

Design of an IoT-Based Online Monitoring and Early Warning System for Insulation Resistance

Wenfei Liu¹ Lili Yang²

1. Shanxi Huakong Weiye Technology Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030024, China

2. Taiyuan Jiancaoping District No.1 Middle School, Taiyuan, Shanxi, 030023, China

Abstract

Aiming at the industry pain points of traditional insulation resistance measurement for three-phase asynchronous motors, such as power shutdown requirement, manual operation, low efficiency and no real-time early warning, an IoT-based online insulation resistance monitoring and early warning system was designed and implemented. The system adopts a hierarchical distributed architecture, with the domestic AT32F microcontroller as the core, and integrates a self-developed DC high-voltage injection measurement circuit. It innovatively realizes the intelligent safety logic of "automatic measurement upon power-off and automatic disconnection upon power-on" based on voltage detection. The measured data is remotely transmitted and synchronized to the cloud platform via WiFi and MQTT protocol, and the background monitoring platform realizes data visualization, storage and multi-terminal early warning for over-limit values. Experimental results show that the system has accurate measurement and stable operation, which can effectively realize online perception and intelligent management of the insulation state of three-phase asynchronous motors, provide reliable technical support for predictive maintenance of industrial equipment, and has good engineering application value.

Keywords

Internet of Things; Online Insulation Resistance Monitoring; Power Traction Equipment; Wireless Sensor Network; Predictive Maintenance; AT32F; MQTT

基于物联网的绝缘电阻在线监测与预警系统设计

刘文飞¹ 杨丽丽²

1. 山西华控伟业科技股份有限公司, 中国·山西太原 030024

2. 太原市尖草坪区第一中学校, 中国·山西太原 030023

摘要

针对三相异步电机绝缘电阻测量需断电、人工操作、效率低下且无实时预警的行业痛点, 设计并实现一套基于物联网 (IoT) 技术的绝缘电阻在线监测与预警系统。系统以自研绝缘电阻测量仪为核心, 创新实现基于电压检测的“断电自测量、上电自切断”智能安全逻辑, 通过WiFi与MQTT协议完成测量数据的远程传输与云端同步, 后台监控平台实现数据可视化、存储与超限多端预警。实验结果表明, 该系统测量准确、运行稳定, 可有效实现三相异步电机绝缘状态的在线感知与智能化管理, 为预测性维护提供可靠技术支持, 具有良好的工程应用价值。

关键词

物联网; 绝缘电阻在线监测; 动力拖动设备; 无线传感网络; 预测性维护; AT32F; MQTT

1 引言

三相异步电机是工业、交通及能源领域的核心动力设备, 其绝缘系统受电、热、机械及环境多重应力影响, 成为设备最易劣化的薄弱环节^[1-3]。据工业运维统计, 该类电机约 30% 的故障源于绝缘劣化, 易引发生产线中断甚至电气火灾等安全事故。而传统绝缘电阻测量为离线人工操作, 存在需长时间断电、仅能获取离散数据、无实时预警等痛点,

既影响生产效率, 也无法支撑设备预测性维护, 难以满足工业现场的实际需求。

随着工业 4.0 与智能制造的推进, 物联网、大数据技术的成熟推动异步电机绝缘电阻测量技术向在线化、智能化演进^[4-6]。当前主流在线监测技术主要基于接地泄漏电流分析、高频阻抗、频谱分析、开关瞬态分析三类原理, 各有优劣^[7]; 前沿研究则融合物理检测与人工智能算法, 探索绝缘寿命预测模型。该领域技术发展呈现三大趋势与挑战: 监测对象向全绝缘系统扩展、技术路线向多信息融合转变、工程应用向低成本系统化发展, 这要求后续系统设计需兼顾全面性、智能性与经济性^[8-9]。同时国内外研究存在明显短板, 国内方案

【作者简介】刘文飞 (1985-), 男, 中国山东济宁人, 硕士, 工程师, 从事工业现场电机设备保护及故障分析研究。

多聚焦高压电机, 低压电机的低成本高安全性监测方案稀缺, 国外方案则存在成本高、适配国内组网环境差等问题^[10-13]。

在此背景下, 研发适配低压三相异步电机的绝缘电阻在线监测系统迫在眉睫。本文设计实现一套基于物联网的异步电机绝缘电阻在线监测及预警系统, 从硬件设计、软件开发、系统测试三方面展开研发, 突破传统检测模式局限, 推动绝缘管理向预测性维护转变, 以为工业设备智能化升级提供技术路径, 为设备安全运行与运维效率提升提供支撑, 兼具重要的工程应用价值与实际推广意义。

2 系统总体设计方案

本文所设计的异步电机绝缘电阻在线监测系统, 采用分层分布式架构, 主要由绝缘电阻测量仪(前端采集单元)、无线 AP 设备(网络传输层)、后台服务器(含云端同步)(数据处理与服务中心)、以及移动式终端(用户交互层)四部分构成。系统通过无线局域网组网, 实现测量数据的自动采集、远程传输、集中处理与可视化访问。其具体组成与工作流程如下:

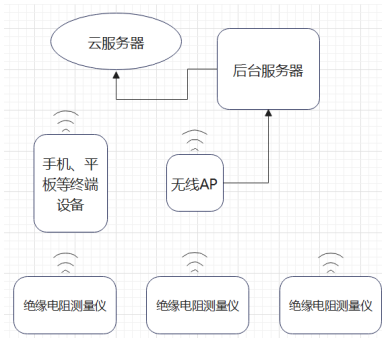


图 1 系统整体设计框图

绝缘电阻测量仪为前端测量单元, 其按预设周期或远程指令精准检测电机对地绝缘电阻, 内置 WiFi 通信模块, 测量完成后将测量值、设备标识、时间戳等数据封装上传。

数据经无线 AP 构建的局域无线网络汇聚, 再通过网线、光纤等有线网络稳定传输至远端后台服务器, 保障数据传输的实时性与可靠性。

后台服务器作为系统中枢, 完成前端数据的接收、解析、存储、分析及历史趋势计算, 依托数据库与 Web 服务程序为移动式终端提供数据接口; 用户通过终端可实时查看被测电机的绝缘电阻值、历史曲线及异常预警状态, 还能手动选定设备发起即时复测, 实现自动化例行监测与人工主动核查的结合。

整套系统形成现场采集、云端管理、移动式终端应用的完整闭环, 实现电机绝缘状态的远程、连续、智能化监控。

3 绝缘电阻测量仪硬件设计与实现

绝缘电阻测量仪硬件以微控制器(MCU)为核心, 各模块协同实现供电、高压生成、安全连接与精准测量(见图

2), 功能如下:

供电与电源管理模块: AC-DC 模块输出 12V、5V、3.3V 直流电为各单元供电, DC-DC 模块将 12V 升压至 500V/1000V 测试高压, 提供绝缘测量高压源; 测量核心与安全接入模块: 电阻分压模块实现高压转低压信号以精准计算电阻, 继电器隔离模块控制高压通断并实现电气隔离, 三相线路接入模块通过标准接口可靠连接电机三相绕组; 控制、交互与通信模块: MCU 统一调度各模块完成全流程控制; 开关量输入及上电反馈模块采集外部状态, 提升设备可监控性; 按键显示模块提供本地操作界面; WiFi 通信模块完成数据无线传输与远程指令接收, 为在线监测网络核心。

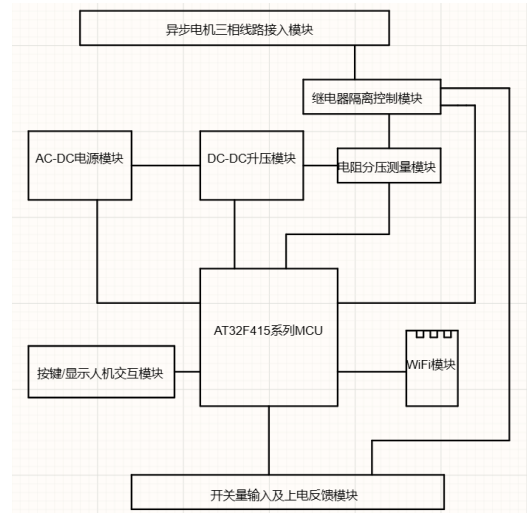


图 2 绝缘电阻测量仪硬件设计原理框图

4 软件系统设计与实现

4.1 绝缘电阻测量仪

测量程序基于 uC/OS-II 多任务实时系统开发, 通过循环检测接入端电压信号, 切换触发自动测量、安全保护、远程指令响应三种工作模式, 兼顾测量的安全性与智能化。

自动测量模式下, 检测到电机断电后, MCU 控制继电器切换, 将测试高压接入三相绕组, 经 ADC 模块采样分压信号并计算各相对地绝缘电阻, 数据封装后通过 WiFi 上传。

安全保护模式中, 监测到电机上电即中断测量, 先关闭 DC-DC 升压模块切除高压, 再断开继电器实现电气隔离, 系统转入低功耗监听模式。

远程指令响应模式接收后台或移动式终端指令后, 优先判定电机电压状态, 断电则执行测量并反馈, 上电则拒绝并回复状态, 全程遵循安全第一原则, 保障测量仅在安全断电时进行, 同时满足自动化周期监测与远程即时触发需求。

4.2 后台软件设计

后台软件采用分层模块化设计, 搭建了集数据接入、解析、处理、存储与可视化于一体的绝缘电阻监测平台。数据处理层基于 Spring Boot 框架开发, 实现阈值判定、异常分级和多端报警; 数据存储层采用 MySQL 数据库, 定制表

结构管理设备、监测数据及系统日志；Web 监控界面基于 B/S 架构，实现多维度可视化功能。测量数据通过 MQTT 协议与无线 AP 交互，轻量级传输适配工业低带宽环境，提升数据传输的稳定性与抗干扰性，保障全流程数据流闭环可靠。

4.3 用户交互展示

用户使用移动式终端可通过微信小程序或网页直接访问后台或云端服务器，查看设备的绝缘电阻数据，并发送测量命令实现远程在线测量。

5 系统测试

为验证系统绝缘电阻自动测量、安全保护、远程指令响应、数据传输及终端显示功能的可靠性，本文搭建实验平台，开展系统综合测试。

绝缘电阻测量仪在检测电机断电后，自动进入测量模式，完成 A、B、C 三相绕组对地绝缘电阻的实时采集与状态判别。根据《三相异步电机维护与检修》(GB/T 30555-2014)，结合工业现场运维经验，设定 0.5MΩ 为下限报警阈值，当某一相绝缘电阻低于阈值时，立即输出报警信号，见图 3。



图 3 绝缘电阻测量仪自动测量模式界面

移动式终端可同步接收测量数据，界面可清晰显示各相绝缘电阻值及设备状态，系统数据传输稳定性良好、终端显示实时性高，见图 4。



图 4 移动式终端显示界面

测试在工业现场模拟环境中进行（温度 25℃，湿度

60%，电磁干扰等级 3 级），除绝缘电阻静态测试外，还完成了电机断电、上电状态切换的 100 次循环测试，系统均能准确触发测量、安全保护模式；连续 72 小时监测测试表明，系统可自动完成绝缘电阻测量、异常判定、数据上传与终端显示，满足工业现场设备绝缘状态在线监测的工程应用要求。

6 结语

本文设计实现了基于物联网的绝缘电阻在线监测与预警系统，该系统突破了传统离线人工检测的局限性，实现了三相异步电机绝缘状态的连续在线感知与智能化管理，为工业低压动力拖动设备的预测性维护提供了一体化技术方案，可有效降低因绝缘劣化引发的设备故障与安全事故概率，提升工业生产运维效率。后续研究可进一步融合人工智能算法，挖掘绝缘电阻监测数据的变化规律，构建绝缘劣化趋势预测模型，实现从状态监测到寿命预测的升级；同时可拓展系统的设备适配范围，优化硬件功耗与通信组网方案，进一步提升系统的实用性与推广价值。

参考文献

- [1] 阙超豪,姚晓键,齐安康,王志胜,王鹏程,陈功.三相异步电机匝间短路故障的诊断方法[J].电气传动.2024,54(11):76-80.
- [2] 苏世民,任智学,渠淮波.电力变压器绝缘老化机理及在线监测技术分析[J].今日制造与升级.2025(10):135-137+153.
- [3] 陆芸,李文彬.低温环境频繁启停工况下的电机绝缘结构研究[J].绝缘材料.2025,58(11):81-88.
- [4] 李欣,杨弄潮.在线绝缘监测系统及其在关键电气设备中的应用[J].水电与新能源.2025,39(09):42-45+49.
- [5] 李汉超.电动机绝缘在线监测装置在电厂中的应用[J].电气技术与经济.2025(08):79-81.
- [6] 荆涛.发电机转子及定子绝缘电阻监测及接地定位方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.2025.
- [7] 赵依琳,冬雷,朱灏,张玉冕.基于反激变换电路的绕组匝间绝缘检测方法[J].微特电机.2025,53(11):27-30.
- [8] 赵琳霞.中压开关柜智能化在线监测技术研究[J].电气技术与经济.2025(05):146-148.
- [9] 张红海.高压电机绝缘介损试验与老化状态评估技术[J].实验室检测.2025,3(22):286-288.
- [10] 彭琳琳,李博,郝博,王伟,徐礼强,金鑫.基于无线传感网络的变压器绝缘故障状态在线监测方法[J].现代传输.2025(01):57-60.
- [11] 梁树利.水电厂高压电气设备绝缘状态监测与故障诊断研究[J].装备维修技术.2025(06):82-85.
- [12] 姚辉.中压电力系统绝缘在线监测与故障预防诊断研究[J].中国设备工程.2026(S1):301-303.
- [13] 勇天泽,马赛,张滔,源苏亮,程刚.超高压变电设备绝缘监测技术研究[J].科技与创新.2026(03):140-142.