

电气自动化在新能源发电并网控制中的关键技术研究

乔闻

陕西华电榆横煤电有限责任公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4920

[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,其装机容量持续攀升。然而,新能源发电具有间歇性、波动性和弱惯性等固有特性,大规模接入电网对电力系统的安全稳定运行提出了严峻挑战。电气自动化技术作为实现新能源高效、可靠并网的核心支撑,在并网控制中发挥着不可替代的作用。本文系统梳理了新能源发电并网面临的主要技术难题,深入分析了电气自动化在并网控制中的关键应用领域,重点探讨了基于先进控制理论的并网逆变器控制策略、虚拟同步发电机(VSG)技术、多时间尺度协调控制、智能调度与预测控制以及信息物理融合系统(CPS)架构等关键技术。最后,结合当前发展趋势,对电气自动化在新能源并网控制中的未来研究方向进行了展望,旨在为构建高比例可再生能源电力系统提供理论支撑与技术路径。

[关键词] 电气自动化; 新能源发电; 并网控制; 虚拟同步发电机; 智能调度; 信息物理融合系统
中图分类号: TM76 **文献标识码:** A

Research on Key Technologies of Electrical Automation in Grid-Connected Control of New Energy Power Generation

Wen Qiao

Shaanxi Huadian Yuheng Coal and Electricity Co., Ltd.

[Abstract] With the global energy structure transformation and the advancement of the "dual carbon" goals, new energy power generation technologies represented by wind and solar energy have developed rapidly, with their installed capacity continuously rising. However, new energy power generation has inherent characteristics such as intermittency, volatility, and weak inertia. Large-scale grid integration poses serious challenges to the safe and stable operation of power systems. Electrical automation technology, as the core support for achieving efficient and reliable grid connection of new energy, plays an irreplaceable role in grid-connected control. This paper systematically reviews the main technical challenges faced by new energy power generation grid connection, deeply analyzes the key application areas of electrical automation in grid-connected control, and focuses on key technologies such as grid-connected inverter control strategies based on advanced control theory, virtual synchronous generator (VSG) technology, multi-timescale coordinated control, intelligent dispatch and predictive control, and cyber-physical system (CPS) architecture. Finally, combined with current development trends, the future research directions of electrical automation in new energy grid-connected control are discussed, aiming to provide theoretical support and technical paths for building a high-proportion renewable energy power system.

[Key words] electrical automation; new energy power generation; grid-connected control; virtual synchronous generator; intelligent dispatch; cyber-physical system

引言

截至2024年底,我国风电、光伏发电总装机容量已突破12亿千瓦,占全国总装机比重超过40%,部分地区新能源渗透率甚至超过50%。然而,传统电力系统是以同步发电机为主导的强惯性、强阻尼系统,而新能源发电主要通过电力电子变流器(如逆

变器)接入电网,呈现出“弱惯性、弱阻尼、无转动惯量”的“电力电子化”特征。这种结构性变化导致系统在频率调节、电压支撑、故障穿越、谐波抑制等方面面临诸多挑战,严重威胁电网的安全稳定运行。在此背景下,电气自动化技术凭借其在感知、控制、通信、决策等方面的综合优势,成为解决新能源并网难题

的关键手段。电气自动化不仅涵盖传统的自动控制理论与装置,更融合了现代信息技术、人工智能、大数据分析等前沿成果,形成了面向高比例新能源电力系统的智能化并网控制体系。因此,深入研究电气自动化在新能源发电并网控制中的关键技术,对于提升新能源消纳能力、保障电网安全、推动能源转型具有重要的理论价值与现实意义。

1 新能源发电并网面临的主要技术挑战

1.1 功率波动性与不确定性

风能和太阳能受气象条件影响显著,出力具有强随机性和不可控性。例如,云层遮挡可导致光伏出力在数秒内骤降70%以上;风电场尾流效应和风速突变亦会造成功率剧烈波动。这种波动若未经有效平抑直接注入电网,将引发电压闪变、频率偏差等问题,影响电能质量。

1.2 系统惯量下降与频率稳定性恶化

传统同步机组通过转子动能提供系统惯量,在负荷突增或机组跳闸时可延缓频率下降速率。而新能源机组通过变流器解耦了机械系统与电网,无法自然提供惯量支撑。随着新能源渗透率提高,系统整体惯量水平显著下降,频率响应能力减弱,极端情况下可能引发频率失稳甚至大停电事故。

1.3 电压支撑能力不足

新能源电站通常位于电网末端或弱连接区域,短路容量较低。当发生故障或负荷突变时,易出现电压跌落或越限。此外,逆变器控制策略若未充分考虑无功调节能力,将难以提供有效的动态电压支撑,影响系统暂态稳定性。

1.4 故障穿越能力要求高

电网规范(如GB/T19963、GB/T19964)明确要求新能源电站具备低电压穿越(LVRT)和高电压穿越(HVRT)能力。即在电网电压骤降或升高期间,机组需保持并网运行并向电网注入无功电流以支撑电压恢复^[1]。这对逆变器的控制算法、保护逻辑及硬件可靠性提出了极高要求。

1.5 谐波与次/超同步振荡风险

大量电力电子设备的非线性特性会引入谐波污染。更严重的是,在特定工况下(如弱电网、长距离输电),新能源机组与串补线路、HVDC系统或其它变流器之间可能发生次同步振荡(SSO)或超同步振荡(SSCI),威胁设备安全与系统稳定。

2 电气自动化在并网控制中的核心作用

电气自动化通过集成传感、控制、通信与计算单元,构建“感知—决策—执行”闭环,为新能源并网提供全方位技术支撑。在实时监测与状态感知方面,利用PMU(同步相量测量单元)、智能电表、SCADA系统等设备,能够实现对电压、电流、频率、功率等关键参数的毫秒级采集,为上层控制提供精准数据基础。在智能控制与动态调节层面,基于先进控制算法,系统可实现有功与无功功率的精准调控、频率与电压的主动支撑,以及在电网扰动下的快速响应能力。在协同优化与调度决策方面,电气自动化技术结合功率预测信息与优化模型,支持多源协同运行和源网荷储互动,从而提升整个电力系统的运行效率与灵活性。此外,在

信息集成与安全防护方面,通过采用IEC61850、OPCUA等标准化通信协议,实现了不同厂商设备间的互操作性,同时借助网络安全机制有效防范针对控制系统的恶意攻击,保障了并网控制系统的完整性与可靠性。

3 关键技术研究

3.1 基于先进控制理论的并网逆变器控制策略

并网逆变器是新能源与电网之间的核心接口,其控制策略直接决定了并网性能的优劣。矢量控制通过在dq旋转坐标系下对有功与无功分量进行解耦,实现独立且精确的功率调节,广泛应用于三相并网系统,具有动态响应快、稳态精度高的优点,但其性能高度依赖锁相环提供的电网相位信息,在弱电网条件下容易出现稳定性问题。直接功率控制则绕开了锁相环节,通过瞬时功率误差直接选择最优电压矢量,结构简洁且动态性能优异,但存在功率纹波较大、开关频率不固定等缺点,限制了其在高电能质量要求场景中的应用^[2]。近年来,模型预测控制因其强大的多变量处理能力和对系统约束的天然兼容性受到广泛关注,它利用系统离散模型对未来状态进行滚动预测,并在线优化开关序列,能够兼顾电流跟踪精度、开关损耗与故障穿越能力,但其较高的计算复杂度对控制器硬件提出了更高要求。针对电网阻抗变化、参数摄动等不确定性因素,自适应控制与鲁棒控制方法被引入逆变器控制设计中,通过在线调整控制参数或构造具有强鲁棒性的控制器结构,显著提升了系统在弱电网或非理想工况下的稳定性和抗干扰能力。

3.2 虚拟同步发电机(VSG)技术

虚拟同步发电机技术通过在电力电子变流器的控制回路中嵌入同步发电机的机电暂态模型,使新能源发电单元能够模拟传统同步机的外特性,从而主动参与系统频率与电压调节。其核心在于引入虚拟惯量和阻尼系数,构建类似于转子运动方程的动力学关系,使得逆变器在面对功率扰动时能够像同步机一样释放或吸收动能,延缓频率变化速率。这一技术不仅有效缓解了高比例新能源接入带来的系统惯量缺失问题,还增强了多台逆变器并联运行时的功率分配精度与稳定性。当前的研究热点已从基础VSG模型构建转向更复杂的工程应用场景,例如如何根据运行工况自动整定虚拟惯量参数以平衡动态响应与系统稳定性,如何与储能系统协同优化配置以提供持续的惯量支撑,以及在微电网与主网切换过程中如何实现VSG控制模式的平滑过渡,避免产生冲击电流或电压波动。这些进展使得VSG技术逐步从理论走向实用,成为提升新能源电网友好性的关键技术路径之一。

3.3 多时间尺度协调控制体系

新能源并网控制本质上是一个覆盖多时间尺度的复杂系统工程。在毫秒级时间尺度上,逆变器底层的电流或电压环控制必须确保快速、精确地跟踪指令,以维持设备安全和电能质量;在秒级尺度上,场站级的自动发电控制(AGC)和自动电压控制(AVC)系统负责根据调度指令动态调节总有功与无功出力,实现局部功率平衡;在分钟级尺度上,基于超短期功率预测的滚动优化调度策略可提前预判风光出力波动,并协调储能充放电或备用机

组动作,有效平抑净负荷变化;而在小时级乃至日前尺度上,系统级的经济调度与机组组合则着眼于全局资源优化配置,以最小化运行成本并满足可靠性约束^[3]。电气自动化技术通过构建分层分布式控制架构,特别是依托IEC61850标准定义的逻辑节点模型,实现了从设备层到系统层的信息贯通与指令协同,形成了“就地快速响应+区域协调优化+全局经济调度”的一体化控制体系,显著提升了新能源并网的可控性与灵活性。

3.4 智能调度与预测控制

准确的功率预测是实现新能源主动控制的前提。近年来,基于深度学习的预测模型,如长短期记忆网络(LSTM)和Transformer架构,在处理风速、辐照度等时序气象数据方面展现出卓越性能,使得超短期(0-4小时)风电与光伏功率预测的平均绝对误差已降至10%以内。在此基础上,智能调度系统构建了“预测-优化-控制”的闭环运行机制:首先利用高精度预测数据生成日前或日内调度计划;随后在运行过程中,通过模型预测控制(MPC)或强化学习(RL)等先进算法,根据实际出力偏差和电网状态在线调整控制策略;同时,结合储能系统的灵活调节能力,对新能源出力进行削峰填谷,将其转化为具有一定可调度性的电源。实践表明,某省级电网在部署“风光功率预测+储能协同调度”系统后,不仅将弃风弃光率降低了15%,还显著减少了调频辅助服务的采购成本,验证了智能预测与控制技术在提升新能源消纳效率方面的巨大潜力。

3.5 信息物理融合系统(CPS)架构

高比例新能源电力系统本质上是一个高度耦合的信息物理融合系统(CPS),其稳定性不仅取决于物理电网的拓扑与参数,更依赖于信息网络的实时性、可靠性与安全性。为此,电气自动化正推动构建“云-边-端”三级协同的新型CPS架构。在端侧,智能逆变器、馈线终端单元(FTU)等设备具备本地自治控制能力,可在通信中断时维持基本运行;在边缘侧,区域协调控制器负责处理局部优化、故障隔离与黑启动等任务,减轻云端负担并降低通信延迟;在云端,依托大数据平台和高性能计算资源,实现全网态势感知、风险预警、数字孪生仿真及全局优化策略生成^[4]。该架构普遍支持5G或时间敏感网络(TSN)等新一代通信技术,确保控制指令在亚毫秒级时延内可靠传输。更重要的是,通过构建电网的数字孪生体,可在虚拟环境中对新控制策略进行充分验证,大幅降低现场调试风险,为复杂电网的安全稳定运行提供了全新的技术范式。

4 未来研究方向与挑战

首先,随着新能源渗透率持续攀升,传统基于同步机的小信号稳定性理论已难以准确描述电力电子化电力系统的动态行为,亟需建立新的建模方法、稳定性判据与控制边界理论。其次,在多类型能源协同方面,如何实现风光水火储等多种异构电源在时空尺度上的深度耦合与灵活互动,仍是系统级优化的重大难题。第三,虽然人工智能技术在预测与优化中展现出强大能力,但其“黑箱”特性在安全关键的电力控制系统中引发了对可信性、可解释性与故障追溯能力的担忧,如何构建兼具高性能与高可靠性的智能控制算法仍需深入探索。第四,随着控制系统高度网络化,网络安全威胁日益突出,一旦遭受针对性网络攻击,可能导致控制指令篡改或设备误动,进而引发连锁故障,因此必须同步提升系统的网络韧性与主动防御能力。最后,当前市场上不同厂商的自动化设备在通信协议、数据模型等方面尚未完全统一,互操作性瓶颈制约了自动化系统的规模化、标准化部署,亟需加强行业标准体系建设与开放生态构建。未来的研究应聚焦于物理系统、信息系统与控制理论的深度融合,致力于发展具备自感知、自决策、自适应能力的新一代智能并网控制系统。

5 结语

电气自动化是支撑新能源大规模、高比例并网的核心技术支柱。本文系统分析了新能源并网的技术挑战,阐述了电气自动化在并网控制中的关键作用,并重点探讨了VSG技术、多时间尺度协调控制、智能预测调度、CPS融合架构等前沿方向。研究表明,通过先进控制理论、信息技术与电力电子技术的交叉融合,可有效提升新能源的可控性、可调度性与电网友好性。未来,随着新型电力系统建设的深入推进,电气自动化将持续演进,为构建安全、高效、绿色、智能的现代能源体系提供坚实技术保障。

[参考文献]

- [1]张人木.电气自动化在新能源发电中的关键技术[J].中国高新科技,2024,(04):34-35+50.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]霍江帅.电气自动化在新能源发电中的关键技术[J].中国高新科技,2023,(23):111-113.