

电气自动化在新能源发电系统中的应用与控制策略

郝振亮

山东省煤田地质局第四勘探队 山东潍坊 261200

摘要: 随着全球能源结构转型和“双碳”目标的推进,以风能、太阳能为代表的新能源发电技术迅速发展。然而,新能源发电具有间歇性、波动性和不确定性等固有特性,对电力系统的稳定性、安全性和调度能力提出了严峻挑战。电气自动化作为融合电力电子、自动控制、信息通信和人工智能等多学科交叉的技术体系,在提升新能源发电系统的运行效率、并网性能和智能化水平方面发挥着关键作用。本文系统阐述了电气自动化技术在风电、光伏等典型新能源发电系统中的具体应用场景,深入分析了包括最大功率点跟踪(MPPT)、变流器控制、无功补偿、频率/电压调节、储能协同控制以及智能调度在内的核心控制策略,并探讨了基于数字孪生、边缘计算和人工智能的前沿发展方向。研究表明,深度融合电气自动化技术是实现高比例可再生能源接入、构建新型电力系统的重要支撑路径。

关键词: 电气自动化; 新能源发电; 风力发电; 光伏发电; 控制策略; 智能电网

引言

全球气候变化和环境污染问题严峻,发展清洁低碳可再生新能源成国际共识。根据国际能源署(IEA)的数据,截至2024年,全球可再生能源装机容量超3500GW,风电和光伏占比超80%。中国是最大新能源市场,风电和光伏累计装机容量分别突破450GW和600GW,占比持续攀升。但新能源发电有随机性、波动性等,给传统电力系统带来电网频率和电压波动加剧、调峰调频能力不足、弃风弃光严重、抗扰动力能力减弱等挑战。电气自动化技术凭借感知、决策等综合优势,融合多种现代技术,能为新能源发电系统高效安全运行提供全方位支撑。系统研究其在新能源发电系统中的应用模式与控制策略,对推动能源转型、保障电网安全、提升新能源消纳能力意义重大。

一、电气自动化技术体系及其在新能源发电中的角色

电气自动化是一个集成了传感测量、信息处理、自动控制、电力电子变换和通信网络于一体的综合性技术体系。在新能源发电领域,其核心功能主要体现在以下几个方面:(1)实时监测与状态感知:通过部署各类传感器(如风速仪、辐照度计、电流/电压互感器、温度传感器等)和智能电子设备(IED),对新能源发电单元(风机、光伏组件、逆变器、储能电池等)的运行状态、环境参数和电气量进行毫秒级的实时采集与上传,

为上层控制提供精准的数据基础^[1]。(2)本地快速控制与保护:利用可编程逻辑控制器(PLC)、数字信号处理器(DSP)或专用控制芯片,在发电单元本地实现快速闭环控制(如变桨控制、MPPT控制、并网控制)和故障保护(如过压、过流、孤岛保护),确保设备安全和电能质量。(3)协调优化与能量管理:在场站级或区域级,通过能量管理系统(EMS)或监控与数据采集系统(SCADA),对全场所有发电单元和储能系统进行集中监控、功率分配、无功调度和经济运行优化,最大化整体效益。(4)信息交互与远程调度:依托高速、可靠的通信网络(如光纤、5G、电力线载波),将新能源电站无缝接入电网调度中心,接收调度指令(如AGC/AVC),并上报运行数据,实现源-网-荷-储的协同互动。电气自动化技术贯穿于新能源发电系统的“发-变-储-送-用”全链条,是连接物理设备与数字世界的桥梁,也是实现新能源从“被动适应”到“主动支撑”电网转变的核心驱动力。

二、电气自动化在典型新能源发电系统中的应用

(一)在风力发电系统中的应用

在风力发电系统中,电气自动化技术的应用已经相当成熟,特别是对于大型风电机组而言,它们本身就是高度自动化的机电一体化系统。变桨距控制系统是确保风机安全和最大化捕获风能的关键。通过风速传感器和发电机转速信号,电气自动化系统能够实时计算最优桨距角,并驱动相应的执行机构进行调整。这样,在高

风速时限制功率输出防止机械过载，在低风速时则尽可能多地捕获风能，提高整体发电效率。双馈感应发电机（DFIG）和永磁直驱同步发电机（PMSG）采用的全功率或部分功率变流器，通过电气自动化系统的精确控制，实现发电机转速与电网频率的解耦，允许风机在宽范围风速下变速运行。这种变速恒频策略不仅提高了风能利用率，还减少了机械应力，延长了设备寿命。并网过程中，自动化系统保证电压、频率和相位同步，确保平稳接入电网，并通过变流器无功功率控制维持并网点电压稳定，抑制谐波，符合电能质量标准。此外，结合振动、油温、轴承温度等传感器数据以及大数据分析和机器学习算法，电气自动化系统还能对关键部件进行健康状态评估和早期故障预警，实施预测性维护，降低运维成本，提高设备可用率。这标志着风力发电系统不仅能高效发电，还能智能管理其运行和维护。

（二）在光伏发电系统中的应用

在光伏发电系统中，电气自动化技术对于克服其直流特性和光照条件敏感性至关重要。最大功率点跟踪（MPPT）是光伏逆变器的核心功能，旨在通过算法如扰动观察法、电导增量法等，实时调整逆变器输入阻抗，使光伏阵列工作于最大功率点（MPP），以最大化能量转换效率。这一毫秒级的调整对整体发电量有决定性影响。现代光伏逆变器不仅执行DC/AC转换，还作为智能电网的“友好接口”，具备低电压穿越（LVVRT）、高电压穿越（HVVRT）、有功/无功功率独立调节等功能，能够在电网故障时保持并网运行，提供必要支持。针对大型地面电站和分布式屋顶项目中的组串失配问题，每个组串配置智能优化器或微型逆变器，实现独立MPPT和监控，有效解决了局部功率损失，提高了系统发电量和可靠性^[2]。此外，借助云平台和移动终端，运维人员可以随时随地访问电站数据，包括实时发电信息、设备状态及历史曲线。自动化系统能够识别异常情况（例如热斑、接地故障），并自动生成告警和维修建议，从而大幅提高运维效率，减少人工巡检成本。这种智能化管理不仅提升了系统的稳定性和效率，也确保了更佳的电网兼容性和更高的经济效益。

三、新能源发电系统中的核心控制策略

（一）最大功率点跟踪（MPPT）策略

最大功率点跟踪（MPPT）是新能源发电系统能量转换效率的生命线。传统算法如扰动观察法（P&O）和电导增量法（IncCond）因其结构简单、易于实现而被广

泛应用，但在光照快速变化时易产生振荡或误判，影响跟踪精度。为克服这一局限，近年来研究者引入了模糊逻辑控制、神经网络、粒子群优化（PSO）等智能算法。这些方法能够更好地适应复杂多变的环境，通过自学习和自适应机制，实现更快、更稳、更准的MPP追踪。尤其在部分阴影条件下，光伏阵列的P-V曲线可能出现多个局部峰值，此时传统算法极易陷入局部最优。为此，全局MPPT策略应运而生，通过扫描法或多峰值检测机制，确保系统始终锁定全局最大功率点，从而最大限度地提升发电效益。

（二）变流器控制策略

变流器作为连接新能源与电网的核心枢纽，其控制策略直接决定了系统的动态性能和并网友好性。目前，矢量控制（VC）是最主流的高性能控制方法，它通过坐标变换（如dq变换），将交流量转化为直流量进行独立控制，实现了有功和无功功率的解耦，具有控制精度高、动态响应快的优点。另一种方法是直接功率控制（DPC），它无需复杂的坐标变换，通过查表或空间矢量调制直接控制瞬时有功和无功功率，具有结构简单、鲁棒性强的特点，特别适用于参数变化较大的场合。更为前沿的是虚拟同步机（VSG）控制策略，它通过在变流器控制环中模拟同步发电机的转子运动方程和励磁调节特性，赋予新能源发电单元“虚拟惯量”和一次调频能力^[3]。这一策略有效弥补了高比例电力电子设备接入导致的系统惯量缺失问题，显著增强了电网在扰动下的频率稳定性。

（三）无功功率与电压控制策略

高比例新能源接入常导致局部电网电压越限，尤其是在午间光伏大发或夜间风电出力高峰时段。为应对这一挑战，需实施有效的无功/电压控制（AVC）。首先，充分利用新能源变流器的剩余容量，根据并网点电压偏差，动态发出或吸收无功功率，这是最经济、最快速的无功支撑方式。其次，在新能源场站配置静止无功补偿器（SVC）或静止同步补偿器（SVG），可提供更大容量、更快响应的无功调节能力，与新能源发电单元形成互补。更进一步，建立场站级、区域级和全网级的多层级AVC系统，通过分层分区协调控制，实现无功资源的全局优化配置，避免局部过补偿或欠补偿，从而在保障电压质量的同时，减少无功传输损耗，提升系统整体运行效率。

（四）储能协同控制策略

储能系统是平抑新能源波动、提供备用容量的关键。

电气自动化系统负责实现新能源与储能的深度协同。在平滑出力方面，系统通过低通滤波等算法，将新能源的短时波动功率由储能系统吸收或释放，使并网功率更加平滑，减轻对电网的冲击。在经济运行层面，系统可根据分时电价信号和负荷预测，在电价低谷时充电，高峰时放电，既提升新能源消纳，又增加电站经济收益。此外，在极端情况下，如电网发生大面积故障，储能系统可在自动化系统的控制下，为关键负荷或新能源场站自身提供启动电源，实现黑启动功能，助力电网快速恢复，显著提升系统的韧性与可靠性。

（五）智能调度与集群控制策略

面对海量、分散的新能源资源，传统的单点控制已无法满足系统级优化需求，必须向集群化、智能化调度演进。虚拟电厂（VPP）技术通过先进的信息通信技术和聚合控制算法，将地理上分散的风电、光伏、储能、可控负荷等资源整合成一个可统一调度的“虚拟”电厂，使其能够像传统电厂一样参与电力市场交易和辅助服务，提升新能源的市场竞争力。模型预测控制（MPC）则利用新能源功率预测、负荷预测和电价预测信息，滚动优化未来一段时间内的运行计划，在满足安全约束的前提下，实现经济效益和运行效率的最优平衡^[4]。为兼顾不同时间尺度的控制需求，还需构建“秒级-分钟级-小时级”的多时间尺度协调控制体系：秒级控制应对快速波动（如变流器底层控制），分钟级控制进行功率分配（如自动发电控制AGC），小时级控制进行经济调度（如日前计划），从而形成层次清晰、响应敏捷的综合调控架构。

四、前沿发展趋势与挑战

随着“云大物移智链”等新一代信息技术融合，电气自动化在新能源领域加速向智能化演进。数字孪生技术构建电站高保真虚拟模型，实现仿真推演、故障预演与控制优化；边缘计算与云边协同架构将决策下沉至边缘设备，兼顾低时延控制与云端大数据分析，缓解通信压力。人工智能深度赋能：深度学习提升功率预测精度，

强化学习自主优化控制策略，知识图谱辅助智能诊断与运维决策。然而，挑战依然突出：海量异构设备缺乏统一接入标准，网络安全防护体系薄弱，控制策略通用性不足，且高比例电力电子设备可能引发次同步振荡等新型稳定性问题。未来需聚焦构建开放、安全、韧性、高效的电气自动化新架构，以支撑高比例可再生能源的安全高效消纳，推动能源系统智能化与可靠运行协同发展。

结语

电气自动化技术是新能源发电系统不可或缺的“大脑”和“神经系统”。从单个发电单元的精细化控制，到整个场站的能量优化管理，再到与大电网的协同互动，电气自动化贯穿始终，为解决新能源的间歇性、波动性难题提供了系统性的技术方案。本文详细梳理了其在风电、光伏等场景的具体应用，并深入剖析了MPPT、变流器控制、无功电压调节、储能协同及智能调度等核心控制策略。面向未来，随着数字孪生、人工智能、边缘计算等前沿技术的深度融合，电气自动化将推动新能源发电系统向更智能、更灵活、更可靠的方向持续演进，为构建以新能源为主体的新型电力系统奠定坚实的技术基石。

参考文献

- [1] 李泽豪. 新能源发电系统的电气自动化控制策略研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025, (30): 77-79.
- [2] 冯耀锋, 李志昌. 电气自动化在新能源发电中的技术研究[J]. 中国设备工程, 2025, (09): 197-199.
- [3] 王建鹏. 新能源发电系统的电气自动化控制策略研究[J]. 电气技术与经济, 2025, (03): 342-344+351.
- [4] 李德伟, 李相华. 电气自动化在新能源发电中的关键技术[C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第七届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 2025: 515-517.