

基于风能光能互补的智能新能源汽车充电技术研究

马涛, 张倩涵, 李守信, 郭超, 王军杰
河北机电职业技术学院, 河北 邢台 054000
DOI:10.61369/ME.2025110026

摘要 : 在能源转型与交通电动化协同推进的背景下, 高比例可再生能源接入与规模化电动汽车充电需求间的矛盾日益凸显。本文聚焦于风能光能互补发电与智能充电技术的深度融合, 旨在解决可再生能源消纳与负荷随机性之间的匹配难题。通过剖析风光出力特性与充电负荷的时空分布规律, 构建了以最大化清洁能源利用率为目标的智能充电协同调度模型。研究引入多时间尺度预测与分布式优化算法, 设计了能够实时响应源荷波动的柔性充电控制策略。该技术路径对于提升电网运行稳定性、降低充电成本及推动交通领域深度脱碳具有明确的工程价值与应用前景。

关键词 : 风光能互补; 智能充电; 新能源汽车

Research on Intelligent New Energy Vehicle Charging Technology Based on Wind and Solar Energy Complementarity

Ma Tao, Zhang Qianhan, Li Shouxin, Guo Chao, Wang Junjie
Hebei institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai, Hebei 054000

Abstract : Against the backdrop of the coordinated advancement of energy transition and the electrification of transportation, the contradiction between the high proportion of renewable energy access and the demand for large-scale electric vehicle charging has become increasingly prominent. This article focuses on the deep integration of wind and solar complementary power generation and intelligent charging technology, aiming to solve the matching problem between the consumption of renewable energy and the randomness of load. By analyzing the spatio-temporal distribution patterns of wind and solar output characteristics and charging loads, an intelligent charging collaborative scheduling model aimed at maximizing the utilization rate of clean energy was constructed. The research introduces multi-time-scale prediction and distributed optimization algorithms, and designs a flexible charging control strategy that can respond in real time to source-load fluctuations. This technical approach holds clear engineering value and application prospects for enhancing the operational stability of power grids, reducing charging costs, and promoting deep decarbonization in the transportation sector.

Keywords : wind and solar energy complementation; intelligent charging; new energy vehicle

引言

全球应对气候变化的紧迫性正加速能源体系与交通模式的根本性变革^[1]。新能源汽车的规模化发展在减少化石能源依赖的同时, 其集中充电行为也对电网规划与运行构成了新的压力。另一方面, 风能、太阳能等分布式能源的大规模接入, 因其固有的间歇性与波动性, 给电网的功率平衡带来了显著挑战^[2]。在此双重背景下, 将电动汽车充电负荷从刚性需求转化为可调度资源, 并与分布式风光发电系统进行智能协同, 成为破题的关键。本文研究基于风能光能互补的智能充电技术, 核心在于通过先进的信息感知与控制策略, 实现发电侧与用电侧的动态优化匹配, 从而提升能源利用效率与系统经济性, 为构建新型电力–交通耦合网络提供关键技术支撑。

一、风能光能互补发电系统与电动汽车充电负荷特性分析

(一) 风能与光伏发电的出力特性及其互补机理

风能发电与光伏发电均属于气候依赖性资源, 其出力曲线呈

现出显著的时空差异性。光伏发电功率在日间尤其是正午时段达到峰值, 夜间出力为零, 具有典型的“昼发夜停”和单峰特性, 且易受云层遮挡、季节更替的影响。风能发电出力则更具随机性和波动性, 日间与夜间均可能产生较大功率, 但受地形、气温、气压等多因素综合影响, 其出力高峰可能与负荷高峰不完全重

合，甚至出现反调峰现象^[3]。正是这种时间上的错位与出力特征的差异，构成了风光互补的物理基础。通过将风电与光伏发电系统在同一个地理区域内进行集成配置，可以利用两者在日内与季节上的出力互补性，在一定程度上平滑总输出功率的波动曲线。例如，在夏季日照强而风力可能相对较弱的白天，光伏承担主要发电任务；在冬季或夜间风力较强的时段，风电则成为主力电源。这种天然互补性使得风光互补系统的联合输出功率比单一能源更为稳定和可靠，为提高可再生能源供电的连续性、降低对备用电源或大电网的依赖程度创造了条件，也为将其作为电动汽车充电站的主供电源提供了可能性。

（二）电动汽车充电负荷的时空分布与不确定性建模

电动汽车充电负荷并非固定不变，其时空分布特性高度依赖于用户的出行行为习惯。在时间维度上，私人乘用车的充电需求往往集中在用户返回住地的傍晚至夜间时段，形成晚间充电高峰；而公交、物流等商用车辆则主要在日间运营间隙或夜间停场时段集中充电。在空间维度上，充电需求密集分布于居民区、商业区、工作园区及高速公路服务区等不同功能区域。这种固有的时空聚集性若不加引导，极易与电网原有晚高峰叠加，加剧电网负担。此外，充电负荷还具有显著的不确定性，包括用户到达充电站的时间、初始电池荷电状态、预计停留时长以及期望的最终充电量等参数均存在随机变化^[4]。准确建模这种不确定性是实施智能充电调控的前提。通常采用概率统计方法，如利用历史数据拟合用户出行链、构建基于泊松过程的车辆到达模型、以及用概率分布描述电池荷电状态等方法，来刻画充电需求的随机性，为后续优化调度提供可靠的输入边界和场景集合。

（三）风光互补发电与电动汽车充电的协同匹配挑战

尽管风光互补能在一定程度上改善可再生能源的供电质量，但其联合出力仍无法完全摆脱间歇性与波动性的束缚，而电动汽车充电需求则具有随机性和一定的刚性。将两者直接进行物理连接，可能会面临实时功率不匹配的严峻挑战：当风光出力骤降而充电需求高企时，充电功率无法得到保障，影响用户体验；当风光出力过剩而充电需求低迷时，则会产生本地消纳不足导致的能源浪费。因此，简单的“即发即用”模式难以实现高效稳定的运行。协同匹配的核心在于引入“时间缓冲”与“功率调节”机制，这需要通过智能技术将电动汽车的充电过程从瞬时刚性行为转变为可在一定时间窗口内灵活调整的柔性负荷^[5]。如何设计有效的调度策略，在尊重用户基本充电需求的前提下，动态调整充电功率或时间，使聚合后的充电负荷曲线能够主动追踪风光互补系统的出力曲线，最大化就地消纳可再生能源，同时避免对配电网造成冲击，是本研究需要攻克的关键技术难题。这涉及到对海量分散充电终端的信息感知、协同控制与优化决策。

二、智能充电系统架构与核心关键技术

（一）系统整体架构：集中与分布相结合的混合控制模式

为实现风光互补发电与电动汽车充电负荷的高效协同，需要构建一个分层分区、集中与分布相结合的智能充电系统架构。该

架构通常包含物理层、通信层、控制层与应用层。物理层由分布式风光发电装置、储能系统、智能充电桩集群以及电动汽车本身构成。通信层依托物联网技术、5G网络等，实现全域设备状态数据与控制指令的实时、可靠传输^[6]。在控制层，采用混合控制模式至关重要：在充电场站或区域微网层级，设置集中控制器，负责接收风光功率超短期预测、电网调度指令、聚合区域内所有充电桩及储能的状态信息，并求解全局优化问题，制定总的功率分配计划；在单个充电桩或车辆终端，则部署分布式智能体，基于集中控制器下发的参考信号或市场价格信号，结合车辆用户的个性化设定，进行本地微调与快速响应。这种架构既保证了系统整体的优化协调能力，又降低了集中计算的复杂度，提高了系统的可扩展性与鲁棒性，并能够更好地保护用户隐私。

（二）多时间尺度风光出力与充电需求预测技术

优化调度模型是实现智能充电的核心决策引擎，其核心目标是在满足多重约束下最大化系统经济性与可再生能源消纳率。目标函数通常设定为最小化系统总运行成本或最大化风光直接利用率。约束条件涵盖四大关键维度：风光实时出力上限、配电网安全运行限值、储能系统工作边界及用户充电的刚性需求。为应对风光与充电需求的双重不确定性，模型需采用随机规划或鲁棒优化方法增强方案的鲁棒性。在求解层面，鉴于系统规模庞大且终端分散，集中式优化面临效率瓶颈。因此，交替方向乘子法等分布式算法成为更优选择，通过将全局问题分解为可并行求解的子问题，各节点仅需本地计算并与相邻单元交换有限信息，经迭代协调后逼近全局最优解，在保障计算效率与隐私性的同时，显著提升了系统的可扩展性与实时响应能力。

（三）面向风光消纳最大化的智能充电优化调度模型与算法

优化调度模型是智能充电系统的核心决策引擎。该模型通常以最大化风光互补发电的本地消纳量、最小化从大电网购电成本或最小化充电总成本为主要目标，同时考虑一系列约束条件，包括：风光发电功率约束、配电变压器与线路容量约束、储能系统充放电功率与电量约束、每辆电动汽车的充电需求约束以及用户约定的离场时间约束等。模型需要能够处理前文所述的多重不确定性，常见的处理方法包括随机规划、鲁棒优化或基于场景的优化^[7]。在算法层面，由于问题规模庞大且具有分布式特性，传统的集中式优化方法可能面临“维数灾”。因此，需要采用分布式优化算法，如交替方向乘子法、一致性算法等，将全局问题分解为多个可由本地控制器并行求解的子问题，通过有限的信息交互迭代收敛至全局最优或次优解。这不仅提高了计算效率，也符合实际系统中设备分散自治的特性。

三、系统优化策略与协同运行机制

（一）基于模型预测控制的实时协同调度策略

为应对风光出力的短时波动与充电需求的随机性，需采用具备前馈与反馈机制的先进控制策略。模型预测控制（MPC）因其在处理多变量约束和滚动优化方面的优势，成为实现实时协同调度的有效方法^[8]。该策略在每个控制周期内，基于当前系统状态

(风光实时出力、车辆电池状态、电网分时电价)与对未来一段时问(预测时域)内风光出力和充电需求的预测,在线求解一个有无限域的优化问题,以最大化风光消纳或最小化综合运行成本为目标,得到最优的充电功率指令序列,但仅将第一个控制时段的指令下发给充电桩执行。至下一周期,系统状态更新,预测信息滚动更新,优化问题被重新求解,从而实现动态闭环优化。这种滚动优化机制能够不断修正因预测误差带来的影响,增强系统抗干扰能力,使聚合充电负荷平滑且紧密地追踪风光出力曲线,有效平抑功率波动,提高能源就地平衡水平。

(二) 考虑用户多元需求与行为响应的激励机制设计

智能充电系统的成功运行依赖于电动汽车用户的广泛参与,因此必须设计兼顾系统目标与用户满意度的激励机制。用户需求具有多元性,包括对充电成本、充电完成时间、充电便利性的不同偏好。激励机制的核心在于通过价格信号或非价格激励,引导用户自愿调整充电行为,将其私人偏好与系统整体优化目标进行协调^[9]。例如,实施精细化分时电价,在风光富余时段提供显著的电价折扣;或引入可中断充电合约,允许运营商在系统紧急情况下适度调整充电功率,并给予用户经济补偿。此外,建立用户积分或碳账户体系,将绿色充电行为量化并予以奖励,也是一种激发环保意识、引导长期行为转变的有效手段。激励机制的设计需建立在用户行为建模与分析之上,通过合理的成本效益分配,实现系统运营商与用户的共赢。

(三) 系统集成与多能流协同管理

基于风能光能互补的智能充电系统并非孤立单元,而是未来新型电力系统乃至综合能源系统的有机组成部分。因此,需要从系统集成的视角,研究其与配电网、分布式储能、以及其他可调负荷的多能流协同管理机制。该系统可作为配电网中的一个可控

微能源节点,接受上层配电管理系统的协调指令,在满足本地充电需求的同时,为配电网提供电压支撑、阻塞管理等辅助服务。通过将充电负荷、风光发电与固定或移动式储能进行一体化优化调度,可以构建一个更加稳定和自治的本地能源系统,减少对外部电网的功率冲击^[10]。进一步地,在具备条件的区域,可探索与建筑空调、制氢等柔性负荷的协同,实现电、热、氢等多种能源形式的耦合与互补,提升整体能源利用效率,为构建高弹性、高渗透率可再生能源的能源互联网提供底层技术支持与运行范式。

四、结语

本研究围绕风能光能互补与新能源汽车智能充电的协同整合问题,系统地分析了两者各自的特性与协同面临的挑战,构建了混合式智能充电系统架构,并深入探讨了其核心关键技术,包括多时间尺度预测、优化调度模型与算法。研究表明,通过智能技术将电动汽车充电负荷转变为可调控的柔性资源,使其动态追踪风光互补发电的出力曲线,是大幅提升可再生能源本地消纳率、平抑电网波动、实现电动汽车绿色用电的有效途径。这不仅是解决可再生能源消纳与电动汽车增长两者矛盾的战略选择,也是构建未来可持续能源体系的重要支柱。尽管在技术集成、标准制定、商业模式等方面仍存在挑战,但随着相关技术的不断成熟、政策机制的逐步完善以及市场力量的推动,基于风能光能互补的智能新能源汽车充电技术必将迎来广阔的发展空间,为能源革命与交通革命的深度融合提供坚实支撑,助力“双碳”目标的如期实现。未来的研究需进一步关注海量异构资源的即插即用管理、跨域协同优化以及商业生态构建等更深层次的问题。

参考文献

- [1] 周强,秦宇,单宇,等.风光互补绿色电能在港口的实际应用 [J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(12):3.
- [2] 崔巍,陈姝伊,蒋盼盼.风光互补高速公路电动汽车无线充电系统的研究 [J].电气时代,2019(6):3.
- [3] 张智勇,郑义清,宁志海,等.油气生产中风光互补清洁能源应用 [J].农村电工,2022,30(4):1.
- [4] 朱同.风光储新能源发电技术大规模应用分析 [J].经济技术协作信息,2021(3):96-96.
- [5] 张明光,赵文渊,李鹏程.多能源互补的虚拟电厂低碳调度研究 [J].工业仪表与自动化装置,2022(005):000.
- [6] 钟文兴,张波.电动汽车无线充电技术专编述评 [J].电源学报,2022,20(6):1-3.
- [7] 高海明,黄梁,高家乐,等.电动汽车无线充电技术综述及发展趋势浅析 [J].百科论坛电子杂志,2020,000(013):1626.
- [8] 孙浩,谭鹏.新能源电动汽车充电技术开发应用研究 [J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(9):4.
- [9] 韩杰.新能源电动汽车充电技术开发应用研究 [J].时代汽车,2022(17):118-120.
- [10] 李梦.新能源电动汽车充电技术的发展方向分析 [J].无线互联科技,2022,19(2):93-94.