

发电机转子磁极引线连接装置在线监测系统设计

杨 晖, 赵聚平, 万正喜, 王 俏

(湖南黑麋峰抽水蓄能有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘 要: 针对当前发电机转子磁极引线连接装置在线监测过程中, 连接装置信号数据采集灵敏度较低, 影响设备运行信号采集精度, 提出新型发电机转子磁极引线连接装置在线监测系统。选择数据采集卡以及红外信号采集器作为数据采集装置, 增设红外信号数据传输设备, 并对系统的中央控制中心进行优化; 应用惯性滤波函数, 完成磁极引线连接装置运行数据采集分析; 构建发电机转子磁极引线连接装置生命周期监测模型, 实现连接装置在线监测。测试结果表明, 此系统可有效提升数据采集灵敏度, 提高设备运行信号采集精度, 对磁极引线连接装置进行高质量监测。

关键词: 磁极引线连接装置; 在线监测; 匝间短路; 红外线监测

中图分类号: TP277 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0125-05

Design of Online Monitoring System for Generator Rotor Pole Lead Wire Connection Device

YANG Hui, ZHAO Ju-ping, WAN Zheng-xi, WANG Qiao

(Hunan Heimifeng Pumped Storage Co., Ltd., Changsha 410200 China)

Abstract: In view of the low signal data acquisition sensitivity of the current generator rotor pole lead connection device in the online monitoring process, which affects the accuracy of equipment operation signal acquisition, a new online monitoring system for generator rotor pole lead connection device is proposed. It selects the data acquisition card and infrared signal collector as the data acquisition device, adds infrared signal data transmission equipment, and optimizes the central control center of the system. The inertial filtering function is used to collect and analyze the operation data of the pole lead connection device. The life cycle monitoring model of generator rotor pole lead connection device is built to realize online monitoring of the connection device. The test results show that this system can effectively improve the sensitivity of data acquisition, improve the accuracy of equipment operation signal acquisition, and conduct high-quality monitoring on the pole lead connection device.

Keywords: pole lead connection device; online monitoring; turn to turn short circuit; infrared monitoring

0 引言

当前, 在我国运行的大型发电机组中, 发电机转子磁极引线连接装置故障占发电机故障的比重相对较大。通过故障案例分析发现, 单一的发电机转子磁极引线连接装置故障不会对发电机组造成恶劣的影响, 但此类故障一旦得到发展, 发电机转子产生的电流增大, 对发电机组运行的稳定性造成威胁^[1-2]。因此, 发电机转子磁极引线连接装置故障的早期诊断尤为重要。通过发电机转子磁极引线连接装置在线监测, 将其遏制在故障初期, 可提升机组运行的安全性与经济性。

随着电气设备在线监测技术与监测设备的发展, 可供使用的在线监测技术相对较多, 张友鹏等人^[3]基于无线传感器网络技术设计正馈线舞动多点分布式在线监测系统, 采用三轴加速度传感器同步采集各舞动监测点加速

度分量信息, 通过构建 ZigBee 无线通信网络传输监测数据, 利用最小二乘法对监测点处舞动轨迹进行拟合; 孙翀等人^[4]提出王道泵站机组在线监测系统, 分析王道泵站工程机组在线监测系统的设计要点及关键技术发现, 在线监测系统能够实时、全方位地采集并准确反映机组振动、摆度、转速、温度等各种测量参数和振动变量。但上述系统在大量应用过程中存在连接设备运行信号采集分析较差的情况, 无法对信号进行全面的采集与分析, 导致在线监测系统的监测性能受到影响。针对此问题, 提出一种新型的发电机转子磁极引线连接装置在线监测系统, 力求对当前在线监测系统的性能问题进行完善, 以期对发电机转子磁极引线连接装置故障进行高精度监测。

1 磁极引线连接装置在线监测硬件优化设计

针对当前发电机转子磁极引线连接装置在线监测系统在应用过程中, 存在数据采集能力较差导致监测结果

*基金项目: 国网新源公司科技项目 (SGXYKJ-2022-031)

收稿日期: 2023-10-23

异常的问题。此次研究中,将对此部分设备性能展开优化,构建新型发电机转子磁极引线连接装置在线监测系统,优化后的系统硬件构架如图1所示。

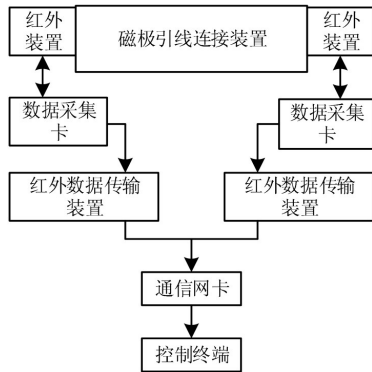


图1 新型在线监测系统硬件构架

如图1所示,此次研究中对数据采集设备、在线监测控制中心进行优化,并在原有的系统硬件构架中增加红外信号数据传输设备,用于增加信号数据采集结果的精度。

1.1 信号数据采集设备

此次研究中将数据采集卡以及红外信号采集器作为系统的数据采集装置。首先,对数据采集卡进行设定。此次研究中使用的数据采集卡为原有数据采集器的扩展版,具体选用HS4系列USB高速数据采集卡,其不但能高速采集数据进行显示分析,还配有一套强大的分析软件包括(数字存储示波器,FFT频谱分析仪,任意波形发生器,瞬态连续波形记录仪,数字多用表,I²C协议分析仪,CAN总线分析仪,串口分析仪,J1939解码,SM总线,PM总线,TWI总线,Access总线,音频分析,MIDI、DMX分析等);主要通过转子磁极引线连接装置的多路数据进行采集。此模块基础结果设定如下所示:

- (1) 最大分辨率:12位
- (2) 输入方式:8通道差分输入
- (3) 输入量程范围:-10~10V
- (4) 可编程增益选择:8倍可编程增益选择
- (5) FIFO缓存:1024位
- (6) 触发方式:定时器触发
- (7) 数据传输方式:查询、中断



图2 红外信号采集装置示意图

根据上述设定对数据采集卡进行优化设计,此部分

设计完成后,根据该数据采集卡基础性能,选择红外信号采集器。本次研究中选择高德智感NC200在线卡片机^[5-6]作为红外信号采集装置,具体示意图如图2所示。

此装置具有红外热成像与可见光于一体的红外设备。具体设备参数设定如下:

- (1) 红外分辨率:256×190
- (2) 热灵敏度:30℃
- (3) 测温范围:-25℃~500℃
- (4) 防护等级:IP67

对上述设备进行整理,并将两者有序连接,安装到原始系统硬件构架中数据采集器的位置上,以此完成信号数据采集设备的优化设计。

1.2 红外信号数据传输设备

针对红外信号数据采集环节较为落后的问题,对红外信号数据传输设备进行优化。在对在线监测系统通信设备进行组网与布线的过程中,首先对各数据采集模块按次序设定地址,并在通信模块中搭建电平转移电路,基础电路结构如图3所示。

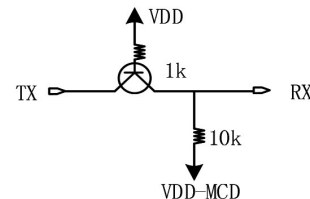


图3 通信电平转换电路

将图3中电路有序安装到通信设备中,并将其正确与数据采集器连接。在硬件连接完成后,为确保设计合理,避免信号之间串扰,加强信号质量防护。

1.3 在线监测控制中心

此次研究中,根据上文中设定的系统硬件对系统的监测控制中心进行完善与优化,优化后控制芯片如图4所示。

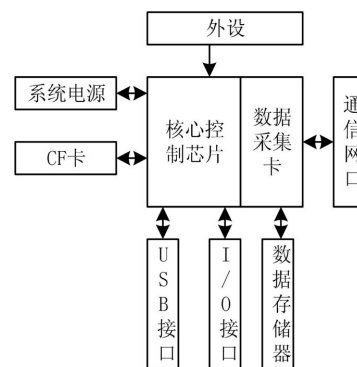


图4 在线监测控制芯片

如图4所示,本次研究在原有监测控制芯片的开发板中增加数据存储存储器,可暂时保存在线监测控制中心的信息,比如暂时存储各种功能程序运行的中间结果,作为运行程序时的数据缓存区,使在线监测控制中心具有远

程数据处理的能力。与此同时,对控制中心开发板进行优化,将其转换为嵌入式主板^[7-8],以此提升数据处理频率。对上述内容进行整理,按照预设的硬件位置进行安装与组装,并在此硬件构架中完成系统软件模块更新。

2 磁极引线连接装置在线监测软件模块开发

2.1 磁极引线连接装置运行数据采集分析

文中系统使用数据采集卡以及红外监测设备对磁极引线连接装置运行数据进行采集,任何一个信号干扰都会对在线监测的质量造成影响。因此,必须对采集到的信号进行滤波处理,降低信号误差。红外采集器接收到连接装置运行信号后,通过信号频率变换算法^[9-11]计算出连接装置的运行状态初步测定结果:

$$z_0(t) = z_0(t_0) \left[1 + \varepsilon_f^{(1)}(t-t_0) + \varepsilon_f^{(2)}(t-t_0)^2 \right] \quad (1)$$

式中, t 表示测量数据; t_0 表示连接装置额定运行数据。初步确定连接装置的运行状态后,对采集到的信号数据展开预处理,为后续的信号应用提供数据来源。对比多种方法后,选择惯性滤波技术^[12]对采集到的信号与数据展开处理。通过文献分析发现,惯性滤波是一种低通滤波函数,主要用于过滤掉电压信号中的高次谐波^[13]。基础惯性滤波函数可表示为:

$$D(U) = \frac{Q(U)}{P(U)} = \frac{1}{g_q U + 1} \quad (2)$$

对此公式进行离散处理,则有:

$$Q_i = (1-n)Q_{i-1} + nP_i \quad (3)$$

式中, Q_i 表示第 i 次滤波输出值; P_i 表示第 i 次连接运行数据采样值; n 表示惯性滤波系数; g_q 表示信号处理软件计算周期。在对原始信号数据滤波完成后,对数据的缺失点进行补偿,根据插值法对历史数据进行处理。假设历史信号区间为 $[v, y]$,已知信号采用 $z(e)$ 表示,此时信号插值处理函数可表示为:

$$z(e_i) = S(e_i) \quad (4)$$

式中, $S(e_i)$ 表示插值函数,应用 $S(e_i)$ 可以表示信号缺失点的插值。在进行插值处理的过程中,需要对差值余项进行控制,具体计算公式如下所示:

$$B(e_i) = z(e_i) - S(e_i) \quad (5)$$

完成插值后,应用式(5)对插值结果进行评估,保证取值结果的可靠性。应用上述设定内容,对信号数据进行处理,以便于应用此信号实现磁极引线连接装置监测。

2.2 构建磁极引线连接装置生命周期监测模型

为对发电机转子磁极引线连接装置进行全周期在线监测,构建发电机转子磁极引线连接装置生命周期监测模型,将其作为文中系统的核心内容。根据以往研究结果,将磁极引线连接装置生命周期设定为 T ,在此周期中

连接设备的电流变化率设定为 α_1 ,连接设备的电压变化率设定为 α_2 ,连接设备温度变化率设定为 α_3 。

发电机组转子的日常运转受到工作环境温度与电流的影响,随着电流的增加连接设备的温度必然会提升。因此,可通过对比连接设备温度 $T1$ 的变化与工作环境温度 $T2$ 的变化,得到设备运行过程中的电流变化情况:

$$W = \frac{(T1-T2)}{\alpha_1} \quad (6)$$

在上述公式的基础上,应用长时间获取到的历史数据得到连接设备的使用寿命计算模型:

$$T = f(\alpha_1, X) \quad (7)$$

其中,

$$\alpha_1 = \frac{(T1-T2)}{100} * n * \beta \quad (8)$$

$$X = C(n, \beta) \quad (9)$$

式中, n 表示发电机转子转速变化次数; β 表示发电机转子转速变化幅度; $f(\cdot)$ 表示发电机转子磁极引线连接装置的历史运行数据拟合函数; $C(\cdot)$ 表示发电机转子磁极引线连接装置的历史运行数据纠正函数。

整理上述模型,当在线监测系统获取到连接装置的异常数据时,可应用此模型对设备的运行状态进行分析,排查存在的潜在威胁,提升连接装置的防护能力。

3 系统测试分析

3.1 系统测试准备

为保证系统具有良好的性能,需要在实验室中对系统的应用性能进行测定,通过对比测试的方式,分析文中系统与传统系统的性能差异。

选择某发电厂的500号大机作为测试对象,在发电机转子下风洞处安装系统的信号采集装置,并根据此电机的真实运行环境固定红外探头,以此完成测试过程,具体监测装置安装位置如图5所示。

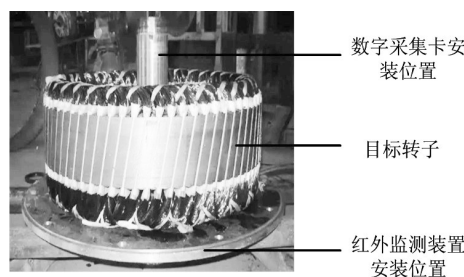


图5 测试装置安装位置

为保证测试结果的可靠性,将此发电机的机组参数汇总如表1所示。

在上述设定内容的基础上,搭建测试平台,对文中系统、基础系统以及多源数据监测系统的应用效果进行对比分析。此次测试中默认文中系统的基础功能均可实

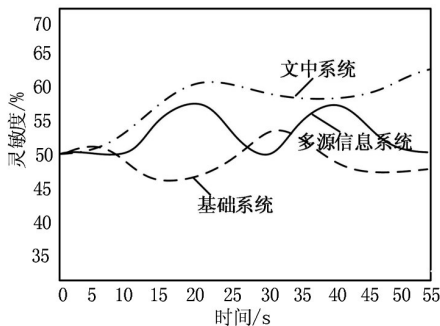
现,只对系统的在线监测性能进行测定分析。

表1 机组参数汇总表

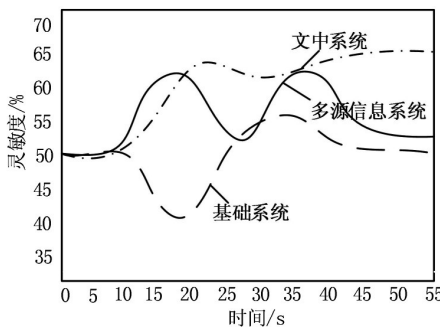
参数名称	参数取值结果
发电机型号	HAN-Z30
额定容量/kVA	128 000.0
额定功率/kW	110 000
功率因数	0.9
额定电压/kV	14.0
额定电流/A	5 346
额定转速/r/min	130
额定频率/Hz	50

3.2 信号数据采集灵敏度测试

由于文中系统对原有系统的信号采集硬件以及信号处理模块进行完善与优化,以此避免由于信号采集精度不佳造成监测效果异常的问题。因此,此次系统测试将首先对不同系统的信号数据采集灵敏度进行对比测试。本次测试中,将发电机转子磁极引线连接装置的工作状态设定为正常运行状态以及运行异常状态两组测试环境,应用光电开关信号采集装置对不同系统在固定周期内的信号波动进行分析,具体测试结果如图6所示。



(a) 正常运行状态



(b) 异常运行状态

图6 信号数据采集灵敏度测试结果

对上述测试结果进行分析可以看出,当磁极引线连接装置运行状态正常时,文中系统与其他两种系统的信号采集灵敏度具有一致性,整体灵敏度较为稳定,并未出现明显差异。当磁极引线连接装置运行状态异常时,文中系统的信号采集反应速度较为灵敏,周期较为均匀,能够准确地获取连接装置的运行信号。其他两种在线监测

装置的信号采集反应速度相对较慢,信号周期波动较大,信号采集结果的可靠性相对较差。上述测试结果表明:对原有系统的信号采集硬件以及信号处理模块进行完善可有效缓解信号数据采集异常对在线监测效果的影响。

3.3 信号数据精准度测试

在对目标转子进行监测时,主要由数据采集卡或红外线装置完成,因此,除需要保证信号数据采集的灵敏度外,更需要保证信号数据的精准度,信号数据精准度测试显得尤为重要。为保证测试结果的可控性,此次研究将已经校对完成的红外探头作为信号采集装置,此探头工作参数如下所示:

- (1) 工作温度: -20℃ ~ 50℃
- (2) 响应时间: 0.01 s
- (3) 光学分辨率: 15:1
- (4) 测量精度: 0.01%

使用上述红外探头作为测量装置,文中系统应用后获取到连接装置红外图像如图7所示。

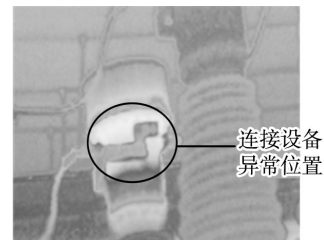


图7 磁极引线连接装置红外图像

将此图像作为文中系统获取到的信号数据组成之一,使用此数据库与其他两种系统的信号数据采集结果进行对比测定。此次测试中,通过对比文中系统与其他两种系统信号数据相对误差的方式,确定不同系统的数据采集能力,具体误差计算公式如下所示:

$$P = \frac{K_l}{K_{all}} 100\% \quad (10)$$

式中, K_{all} 表示采集到的全部运行信号; K_l 表示运行信号采集异常结果信号量。以此公式作为依托,共进行10次测试,测试结果如表2所示。

表2 信号数据精准度测试结果/%

测试序号	文中系统	基础系统	多源数据在线监测系统	测试序号	文中系统	基础系统	多源数据在线监测系统
1	95.5	91.2	92.5	6	94.5	89.5	90.1
2	94.2	92.0	93.2	7	95.2	89.7	91.5
3	95.0	93.0	92.6	8	95.1	89.6	93.9
4	95.6	91.0	93.1	9	95.0	84.5	94.5
5	94.8	90.5	92.0	10	94.8	90.1	93.1

对表2中数据进行分析可以看出,文中系统的信号采集精准度相对较高。与文中系统相比,其他两种系统的信号采集精准度明显低于文中系统,且在多次测试中均出

现信号数据精度波动较大的问题。应用此两种系统对磁极引线连接装置的监测效果造成不良影响,在日后的研究中还需对其进行优化,避免出现在线监测异常的问题。

3.4 在线监测性能测试

此测试环节将主要对不同系统的在线检测性能进行分析,进行在线监测时主要通过分析连接设备电压振幅完成。通过文献分析可知,当连接装置存在异常时,电压振动频率跨度相对较大。文中系统与其他两种系统均根据此原理确定目标装置的运行状态。此次测试中,将进行5次测试,每组测试中涵盖的信号数据量为10 000条、20 000条、50 000条、100 000条以及200 000条,且每组中含有200条异常运行数据。根据异常数据的监测量确定不同系统的在线监测性能。在线监测性能测试结果如表3所示。

表3 在线监测性能测试结果

测试序号	文中系统/条	基础系统/条	多源数据在线监测系统/条
1	200	190	198
2	199	175	190
3	199	160	185
4	198	152	185
5	200	147	175

对表3中内容进行分析后可以发现,在信号数据不断增加的过程中,文中系统对异常数据的监测量并没有发生变化。与文中系统相比,其他两种系统在信号数量变化的过程中,异常运行数据量不断下降,说明此两系统对信号数据量规模的依赖性较高,在线监测性能较差。对上述测试结果进行整理可以确定,文中系统的在线监测能力相对较高,应用其可对连接装置进行高质量监测。

4 结束语

本次研究提出一种新型的发电机转子磁极引线连接装置在线监测系统,对原有系统中的应用性能进行完善与优化。此次研究主要对系统的数据采集设备与装置进行性能完善,可保证系统监测效果符合当前的设备监测

要求。随着监测设备的不断升级优化,在日后的研究中还需对其进行不断完善,以此保证监测结果符合预设要求。

参考文献:

- [1] 安震东,徐兴兵.大型同步电机转子实心磁极的改进[J].电机与控制应用,2021,48(7):111-116.
- [2] 李卓远,李栋杰,许浩德,等.天然气压差发电机用主动磁轴承-转子系统支承特性参数分析[J].轴承,2022(3):74-79.
- [3] 张友鹏,赵少翔,赵珊珊,等.兰新高铁大风区接触网正馈线舞动在线监测系统[J].铁道学报,2021,43(7):57-65.
- [4] 孙翀,韩鹏,李琨,等.王道泵站机组在线监测系统[J].水电能源科学,2022,40(9):214-216,161.
- [5] 何玉灵,武钰,王烁,等.磁热固耦合作用下的同步发电机转子铁芯损耗及温升特性分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(6):55-62.
- [6] 王子驰,苏玉刚,李皓然,等.磁耦合无线电能传输系统能效性能在线监测器设计[J].重庆大学学报,2020,43(11):11-20.
- [7] 李琦,孙承旭,范涛,等.车用双层内嵌式永磁电机转子磁极优化设计研究[J].电机与控制学报,2020,24(9):56-64.
- [8] 张玉皓,顾煜炯,马晓腾,等.核电汽轮机扭振在线监测装置的设计与应用[J].中国测试,2020,46(7):125-132.
- [9] 李玉平,桑建斌,朱宇聪,等.基于双端直流注入切换采样原理的发电机转子接地保护[J].电力系统自动化,2020,44(21):139-144.
- [10] 白广宇,庄卫东.基于CFD的多层覆盖一体式日光温室热环境模拟[J].农机化研究,2022,44(10):218-221,227.
- [11] 房中玉.大直径泥水盾构常压刀盘温度在线监测系统设计与应用——以杭州望江路过江隧道工程为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(4):586-590.
- [12] 赫广杰.矿用磁力耦合器运行状态远程在线监测系统[J].煤炭技术,2020,39(4):190-191.
- [13] 杨一帆,包永迪,郑阳,等.基于数据融合的企业用电量状态自动监测方法[J].自动化技术与应用,2023,42(1):117-120.

作者简介:杨晖(1976-),男,本科,高级工程师,研究方向:抽水蓄能电站电气设备运维管理。

(上接第106页)

- [6] 汪冬瑾,张舒,刘健,等.一种空间信号误差异常检测分析方法[J].航天控制,2020,38(6):19-23.
- [7] 孙世政,周青松,韩宇,等.不同安装模式对嵌入式栅测量误差的影响[J].光学精密工程,2020,28(10):2290-2300.
- [8] 吕攀,辛越,张恒,等.基于MSCKF的IMU与激光雷达紧耦合定位方法[J].仪器仪表学报,2020,41(8):13-20.
- [9] 史鹏博,李蕊,李铭凯,等.基于决策树和聚类算法的智能电表误差估计与故障检测[J].计量学报,2022,43(8):1089-1094.
- [10] 谢瀚阳,彭泽武,唐重阳,等.基于数据挖掘技术的电网时序数据质量维护研究[J].电测与仪表,2022,59(2):38-44.
- [11] 刘豪.基于数据挖掘的小行星探测轨道误差分析与校正[J].自动化技术与应用,2023,42(3):11-14,19.

- [12] 廖志雄,程海军,周士元.嵌入式网络高维异构数据攻击检测方法研究[J].计算机仿真,2020,37(7):333-336,454.
- [13] 党威武,李会荣,李慎安.异面间垂直度的检测装置设计与误差分析[J].自动化技术与应用,2020,39(8):111-114.
- [14] 郭昌军,郑明明,王巧花,等.横梁移动式五轴龙门铣床摆动轴与位置相关的几何误差检测与辨识[J].制造技术与机床,2022(9):173-180.

作者简介:贾梦琦(1987-),女,硕士,讲师,研究方向:现代语言学,计算机应用。