

新能源风电场电气自动化控制技术的应用

毕伟杰 屈春花 赵祥凯 田波 石峰

华能内蒙古蒙东新能源有限公司，内蒙古赤峰，024000；

摘要：在全球能源结构向清洁低碳转型的大环境下，新能源风电场的高效稳定运行越来越依赖电气自动化控制技术。本文主要研究新能源风电场电气自动化控制技术的应用，分析风电场电气自动化控制的核心架构体系，对机组核心环节控制、并网调度控制、安全防护控制等关键技术的应用逻辑进行深入分析，探究自动化控制技术在提高风能利用效率、保证并网稳定性和加强运行安全方面的作用。通过对分层控制架构、核心控制策略及协同控制模式的系统梳理，为新能源风电场电气自动化控制技术的优化应用提供理论与实践参考，助力风电产业高质量发展。

关键词：新能源风电场；电气自动化；并网控制；安全防护

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.004

引言

风能属于清洁可再生能源的重要部分，对于能源转型而言有着十分重要的地位。新能源风电场的规模化发展对运行控制的要求提高，电气自动化控制技术凭借高效信号处理和精确执行调控能力，成为解决风电场运行管控难题的核心支撑。该技术综合应用了多学科技术，实现了风电场运行全过程自动化控制。本文主要针对其应用维度展开论述，分析其架构组成和关键技术要点，给进一步的应用提供参考。

1 新能源风电场电气自动化控制的核心架构体系

1.1 分层分布式控制架构的构成逻辑

新能源风电场电气自动化控制核心架构为分层分布式，功能模块化划分，达到高效协同和信息准确传输。架构由上而下分成现场设备层、控制层和监控信息层。各层次之间依靠标准通信协议和传输链路来交换数据、发出指令。现场设备层是感知和执行终端，包括传感器、执行机构、智能仪表，分别对参数进行采集、对执行进行操作、对反馈的电能参数进行监测。控制层以可编程逻辑控制器为主，完成数据处理等任务，可以配置主、辅控制器分别控制不同的单元。监控信息层包含本地人机交互界面等，完成机组运行状态的监控、参数的设置、报警的处理以及数据的存储分析，为运维提供支持^[1]。

1.2 架构内通信网络的协同机制

通信网络给架构高效运行提供纽带，多层次、高可靠的通信链路保证信息的实时传输。控制层内部用工业以太网或者现场总线进行高速数据交换，采用抗干扰强、延迟低的通信协议。控制层和监控信息层用工业以太网相连，用标准化的协议互相传递数据。风电场同集控中心或者电网调度之间经由光纤、无线通信等搭建起

远程传输链路。通信网络系统通过冗余设计来提高可靠度，保证自动化控制系统连续稳定的工作。

1.3 架构核心控制单元的功能定位

核心控制单元分为主控制器、机舱控制器、轮毂变桨控制器等，共同完成风电场全流程自动化控制。主控制器装在塔基柜里，是控制体系的中枢，汇集设备信号，实行全局控制，调度各个层次的通信。机舱控制器主要完成机舱本地控制，获取气象站数据，驱动偏航电机，检测环境参数，触发保护动作，管理辅助设备运行。轮毂变桨控制器经由滑环与机舱进行通信，按照主控制器的指令来调节叶片桨距角，从而提升风能捕获效率，在紧急状况下可以顺桨制动以确保安全。各个单元用标准化接口和协议来实现联动，形成控制闭环。

2 风电机组核心环节的电气自动化控制技术应用

2.1 变桨距自动化控制的应用逻辑

变桨距控制是新能源风电场提高风能利用效率、保证机组安全运行的关键部分，电气自动化控制技术依靠精确调节叶片桨距角，使风电场在各种风速下都能达到最佳的运行状态。在低风速工况下，自动化控制系统依靠传感器实时采集风速数据，经过控制器运算之后向变桨执行机构发出指令，使叶片桨距角接近0°的最佳攻角位置，从而增大叶片迎风面积来捕获更多的风能，配合发电机转矩控制实现最大功率点跟踪。当风速达到额定值的时候，控制系统会增大桨距角来限制叶片捕获的风能，防止发电机输出功率超过额定值，保证机组稳定运行。风速过高或者出现故障等紧急情况下，自动化控制系统立刻启动紧急变桨逻辑，把叶片桨距角驱动到90°的顺桨位置，利用空气动力学原理实现气动刹车，配合机械制动系统快速降低机组转速，保证机组结构安

全。变桨距自动化控制采取高速闭环控制策略，依靠实时的叶片角度信号反馈来不断修正控制指令，改善调节的精度和响应的速度，以满足风能资源动态变化的特性^[2]。

2.2 偏航自动化控制的实现路径

偏航自动化控制技术就是根据风向的变化来调整机舱的方向，使风轮轴线始终对准来风方向，从而最大限度地提高风能的捕获效率，是新能源风电场电气自动化控制的重要组成部分。该技术利用风向传感器实时采集风向数据，将数据传给机舱控制器，控制器通过逻辑运算得出机舱需要转动的角度，然后驱动偏航电机带动机舱缓慢转动，达到对风调节的目的。自动化控制系统具备自动投入与退出的功能，在正常发电过程中不断对机舱的方向进行调整，从而提高风能的捕获效率；当停机或者出现紧急情况时停止偏航动作，防止由于无效能耗或者结构破坏引发的问题。为防止偏航过程中出现电缆缠绕的情况，控制系统加入了扭缆保护功能，通过检测偏航角度来控制解缆，当偏航角度达到设定阈值时，自动控制机舱反向旋转释放电缆，防止电缆损坏影响机组运行。偏航自动化控制依靠准确的风向跟踪以及智能的保护逻辑，给风电机组高效稳定运行提供保证。

2.3 机组启停与制动的自动化控制

机组启停、制动的自动化控制技术是保证新能源风电场安全运行的基础，用标准的控制逻辑使机组在各种工况下平稳过渡并加以安全防护。在启动控制上，自动化控制系统实时监测风速、电网状态等重要参数，当风速达到启动阈值并且电网状态满足并网要求时，自动执行启动程序，依次完成机械刹车释放、叶片角度调整、发电机转速提升等操作，利用软启动装置使机组平稳并网，不会对电网造成冲击。正常停机控制中，控制系统根据风速变化、电网调度指令等执行脱网操作，调整叶片角度到安全位置，启动机械制动使机组平稳停机。当发生超速、振动超限、电网故障等紧急情况时，系统立刻进入紧急停机状态，切断所有输出信号，旁路常规控制指令，启用气动制动和机械制动双重保护，迅速断开所有电气连接，直到人工复位前不允许机组重新启动。启停和制动控制过程依靠准确参数监测、快速指令响应来保证机组运行的安全性和稳定性。

3 风电并网与调度的电气自动化控制技术应用

3.1 并网过程的自动化控制策略

风电并网是新能源风电场实现电能输送的重要环节，电气自动化控制技术依靠精确的控制策略来保证并网过程平稳、安全，使风电机组输出的电能符合电网接入标准。并网准备阶段，自动化控制系统对发电机输出

的电压、频率、相位等参数进行实时监测，同时得到电网侧的电压、频率信息，经过逻辑运算得到并网参数。根据风电机组类型和运行工况，控制系统可以采用直接并网、软并网等不同的并网方式，软并网方式通过调节功率器件的导通角来实现电压的平滑上升，有效地抑制并网冲击电流，保护发电机和电网设备。并网过程中，控制系统实时监测并网电流、功率等参数，根据情况动态改变控制策略，保证并网过渡平稳，防止出现电压波动、频率偏移等问题。当电网出现故障的时候，并网自动化控制系统立即触发脱网保护，将风电机组从电网中脱离出来，防止故障蔓延到风电场内部设备上，保证机组和电网的安全^[3]。

3.2 功率输出的动态调节控制

电气自动化控制技术依靠对风电机组功率输出的动态调节，使风电出力同电网负荷达成精确匹配，从而改善风电并网的稳定性和可靠性。控制系统实时采集电网负荷变化、风电出力波动等信息，根据风速预测数据用先进的控制算法调整风电机组运行参数。当电网负荷较大时，控制系统优化变桨距和发电机转矩控制策略，提高机组输出功率，尽可能满足电网电力需求；当电网负荷较小时，适当降低机组输出功率，防止电能过剩造成电网频率波动。根据风能资源的随机性、间歇性特点，控制系统采用功率平滑控制策略，和储能系统配合，在风电出力高峰时将多余电能储存在储能装置里，在出力低谷时释放储能电能，从而平抑风电出力的波动^[4]。功率输出动态调节控制依靠准确的负荷匹配以及波动平抑，加强了风电在电网中的消纳能力，保证了电网的稳定运行。

3.3 远程调度与协同控制的应用

远程调度与协同控制技术依靠电气自动化技术，使风电场同电网调度中心之间高效联动，从而提高风电场运行的智能化程度以及调度的灵活性。风电场监控信息层利用远程通信链路同电网调度中心相联系，把风电场的运行状况，发电量，出力预估等数据实时上传，而且接收调度中心发出的负荷调节，启停控制等指令。自动化控制系统按照调度指令自动调节风电场的运行策略，对风电机组集群进行协同控制，保证风电场整体出力满足电网调度的要求。根据大规模风电场集群控制的要求，控制系统采取分层调度的方式，由风电场级控制器对各个机组进行协调，提高整体风能利用率，同时满足电网调度全局控制的要求。远程调度与协同控制技术的应用，实现了风电场运行的精细化管理、高效调度，提高了风电在电力系统中的协同运行能力。

4 风电场安全防护的电气自动化控制技术应用

4.1 设备状态监测与故障诊断自动化

电气自动化控制技术被应用到风电场设备状态监测与故障诊断中，可以提前预警运行风险、精准控制，降低运维成本，保证安全稳定的运行。控制系统安装各种监测设备，对关键部件的运行参数进行实时采集并上传到控制中心。控制中心用智能算法分析数据，找出异常特征，参数超阈值时发出报警、推送重要的信息。轻微故障可以远程调节参数进行在线处理，严重故障就触发停机保护^[5]。创建设备运行数据库可以追溯分析故障历史数据，为维修计划提供支持，提高维修的针对性与有效性。

4.2 电气系统安全防护控制

电气系统安全防护是新能源风电场运行核心保障，电气自动化控制技术用多重防护策略控制电气回路、设备绝缘、过电压等风险。控制系统集成了多种电气保护功能，可以实时监测参数，在出现异常的时候会触发保护机制来切断电源。对于户外环境，具备环境适应性防护功能，监测环境参数并启动辅助设备。同时利用冗余设计和绝缘监测来提高可靠性，给风电场提供全方位的电气保护。

4.3 应急处置的自动化控制机制

应急处置的自动化控制机制，用电气自动化技术实现风电场突发故障的快速响应和科学处置，减少损失，保证人员和设备的安全。控制系统预设应急流程，发生突发情况时自动启动响应流程，执行相关操作。记录处置中关键参数，用报警系统指导运维人员。重要的控制单元配备备用电源，在主电源断电时可以完成关键操作。该机制可以提高风电场对突发故障的应对能力，筑牢安全防线^[6]。

5 自动化控制技术与储能系统的协同应用

5.1 协同控制的核心架构与原理

新能源风电场中，电气自动化控制技术同储能系统相互配合使用，可以改善风电出力的稳定性，提高能源的利用效率。其核心架构以风电场控制体系为依托，把储能系统控制单元整合起来形成协同管控闭环，依靠风电场主控制器和储能系统控制器之间的通信联动，共享关键信息，给协同控制策略提供数据支持。核心原理就是实现风电出力和储能调节的精准匹配，高峰时储能系统吸收多余电能，低谷时释放储备电能，实现平滑稳定的输出，还可以参与电网辅助服务，提高电网的稳定性。

5.2 储能系统的自动化调度控制

电气自动化控制技术可以实现储能系统精细化调度控制，按照风电场的工况以及电网的需求来改变充放电的状态。利用风电、电网负荷预测的数据，用模型预测控制算法来制定出优化的调度计划，提前规划、精准调控充放电行为。实时监测储能设备参数，根据实时情况调节功率，防止过充过放。根据不同的储能布局采取分层调度的方式，消化风电的波动，减轻主网的压力。电网出现问题的时候，快速调节储能系统充放电状态，恢复频率和电压^[7]。

5.3 协同应用的运行优化效果

二者协同使用提高了新能源风电场运行优化的效果和综合效益。平滑控制风电出力，减小风能对电网的冲击，提高并网质量与消纳能力，减少弃风损失。储能系统参与到电网辅助服务当中来，提高电网的稳定性以及可靠性，从而带来额外的经济收益。协同控制技术来优化运行参数，实现资源的高效匹配，提高能源利用效率。通过自动化控制技术进行远程监控、故障诊断，减少运维工作量，提高效率。

6 结语

新能源风电场电气自动化控制技术贯穿于运行全过程，用各种技术手段提高风能利用率、运行稳定性、安全性，为风电产业规模化发展提供重要的技术支撑。该技术以后将会朝着更加精确的控制策略、更加高效的协同方式方向发展，并进一步的加以优化利用，有利于推动风电产业的高质量发展，促进能源结构的转变，从而达到可持续发展的目标。

参考文献

- [1]白晓帅,李伟.新能源开发中电气工程自动化节能措施应用[J].中国高新科技,2022,(17):40-41+44.
- [2]阎诚.考虑源荷不确定性的电力系统频率调控策略研究[D].东南大学,2022.
- [3]本刊.上海电气风电入选中国数字化转型新范式项目[J].机械制造,2022,60(04):35.
- [4]赵梦阳.抑制直流扰动下风电场暂态过电压的调相机配置方法研究[D].南京师范大学,2021.
- [5]李亚辉.风电电气工程自动化中的问题及解决对策[J].电力设备管理,2021,(02):120-121.
- [6]梁涛.大规模风电并网条件下电力系统运行中电气自动化技术应用研究[J].自动化应用,2020,(05):87-88.
- [7]曹敏健.多运行场景下储能优化配置方法及实现策略[D].东南大学,2019.