

电气及其自动化驱动的可再生能源并网技术研究

徐剑

江西省人力资源有限公司（江西科能工程建设咨询监理有限公司），江西南昌，330000；

摘要：在“双碳”目标引领下，可再生能源的规模化开发与高效并网成为能源转型的核心任务。电气及其自动化技术作为连接可再生能源与电网的关键支撑，其发展水平直接决定了并网系统的稳定性与经济性。当前风能、太阳能等可再生能源并网普遍面临波动性、间歇性难题，这对电网的接纳能力提出了更高要求。本文聚焦电气及其自动化在可再生能源并网中的驱动作用，系统探讨并网系统的拓扑结构优化、核心控制策略创新及自动化调度技术应用。通过分析相关技术的应用路径与优化方向，明确电气自动化技术提升并网性能的关键方法。

关键词：电气及其自动化；可再生能源；并网技术；拓扑优化

DOI：10.69979/3029-2727.25.11.101

引言

全球能源结构正经历深刻变革，可再生能源凭借清洁、低碳的独特优势，已成为替代传统化石能源的核心力量。近年来，风电、光伏等可再生能源的装机容量持续增长，但其固有的随机性与不确定性，使其并网过程中极易引发电网频率波动、电压偏移等问题。这些问题严重制约了可再生能源的消纳能力，成为能源转型进程中的主要障碍。电气及其自动化技术以其精准控制、高效调节的特性，为解决可再生能源并网难题提供了有效方案。

1 可再生能源并网现状及电气自动化技术需求

1.1 并网发展格局与核心挑战

当前可再生能源并网呈现规模化、多元化发展态势。随着风电、光伏等技术的不断成熟，其装机容量在全球范围内持续攀升，在能源结构中的占比逐步提高。我国西北地区已建成多个大型风电和光伏基地，分布式光伏也在城乡各地广泛应用，形成了集中式与分布式并举的并网格局。然而，可再生能源输出的波动性与电网接入的刚性需求之间的矛盾日益突出。风能受风速变化影响显著，太阳能则依赖光照条件，这种固有的不确定性导致发电功率波动剧烈。当大量可再生能源集中并网时，极易引发电网频率波动、电压偏移等问题，给电网的安全稳定运行带来严峻挑战，也制约了可再生能源的全额消纳。

1.2 电气自动化的核心作用

电气自动化技术在可再生能源并网过程中占据核心地位，承担着多项关键任务。在发电单元层面，它实

现对风机、光伏组件等设备的实时状态监测，及时掌握设备运行参数与健康状况，为设备维护提供依据。在功率调节方面，通过自动化控制系统可动态调整发电功率，平抑输出波动，使能源输出更符合电网需求。在并网协同控制中，电气自动化技术能够协调可再生能源发电系统与电网之间的运行状态，确保并网过程平稳过渡，避免对电网造成冲击。

1.3 电气自动化发展瓶颈

尽管电气自动化技术在可再生能源并网中应用广泛，但在当前高比例可再生能源并网的场景下，仍存在诸多发展瓶颈。在多能源协同调控方面，现有技术难以实现风电、光伏、储能等多种能源形式的深度协同，无法充分发挥不同能源的互补优势。在极端工况适应性上，面对台风、暴雪等恶劣天气导致的能源输出突变，自动化系统的响应速度和调节精度有待提升，难以快速恢复系统稳定。在智能化水平方面，部分自动化系统仍依赖传统控制算法，缺乏基于大数据和人工智能的自主学习与优化能力，无法及时适应复杂多变的并网环境，难以完全匹配高比例可再生能源并网的需求。

2 电气自动化驱动的并网系统拓扑结构优化

2.1 并网接口拓扑创新

并网接口是可再生能源接入电网的关键环节，其拓扑结构直接影响能量转换效率与电能质量。以IGBT、SiC等新型电力电子器件为核心进行拓扑创新，已成为当前研究的热点方向。IGBT器件具有开关速度快、损耗低的特点，能够提升变流器的运行效率；SiC器件则在耐高温、耐高压性能上更具优势，适用于更高功率等级的并网场景。基于这些新型器件，科研人员不断优化并网

变流器的拓扑结构，通过改进电路拓扑减少能量转换过程中的损耗，提高电能质量。

2.2 微电网拓扑设计

分布式可再生能源具有分布范围广、装机容量分散的特点，其并网问题难以通过传统集中式电网完全解决。结合电气自动化控制需求，构建“源网荷储”一体化微电网拓扑，成为解决分布式能源并网问题的有效途径。这种拓扑结构将分布式发电单元、配电网络、用电负荷和储能系统有机整合，形成一个独立的能源系统。通过电气自动化技术实现对微电网内部各单元的协调控制，可根据负荷需求灵活调整发电功率和储能状态。当外部电网出现故障时，微电网能够切换至孤岛运行模式，保障内部重要负荷的供电；当外部电网恢复正常后，又可平稳并网运行，增强了分布式能源并网的灵活性与独立性。

2.3 大规模基地拓扑规划

大规模可再生能源基地的并网容量大、影响范围广，其拓扑规划需综合考虑全网的功率平衡与安全稳定运行。基于全网功率平衡原则，优化大规模风电场、光伏电站的并网接入点与网络拓扑，是降低并网对主网冲击的关键。在接入点选择上，需结合基地的地理位置、发电容量以及电网的承载能力，优先选择靠近负荷中心或电网结构较强的节点接入，减少远距离输电带来的损耗和风险。在网络拓扑规划中，采用分层分区的设计思路，构建结构清晰、冗余度合理的输电网络。同时，通过电气自动化技术实现对拓扑结构的动态监测与调整，确保在不同运行工况下，电网都能保持功率平衡，提升大规模可再生能源基地的并网适应性。

3 可再生能源并网的核心自动化控制策略

3.1 功率平滑调节策略

可再生能源输出的波动性是影响并网稳定性的主要因素之一，基于模型预测控制的功率平滑调节策略为此提供了有效的解决方案。该策略利用电气自动化的实时计算能力，通过建立精确的可再生能源发电预测模型和电网运行模型，实现对未来一段时间内发电功率和电网需求的预测。根据预测结果，模型预测控制算法能够动态生成最优的功率调节指令，控制储能系统充放电或调整发电设备输出，平抑可再生能源的输出波动。与传统控制策略相比，模型预测控制具有响应速度快、控制精度高的优势，能够更好地适应可再生能源功率的快速变化，使并网功率保持平稳，减少对电网频率和电压的

冲击，提升并网系统的稳定性。

3.2 电压与频率协同控制

电压和频率是电网运行的核心指标，其稳定性直接决定了电能质量。构建电压-频率双闭环控制体系，结合自动化检测技术实时反馈电网状态，是确保并网节点电能质量稳定的重要实现路径。电压闭环控制通过监测并网节点的电压变化，调节变流器的无功功率输出，使电压维持在允许范围内；频率闭环控制则根据电网频率的波动，调整有功功率输出，实现频率的稳定控制。双闭环控制体系能够实现电压与频率的协同调节，避免单一控制导致的系统失衡。自动化检测技术的应用的应用，可实时采集电网的电压、频率等参数，并快速反馈至控制系统，确保控制指令的及时性和准确性，为并网节点的电能质量提供可靠保障。

3.3 多能源协调控制优化

多能源互补是提升可再生能源并网稳定性的有效手段，基于电气自动化平台实现风电、光伏、储能等多单元的协同控制，能够充分发挥各能源的优势。不同能源具有不同的输出特性，风电在夜间和冬季出力相对稳定，光伏则在白天光照充足时发电效率高，储能系统可实现能量的存储与释放。电气自动化平台通过整合各单元的运行数据，建立多能源协调控制模型，根据电网运行状态和能源输出情况，动态分配各单元的出力比例。当风电出力不足时，可调用光伏和储能系统补充功率；当光伏出力过剩时，可将多余电能存储至储能系统或输送至电网。通过这种协调控制策略的优化，能够提升整体并网系统的运行稳定性和能源利用效率。

4 智能自动化调度系统在并网中的应用

4.1 自动化调度架构设计

智能自动化调度系统是实现可再生能源高效并网的核心支撑，构建“感知-决策-执行”三级自动化调度架构，能够实现对并网系统的全面管控。感知层通过部署在发电单元、输电线路、电网节点的各类传感器和监测设备，实时采集可再生能源发电数据、电网运行参数、负荷需求信息等，为调度决策提供数据支撑。决策层基于大数据分析和人工智能算法，对感知层采集的数据进行处理和分析，结合电网运行约束和能源消纳目标，制定最优的调度方案。执行层则根据决策层下达的调度指令，通过自动化控制设备调整发电单元出力、储能系统状态和电网运行方式，确保调度方案的有效实施。三级架构分工明确、协同配合，实现了调度系统的高效运行。

4.2 调度决策自动化技术

大数据与AI驱动的调度决策自动化技术，显著提升了调度系统的智能化水平。可再生能源的出力受天气、环境等多种因素影响，具有较强的随机性，传统调度决策方法难以精准把握其变化规律。利用大数据分析技术，可对历史发电数据、气象数据、负荷数据等进行深度挖掘，发现可再生能源出力的变化趋势和影响因素，为发电预测提供依据。AI算法则通过对大量数据的学习和训练，不断优化调度决策模型，能够根据实时运行状态自主调整调度策略。例如，基于神经网络算法的调度模型，可实现对短期发电功率的精准预测，结合强化学习算法制定动态调度方案，实现调度策略的自主优化与精准执行，提升调度决策的科学性和有效性。

4.3 实时通信机制构建

调度系统与并网单元之间的实时通信，是保障调度指令高效传输和执行的关键。基于工业以太网与无线通信技术，构建低延时、高可靠的通信链路，能够满足并网系统对通信的严格要求。工业以太网具有传输速率高、稳定性好的特点，适用于大规模数据的高速传输，可实现调度中心与集中式可再生能源基地、电网节点之间的通信。无线通信技术则具有部署灵活、成本低的优势，适用于分布式可再生能源单元的通信接入。为确保通信的可靠性，采用冗余通信设计，当主通信链路出现故障时，可自动切换至备用链路。

5 并网技术的电气自动化安全保障体系

5.1 自动化故障检测诊断

并网系统的故障检测与诊断是保障系统安全运行的重要环节，采用多传感器融合技术，结合自动化分析算法，能够实现故障的快速定位与精准诊断。多传感器融合技术通过在并网系统的关键部位部署不同类型的传感器，同时采集电流、电压、温度、振动等多种物理量数据，避免了单一传感器检测的局限性，提高了故障信息的完整性和可靠性。自动化分析算法对多传感器采集的数据进行融合处理和特征提取，通过对正常运行数据与故障数据的差异，识别故障特征。例如，基于小波分析的故障诊断算法可有效提取故障信号的特征信息，结合支持向量机算法实现对故障类型的分类识别，能够快速判断故障位置和原因，为故障处理提供及时、准确的依据。

5.2 并网保护策略设计

可再生能源并网系统具有与传统电网不同的故障特性，基于电气自动化的并网保护策略设计，需充分考虑这些特性以提升系统的安全保障能力。针对可再生能源并网时故障电流变化复杂、衰减速度快的特点，优化保护定值与动作逻辑，采用自适应保护方案。通过电气自动化技术实时监测并网系统的运行状态，根据系统运行方式和故障类型的变化，自动调整保护定值，确保保护装置在不同工况下都能准确动作。

5.3 设备全生命周期监测维护

并网设备的稳定运行是保障并网系统可靠工作的基础，通过自动化监测系统实时跟踪设备运行状态，实现维护需求的提前预警与精准安排，是设备全生命周期管理的核心内容。自动化监测系统通过在设备上安装温度、湿度、振动等监测传感器，实时采集设备运行参数，结合设备的历史运行数据和性能参数，建立设备健康状态评估模型。通过对监测数据的持续分析，判断设备的健康状况，当设备参数出现异常时，及时发出维护预警信号，提醒工作人员进行检查和处理。

6 结论

本文围绕电气及其自动化驱动的可再生能源并网技术展开系统研究，结合当前能源转型背景，明确了电气自动化技术在可再生能源并网中的核心地位。通过分析可再生能源并网现状及技术需求，指出了当前并网过程中面临的波动性、间歇性等核心问题，以及电气自动化技术在多能源协同、极端工况适应等方面的发展瓶颈。从拓扑结构优化、核心控制策略、智能调度应用和安全保障体系四个维度，深入探讨了电气自动化技术提升并网性能的具体路径。

参考文献

- [1] 李国平. 电气自动化在可再生能源并网中的关键技术研究[J]. 石化技术, 2024, 31(11): 154-156.
- [2] 李兵, 牛洪海, 余帆. 全可再生能源热电气储耦合供能系统优化调控模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(07): 103-108.
- [3] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生资源的交直流输电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(09): 19-27.