

# 基于谐波检测的井下高压电网选择性漏电保护系统

孟润泉<sup>1</sup>, 梁翼龙<sup>1</sup>, 宋建成<sup>1</sup>, 李安平<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 潞安矿务局王庄煤矿, 山西 襄垣 046031)

**摘要:** 为限制超标的单相接地电流而在矿井高压电网中引入了消弧线圈, 这使得现有漏电保护的选择性性能受到严重影响。本文在分析电网漏电故障规律及现有检漏装置原理基础上, 提出将五次谐波方向原理用于井下高压隔爆开关中, 从而使选择性漏电保护适于各种中性点接线方式的电网。重点介绍以微控制器为核心的选择性漏电保护系统的硬、软件结构及干扰抑制措施, 最后给出试验结果。

**关键词:** 矿井高压电网; 选择性漏电保护; 零序电压; 零序电流; 五次谐波方向; 消弧线圈

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1003-4897(2001)05-0037-04

## 1 引言

据《煤矿安全规程》规定, 矿井高压电网为中性点绝缘方式供电。但是, 随着煤矿生产用电量的增大及电缆网络的不断延伸, 矿井高压电网单相接地电容电流不断增加。据统计, 单相接地电流超过20A者占70%以上<sup>[1]</sup>。如此大的接地电流极易引起电弧接地过电压, 严重威胁供电电缆的绝缘<sup>[2]</sup>, 并且极易引发瓦斯、煤尘爆炸。故此, 许多煤矿都不得不改用中性点经消弧线圈或消弧线圈并高阻接地的供电系统。尽管这样可以使电网中的电容电流得以补偿, 但同时也导致系统接地方式的变更, 使得现有漏电保护装置的选择性受到严重影响。针对目前我国矿井高压电网多种中性点接地方式下的漏电故障特征及现有选择性漏电保护装置的局限性, 本文提出将五次谐波方向原理用于井下高压隔爆开关中, 使其选择性漏电保护功能不受电网中性点接线方式的限制。介绍了以微控制器为核心的保护系统原理、硬件组成、软件设计、干扰抑制和模拟试验结果。

## 2 矿井高压电网漏电故障特征及选择性漏电保护原理

我国目前的矿井高压电网主要有中性点对地绝缘、中性点经消弧线圈接地和中性点经消弧线圈并高阻接地三种供电方式, 而消弧线圈的引入是影响现有选择性漏电保护正常工作的主要原因, 已有的研究表明, 有消弧线圈补偿时, 在脱谐度  $P < 10\%$  的前提下, 稳态电流补偿效果明显而暂态电流得不到补偿, 故障支路的暂态电流是系统各支路电容电流之和, 且其方向与非故障支路电流方向相反<sup>[3]</sup>。但是暂态电流大小受接地瞬间电压初始相位的影响很大, 当漏电故障刚好发生在线电压瞬时零

值附近时, 暂态电流很小<sup>[3]</sup>, 将其作为保护参量极不可靠。下面主要对消弧线圈引入前后电网的稳态特性加以说明。

### 2.1 高压电网漏电故障特性

消弧线圈引入前即中性点对地绝缘电网的漏电电流分布特点如图1所示。

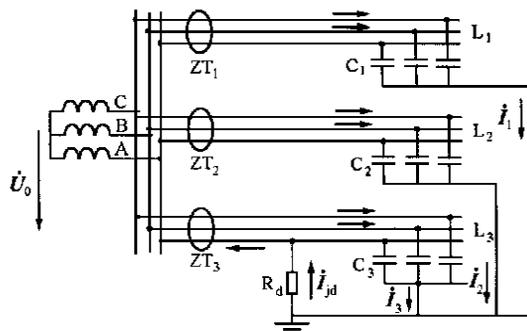


图1 中性点对地绝缘电网的漏电电流分布特点

图中给出的是我国煤矿高压辐射式电网的典型模式, 由  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  三条支路构成,  $ZT_1$ 、 $ZT_2$ 、 $ZT_3$  为分别安装于各支路的零序电流互感器。由于一般高压电网绝缘水平较高, 故假定各相对地电阻为  $\infty$ , 设每条支路各相对地分布电容相等, 分别以集中参数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  表示, 并设  $L_3$  支路的 A 相发生接地故障, 此时, 电网各故障参数间存在如下关系:

(1) 流过非故障支路零序电流互感器的电流为本支路的电容电流  $\dot{I}_i = 3j C_i \dot{U}_0$  ( $i = 1, 2, 3$  为支路号), 其相位超前零序电压  $\dot{U}_0 90^\circ$ ;

(2) 流过故障支路零序电流互感器的电流是其它所有非故障支路电容电流之和  $\dot{I}_k = -3j \dot{U}_0 (C_\Sigma - C_k)$  ( $C_\Sigma = \sum_i C_i$  为各支路对地总电容,  $k$  为故障支路号), 其相位滞后  $\dot{U}_0 90^\circ$  故障支路自身产生的零序电流在该支路零序互感器中一去一返两次流过,

对互感器而言自相抵消)；

(3) 若忽略三相电网中零序阻抗电压降的影响,则电网任何地方对地的零序电压均相等。

引入消弧线圈后的漏电电流分布特点如图 2 所示。

当漏电故障时,在  $\dot{U}_0$  作用下产生一感性电流  $\dot{I}_L = -j\dot{U}_0/L$  与  $\dot{I}_{jd} = 3j\dot{U}_0 C_\Sigma$  迭加,使得接地点电流变为  $\dot{I}_{jd} = j\dot{U}_0(3C_\Sigma - 1/L)$ 。据  $L$  值不同分完全补偿、过补偿、欠补偿三种情况。

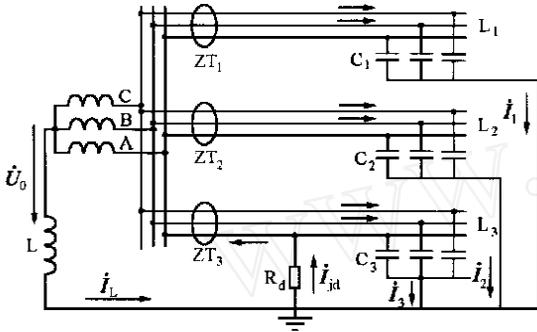


图 2 引入消弧线圈后的漏电电流分布特点

(4) 当  $3C_\Sigma = 1/L$  时为完全补偿,接地点处的感性电流和容性电流大小相等、方向相反而互相抵消,使得接地电流  $\dot{I}_{jd} = 0$ 。流过故障支路  $ZT_3$  的电流是  $L_3$  自身对地的电容电流  $\dot{I}_3$ ,与支路  $L_1$ 、 $L_2$  的零序电流同相位,均超前  $\dot{U}_0 90^\circ$ ,其大小由该支路对地分布电容大小决定。

(5) 当  $3C_\Sigma < 1/L$  时为过补偿, $\dot{I}_{jd}$  为一感性残余电流,与故障支路自身电容电流同相位。流过  $ZT_3$  的电流是感性残余电流与该支路自身电容电流迭加而成的零序电流,其大小随支路的长短而变,相位与  $L_1$ 、 $L_2$  支路电容电流相同。

(6) 当  $3C_\Sigma > 1/L$  时为欠补偿, $\dot{I}_{jd}$  呈容性,流过  $ZT_3$  的是此反向残余电流与  $L_3$  支路自身对地的电容电流之和,其值随支路长短不同而不同,相位也因支路长短不同而超前或滞后于  $\dot{U}_0$ 。

## 2.2 选择性漏电保护原理

矿井高压检漏保护装置按工作原理大致可分为零序电流型、零序功率方向型和谐波方向型三类。其中用于井下的主要是零序电流型和零序功率方向型,并且后者占绝大多数。它们工作的依据就是本文 2.1 中所述的特征 (1) (2) (3)。零序电流型是利用故障支路零序电流大于任一支路自身的零序电流的特点实现选择性。零序功率方向型是利用电网发生接地故障后  $\dot{U}_0$  的变化以及故障支路  $\dot{I}_0$  和非故

障支路  $\dot{I}_0$  与  $\dot{U}_0$  相位关系的不同来实现选择性。当  $\dot{U}_0$  和  $\dot{I}_0$  达到设定值时保护启动,作好动作准备而不动作,然后利用非故障支路  $\dot{I}_0$  超前  $\dot{U}_0 90^\circ$  而故障支路  $\dot{I}_0$  滞后  $\dot{U}_0 90^\circ$  的特点,通过比较各支路  $\dot{I}_0$  与  $\dot{U}_0$  相位选出故障支路并切断该支路<sup>[4]</sup>。在有消弧线圈补偿的电网中,上述特征已不复存在,而正如本文 2.1 中 (4) (5) (6) 所述,流过各支路零序互感器的电流随补偿情况的不同和电网相对长度的变化而变化。所以,当引入消弧线圈后,这两种类型的保护将失去选择性而不能正常工作。

谐波方向型是利用高压电网所含的谐波成份来实现选择性的。谐波是高压电网中固有的成份,它们在大小和相位关系上也具有 2.1 中 (1) (2) (3) 所述  $\dot{I}_0$  和  $\dot{U}_0$  的三个特征。谐波中以三次、五次谐波含量较大,由于三次谐波受变压器接线组别的影响,更因其方向一致,使得相间没有三次谐波电压,而五次谐波不受此影响<sup>[5]</sup>。所以,提取五次谐波较为理想。接入消弧线圈是为了补偿电容电流基波成份,而感抗和容抗是随信号频率变化的,对五次谐波而言,感抗是基波时的 5 倍,而容抗则是基波时的 1/5。消弧线圈的接入对五次谐波信号在电网中的分布规律几乎没有影响。这样,利用五次谐波信号来实现选择性不受电网中性点接地方式的影响。但是,由于谐波含量一般较低,数值很小,极易混入干扰成份,尤其在煤矿井下的严酷环境中,抗干扰是个难题。到目前为止,谐波方向原理仅在便于计算机集中选线的地面变电所或井下中央变电所使用,与井下高压隔爆开关相配套的谐波型保护急待开发研制。

## 3 基于谐波检测的井下高压电网选择性漏电保护系统

由上文知,五次谐波比相原理适用于多种中性点接线方式,但要用于井下必须克服严重的干扰,另外,我国井下高压隔爆开关中所装设的均为包含漏电、监视、短路、过载等多种保护功能的综合保护装置,拟设计的漏电保护必须与这种模式兼容,综合考虑以上因素,构成了以 AT89C52 为核心的微机应用系统,而选择性漏电保护仅作为其中的一个子系统。本文只介绍与之相关的硬件及软件。

### 3.1 漏电保护系统硬件

选择性漏电保护硬件结构如图 3 所示。主要由零序电压回路、零序电流回路和相位比较电路三部

分组成。

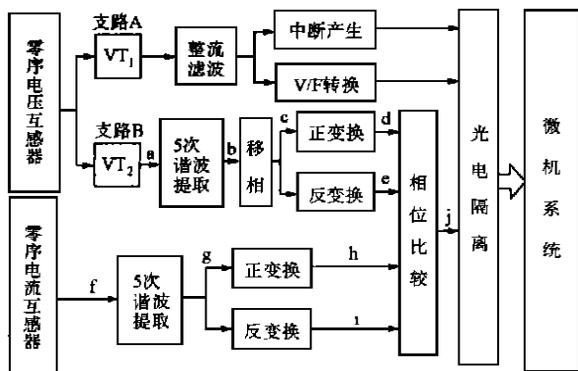


图3 漏电保护系统硬件结构图

零序电压回路又分成 A, B 两个支路。支路 A 由隔离变压器  $VT_1$ 、整流电路、滤波电路、中断产生电路、V/F 转换电路,光电隔离电路等组成。支路 A 完成两个功能:产生漏电中断信号;产生供微机系统检测用的反映零序电压大小的频率信号。支路 B 由隔离变压器  $VT_2$ 、五次谐波提取电路、移相电路、波形变换电路、光电隔离电路等组成,将接地故障时所产生的零序电压中的五次谐波成份提取出来,并进行适当的相位移动和波形变换,以和零序电流支路的输出信号进行相位比较。

零序电流回路由五次谐波提取电路、波形变换电路和光电耦合电路等组成,主要来自零序电流互感器的信号中提取出五次谐波成份,并对其放大和波形变换,以便和零序电压 B 支路输出信号进行相位比较。

比相电路采用逻辑门电路对零序电流支路的输出信号和来自零序电压 B 支路的经过正、反变换的信号进行相位比较。

当电网发生单相接地故障使零序电压升高并超过硬件电路整定值时,中断产生电路向微机系统发送中断信号,微机系统接收到中断信号后,先后对以下两个指标进行判断:

零序电压是否超过存储器中的基准值;

本支路零序电流五次谐波相位如何?

如果微机系统采集到的  $U_0$  值小于基准电压,按非漏电情况处理。如采集到的  $U_0$  值大于基准电压,则对  $I_0$  进行相位鉴别。相位判别方法是以移相后的零序电压五次谐波  $U_{(5)}$  为基准,若  $U_{(5)}$  与  $I_{(5)}$  同相位,则判定本支路发生漏电,CPU 发出控制信号使断路器跳闸并闭锁,否则本支路正常运行。对应各点的波形如图 4 所示。

零序电压经  $VT_2$  隔离变换,五次谐波提取、移相、波形变换等处理后得到周期为 4ms 的方波信号,处理过程的波形如图 4 中 a、b、c、d、e 所示。而零序电流  $I_0$  经五次谐波提取、波形变换后得到周期为 4ms 的脉冲序列,如图 4 中波形 f、g、h、i 所示。对应于零序电压和零序电流五次谐波正、负半波的输出信号两两(d 与 h, e 与 i)进行相位比较,对故障支路而言 d 与 h, e 与 i 分别同相位,比相电路输出 j 点为周期等于 2ms 的正脉冲,如图 4(j) 所示。非故障支路中则由于 d 与 h, e 与 i 的相位分别相反, j 点输出低电平信号。微机系统最终通过判断脉冲宽度来完成选择性漏电保护功能。

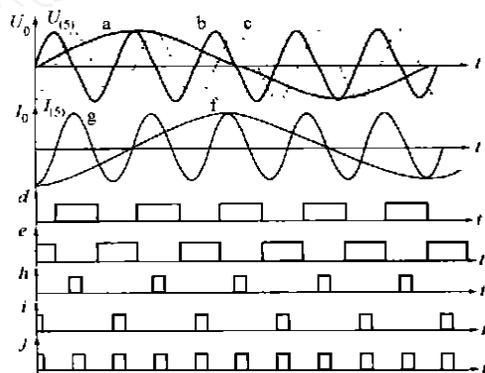


图4 漏电保护系统信号处理波形图

### 3.2 系统软件

选择性漏电保护的软件采用中断触发方式启动。正常情况下 CPU 执行综合保护主控程序和其它子程序模块,对相应功能模块的输入信号进行检测并循环显示有关参量。只有接收到零序电压 A 通道发来的中断申请后,CPU 才进入中断服务程序

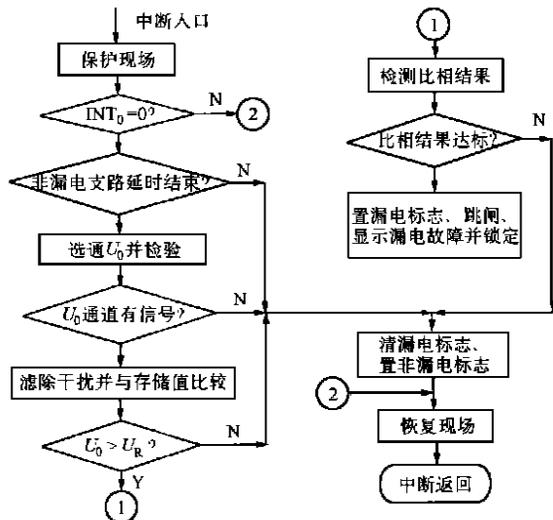


图5 漏电保护中断服务程序流程图

进行漏电判断。中断服务程序流程如图 5 所示。图中  $U_R$  为存储器中的零序电压比较值。

## 4 干扰抑制

### 4.1 干扰源

煤矿井下存在多种干扰源,如向电机车提供直流电能的可控硅的通断会产生周期性脉冲干扰;断路器、真空接触器的频繁分合产生随机性脉冲干扰;井下接地线和铁轨中有杂散电流干扰以及载波通讯的周期性干扰等。

### 4.2 抑制措施

针对以上各种干扰采取的相应措施有:设计无源和有源滤波器以消除周期性干扰;程序中采用了双循环去极值滤波算法消除系统的随机性干扰;采用接地、屏蔽、隔离等措施消除电磁场干扰。此外,还采用了无源、有源带阻滤波器、带通滤波器和高精度选频放大器相结合来获取高质量的五次谐波信号;采用有源移相器与宽度可调的正弦波/矩形波变换电路相结合的方法提高了谐波比相环节的容错能力<sup>[6]</sup>;选用内置 EEPROM 的微控制器 AT89C52 并用  $\mu P$  监视芯片 X25045 保证 CPU 系统的正常运行。

## 5 试验结果

将样机接于 380V 三相模拟电网,以集中参数电容代替电网对地分布电容,漏电阻用可变电阻模拟,由三相电抗器星形连接构成人为中性点串入补偿电感。试验结果表明,样机的选择性非常好,无论电网是中性点绝缘还是处于某种补偿状态下,只要样机零序电压比较值调整适当,装置就不会出现拒动误动现象。接入补偿线圈后的零序电压值比中性点绝缘时略有偏高,但不影响装置的选择性。

## 6 结论

a) 将消弧线圈引入矿井高压电网破坏了原先针对中性点绝缘系统所设计的零序电流型及零序功率方向型选择性漏电保护装置赖以工作的基础;

b) 利用零序电压作为检漏装置的启动信号,再通过鉴别五次谐波零序电流和零序电压的相对相位来实现选择性,不失为一种实现井下高压电网选择性漏电保护的有效手段。

c) 采用微控制器芯片再借助相应的软、硬件抗干扰措施可构成适于井下隔爆开关中的保护系统。其选择性良好且不受中性点接线方式的影响,缺点是零序电压值随电网不同而不固定,但可以通过设置多整定值分档的方法加以解决。

### 参考文献:

- [1] 张效陶,等. 6(10) kV 高压电网绝缘监视及单相接地的新途径. 煤炭科学技术,1996(10).
- [2] Etwell E A et al. Performance testing of the Nordon high impedance fault detector on a distribution feeder. 34th Annual Conference, New York, USA, 1990.
- [3] 王彦文,刘玉英,等. 64kV 电网单相接地电流的暂态分析. 煤炭科学技术,1997(10).
- [4] 金兆民. 煤矿 6kV 电网消弧线圈补偿对高压选择性接地保护装置的影响. 煤炭科学技术,1997(2).
- [5] 祝生香. 煤矿半导体继电保护. 煤炭工业出版社,1985.
- [6] 孟润泉,等. 提高脉冲比相可靠性的途径及其实现. 继电器,1996(6).

收稿日期: 2000-09-28

作者简介: 孟润泉(1968-),男,硕士,研究方向为矿井电网的继电保护。

## The selective leakage protection system for underground HV distribution networks based on harmonic detection

MENG Run-quan<sup>1</sup>, LIANG Yi-long<sup>1</sup>, SONG Jian-cheng<sup>1</sup>, LI An-ping<sup>2</sup>

(1. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Wangzhuang Colliery, Lu'an Coal Mining Bureau, Xiangyuan 046031, China)

**Abstract:** The installed selective leakage protection equipment for underground HV networks does not work properly owing to the application of the arc-suppression coil, by which the earthing current is compensated. On the basis of analyzing the fault law of leakage and the principles of present leakage protection equipment, the paper presented a selective leakage protection method suitable for all kinds of underground HV networks, which operates according to the fifth harmonic direction of the zero sequence current as well as the value of the zero sequence voltage. The hardware structure, software design and anti-interference of the system are emphatically discussed. Finally, the testing result is described as well.

**Keywords:** underground HV distribution networks; selective leakage protection; zero sequence voltage; zero sequence current; the fifth harmonic direction; arc-suppression coil