

基于 PLC 技术的新能源风力发电控制系统研究

乔静男

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘 要 在新能源风力发电系统运行中, 控制系统与发电效率、发电安全联系密切。可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)具备高效、稳定、灵活的优势, 现已在新能源风力发电控制系统中实现了应用。本文总结了 PLC 技术应用优势及核心功能, 从硬件设计、软件设计、中断程序设计、设计效果验证层面入手, 结合实际案例阐述了 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用设计, 旨在对充分发挥出新能源风力发电控制系统中 PLC 技术的重要作用有所裨益, 进而保障新能源风力发电系统运行可靠, 提高新能源利用水平。

关键词 PLC 技术; 新能源; 风力发电控制系统

中图分类号: TM61; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.022

0 引言

风速变化会影响风电机组输出功率, 不仅威胁电网供电质量, 还会导致新能源风力发电机组运行年限下降。因此, 应保障控制系统可靠性, 提升控制系统精度, 从而实现新能源风力发电机组全程监测、灵活调节及故障保护, 为新能源风力发电系统稳定运行打下坚实的基础。近年来, 在工业自动化技术飞速发展的背景下, PLC 技术凭借其模块化结构、灵活、抗干扰能力强等优势, 逐渐在控制系统中实现了应用, 并成为新能源风力发电控制系统中的核心技术。由此可见, 加强新能源风力发电控制系统中 PLC 技术应用研究具有积极的现实意义。

1 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用优势

其一, 抗干扰能力优越。新能源风力发电机组所处环境恶劣, 易受电磁辐射、温度波动、振动等因素干扰。而 PLC 硬件为模块化结构, 内部有电源滤波等抗干扰设计, 可保障复杂环境下功能发挥稳定, 平均无故障时间可达 10 万小时, 能够为新能源风力发电机组长时间连续运行打下基础。其二, 灵活性强。PLC 技术支持多种编程方式, 如梯形图、结构化文本等, 工程师可结合控制需求展开灵活设计, 还可添加通信模块等实现 PLC 系统扩展, 从而满足 1.5 MW、2.5 MW 等多功率的新能源风力发电机组控制要求。其三, 故障诊断功能。PLC 系统可借助内置诊断程序监测 CPU、I/O 模块等自身硬件设施及执行机构、传感器等外部设备运行状态。如某设备出现故障, PLC 系统可实时记录故障代码及故障发生时间, 再通过人机交互界面发出报警信号, 管理人员可快速定位故障问题, 从而提升故

障处理效率^[1]。其四, 通信互联能力优越。在新能源风力发电机组运行中, 应保障各机组与监控中心实现互联。PLC 技术支持多种通信协议, 机组运行转速、运行功率、环境风速及设备故障信息可实时上传至监控中心, 同时还可接受监控中心所下达的各项指令, 从而实现各机组的集中监管。

2 PLC 技术在风力发电控制系统中的核心功能

其一, 数据采集功能。PLC 系统可借助多种传感器实时采集新能源风力发电机组运行参数及外部环境因素, 从而为控制指令下达提供数据依据。其二, 变桨距控制功能。在新能源风力发电机组运行中, 变桨距系统是影响风能利用的重要系统。当外部风速低于额定风速时, PLC 系统可将桨叶角度调整为最佳迎风位置, 从而提高风能利用效率; 当风速超过额定风速时, PLC 系统可降低桨叶角度, 以此减少风能吸收, 保障新能源风力发电机组运行安全。其三, 偏航控制功能。PLC 系统可根据风向信号控制偏航电机驱动机舱旋转, 从而保障风轮轴线与风向对应^[2]。其四, 并网控制功能。在新能源风力发电机组运行中, 借助 PLC 系统可调节发电机转速, 从而保障发电机输出电压、输出频率与电网参数统一。当参数匹配完成后, PLC 系统可发出指令控制并网接触器闭合, 从而保障并网过程更加平滑, 避免并网冲击影响电网及新能源风力发电机组运行。其五, 故障保护功能。当 PLC 系统检测到转速过高、电压异常等异常时, 保护机制可立刻激发, 再利用紧急顺桨、暂停发电机运行等方式实现故障保护。同时还可记录故障信息, 发出报警信号, 从而降低故障影响。

3 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用设计

3.1 案例背景

以某新能源风力发电场为例,该发电场规划建设 30 台 2.0 MW 陆上风电机组。该发电场位于风速波动大、昼夜温差大、沙尘天气频发的戈壁地区,对风力发电控制系统抗干扰能力、环境适应性、控制精度要求较高。为保障新能源风力发电机组运行稳定,该发电厂应用基于 PLC 的控制系统方案,核心控制单元为罗克韦尔 Allen-BradleyControlLogix5570 系列 PLC,变频器为施耐德 ATV630 系列变频器,传感器为 Banner 风速风向传感器,人机交互界面为昆仑通态 TPC1561Hi 触摸屏。

3.2 硬件设计

3.2.1 硬件整体架构

该项目 PLC 系统硬件采用四层架构设计,通过工业通信协议实现各层级高效互联,构建起数据采集、逻辑运算、指令执行及状态反馈的闭环控制体系,充分适配戈壁地区风电场风速波动大、昼夜温差悬殊、沙尘频发的复杂运行环境,为机组稳定运行提供硬件支撑。

1. 数据采集层。以各类高精度检测设备为核心,全面捕捉风电场环境与机组运行状态数据。风速传感器可精准采集 0 ~ 30 m/s 的风速信号,风向传感器实现 0° ~ 360° 风向的实时监测,二者共同为机组对风控制提供基础依据;转速编码器持续跟踪主轴与发电机的转动状态,确保转速参数实时反馈;温度传感器则重点监测齿轮箱、发电机定子及机舱环境温度,及时预警设备过热风险,为控制决策提供全面、可靠的原始数据支撑^[3]。

2. 控制核心层。选用高性能 PLC 作为主控单元,配套 I/O 框架及各类功能模块构建核心控制网络。该 PLC 搭载多核处理器,具备强大的并行运算能力,可高效处理变桨距控制、并网调节、故障诊断等多类任务,且支持大规模 I/O 扩展,满足风电场多设备、多参数的控制需求。其配套的 I/O 框架支持功能模块热插拔,可在机组不停机状态下完成维护升级,大幅提升运维效率;模拟量输入模块以高分辨率采集各类环境与设备信号,具备光电隔离功能,有效抵御电磁干扰;数字量输出模块可稳定驱动接触器、继电器等执行机构,且自带过流保护机制,确保控制指令安全、精准输出。

3. 执行驱动层。整合变频器、偏航电机及并网接触器等核心执行设备,实现控制指令的高效落地。变频器专为变桨电机驱动设计,响应速度快,可精准调节变桨动作,保障叶片角度与风速的动态匹配;偏航电机通过减速器驱动机舱旋转,配套电磁制动装置,实现机舱对风角度的稳定控制,提升风能捕获效率;并网接触器具备高电压、大电流承载能力,支持 PLC

远程控制,且内置可靠的灭弧保护功能,确保机组安全、平稳并入电网。

4. 人机交互层。由触摸屏与工业路由器组成,构建现场运维与远程监控的双重交互通道。高清触摸屏可直观展示机组运行曲线、故障代码等关键信息,支持触摸操作与参数设置,方便现场运维人员快速掌握设备状态、及时处理故障;工业路由器采用高速通信技术,实现 PLC 与风电场 SCADA 系统的实时数据交互,保障远程监控指令的快速下达与运行数据的高效上传,显著提升风电场整体运维管理水平^[4]。

3.2.2 硬件选型与适配性分析

本项目中,罗克韦尔 Allen-BradleyControlLogix 5570 系列 PLC 环境适应能力及运算能力强,该 PLC 设备工作温度为 -25 ~ 60 °C,即使发电厂昼夜温差较大,PLC 设备仍可保持良好的运行状态。PLC 设备中的多核 CPU 可同时处理变桨距控制、并网、故障诊断任务,运算能力较强。此外,该 PLC 设备内置的 EtherNet/IP 协议可与多种设备实现互联,可降低通信额外硬件成本。传感器为 Banner 传感器,防尘外壳防护等级为 IP67 级,不仅具备基础的信息采集功能,还具有一定的防护功能。转速编码器为欧姆龙 E6B2 系列传感器,抗震性能优越,适用于主轴高速旋转振动环境中。温度传感器为倍加福 NBN8 系列传感器,金属外壳可避免沙尘侵蚀,保障信号传输稳定,从而实现关键部件温度准确监测。此外,变桨系统是影响机组运行稳定的核心系统,应用 EtherNet/IP 协议将变频器与 PLC 相连,PLC 可下发转速指令,并获取变频器状态信号。如检测到变桨机电流超过额定限值,PLC 可切断变频器使能,避免电机损坏。偏航电机为多台并联形式,PLC 可控制电机通断顺序,实现机舱精确控制,PLC 还可利用转速编码器获取机舱旋转角度,并实现偏航校正。

3.3 软件设计

3.3.1 软件开发环境

在本项目中,开发平台为罗克韦尔 Studio5000 软件,可实现结构化文本及功能块图的混合编程,软件扫描周期为 80 ms。

3.3.2 核心功能块设计与适配性分析

在本项目中,风电场所处区域风速波动较大,变桨距控制功能模块采用分段 PID 控制算法。当风速为 3 ~ 12 m/s, PID 比例系数设定为 0.8,积分时间设定为 1.2 s,从而实现桨叶角度的快速调整及风能最大化吸收;当风速为 12 ~ 20 m/s, PID 比例系数设定为 0.5,积分时间设定为 0.8 s,从而实现桨叶角度的缓慢调整,并降低功率变化对电网所造成的冲击。功能模块还可实现角度偏差监测,如桨叶角度较预定角度相比偏差

超过 3° ，可发出报警信号，并切换备用电机，从而保障变桨系统稳定运行^[5]。为避免并网对 10 kV 电网造成冲击，并网控制功能块采用软并网策略。在预充电阶段，PLC 控制变频器以 20% 额定电压形式输出 0.5 s，以此实现发电机定子绕组预充电；在同步阶段，借助电压互感器及频率互感器采集电网运行参数。再将采集参数与发电机输出参数相比较，当电压偏差低于 3%、频率偏差低于 0.2 Hz、相位差低于 5° 时，方可发出并网指令；在合闸阶段，选择分阶段合闸形式，将接触器闭合时间控制在 0.2 s 以内，避免电流产生冲击。

风电场所处区域沙尘多、温差大，故障诊断功能块可实现三类故障监测。在传感器故障监测中，当风速传感器信号丢失超过 5 s 时，可结合过往风速数据计算当前风速，从而避免机组停机；在温度故障监测中，当齿轮箱温度超过 85°C 时，冷却风扇可自动开启。当温度超过 95°C 时，可自动停机并发出报警信号。在电网故障监测中，当电网电压跌落超过 15% 时，可立刻断开并网接触器，控制变桨系统，避免发电机损坏。

3.4 中断程序设计

本项目中，控制系统设计三类中断程序，在超速中断设计中，当变桨系统顺桨转速超过 120% 额定转速时，即可立即中断，随后控制变桨电机紧急顺桨，从而避免发生飞车事故；在过温中断设计中，当新能源风力发电机组定子温度超过 130°C 时，即可立即中断，并启动散热系统，再上传故障信息；在电网中断设计中，当电网电压持续 0.5 s 低于额定值 80% 时，即可立即中断，并断开并网接触器，避免新能源风力发电机组故障。

3.5 冗余设计与容错机制构建

针对戈壁地区风电场风速波动剧烈、沙尘频发、昼夜温差大的极端环境特性，为强化控制系统抗故障能力，构建硬件冗余与软件容错协同的保障体系。

在硬件层面，核心控制单元采用双 PLC 热备架构，通过高速同步总线实现主从设备数据毫秒级同步，主 PLC 若出现 CPU 异常、通信中断等故障，从 PLC 可无缝切换接管控制任务，确保控制流程无间断。关键 I/O 模块实施冗余配置，模拟量输入模块采用双路采集校验机制，数字量输出模块预留备用通道，规避单一模块失效导致的执行机构失控风险。

在软件层面，嵌入容错控制算法提升系统鲁棒性。传感器数据异常时，启动多源数据融合策略，结合历史运行数据、相邻机组监测数据及气象预报信息，通过卡尔曼滤波算法重构核心参数，保障风速、转速数据的连续性与准确性。变桨距、偏航等关键系统内置故障自修复逻辑，单台变桨电机故障时，自动优化剩余电机负载分配，维持桨叶角度控制精度；偏航系统

采用电机冗余驱动，单台电机失效后通过调整其余电机输出扭矩，将机舱对风角度误差控制在 $\pm 1^{\circ}$ 以内。同时，建立控制程序在线备份与快速恢复机制，通过工业以太网定期将 PLC 程序备份至远程服务器，若程序因电磁干扰出现错乱，可一键恢复至最近稳定版本。硬件冗余与软件容错的协同设计，形成全链条保障体系，有效降低极端环境下的机组停机概率，为风电场连续稳定运行提供可靠支撑。

3.6 设计效果验证

在该风电场试运行 6 个月后，性能检测结果如下。其一，在 $-25 \sim 45^{\circ}\text{C}$ 环境中，PLC 及各传感器均稳定运行。在沙尘天气下，风速传感器精度低于 0.3 m/s，与设计要求相符。其二，当风速由 8 m/s 骤升至 15 m/s 时，变桨系统可在 0.4 s 内将桨叶角度由 15° 调整为 25° ，功率波动 $\leq 1.8\%$ 。其三，试运行阶段共发生 2 次传感器故障，PLC 均自动切换至备用控制模式。其四，较传统继电器控制系统的新能源风力发电机组相比，PLC 控制系统的新能源风力发电机组月平均发电量提升约 4.3%。

4 结束语

本研究结合某新能源风力发电场案例，围绕硬件设计、软件设计、中断程序设计展开分析，结合设计效果，验证了 PLC 技术在风力发电控制系统中的应用可行性及优越性。该设计方案实现了环境适配性与控制精确性的深度结合。在硬件设备选择中，结合项目所处区域环境，应用抗干扰能力强、防护等级高的硬件设备，以保障系统运行稳定。在软件设计上，应用分段 PID 控制算法、软并网策略、故障监测及中断保护，在充分利用风能的基础上，保障了新能源风力发电机组与电网运行安全。未来，可将物联网技术、大数据技术与 PLC 控制系统相结合。在技术持续迭代下，风力发电控制系统中的 PLC 技术将发挥出更重要的作用。

参考文献：

- [1] 艾浩. 基于 PLC 技术的新能源风力发电控制系统[J]. 电气技术与经济, 2025(04):133-135,142.
- [2] 陈文静. 新能源风力发电系统中自适应控制技术及应用及未来前景[J]. 电子测试, 2022(16):104-106.
- [3] 王宁. 新能源时代电力电子技术在风力发电中的应用分析[J]. 工程建设与设计, 2025(10):40-42.
- [4] 孙晓颖. 风力发电新能源电气系统设计与性能优化研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2025(07):164-167.
- [5] 郝显翔, 侯宏霖. 新能源发电系统的控制与优化技术研究[J]. 电子质量, 2025(03):66-69.