

发电机励磁碳刷运行故障检测方法

刘刚¹, 赵健龙²

(1. 浙江浙能嘉华发电有限公司, 浙江 嘉兴 314201; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 针对发电机励磁系统中碳刷结构故障检测困难, 故障定位不准确的问题, 该研究根据实际碳刷运行过程建立碳刷结构检测系统; 通过建立组件对象模型 (COM) 动态检测方案将碳刷结构模型化, 使系统能够更精确地检测到故障原因; 设计数字式光纤传感器 (BF5R) 检测电路将碳刷故障过程图像化, 缩短系统检测时间; 通过改进维格纳威耳分布 (WVD) 故障定位算法精准定位碳刷故障位置, 采用合理方式进行维修; 通过 Proteus 软件仿真检测系统运行过程, 实验表明该设计对碳刷故障检测具有明显效果, 在 15 kW 发电机环境中, 碳刷故障定位时间为 3.5 min, 信号幅值为 13 V, 结果精确度为 96.4%, 证实了该设计的可行性; 通过仿真对比 3 种不同系统信号检测幅值电压和检测准确度曲线, 由此验证了该研究的优越性。

关键词: 发电机励磁系统; 碳刷故障检测; COM 动态检测方案; BF5R 检测电路; 改进 WVD 算法

Fault Detection Method of Generator Excitation Carbon Brush Operation

LIU Gang¹, ZHAO Jianlong²

(1. Zhejiang Zheneng Jiahua Electric Power Generation Co., Ltd., Jiaxing 314201, China;

2. Nanjing NR ELECTRIC Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of detecting the carbon brush structure fault in the generator excitation system and the inaccurate fault location, a carbon brush structure detection system based on the actual carbon brush operation process is established. By establishing a Component Object Model (COM) dynamic detection program to model the carbon brush structure, the system can detect the cause of the failure more accurately. Design a digital optical fiber sensor (BF5R) detection circuit to visualize the carbon brush failure process and shorten the system detection time. By improving the location algorithm for the Wigner Ville Distribution (WVD) fault to accurately locate the carbon brush fault location, and use reasonable methods for maintenance. Through the Proteus software to simulate the operation process of the detection system, the experiment shows that this design has obvious effects on carbon brush fault detection. In a 15 KW generator environment, the carbon brush fault location time is 3.5 min, the signal amplitude is 13 V, and the accuracy of result is by 96.4%, Confirmed the feasibility of the design; through the simulation and comparison of three different system signals detection amplitude voltage and the detection accuracy curve, thus the superiority of this research is verified.

Keywords: generator excitation system; carbon brush fault detection; COM dynamic detection scheme; BF5R detection circuit; improved WVD algorithm

0 引言

发电机励磁碳刷由石墨组成, 在电机运行过程中起到滑动接触件的作用, 但由于其材料主要为碳, 往往容易磨损, 而碳刷的损坏是引起励磁系统故障的重要成因, 因此对发电机励磁碳刷的故障检测是非常必要的, 进而提出本课题的研究。

国外机械研究机构对发电机碳刷检测进行研究, 文献 [1] 根据碳刷运行过程设计自适应故障判断模块, 利用机电系统 (MEMS, microelectro mechanical systems) 技术对发电机输出结果进行分析, 通过剪切应力传输模型 (SST, shear stress transfer) 检测算法判断碳刷的具体信息, 达到碳刷故障的自适应判断功能。但这种方式判断结果较为宽泛, 精确度不高; 国内机械研究部门对碳刷材料进行研究, 其中文献 [2] 设计一种 STC 故障检测单片机,

利用红外热成像技术得到发电机内部碳刷余量, 并通过多普勒信号分离算法确定碳刷运行是否正常, 并给出相应检测参数。但这种方法设计成本较高, 需要精密的仪器才能实现。而文献 [3] 设计多回路故障检测模型对励磁碳刷进行回路检测, 通过多小波和峭度准则判断碳刷实际运行状态, 利用频谱法对碳刷移位故障进行调节, 完成碳刷的及时复位。但这种方法对磨损较严重的碳刷处理较差, 无法满足现阶段电机故障检测的需求。

针对上述研究的发电机励磁碳刷故障检测技术存在的问题, 该研究设计一种故障检测系统, 对碳刷运行过程进行系统化管控^[4]。主要创新点在于:

1) 建立组件对象模型 (COM, component object model) 动态检测方案, 对发电机内部碳刷运行进行建模, 掌握碳刷整体概况。

2) 利用 BF5R (digital sensing device optical sensor)

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-01-07。

作者简介: 刘刚 (1982-), 男, 浙江嘉兴人, 大学本科, 工程师, 主要从事发电厂继电保护、励磁系统等方向的研究。

引用格式: 刘刚, 赵健龙. 发电机励磁碳刷运行故障检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 53-58.

检测电路对碳刷运行条件和输出参数进行检测,使故障判断更为精确化。

3) 通过改进维格纳威尔分布 (WVD, wigner ville distribution) 故障定位算法对检测数据进行分析,并根据分析结果精准定位碳刷故障位置,为后期更换提高数据支撑。

1 COM 动态检测方案

对于发电机碳刷故障的检测,本研究通过设计组件对象模型 (COM) 完成碳刷检测的建模,使电机碳刷故障检测具有动态功能,检测结果更为准确,在此基础上将其实际故障检测运行同步到模型中,从而得到碳刷检测结果,然后根据模型输出结果确定碳刷状态,经过故障分析和维保机制从而完成碳刷故障的检测^[5]。COM 动态检测方案如图 1 所示。

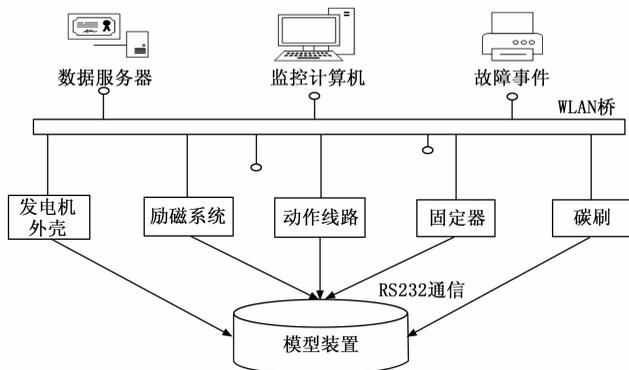


图 1 COM 动态检测图

COM 动态检测方案通过数据服务器、监控计算机进行发电机碳刷基本信息的查询和记录,对碳刷可能存在存在的故障事件进行归纳,数据服务器主要收录电机碳刷参数和运行数据状态,并对收录信息进行归纳,为后续相似故障的维修方案提供参考;监控计算机监控维修人员的具体操作步骤,对电机碳刷正常运行到发生故障,维修过程和恢复正常整个流程进行监控,使碳刷运行过程处于完全监控状态。通过 WLAN 桥完成电机设备与工作台之间的数据传达。模型装置主要建造设备有发电机外壳、励磁系统、动作线路、固定器和碳刷,发电机外壳负责整个电机器件的总装^[6];励磁系统作为电机的主要运行结构,是碳刷作用的主要部位;动作线路主要完成电机各设备的协调,将发电结果输送至外场;固定器起到稳固碳刷的作用,使碳刷在运作过程中减小磨损。整个动态模型的建立根据服务器查询数据进行各类设备的框架设计,动态模型中各设备数据通过 RS232 通信传输到检测系统中,最终由检测系统整合数据,并通过算法编程确定故障位置,为后续碳刷的更换和维修提供参考^[7]。

整个模型的建立依赖于 COM 技术,通过对电机组件一对一的设计,将实际运行中的设备结构分解,能够对电机内部设备的运行进行针对性检测,完成碳刷的整体运行过程的监控,更加全面地了解电机中各结构之间的影响,并

通过减小这些影响的方式控制碳刷的损坏程度^[8]。

2 BF5R 检测电路

检测系统运行过程中,传输线路的选型具有重要作用,通过分析碳刷运行条件和参数进行选型,碳刷运行条件主要分析电机受力状态和连接设备的稳定程度进行判断,碳刷参数主要由专用测试表进行判断。经过分析判断本文选用 BF5R 检测电路,在此结构的基础上设计 90° 直角探头检测方式^[9],此检测方式能够实现碳刷的完全检测,通过碳刷的旋转定时检测,检测方式更为先进,数据统计更为精确,在线路外围包裹光纤保护套,保证检测过程的顺利进行,通过 IP65 声光报警器等元件设置安全装置,BF5R 检测电路如图 2 所示。

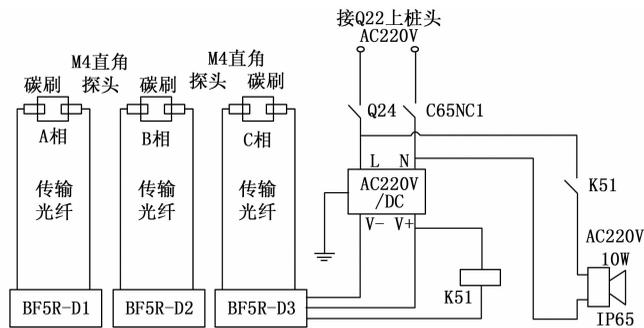


图 2 BF5R 检测电路设计

BF5R 检测电路应用在电机碳刷中,电机电压需控制在 AC220V,碳刷初始尺寸控制在 160 mm × 27 mm × 22mm,最大磨损面积为 10 mm²,对碳刷材料进行定期更换^[10]。经过比较和筛选后,采用 BF5R 光纤传感器作为检测线路的核心装置,具有光检测,实现非接触式检测,并且不易损坏,在使用过程中采用双显示型光纤传感器放大器,每秒两万次的超高速检测和 1/10 000 高分辨率的光纤放大器,光纤本身具有的特性为超高速模式 (50 μs),高速模式 (150 μs),标准模式 (500 μs),长距离模式 (4 ms),能将测量信号最大距离传输,满足检测线路的各项要求。线路检测过程主要利用输出光纤将碳刷模型检测数据传输到系统的两侧,传输光纤一般为 10 m,以 M4 直角探头采集的碳刷磨损度为检测指标,设置 A、B、C 三相探头应用在三条 BF5R 线路中,BF5R 线路采用自动功率控制 (APC, auto power control) 回路架设方式,回路电线不受元件寿命或温度变化的影响,可实现稳定持久使用。碳刷运行正常时 BF5R 探头穿过碳刷内的小孔,将传感器检测数据正常输送,传感器采用多种灵敏度设置模式,实现自动调整的目的,1 点为最大灵敏度,2 点为最小灵敏度,能够更加碳刷位置设置相应灵敏度;当碳刷存在故障时,探头滑触线出现偏移,当偏移程度过大时,碳刷小孔被遮挡,检测光映射到挡板上,BF5R 线路检测异常,发出故障信号,并记录故障时间,完成碳刷运行的故障数据传输,碳刷故障信号通过 RS485 专用通信模块,轻松实现通信传输过程,通信模块最大可连接 32 个故障检测点,为定位故障提供有

效数据^[10]。

BF5R 检测线路的设计运行电压为 AC220 V, 通过连接发电机 Q22 上桩头提供电压供给, 并经过 AC/DC 转换, 分别应用于报警信号和光纤结构。通过设计 M4 直角探头和光纤传感的方式提高检测质量, 对数据的传输和碳刷参数的记录具有重要作用^[11]。

3 改进 WVD 故障定位算法

维格纳维拉分布 (WVD, wigner viller distribution) 定位算法主要运算方式为时域和频域上的一种定位, 通过双线性规律完成故障的寻址和测算, 具有时频分布的特性。该研究通过融合经验模态分解算法中的函数处理方式, 对碳刷故障参数进行分化, 从而减轻计算压力, 保证碳刷材料在故障处理后达到最佳分辨率, 满足发电机平稳运行的需要^[12]。

针对碳刷故障数据, 通过建立碳刷检测模型进行碳刷状态的判断, 然后通过模态分解算法进行参数分化, 将电机中复杂设备数据状态分化为可利用的数据状态, 即按设备型号进行分化, 从中提取碳刷参数, 通过分析碳刷参数变化得到检测结果, 在故障检测周期内的碳刷检测函数可以表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n f_{imfi}(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 表示模态算法分化碳刷检测结果, $f_{imfi}(t)$ 表示碳刷模型数据函数, $r_n(t)$ 表示数据检测过程中的不可控变量, t 表示碳刷模型检测周期。

在具体计算时, WVD 定位算法能够将时域和频域上的数据信息分离出来, 从不同的角度提炼数据信息。在输入数据信息为混和数据信息的情况下, 无须了解信号混合系数, 可以通过盲源分离法提取各独立分量信号, 给出盲源分离结果不确定的解决方法。并建立了包含自项与交叉项的时频分布矩阵, 利用时频分布矩阵的联合对角化算法消除独立分量信号之间的交叉干扰项。

为保证碳刷故障检测的准确性, 需要对发电机使用时长进行检测, 对同一台发电机, 通过分析碳刷使用时长确定检测周期^[13], 发电机使用时长计算公式为:

$$\Delta t = \left| \frac{x}{v} - \frac{l-x}{v} \right| = \left| \frac{2x-l}{v} \right| \quad (2)$$

式中, Δt 表示发电机使用时长, x 表示碳刷运行参数, v 表示碳刷磨损速度, l 表示正常碳刷周长。

根据模态算法分化的碳刷模型数据, 对其参数进行逐一鉴别, 鉴别方式采用 BF5R 检测电路, 由检测回路和各类传感器完成大数据的鉴别, 从鉴别结果中找到可能碳刷运行故障原因, 然后进行 WVD 定位, 为后续碳刷的维护提供参考, WVD 定位过程表示为:

$$W_x(t, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\Omega\tau} d\tau \quad (3)$$

式中, W_x 表示 WVD 故障定位函数, Ω 表示碳刷模型数据对于周期变化的碳刷磨损量, τ 表示故障定位时间常数,

x^* 表示 MVD 定位周期内碳刷变化量, e 表示故障定位常数。

WVD 定位算法提供了碳刷故障位置, 但无法对碳刷故障原因和变化规律进行说明, 因此需要对式 (3) 进行积分变换, 确定碳刷发生故障的原因和规律, 称作碳刷磨损量, 对 WVD 算法中碳刷故障定位周期变化引起的碳刷磨损量进行积分变换^[14], 可得:

$$W = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, \Omega) d\Omega \quad (4)$$

通过式 (4) 的积分变化可以看出碳刷磨损量受到定位周期的影响, 即存在时域的变化, 通过时域上的变化分析, 碳刷故障位置发生在频率轴上, 因此对碳刷频率轴进行分析, 确定是否存在碳刷磨损, 通过频率轴确定碳刷故障位置, 在此基础上完成碳刷故障的数据分析, 即存在:

$$\delta = a_{ngle} \left\{ \frac{1}{V_A} [V_B \cosh(\gamma l) - Z_C I_B \sinh(\gamma l)] \right\} \quad (5)$$

式中, δ 表示碳刷故障在频率轴上的定位, a_{ngle} 表示频率轴碳刷磨损量, V_A 、 V_B 表示发电机和碳刷量端的电压相量, γ 表示碳刷频率系数, Z_C 表示碳刷影响电机阻抗变化, I_B 表示经过碳刷线路的电流相量, $h(\cdot)$ 表示碳刷定位频率轴角函数。

改进的 WVD 算法在原有算法的基础上汇总了碳刷模型参数变化, 通过对比模型数据和实际碳刷磨损量, 提高了故障定位的精准度^[15], 同时增加了研究的信服力, 使碳刷在电机中的故障定位更加准确, 对维修人员的后续处理具有重要帮助。

4 故障检测系统

通过建立故障检测系统对 COM 动态检测技术、BF5R 线路规划和改进 WVD 算法进行统合, 建立故障检测系统, 通过微机控制的方式使各项技术分工更为明确, 并建立指令传达控制室, 能够更加碳刷故障进行相应指令的确定, 使碳刷故障检测过程更为顺利, 而系统化的检测过程能够提高碳刷故障检测效率, 将不同检测结构模块化, 改善了传统故障检测方案运行混杂、检测方案不清晰的问题^[16]。该研究建立的励磁碳刷故障检测系统如图 3 所示。

碳刷故障检测系统通过微机控制, 利用计算机算法处理发电机碳刷运行状态信息, 并对碳刷故障数据进行整理分析, 通过微机控制中心完成多个检测技术的调度配合^[17]。通过电量记录发电机输出数据, 对其外在显示电流、电压进行记录, 与初始电机发电参数形成对比数据, 分析出在此期间内输出电量的变化, 以此推算碳刷是否发生故障, 并进行统计记录。根据分析的碳刷数据存库设计 COM 动态检测方案, 并建立相应服务器, 通过模型状态显示碳刷状态, 同时对电机整体数据和各部分连接设备的数据状态进行记录, COM 模型数据和碳刷数据存库通过传真信息和邮件的方式进行发送和接收, 重要信号采用 5G 无线的信号进行传输^[18]。在故障检测系统中, 由电机总线负责 COM 模型和碳刷实际检测的数据联系, 碳刷实际检测过程主要由 BF5R 检测电路和改进 WVD 算法完成, BF5R 检测电路通

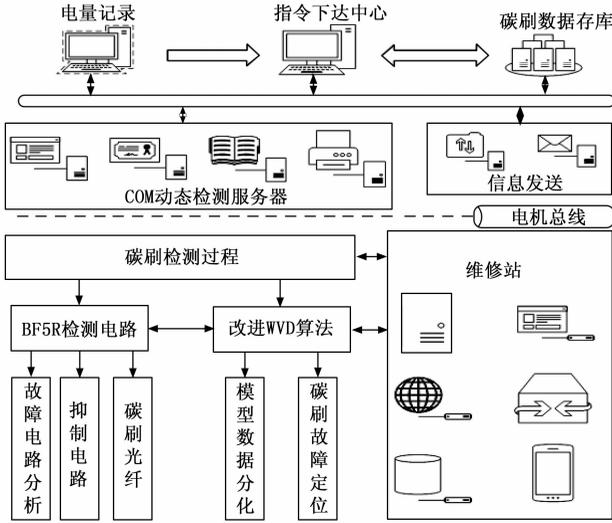


图 3 故障检测系统

过故障电路分析、抑制电路和碳刷光纤完成碳刷状态的收集；改进 WVD 算法主要进行碳刷模型数据的分化和碳刷故障定位^[19-20]。而维修站主要根据实际检测过程和改进 WVD 算法进行碳刷的维护和更换，首先作好故障记录，然后根据记录建立维修方案，最后进行选材和现场维修，通过移动端进行实时数据更新。

整个碳刷故障检测系统对发电机输出瞬间电量数据进行记录和对比，精确把握碳刷运行状态。通过微网控制中心传达操作指令，完成碳刷检测技术的协调配合，提高发电机碳刷检测的效率，最大限度的节省后期维修的时间，保证电机维护和碳刷更换工作的顺利运行^[21-22]。

5 试验结果与分析

该研究针对发电机励磁碳刷运行故障检测进行研究，实验发电机采用 4B3.9 型柴油发电机，电机寿命为最大值，电机中各类设备完美的环境下进行实验，碳刷材料为电化石墨，并设计各种碳刷故障状态，通过组建 COM 碳刷模型确定电机中碳刷位置^[23]，设计 BF5R 检测电路完成碳刷故障的检测实验，通过改进 WVD 算法精确定位碳刷故障位置，并对碳刷磨损量和碳刷调节幅度进行控制，最后记录实验结果，将实验数据整理成图表形式进行分析^[24]。实验过程在 Intel i9 9600KF 计算机，3.10 GHz 的 CPU 和 64+128 GB 内存的双核 PC 机上运行，计算机系统采用 WIN 10 系统^[25]，设备性能为顶配计算机，处理数据较快。现场实验环境设置，实验采集信号为数据光纤采集模式，具有采集速度快，采集精度高的特点，信号传输方式为 5G 无线信号，同时架设有线传输方式，保证传输信号的稳定，传输速率 >4.5 MB/s。在此环境下进行实验，参数配置如表 1 所示。

本设计试验对发电机中碳刷故障原因检测和故障定位进行研究，根据实验数据分析，对 15 KW4B3.9 型号柴油发

表 1 环境参数与配置软件

实验环境	类型	参数
发电机	柴油发电	15 KW 4B3.9
碳刷	电化石墨	D172
计算机	I9 9600KF	64+128 GB
数据算法	改进 MVD 算法	精确度 >90.0%
仿真软件	Proteus 软件	

电机中碳刷故障进行实验，根据 Proteus 仿真软件对实际工作过程进行仿真演示，检测系统运行仿真过程如图 4 所示。

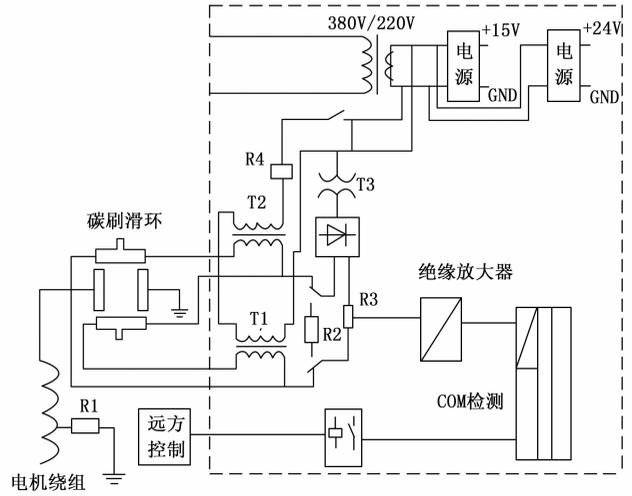


图 4 检测系统运行仿真图

根据图 4 仿真结果对比各设计方案具体效果，将仿真实验数据整体列表，定位时间通过实验人员进行记录生成，信号幅值由脉冲滤波器显示得到，精确度根据碳刷故障实际参数和实验参数对比计算可得，记录碳刷状态变化规律，进而验证本研究的有效性，将实验结果汇总数据表，最终显示碳刷故障检测实验数据如表 2 所示。

表 2 碳刷故障检测实验数据表

检测方式	定位时间/min	信号幅值/V	精确度/%
本设计	3.5	13	96.4
MEMS 技术	6.4	18	90.8
STC 单片机	8.6	24	85.8

通过表 2 数据分析，本设计对发电机励磁碳刷故障检测具有明显效果，在 15 kW 发电机环境中，碳刷故障定位时间为 3.5 min，信号幅值为 13 V，结果精确度为 96.4%；文献 [1] 采用的 MEMS 检测技术碳刷故障定位时间为 6.4 min，信号幅值为 18 V，结果精确度为 90.8%；文献 [2] 设计的 STC 检测单片机碳刷故障定位时间为 8.6 min，信号幅值为 24 V，结果精确度为 85.8%。由此看出本研究对励磁碳刷的检测效果具有较高可行性。

利用仿真软件显示 3 种不同方案检测系统的幅值，其幅值变化较大，将幅值变化导入滤波器中，利用脉冲滤波

器对比 3 种技术的信号检测波形, 其波形反应了 3 种方案的故障检测性能, 通过对比方式分析各系统性能, 3 种系统信号检测波形变化曲线如图 5~7 所示。

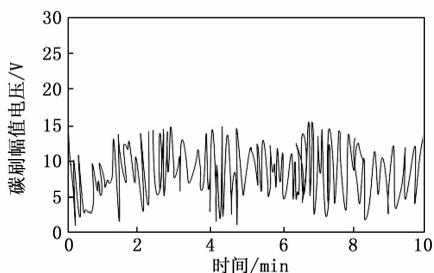


图 5 本研究信号检测波形

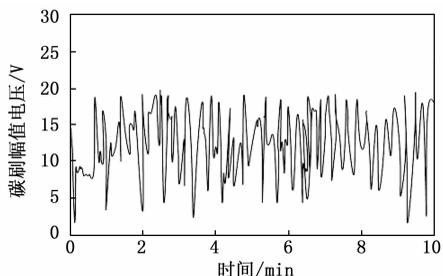


图 6 MEMS 技术信号检测波形

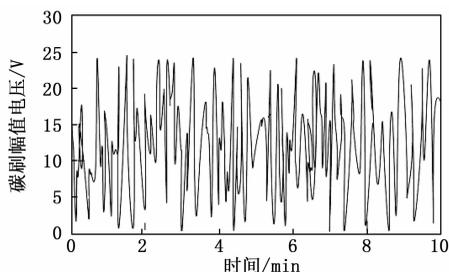


图 7 STC 单片机信号检测波形

通过对比发现, 文献 [1] 提出的 MEMS 检测技术最大幅值电压为 18 V, 最小幅值电压为 10 V, 平均幅值为 14 V, 信号检测过程存在一定的波动性, 系统稳定性不足; 文献 [2] 提出的 STC 检测单片机最大幅值电压为 24 V, 最小幅值电压为 6 V, 平均幅值为 15 V, 波动范围较大, 系统稳定性较差; 本研究检测波形最大幅值电压为 13 V, 最小幅值电压为 6 V, 平均幅值为 9.5 V, 通过对比发现本研究碳刷检测系统脉冲波形变化幅度较慢, 则仿真结果幅值电压最低, 证实本研究检测系统较为稳定。

通过对比各设计方案的检测结果精确度, 进一步完成实验, 根据 Proteus 软件实现碳刷故障检测系统的仿真, 得到系统检测结果精确度曲线对比如图 8 所示。

通过对比发现 3 种方案检测结果精确度与发电机输出电能存在一定关系, 本研究精确度最高为 97.9%, 最低为 94.9%, 平均为 96.4%; 文献 [1] 设计的 MEMS 检测技术精确度最高为 92.4%, 最低为 89.2%, 平均为 90.8%; 文献 [2] 设计的 STC 检测单片机精确度最高为 87.9%,

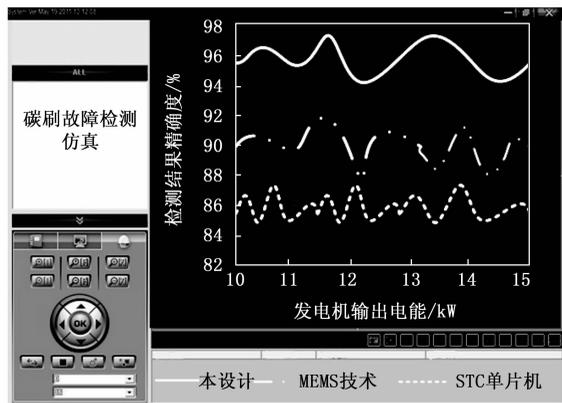


图 8 检测结果精确度曲线

最低为 83.7%, 平均为 85.8%。

综上所述, 本设计方案对碳刷结构的故障定位时间、检测精确度和系统稳定性具有明显效果, 根据实验表明本研究定位时间最短, 结果准确度最高, 系统运行最为稳定, 体现出本设计发电机碳刷结构故障检测系统的优越性。

6 结束语

本研究对发电机碳刷结构的故障检测和定位进行研究, 通过组建碳刷模型和检测线路完成方案设计, 主要技术研究如下:

1) 建立 COM 模型将发电机内部碳刷结构呈现到屏幕上, 检测状态更为明显, 使工作人员更为容易地找到故障原因, 避免误判和漏判问题。

2) 利用 BF5R 检测电路完成电机内部碳刷结构与微机模型的对接, 将碳刷初始参数与后期模型参数形成对比数据, 从而找到故障点。

3) 通过改进 WVD 算法分化碳刷模型数据, 将复杂的运行参数分化开来, 使故障定位更具条理性, 进而精确确定碳刷故障位置。

通过对本设计发电机励磁碳刷故障检测系统进行测试, 将实验结果汇总为碳刷故障检测实验测试表, 发现本研究定位时间最短, 结果准确度最高, 系统运行最为稳定, 通过仿真对比分析, 表明本设计方案具有明显优势。但是本研究在实验过程中仍存在问题, 碳刷更换效率较慢, 故障报警需要停机检修, 从而导致电能浪费等问题仍待解决。

参考文献:

- [1] 杨海利. 发电机组励磁碳刷问题与对策分析 [J]. 集成电路应用, 2020, 37 (4): 152-153.
- [2] 杨 振. 发电机励磁碳刷故障分析与处理 [J]. 数字化用户, 2019, 25 (33): 145.
- [3] 黄平光. 水轮发电机碳刷及滑环磨损及其改进 [J]. 中国科技投资, 2019 (1): 81, 115.
- [4] 王顺利, 唐小花. 大型汽轮发电机常见故障及案例分析 [J]. 工业技术创新, 2019, 6 (6): 57-62.
- [5] AKIMOTO Y, OKAJIMA K. Simple on-board fault-detection

- method for proton exchange membrane fuel cell stacks using by semi-empirical curve fitting [J]. *Applied Energy*, 2021, 303 (1): 117654.
- [6] 雷国强. 一种凸极同步发电机转子磁极动态匝间短路故障的检测方法 [J]. *科技经济导刊*, 2020, 733 (35): 89-90.
- [7] 吴延宾. 发电机电刷电流分布不均问题的分析及处理 [J]. *电世界*, 2020, 61 (2): 5.
- [8] 陆继谋, 李建豪, 吴峰, 等. 光纤传感技术在发电机碳刷测温的现场应用 [J]. *红水河*, 2020, 39 (4): 85-88.
- [9] 代小兵. 发电机转子一点接地故障分析与处理 [J]. *盐科学与化工*, 2020, 49 (1): 32-34.
- [10] PARK J, HAMADACHE M, HA J M, et al. A positive energy residual (PER) based planetary gear fault detection method under variable speed conditions [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 117 (15): 347-360.
- [11] 张伟. 汽轮发电机集电环和碳刷维护 [J]. *科技创新导报*, 2020, 17 (2): 67-68.
- [12] 李剑峰, 肖明清, 唐希浪, 等. 基于 OWL 本体和 SWRL 规则的导弹智能故障诊断研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 238 (7): 102-107.
- [13] 吕宝献. 水轮发电机转子碳刷跳火原因及处理 [J]. *水电水利*, 2019, 3 (11): 53-54.
- [14] ROSSION, BRUNO. Humans are visual experts at unfamiliar face recognition [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2018, 22 (6): 471-472.
- [15] 张万星, 王炜, 白立辉. 基于高斯混合模型的逆变器故障诊断方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (3): 14-18.
- [16] 李恒, 柴晓冬, 徐纪康, 等. 基于故障树的轨道交通车载电源可靠性分析 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (5): 35-38.
- [17] 李政, 李巍, 卿启维. 吉牛水电站水轮发电机碳刷, 集电环的运行隐患分析与治理 [J]. *四川水力发电*, 2020, 39 (3): 133-136.
- [18] 王梓杰, 周新志, 宁芊. 基于 PCA 和随机森林的故障趋势预测方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26 (2): 21-23, 26.
- [19] 田野, 闫茂德, 杨盼盼, 等. 基于云平台的蒸渗仪远程故障诊断方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (2): 23-27.
- [20] 郑鹏斌, 李昭春. 天气雷达故障测试平台远程控制软件设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (10): 148-153.
- [21] 宋政辉, 应洪伟, 潘晓. 基于定性趋势分析的空调系统传感器故障检测 [J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26 (11): 30-34.
- [22] 周伟恒. 基于遗传算法的机械设备故障检测机器人设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (2): 53-57.
- [23] 汪波, 夏钦锋, 钱龙, 等. 基于全相关动态核偏最小二乘法的故障诊断方法 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (3): 19-24.
- [24] 刘哲成, 郭丽娟. 基于分层滤波算法的无人机控制系统故障检测技术 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (5): 23-26, 30.
- [25] 万磊, 戴滨, 蒋寒. 基于自主诊断重构技术的航天器故障检测系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (9): 5-9, 22.
- [16] 曹冲振, 马培荪, 王凤芹, 等. 海底石油管道超声检测柔性无级变径系统 [J]. *机械科学与技术*, 2006 (7): 865-868.
- [17] 唐东林, 陈才和, 崔宇明, 等. 海底管道缺陷在线智能检测机器人 [J]. *传感技术学报*, 2005 (4): 818-821.
- [18] 雷小军, 付庄, 曹其新, 等. 海底管道检测机器人自主缺陷定位的模糊控制研究 [J]. *机器人*, 2005 (3): 252-255.
- [19] 周佳琪, 阙沛文, 黄作英. 海底管道超声检测数据采集模块的设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2007 (4): 509-511.
- [20] YANG B H, GAO Z W, GAO Y, et al. Rapid detection and counting of wheat ears in the field using YOLOv4 with attention module [J]. *Agronomy*, 2021, 11 (6): 1202-1202.
- [21] DU X W, CHEN D, LIU H J, et al. Real-time hand tracking based on YOLOv4 model and Kalman filter [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2021, 28 (3): 86-94.
- [22] 朱杰, 王建立, 王斌. 基于 YOLOv4-tiny 改进的轻量级口罩检测算法 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36 (11): 1525-1534.
- [23] 卢迪, 马文强. 基于改进 YOLOv4-tiny 算法的手势识别 [J]. *电子与信息学*, 2021, 43 (11): 3257-3265.
- [24] 王立舒, 秦铭霞, 雷洁雅, 等. 基于改进 YOLOv4-Tiny 的蓝莓成熟度识别方法 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (18): 170-178.

（上接第 37 页）

- [10] 赵苗, 高永琪, 吴笛霄, 等. 复杂海战场环境下 AUV 全局路径规划方法 [J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43 (1): 41-48.
- [11] XU R K, TANG G Y, XIE D, et al. Three-dimensional neural network tracking control of autonomous underwater vehicles with input saturation [J]. *Journal of Central South University: Science & Technology of Mining and Metallurgy*, 2020, 27 (6): 1754-1769.
- [12] CHENG H Y, CHU J K, ZHANG R, et al. Real-time position and attitude estimation for homing and docking of an autonomous underwater vehicle based on bionic polarized optical guidance [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19 (5): 1042-1050.
- [13] HUANG Y, WU L H, YU Q. Underwater square-root curvature attitude estimator by use of quaternion-vector switching and geomagnetic field tensor [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, 31 (4): 804-814.
- [14] WANG H D, LI X G, LIU X, et al. Fuzzy sliding mode active disturbance rejection control of an autonomous underwater vehicle-manipulator system [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19 (5): 1081-1093.
- [15] 王忠巍, 曹其新, 栾楠, 等. 基于信息融合的海底管道机