

基于电压电流多信息采集的电火防控系统设计

韩国璇¹ 葛浩正¹ 向亚琪¹

HAN Guoxuan GE Haozheng XIANG Yaqi

摘要

传统的电气火灾防控系统在受到线路分布电容与漏电检测死区的影响时可能会失效或误判。为了提高漏电故障检测和电火防控的速度及准确率,设计开发了一套基于电压电流多信息采集的电火防控系统。系统实时采集相电压与漏电流,通过滑动窗口算法提取其故障特征,进行线性预测后完成故障检测和判断,并驱动故障相的旁路保护模块,提供低阻抗接地通路降低漏电电流,消除线路分布电容对电火防控的影响。系统分别完成了漏电故障的保护效果和保护动作特性测试,均能实现快速、准确的漏电故障保护,保护后的故障相电压低于3 V,漏电电流低于5 mA,保护动作时间不超过15 ms,且输出线电压幅值、相位保持不变。

关键词

电气火灾防控;线性预测;故障特征值提取;多信息采集;漏电保护

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.03.007

0 引言

随着电力工业迅速发展,用电终端种类和数量日益增加。在为用户提供更为便利、智能的电能同时,用电风险性明显提升^[1]。对用电终端电气安全隐患而言,主要包括电气火灾和人体触电^[2]两种类型。

电气火灾的诱因^[3]主要包括带电导体接地故障、输电线路短路等。对电火故障案例的统计分析可知,由于电缆绝缘性能下降或电气设备老化造成的漏电是我国电气火灾事故主要原因。由于线缆绝缘性能下降和电缆或用电设备使用不当可能会造成火线破损、电气设备外壳绝缘性能下降等问题而对地漏电,由于初始漏电流较低,温度升高不明显,传统电气保护设备难以实现可靠的漏电检测,因此始终存在漏电流导致的电气火灾安全隐患^[4];随着漏电电流逐渐增大,绝缘性能会进一步恶化,接地端产生电火花引发火灾^[5]。

单相接地故障产生的故障电流是引发电气火灾的关键因素。现有的电气火灾防控技术有电气隔离技术、漏电流保护技术^[6]、接地技术、双重绝缘技术等。其中,电气隔离技术通过隔离变压器使二次侧回路不接地,降低了单相接地故障事故发生率,现已广泛应用于医院、矿井^[7]、科研院所中。然而线路对地分布电容值会随着输电线路的增长而增大,在长输电距离的工作场合中会产生过大的漏电流,存在安全隐患^[8]。漏电流保护技术会因线路中漏电流的相角影响产生检测死区,同时大量电力电子装备投入工作时会引入高频谐波分量,漏电保护器存在拒动作或误动作问题。此外,漏电

保护的延时受脱扣器件影响,可靠性与动态响应时间需要根据实际工作环境与用户需求进行权衡^[9],目前尚无兼顾可靠性、检测速度、灵敏度的漏电保护器。

综上所述,隔离变压器和漏电保护器可在一定条件下实现设备漏电故障的检测与保护。但受线路分布电容和检测死区的影响,其保护效果和适用性有限^[10]。因此,设计一种可靠性高、检测速度快、灵敏度高的电火防控系统,并保证良好的供电连续性,对推进智能用电的稳步发展、保护生命和财产安全具有重要的现实意义与工程价值。

1 总体设计

基于电压电流多信息采集的电火防控系统总体结构如图1所示,系统主要包括信号采集单元(A)、信号处理单元(B)和控制输出单元(C)三部分。

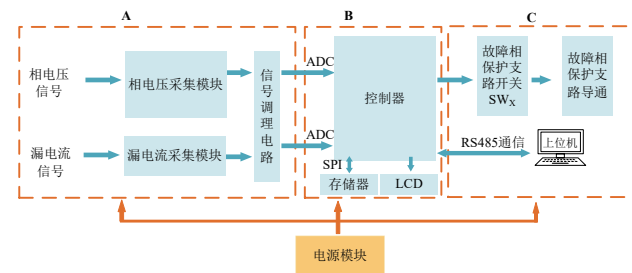


图1 系统总体结构图

信号采集单元由相电压采集模块和漏电流采集模块组成。通过设计电压测量及其信号调理电路,实现对相电压信号的实时采集;通过设计合适的漏电流互感器及其信号调理电路,实现对回路中漏电流信号的采集。信号处理单元的核心是控制器,同时还包括通信接口等,相电压采集模块和漏

电流采集模块采集到的信号通过 A/D 口传输至控制器，数据存储模块通过 SPI 总线与控制器相连实现数据存储；上位机与控制器之间通过 RS485 串口传输数据实现上位机显示。控制输出单元包括保护支路、控制器 I/O 口与保护支路电子开关 SW_x 相连，控制保护支路的导通与关断。电源模块为系统中所使用的元器件提供工作电压。

2 故障检测算法

当电缆发生故障后，漏电流采集量由线缆或设备自然漏电产生的自然漏电流和故障电流组成。传统故障检测方法仅通过监测漏电流判断故障，受自然漏电流干扰而存在故障检测死区，导致误判和漏判。因此，本文对传统检测方法进行改进，同时监测相电压和漏电流，故障检测方法的步骤为：首先提取其故障特征，其次对故障特征量进行线性预测，最后实现单相接地故障的判断和选相。线性预测可以根据相电压和漏电流的变化趋势，对未来时刻的故障特征值进行预测，在发生故障后，相电压和漏电流故障特征值随着时间推移而非线性增大。根据其线性预测值判断故障可以有效提高检测速度，预测的权重因子随故障特征值的单调增长时间而逐渐增大，提升检测方法的抗干扰能力。

2.1 故障特征量提取

故障特征量包括电压特征量提取和电流特征量提取。控制器通过滑动窗口算法计算相电压故障特征 $x(k)$ 和漏电流故障特征 $y(k)$ 。设定滑动窗口函数的窗长为 1.2 个周期，即 $1.2 \times 0.02 \text{ s} = 0.024 \text{ s}$ ，以兼顾检测速度与抗干扰性。（1）电压故障特征量：在单相隔离变压器输出线路中，取 A 相和 B 相电压峰值之差作为电压故障特征量。在三相隔离变压器输出线路中，取三相电压峰值中的最高值和最低值，计算最高峰值与最低峰值之差作为电压故障特征量。（2）漏电流特征量：在单相隔离变压器或三相隔离变压器输出相线中发生单相接地故障时，漏电流受故障相对地分布电容经故障支路放电影响而产生尖峰，并逐渐衰减趋于稳态。由于漏电流有效值不易受高频尖峰影响，因此选择漏电流的有效值作为电流特征量。

2.2 线性预测

取相邻两次相电压故障特征值作差以得到相电压特征值斜率，取相邻两次漏电流故障特征值作差以得到漏电流特征值斜率，根据其单调变化的时间进行线性预测。预测值 $x_d(k)$ 、 $y_d(k)$ 计算公式为：

$$\begin{cases} x_d(k) = x(k) + t_x / T_x \cdot \Delta x(k) \\ y_d(k) = y(k) + t_y / T_y \cdot \Delta y(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\Delta x(k)$ 表示为相电压特征量斜率； $\Delta y(k)$ 表示为漏电流特征量斜率； t_x 表示为相电压特征值单调递增的时间； t_y 表示为漏电流特征值单调递增的时间； T_x 表示为相电压预测时间区间； T_y 表示为漏电流预测时间区间； t_x/T_x 和 t_y/T_y 为线

性预测的权重因子；单调递增时间 t_x 和 t_y 分别为相电压特征值和漏电流特征值单调递增的次数与采样时间乘积。 $\Delta x(k)$ 、 $\Delta y(k)$ 表达式为：

$$\begin{cases} \Delta x(k) = x(k) - x(k-1) \\ \Delta y(k) = y(k) - y(k-1) \end{cases} \quad (2)$$

预测时间区间 T_x 和 T_y 需综合考虑检测速度与抗干扰性进行取值。由于电压特征量变化幅度大、速度快，电流特征量变化幅度小、速度慢，因此设置电压的预测时间区间 T_x 大于电流的预测时间区间 T_y 。

2.3 故障判断与选相

判断故障流程为：当电压故障特征值与电流故障特征值的线性预测值同时大于预设阈值时，判断发生故障。由于单相隔离变压器和三相隔离变压器的输出相线中，故障相电压峰值均低于非故障相电压峰值，因此判断相电压峰值最低相即为故障相。

3 硬件设计

图 2 为本系统硬件结构框图，包括相电压采集模块、漏电流采集模块、控制器模块、旁路保护支路和显示模块等。微控制器选用意法半导体公司生产的 STM32F103ZET6，其工作频率最高可达 72 MHz，具有丰富的 I/O 口资源。

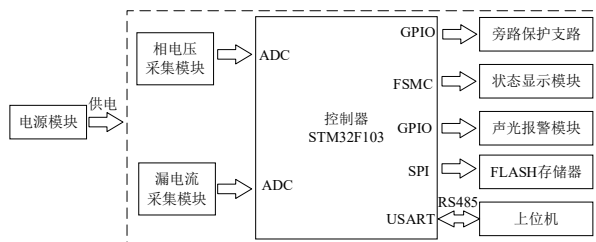


图 2 硬件结构框图

3.1 电源模块

系统正常工作所需的电源轨有 24 V、5 V、3.3 V、-5 V。24 V 用于电流传感器供电，5 V 和 -5 V 用于给相电压和漏电流采集模块的信号调理电路供电，3.3 V 和 5 V 给其他功能模块供电。

3.2 相电压采集模块

三相隔离变压器以原、副边均为星型接法为例，正常工作时输出相电压频率为 50 Hz，峰值不超过 312 V；发生故障时故障相电压和非故障相电压频率均为 50 Hz，故障相电压峰值减小，非故障相电压峰值增大，最大峰值不超过 600 V。相电压首先由分压电阻进行衰减，分压电阻采用误差为 0.1% 的高精度、低温漂贴片电阻。相电压经电阻分压后输出的电压信号衰减至原始信号的 1/200。分压电路输出端采用双向 TVS 管进行过压保护，防止因过压损毁器件。由于相电压测量电路输出的电压信号均为双极性信号，而 ADC 输

入电压范围为 0 ~ 3.3 V，因此需对经电阻分压后的电压信号进行比例放大、低通滤波、直流偏置和阻抗变换后输入 ADC 采集端口得到相电压采集值。

3.3 漏电流采集模块

由于待测漏电流主要为 50 Hz 工频电流，无直流分量，因此漏电流采集模块采用电流互感器型的漏电流传感器。漏电流传感器的副边接在采样电阻两端。将采样电阻两端电压信号放大后进行低通滤波以滤去高频分量，并通过直流偏置电路使漏电流信号符合 AD 采集端口输入电压范围。由于采集漏电流信号的延时包括运算放大器的建立时间、滤波器的相频特性和软件计算漏电流有效值的计算时间，因此在保证增益和滤波效果的情况下应尽可能减少调理电路中运算放大器的个数以及滤波器的延迟时间。

3.4 旁路保护模块

在旁路保护支路中，通过控制电子开关的通断实现保护支路的工作。当发生单相接地故障时，控制故障相保护支路动作，将线路中的漏电流分流至大地，避免故障电流持续增大引发电气火灾或对人体造成电击伤害。常见的电子开关有场效应管、晶闸管、可控硅、继电器、光电耦合器等。为保证旁路保护支路可以快速、有效地降低故障电流，选择响应速度快、导通电阻小、可快速通断的固态继电器。

3.5 状态显示模块

采用微控制器控制 LCD 液晶显示模块，实现实时显示相电压、漏电流信息及运行状态的功能，直观监测系统运行信息。运行状态即为正常工作、故障相线、故障时间等状态信息。所选择的液晶显示屏型号为 DST2001PH，接口为 16 位的 8080 并行接口，通过配置 STM32 中的 FSMC 寄存器，实现微控制器与显示模块数据交互。

3.6 声光报警模块

当检测到发生漏电故障时，通过声光报警来警示用户及时排查故障，保障用电安全。当检测到发生故障时，STM32 的 IO 口输出高电平，NPN 型三极管导通，有源蜂鸣器发出声音，同时 LED 灯闪烁，通过频闪的红光和声音警示用户。

3.7 通信模块

通信模块采用 SP3485 芯片，可以实现最高 10 Mbit/s 的传输速率。SP3485 的 RE 与 DE 引脚短接在一起连接到 STM32 的 PD7 引脚上，通过 PD7 引脚可以控制 SP3485 的数据接收/发送模式，当 PD7=0 时，为数据接收模式，禁止发送；当 PD7=1 时，为数据发送模式，禁止接收。上拉电阻和下拉电阻使 SP3485 在数据未传输时处于空闲状态，使数据线的状态为确定值，保证 RS485 节点与网络的稳定性。

3.8 数据存储模块

数据存储模块中选择华邦公司生产的 128 Mbit 的 W25Q128 存储芯片，采用 SPI 总线接口的容量为 16 MB

FLASH 存储器，用于存储模块采集数据、故障记录、报警记录和操作记录等，满足存储容量要求。

3.9 上位机设计

为远程监测线路运行状态，设计了基于 labVIEW 的上位机显示模块，通过串口接收采集到的相电压和漏电流数据，实现数据显示、存储和导出处理功能。

4 软件设计

4.1 主程序设计

系统主程序流程如图 3 所示。

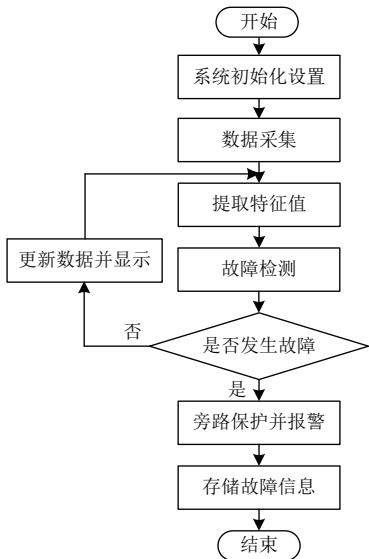


图 3 系统主程序流程图

首先微控制器进行初始化设置，包括系统开机时初始化定时器、中断、A/D 转换、I/O 口、串口等端口，并配置 LCD 显示屏等功能模块寄存器参数。软件完成初始化和自检后，由于隔离变压器在接入电网时会产生幅值远超额定值的励磁涌流，会对电网产生冲击，甚至使上级保护器跳闸，因此需要进行隔离变压器的软启动。系统初始化完成后，相电压采集模块、漏电流采集模块实时采集相电压和漏电流数据。微控制器提取相电压、漏电流故障特征值并计算线性预测值，输入故障检测算法进行判断；若判断发生故障，则输出控制信号驱动相应保护支路动作，同时驱动 LED 和蜂鸣器发出警报。微控制器通过显示屏实时显示系统运行状态。在发生故障时，将故障状态下的相电压、漏电流数据均保存至存储器中，为用户排除故障提供指导。

4.2 数据采集设计

采用 STM32F103ZET6 自带的 12 位 ADC 进行电压和电流采集。ADC 时钟频率经 6 分频后为 12 MHz，设定采样时间为 7.5 个周期数，则单次采样需要 $7.5 \div 12.5 = 20$ 个周期，即 $1.67 \mu\text{s}$ 。ADC 转换后的数据量需要取平均值，在此取 3 次数据的平均值。通过 Timer2 软件触发中断，计数频率为 100 kHz，而相电压和漏电流的频率为 50 Hz，则单个周期采

集 2000 个点。相电压的计算公式为

$$v_{phase} = \left(\frac{v_value}{4095} \times 3.3V - 1.65V \right) \times 400 \quad (3)$$

式中: v_{phase} 为相电压计算值; v_value 为相电压采集值 AD 转换后的数字量。

漏电流经电流互感器转换为电压量, 又经过 29.3 倍放大并加入了 1.65 V 的直流偏置, 其采样电阻两端电压为:

$$v_{sam} = \frac{1}{29.3} \left(\frac{i_value}{4095} \times 3.3V - 1.65V \right) \quad (4)$$

式中: v_{sam} 为漏电流互感器副边采样电阻两端电压计算值; i_value 为漏电流采集值 AD 转换后的数字量。

原边漏电流与采样电阻电压为正相关的线性关系, 其计算公式为:

$$i_p = a \cdot v_{sam} + b \quad (5)$$

式中: a 为拟合曲线斜率; b 为拟合曲线截距, 均由实测数据进行插值拟合解算得到。

5 测试结果

5.1 保护效果测试

三相隔离变压器输出相线 U、V、W 结构对称, 以 U 相发生漏电故障为例进行测试。在 U 相与地线之间短接不同阻值的定值电阻以模拟不同阻抗下的单相接地故障。表 1 为 U 相故障保护效果测试数据, 其中 Z_p 为故障阻抗, v_p 为故障相电压, i_p 为故障电流。

表 1 U 相故障保护效果测试数据

$Z_p / k\Omega$	v_p / V	i_p / mA	$Z_p / k\Omega$	v_p / V	i_p / mA
0.5	2.6	5.0	3.4	2.5	0.7
	2.8	5.0		2.6	0.8
	2.5	4.8		2.9	0.9
	2.5	4.9		2.6	0.7
	2.8	4.9		2.6	0.7
2	2.6	1.3	1.5	2.4	1.4
	2.8	1.4		2.6	1.6
	2.8	1.3		2.8	1.8
	2.6	1.3		2.5	1.5
	2.5	1.2		2.5	1.6

系统 U 相经不同的故障阻抗模拟对地漏电时, 最大故障相电压有效值均不超过 3 V; 最大故障电流有效值不超过 5 mA, 有效实现了电火防控。

5.2 保护动作特性测试

为测试保护动作时间, 可利用示波器测量保护动作信号、故障支路电流、保护支路电流, 以得到保护动作时间。其中 t_p 为保护动作时间, 定义为发生故障到旁路保护动作使相电压和故障电流降低至安全范围内的时间。

由表 2 可知, 当 U 相发生漏电故障时, 故障相保护支路均能准确动作, 其保护动作时间不超过 15 ms。发生人体单相接地故障时, 系统能够实现准确的故障选相, 并作出快速的保护, 具有可靠的保护动作特性。

表 2 U 相故障保护动作特性测试

$Z_p / k\Omega$	t_p / ms	$Z_p / k\Omega$	t_p / ms
0.5	9.4	3.4	12.2
	7.5		14.5
	8.6		12.3
	9.2		10.2
	8.5		11.5
2	11.7	1.5	10.9
	8.2		7.5
	9.5		11.0
	11.8		8.6
	10.5		8.2

6 总结

本文设计了一套基于电压电流多信息采集的电火防控系统, 系统通过相电压与漏电流的故障特征量提取与线性预测的故障检测方法, 可以快速、可靠地完成故障检测与选相, 通过旁路保护支路减小了故障电流和检测时间。在三相工况下进行了保护效果测试和保护动作测试, 测试结果验证了本系统可以使故障相电压降至 3 V 以内, 故障电流降至 5 mA 以内, 可以在 15 ms 内实现分流, 达到了准确、快速地完成电火防控的目的。此外, 测试过程中输出线电压和相角均保持不变, 具有良好的供电连续性。

参考文献:

- [1] MITOLO M, BAJZEK T J. New generation tester to assess the electrical safety in low-voltage distribution systems[J]. IEEE transactions on industry applications, 2019,55(1):106-110.
- [2] 李天友, 郭峰. 低压配电的触电保护技术及其发展 [J]. 供用电, 2019,36(12):1-8.
- [3] 邢小崇. 一起电气火灾事故起火原因的调查分析 [J]. 消防科学与技术, 2018,37(4):570-572.
- [4] 吴志强, 王德坤, 赵海龙, 等. 遏制电气火灾多发的阻性漏电检测技术分析 [J]. 消防科学与技术, 2020,39(7):991-993.
- [5] 吕亮, 段成, 汲胜昌, 等. 电线电缆引燃机理及燃烧特性研究综述 [J]. 高压技术, 2022,48(2):612-625.
- [6] 李小白, 钟晨, 张学军. 电气火灾监控探测器剩余电流分析方法 [J]. 消防科学与技术, 2017,36(3):359-362.
- [7] 靳瑞俊. 煤矿井下分区供电关键技术研究及应用 [J]. 中国设备工程, 2021(3):217-218.
- [8] 李奎, 王天朔, 王尧, 等. 基于数字恒流技术的 B 型剩余电流动作特性测试方法的研究 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 147-152.
- [9] 杨帅, 陈远扬, 胡军华, 等. 基于物联网的配电网漏电排查装置的研制 [J]. 电测与仪表, 2018,55(22):87-91.
- [10] 艾精文, 谢智敏, 赵宇明, 等. 剩余电流动作保护器研究综述 [J]. 电器与能效管理技术, 2019(24):1-5+21.

【作者简介】

韩国璇 (1997—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 嵌入式系统与智能控制。

(收稿日期: 2023-12-14)