

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190759

## 基于半波傅氏算法的小电流接地选线装置设计

安东亮<sup>1</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 姚凯<sup>1</sup>, 张辉<sup>1</sup>, 王晗<sup>2</sup>

(1. 国网漯河供电公司, 河南 漯河 462000; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 为了解决小电流接地系统中单相接地故障选线困难的问题, 经过现场调研分析了现有选线方法无法有效地检出和切除故障相的原因。然后对小电流接地系统单相接地故障的特征和选线原理进行了深入的理论分析, 并对小电流接地选线方法进行了阐述。在此基础上提出了基于半波傅氏算法的接地保护原理, 建立了基于半波傅氏算法的动作判据算法模型。根据动作判据, 设计了小电流接地系统单相接地故障选线系统, 并对系统的硬件部分进行了选型。

**关键词:** 小电流接地; 选线; 半波傅氏算法; 动作判据; 硬件

### Design of a small current grounding line selection device based on a half-wave Fourier algorithm

AN Dongliang<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, YAO Kai<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, WANG Han<sup>2</sup>

(1. State Grid Luohe Power Supply Company, Luohe 462000, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Selecting single-phase ground faults in small current systems is difficult. To tackle this, first the reason why the existing line selection methods cannot effectively detect and remove the fault phase is analyzed after on-site investigation. The characteristics of the single-phase grounding fault and the principle of line selection of a small current grounding system are analyzed in depth. The method of grounding line selection for small current is described. On this basis, the principle of grounding protection based on a half-wave Fourier algorithm is proposed. An action criterion algorithm based on a half-wave Fourier algorithm is established. Given the action criterion, a single-phase ground fault line selection system for small current grounding system is designed, and the hardware part of the system is selected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 5187070061).

**Key words:** small current grounding; line selection; half-wave Fourier algorithm; action criterion; hardware

## 0 引言

随着前几年智能电网概念的提出, 我国电网系统要求越来越高的可靠性, 而就目前我国已经构建的电网中配电网系统占据绝大多数, 因此增加配电网系统的可靠性能使我国的电力网络系统更加坚强; 同时, 配电网系统与用电客户直接紧密联系, 在用电客户生活水平日益增长的同时, 用电客户对电网可靠性能要求也越来越高<sup>[1]</sup>。因此, 为了保证供电质量, 同时提升供电系统的可靠性, 在系统发生故障时需有相关设备能够快速有效地检测出故障, 保证供电的可靠性, 降低系统故障对整个系统

的影响<sup>[2]</sup>。

对于配电网系统广泛使用的小电流接地系统, 国内外很多学者已对此开展了相关研究, 同时也提出了很多方法和选线装置, 如注入变频信号法、小波分析法等, 但是根据现场事故分析, 现有选线装置准确率仍然较低, 实际中的选线效果并不好, 误选的现象时有发生, 因此开展进一步的相关研究, 对提高系统的可靠性以及供电质量具有重要的意义<sup>[3-7]</sup>。

造成目前选线装置准确率低的因素有多种。首先, 在目前的配电网系统中, 故障接地点附近的电磁环境较为复杂; 其次, 目前各个生产商所设计的选线装置中所使用的算法包含故障特征量较少, 这也使得选线不准确<sup>[8-12]</sup>。因此, 为了克服现有选线

设备的不足, 应尽可能多地考虑并整合故障时的变化量, 以此提高选线的准确率。系统发生事故后, 故障线路的母线上会出现零序电压, 同时故障回路中也会产生零序电流。经过研究, 本文选取基于傅里叶算法的选线理论作为研究对象, 开展选线系统的研究设计, 主要是由于该理论能同时考虑零序电压、电流两个故障特征量, 从而提高选线准确率<sup>[9-14]</sup>。本文首先对傅里叶算法原理进行分析, 获得不同接线情况下小电流接地系统动作选线判据, 随后根据选线的判据理论对构建系统的硬件装置进行选型和设计。

## 1 小电流接地系统单相接地故障特征分析

### 1.1 中性点不接地系统

我国配电网系统中, 在中性点不接地系统正常运行时, A、B、C 三相对地电压对称且中性点对地电压为 0。此外, 在输电线路中一般有  $C_{ABi}=C_{BCi}=C_{CAi}$ , 且  $C_{Ai}=C_{Bi}=C_{Ci}=C_i$  ( $C_i$  为第  $i$  条馈出回路的对地电容值;  $i=2,3,4,\dots,n$ ), 则各相电容电流相等并超前于相应电压  $90^\circ$ , 如图 1 所示。

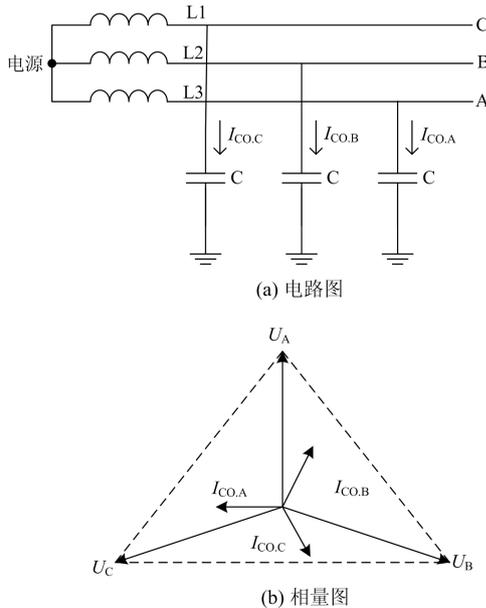


图 1 正常运行时零序电压、电流相位关系

Fig. 1 Phase sequence relation of zero sequence voltage and phase current in normal operation

假设 A 相发生接地故障, 此时对图 1 进行分析, 较易总结出以下两点:

1) 电网发生单相接地故障后, 故障相电压为 0, 其他两相电压会升高到  $\sqrt{3}$  倍, 中性点电压  $\dot{U}_N$  上升为相电压。

$$U_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = -E_A \quad (1)$$

即等于电网正常工作时的相电压, 相应地对地电流也升高  $\sqrt{3}$  倍; 线电压仍然保持对称。

2) 流经接地点的容性电流为两个非故障相的容性电流之和, 而流经非故障电容电流可以用式(2)进行计算。

$$I = \sqrt{3}U_\phi\omega C_0 \quad (2)$$

式中:  $U_\phi$  为系统正常运行情况下相电压有效值,  $U_\phi$  的大小等于图 2 中向量  $E_B$  或者  $E_C$  的大小;  $\sqrt{3}$  代表的是非故障相电压升高的倍数。

在中性点不接地的系统中, 流经故障点的电流可以计算为  $I_f = I_B + I_C$ , 即两个非故障相的对地电容电流之和。此外, 分析图 2 所示的向量关系, 非故障相电流相位的夹角为  $60^\circ$  且大小相等, 则可以计算出  $I_f$ 。

$$I_f = \sqrt{3}(\sqrt{3}U_\phi\omega C_0) = 3U_\phi\omega C_0 \quad (3)$$

根据式(3)可以得知, 发生单相接地故障后, 流经故障点的电流大小刚好等于线路未发生故障时三相对地电容电流之和。

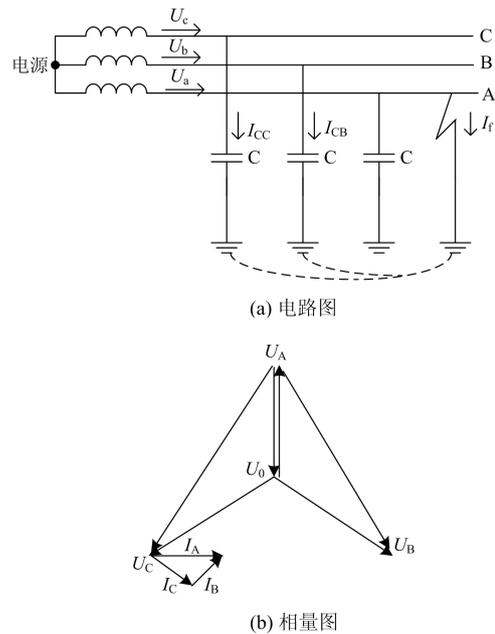


图 2 单相接地时的中性点不接地电力系统

Fig. 2 Diagram of neutral ungrounded power system with single phase grounding

### 1.2 中性点经消弧线圈接地的系统

中性点经消弧线圈接地方式是指配电网一个或多个中性点经消弧线圈与大地连接, 系统图如图 3 所示。

如图3所示, 当A相发生单相接地故障后, 则流经故障点的电流是接地电容电流  $\dot{I}_A$  与流过消弧线圈电感  $\dot{I}_L$  的相量和。由于电流  $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_L$  分别超前、滞后A相电压  $\dot{U}_A$  的角度为  $90^\circ$ , 即两个电流相位相反, 这就极大地减小了接地点的电流, 继而使得接地点不会产生巨大的电弧等危害, 不至于危害整个系统的稳定运行。

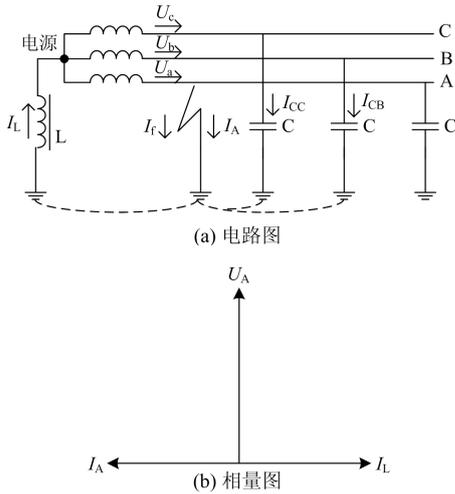


图3 单相接地时中性点经消弧线圈接地的电力系统图  
Fig. 3 Power system diagram of neutral point grounding through extinction coil when single phase grounding

随着智能电网的建设, 目前我国大部分系统中安装了具有自动跟踪补偿功能的消弧线圈装置<sup>[3,15]</sup>, 可使消弧线圈调谐至合理状态, 以此来减小接地电弧。

此外, 在经消弧线圈接地的配网系统中, 故障相接地即对地电压为零, 而非故障相对地电压增加  $\sqrt{3}$  倍。但是, 对于整个系统而言, 由于各相之间的电压没有改变, 因此可维持整个系统的短暂正常运行。

## 2 小电流接地系统动作选线判据

通过对电力系统进行分析可知, 在整个系统中各类电压、电流等信号均是以基波及奇次谐波为主, 而偶次谐波基本不存在或者存在比例很小, 可以忽略不计。此外, 通过分析系统发生接地故障后的电流、电压的波形, 发现其不是标准的正弦波, 也即零序分量中含有谐波。另外, 目前我国配网系统中变压器二次侧基本采用三角形接线, 这就使得接地故障后的零序分量中不存在3次、9次、15次等谐波, 即零序分量中的组成部分为基波、5次、7次、11次、13次等<sup>[16-18]</sup>。综上所述, 结合小电流系统的实际情况, 选取以半波傅氏算法为基础设计小电流接地选线装置。

假设随时间变化的周期函数为  $u(t)$ , 根据半波傅氏算法<sup>[19-24]</sup>, 该函数的  $n$  次倍频分量的实部  $U_{R_k}$ 、虚部  $U_{I_k}$  可以表示为

$$\begin{cases} U_{R_k} = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} u_k \cos\left(nk \frac{2\pi}{N}\right) \\ U_{I_k} = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{N/2} u_k \sin\left(nk \frac{2\pi}{N}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $N$  为一个周期内的采样点数;  $U_k$  为第  $K$  次采样值。

### 2.1 中性点不接地系统接地保护动作判据

设线路零序电流的瞬时值为  $i_0$ , 电网零序电压的瞬时值为  $u_0$ 。每周期采12个点, 求取基波分量, 根据半波傅氏算法, 可求得电压、电流的实部  $U_{OR}$ 、 $I_{OR}$ , 虚部分别为  $U_{OI}$ 、 $I_{OI}$ , 具体计算公式分别为

$$\begin{cases} U_{OR} = \frac{1}{6} \left[ (u_{02} - u_{04}) + \sqrt{3}(u_{01} - u_{05}) - 2u_{06} \right] \\ U_{OI} = \frac{1}{6} \left[ (u_{01} + u_{05}) + \sqrt{3}(u_{02} + u_{04}) + 2u_{03} \right] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} I_{OR} = \frac{1}{6} \left[ (i_{02} - i_{04}) + \sqrt{3}(i_{01} - i_{05}) - 2i_{06} \right] \\ I_{OI} = \frac{1}{6} \left[ (i_{01} + i_{05}) + \sqrt{3}(i_{02} + i_{04}) + 2i_{03} \right] \end{cases} \quad (6)$$

设  $i_0$ 、 $u_0$  的相位角分别为  $\varphi_i$ 、 $\varphi_u$ , 其值可表示为  $\varphi_i = \text{tg}^{-1} \frac{I_{OI}}{I_{OR}}$ ,  $\varphi_u = \text{tg}^{-1} \frac{U_{OI}}{U_{OR}}$ 。令  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ , 将零序电流  $i_0$  超前移相  $90^\circ$ , 构造选线动作判据。

$$U_{OI} I_{OI} \cos(\varphi + 90^\circ) > K \quad (7)$$

式中:  $U_{OI}$ 、 $I_{OI}$  分别为  $u_0$ 、 $i_0$  的模值, 且有  $U_{OI} = \sqrt{U_{OR}^2 + U_{OI}^2}$ ,  $I_{OI} = \sqrt{I_{OR}^2 + I_{OI}^2}$ ;  $K$  为动作整定值, 且  $K > 0$ 。

$$\text{由于 } \cos(\varphi + 90^\circ) = \frac{(U_{OR} I_{OI} - U_{OI} I_{OR})}{\sqrt{(I_{OI}^2 + I_{OR}^2)(U_{OI}^2 + U_{OR}^2)}},$$

则动作判据可得实现选择性接地故障保护的动作为(即对应于故障支路)

$$P_{OP} = (U_{OR} I_{OI} - U_{OI} I_{OR}) > K \quad (8)$$

其制动条件为(对应于非故障线路)

$$P_{OP} = (U_{OR} I_{OI} - U_{OI} I_{OR}) < 0 \quad (9)$$

可见, 经过上述处理后, 极大地简化了动作条件、制动条件的表达式, 使得动作判据更为直观, 同时在进行编程计算时也可缩短系统的运算时间。

直观地看, 从相量图4可看出, 经过处理后  $I_{of}$  (即  $I'_{of}$ ) 与电网零序电压  $U_0$  同相位, 而处理后的

$I_{01}$  (即  $I'_{01}$ ) 与  $U_0$  反相位。这样对故障线路  $\cos(\varphi + 90^\circ) = 1$ , 对非故障线路  $\cos(\varphi + 90^\circ) = -1$ 。

对于选线判据中  $K$  值的确定, 一旦设定好选线装置的零序电压, 整定值  $K$  就取决于系统的零序电流值。

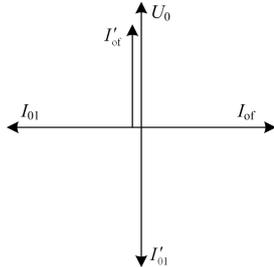


图 4 中性点不接地系统零序电流向量图

Fig. 4 Zero sequence current vector diagram of neutral ungrounded system

### 2.2 中性点经消弧线圈接地系统接地保护动作判据

如中性点不接地系统, 同样令  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ , 此时将零序电流  $i_0$  超前移相  $180^\circ$ , 构造下式选线动作判据。

$$U_{01} I_{01} \cos(\varphi + 180^\circ) > K \quad (10)$$

$$\text{由于 } \cos(\varphi + 180^\circ) = \frac{(U_{OR} I_{OR} + U_{OI} I_{OI})}{\sqrt{(I_{OI}^2 + I_{OR}^2)(U_{OI}^2 + U_{OR}^2)}},$$

则动作判据可得实现选择性接地故障保护的动作为(对应于故障支路)

$$P_{OP} = (U_{OR} I_{OR} + U_{OI} I_{OI}) > K \quad (11)$$

观察图5可知, 将  $I_{RN}$  超前移项  $180^\circ$  后, 其与电网零序电压  $U_0$  同相位, 而移相后  $I'_{of}$  垂直于  $U_0$ 。因此式(10)表达的含义为零序电流在零序电压上的投影值, 因此对零序电流中的有功分量, 恒有  $\cos(\varphi + 180^\circ) = 1$ , 而对零序电流中的无功分量恒有  $\cos(\varphi + 180^\circ) = 0$ 。

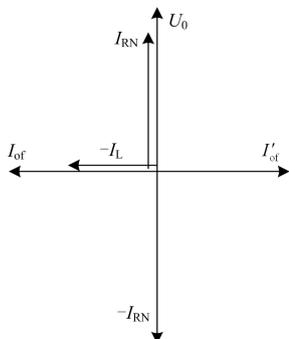


图 5 中性点经消弧线圈接地系统零序电流向量图

Fig. 5 Neutral point arc-suppression coil grounding system zero sequence current vector diagram

通过上述分析, 在故障支路中  $P_{OP} > 0$ , 非故障支路有  $P_{OP} = 0$  (其中, 如果将线路的绝缘电阻计算在内则有  $P_{OP} \leq 0$ )。此外, 通过上述分析, 此种计算方式仅利用系统中的有功电流即可实现故障线路快速、准确的识别。

经过分析, 在采用此种方法选取故障线路过程中与电网的零序电流中无功分量无关, 因此不需要获得接地电流等具体信息, 简化了选线方法。

至于选线判据中  $K$  值的确定, 同中性点不接地系统, 一旦设定好选线装置的零序电压, 整定值  $K$  就取决于系统的零序电流值。

综上所述, 由于本系统所采用的选线判据模型是基于半波傅氏算法, 使得整个系统动作时间大大缩短, 对瞬态接地故障的选线具有重大意义。

### 3 小电流接地选线装置的硬件设计

基于上述小电流接地选线装置的理论研究以及选线判据研究, 对选线系统的硬件装置进行设计, 系统的整体设计思路如图 6 所示。首先通过信息采集模块对线路上的电压、电流信号进行采集, 通过电压调整模块转换电压至合适的范围, 便于后续装置进行处理分析。随后采用 A/D 转换模块将调整后的信号转换为数字信号。借助上节所述的各种系统接地保护动作判据, 在单片机内部对采集得到的信号进行分析, 如果判断出系统存在单相接地故障, 则将故障信息保存在存储器模块中, 同时将故障线路信息传送给执行装置进行故障报警和显示。

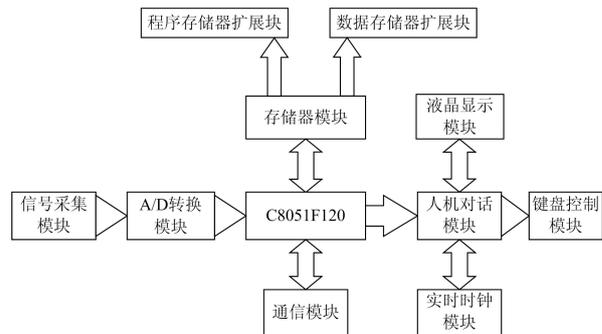


图 6 系统结构框图

Fig. 6 Diagram of system structure

#### 3.1 CPU 模块

CPU 是单片机的核心模块。根据图 6 所示, 在整个系统中单片机是核心器件, 因此为保证系统具备高性能, 必须选取合适的 CPU 芯片。本文所设计小电流接地故障选线装置中必须要求装置能有效、快速地接收采集获得的信号数据, 并及时处理, 最终获得故障线路, 因此我们使用了十六位高速单片

机 C8051F120。

### 3.2 信号采集模块

传感器采集获得零序电流信号经过信号调理模块转换后, 将成为小幅值的电流信号。同理, 电压传感器才得到的零序电压信号经解调后将变为一定幅值范围的电压信号。随后, 变换获得电压电流信号被隔离后计入设计的滤波电路, 目的是滤除信号中所携带的高次谐波, 最终进入信号采集模块。经市场调研, 本文选择了MAX308作为A/D转换模块。

此外, 经转换模块后获得电压、电流均为交流信号, 属于双极性的, 但是一般的A/D转换模块只允许单极性输入, 因此在该模块中设置了偏置电压, 使输入信号成为单极性, 电压调整图如图7所示。

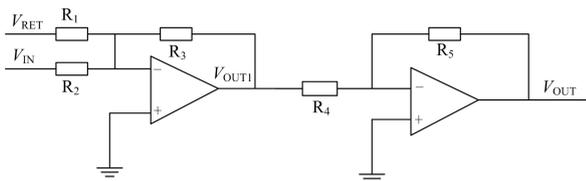


图7 电压调整图

Fig. 7 Voltage regulation diagram

$$\frac{V_{RET}}{R_1} + \frac{V_{IN}}{R_2} = -\frac{V_{OUT1}}{R_3} \quad (12)$$

$$\frac{V_{OUT1}}{R_4} = -\frac{V_{OUT}}{R_5} \quad (13)$$

令  $R_1 = R_2 = R$ ,  $R_3 = R$ ,  $R_4 = R_5$ ; 则有

$$V_{OUT} = (V_{IN} + V_{RET})/2 \quad (14)$$

当  $|V_{IN}| \leq |V_{RET}|$  时, 有

$$0 \leq V_{OUT} \leq V_{RET} \quad (15)$$

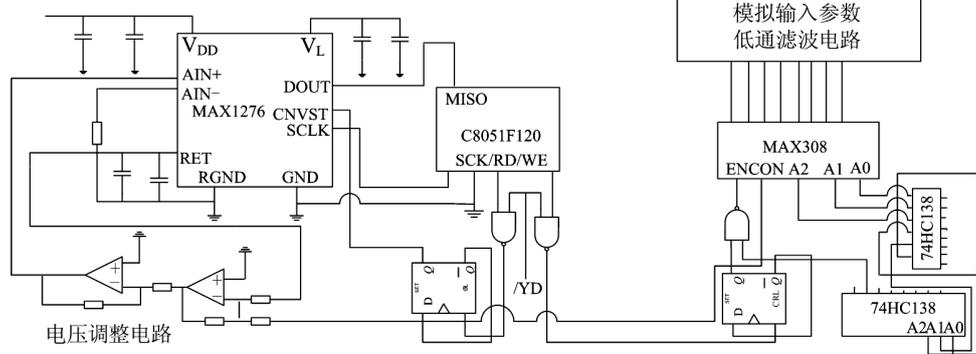


图9 硬件连接图

Fig. 9 Hardware connection diagram

### 3.4 存储空间扩展模块

根据第二部分的分析, 本文提出的基于半波傅氏算法的小电流接地故障选线装置需要利用待检测

对于上述所列公式, 其中  $V_{RET}$  是A/D转换器的基准电压,  $V_{IN}$  是MAX308 多路开关的输入电压值。经过上述分析, 所设计的电路满足了MAX1276对电压的要求。

### 3.3 A/D 转换模块

该模块主要是将输入的模拟信号转换为数字信号。MAX1276具有较好的工作性能, 且有标准的SPI接口可以轻松地与C8051F120的同步串行接口相连, 能够满足小电流选线装置的精度要求, 其典型工作电路如图8所示。

图9展示了MAX1276与CPU的硬件连接方式。线路上的电压、电流传感器将零序电压、电流转换为低幅值电压信号, 而该信号中的高频信号通过硬件中低通滤波器滤除, 通过对MAX308进行参数输入来选择A/D转换通道。由于MAX1276的转换范围为0~4.096 V, 因此本文设计的硬件系统中增加了电压调整电路, 将输入的电压调整至MAX1276转换范围内的值。最后通过A/D转换芯片把模拟信号转换成单片机数据总线能接受的数据。

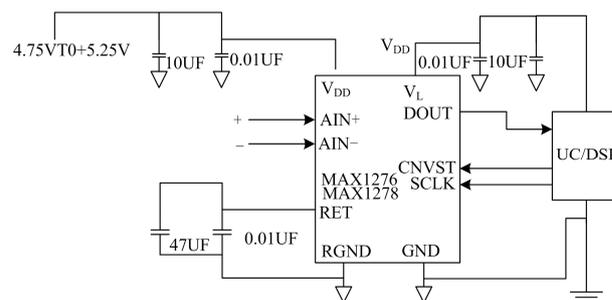


图8 MAX1276 典型工作电路图

Fig. 8 Typical working circuit diagram of MAX1276

电网系统中的多种电气信息, 例如零序电压、电流信息, 根据第二节所述的采样频率存储这些信息至少需要150 k以上的内存空间。此外当选线系统检

测到配电网出现单相接地故障后需要记录故障发生时的各种信息,这也需要大量的存储空间,如果仅依靠C8051F120的存储空间来存储这些信息是远远不够的。因此在本文设计的选线系统中,增加了一片存储容量为128 MB 的FLASH芯片K9K1G08U0M和一片快速静态数据存储器(SRAM),以便可以存储大量的数据及内容,达到选线装置对存储空间的要求。

### 3.5 人机对话模块

人机对话模块方便了现场操作,改善了工作环境。本系统设计了人机交互界面,采用了全汉字液晶屏及8279键盘显示器接口控制键盘,较为合适地应用在实时性较高的小电流选线测控系统中。

### 3.6 通信系统

考虑到目前新建的变电站基本都是无人值守以及建设智能变电站的需求,因此所设计的选线装置具有与上一级部门(如远动)进行通信联系的功能。所选用的C8051F120恰恰存在两个异步串行口UART,使得系统间的通信成为可能。本文设计中将装置的动作信号通过串口方式上传使得选线系统和上一级部门进行通信。

### 3.7 硬件抗干扰设计

为了抵抗外界环境对测量系统的影响,采取以下措施:数字地与模拟地短接,防止交流地线干扰;采取了众多的屏蔽与隔离措施,同时通过添加模拟滤波器来减少高频信号的影响,增强A/D。

## 4 结语

综上所述,为了解决目前选线装置存在的问题,本文提出了一种基于傅里叶算法的小电流接地选线装置方法。首先对小电流接地系统单相接地故障的特征和选线原理进行了较深入的理论分析,并阐述了小电流接地选线方法。综合考虑本文基于半波傅氏算法分析了接地保护原理,通过分析算法模型获得了中性点接地与否的动作判据,以便可以选出故障相。此外,通过对故障特征分析,文中分别给出了故障相动作判据、非故障相制动判据,这就使得选线动作判据简单明了,可较好地解决目前我国配电网中单相接地故障选线不准确的问题。最后,根据半波傅氏算法的选线判据,设计了小电流接地系统单相接地故障选线系统,并对系统的硬件部分进行了选型。

### 参考文献

[1] 王骁,李小君,李勤超.小电流接地系统单相接地故障查找方法的探究[J].电工技术,2019(4):60-61,105.

- WANG Xiao, LI Xiaojun, LI Qinchao. Research on finding method of single phase earth fault in small current grounding system[J]. Electric Engineering, 2019(4): 60-61, 105.
- [2] 朱振东,邢惠民,刘代,等.基于综合 Hausdorff 距离的小电流接地故障选线[J].电测与仪表,2019,56(6):56-62.
- ZHU Zhendong, XING Huimin, LIU Dai, et al. Fault line selection in small current grounding system based on composite Hausdorff distance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 56-62.
- [3] 刘柱揆,曹敏,董涛.基于波形相似度的小电流接地故障选线[J].电力系统保护与控制,2017,45(21):89-95.
- LIU Zhukui, CAO Min, DONG Tao. Fault line selection of neutral indirectly grounding system based on waveform similarity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 89-95.
- [4] DENG F, ZENG X, PAN L. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [5] 邵翔,郭谋发,游林旭.基于改进 DTW 的接地故障波形互相关度聚类选线方法[J].电力自动化设备,2018,38(11):63-71,78.
- SHAO Xiang, GUO Moufa, YOU Linxu. Faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 63-71, 78.
- [6] WANG X, GAO J, CHEN M, et al. Faulty line detection method based on optimized bistable system for distribution network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1370-1381.
- [7] 张建东,冯小明,吴国平,等.基于 TDFT 非同步采样谐波测量的小电流接地故障信号处理方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):117-124.
- ZHANG Jiandong, FENG Xiaoming, WU Guoping, et al. Signal processing method of small current grounding fault based on TDFT non synchronous sampling harmonic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 117-124.
- [8] XU Y, LIU J, FU Y. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [9] BORGHETTI A, BOSETTI M, NUCCI C A, et al.

- Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 3139-3146.
- [10] 杨丽娜, 辛雷, 辛鹏. 小电流接地系统故障仿真分析与研究[J]. 东北电力大学学报, 2010, 30(1): 57-61.  
YANG Lina, XIN Lei, XIN Peng. Simulation and analysis of single phase to ground fault in the indirectly earthed power system[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2010, 30(1): 57-61.
- [11] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29(4): 16-20.  
XIAO Bai, SHU Hongchun, GAO Feng. Survey of the methods of fault line selection for single-phase-to-earth fault in networks with ungrounded neutral[J]. Relay, 2001, 29(4): 16-20.
- [12] MALLIKARJUNA B, VARMA P V V, SAMIR S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 229-244. DOI: 10.1186/s41601-017-0053-1.
- [13] YAONAN W, BAILIN H, HUI W. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [14] 薛永端, 薛文君, 李娟, 等. 小电流接地故障暂态过程的 LC 谐振机理[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 137-145.  
XUE Yongduan, XUE Wenjun, LI Juan, et al. LC resonance mechanism of transient process of earth fault in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 137-145.
- [15] GHADERI A, MOHAMMADPOUR H A, GINN H L, et al. High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1260-1268.
- [16] 骆玮, 王恒, 王磊, 等. 基于设备信息交互的小电流接地故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 73-82.  
LUO Wei, WANG Heng, WANG Lei, et al. Faulted line location method for distribution systems based on the equipment's information exchange[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 73-82.
- [17] GONG J. Based on FTU with wavelet decomposition waveform adaptive area calculation for single-phase ground fault line selection in distribution network[J]. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010, 294: 734-738.
- [18] 罗蛟. 配电网故障检测与定位方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- LUO Jiao. Research of distribution network fault detection and localization method[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [19] 牟龙华. 基于半波傅氏算法的补偿电网接地选线保护[J]. 华北电力大学学报, 2000, 27(3): 17-20.  
MOU Longhua. Compensation network grounding line selection protection based on half-wave Fourier algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2000, 27(3): 17-20.
- [20] 李彦哲, 关恩明, 张显民. 巴特沃兹有源低通滤波器设计[J]. 黑龙江科技信息, 2010(27): 15-16.  
LI Yanzhe, GUAN Enming, ZHANG Xianmin. Design of butterworth active low pass filter[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(27): 15-16.
- [21] 尹继亮. 积分方程快速傅里叶变换方法的研究及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.  
YIN Jiliang. Research and application of fast fourier transform method for integral equation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010.
- [22] 刘哲, 沈雯婷. 小电流接地系统故障选线法的分析[J]. 电工电气, 2018(2): 1-5.  
LIU Zhe, SHEN Wenting. Analysis of method to select fault line in small current grounding system[J]. Electrotechnics Electric, 2018(2): 1-5.
- [23] 孟安波, 葛佳菲, 李德强, 等. 基于纵横交叉算法的神经网络配电网故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 90-95.  
MENG Anbo, GE Jiafei, LI Deqiang, et al. Research on fault line selection of distribution network using RBF neural network based on crisscross optimization algorithm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 90-95.
- [24] SESHADRINATH J, SINGH B, PANIGRAHI B K. Incipient interturn fault diagnosis in induction machines using an analytic wavelet-based optimized Bayesian inference[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2014, 25(5): 990-1001.

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-09-08

作者简介:

安东亮(1966—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为经济管理研究; E-mail: 15939509559@163.com

陈涛(1969—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电气自动化; E-mail: 13839529781@163.com

李军(1969—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电气自动化。E-mail: 17803959988@163.com

(编辑 张爱琴)