(10):3641-50.
- JIN Li, FANG Xinyan, CAI Zhenhua, et al. Multiple time-scales source-storage-load coordination scheduling strategy of grid connected to energy storage power station considering characteristic distribution[J]. Power System Technology,2020,44(10):3641-50.
- [64] YUE H Z, ZHANG Q, ZENG X S, et al. Optimal scheduling strategy of electric vehicle cluster based on index evaluation system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2023,59(1):1212-1221.
- [58] TUSHAR W, YUEN C, HUANG S S, et al. Cost minimization of charging stations with photovoltaics: an approach with EV classification[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2016,17(1):156-169.
- [65] 章攀钊,谢丽蓉,马瑞真,等. 考虑电动汽车集群可调度能力的多主体两阶段低碳优化运行策略[J]. 电网技术,2022,46(12):4809-4825.
- ZHANG Panzhao, XIE Lirong, MA Ruizhen, et al. Multi-player two-stage low carbon optimal operation strategy considering electric vehicle cluster schedulability[J]. Power System Technology,2022,46(12):4809-4825.
- [66] CAI S N, MATSUHASHI R. Model predictive control for EV aggregators participating in system frequency regulation market[J]. IEEE Access,2021,9:80763-80771.
- [67] 雍培,张宁,慈松,等. 5G通信基站参与需求响应:关键技术 与前景展望[J]. 中国电机工程学报,2021,41(16): 5540-5552.
- YONG Pei, ZHANG Ning, CI Song, et al. 5G communication base stations participating in demand response: key technologies and prospects[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(16):5540-5552.
- [68] 郭磊,王克文,文福拴,等. 电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(3):56-70.
- GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(3):56-70.