

# 煤矿井下电网漏电保护系统设计

孙 勇

(中国煤炭科工集团太原研究院，山西 太原 030006)

**摘要：**基于对井下电网漏电原理和选择性漏电保护的4种选线方式的分析，确定了漏电保护装置的选线判据，即依据零序功率方向原理并配合零序电流鉴幅法。装置采用高性能DSP芯片和软件比相算法迅速判断漏电并进行保护动作，介绍了井下漏电保护系统的硬件设计和软件设计方案，通过对低压馈电开关进行选择性漏电保护试验，结果表明：该漏电保护系统安全可靠、动作灵敏，缩短了排查故障时间，防止了事故蔓延，有效提高了煤矿井下生产效率和供电安全性。

**关键词：**电网系统；漏电保护；DSP；矿井

中图分类号：TD68 文献标志码：A 文章编号：0253-2336(2012)05-0082-04

## Design on Earth Leakage Protection System of Electric Power Network in Underground Mine

SUN Yong

(Taiyuan Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Based on the analysis on the power leakage principle of the underground mine electric power network and the four power cable selection modes of the selective power leakage protection, the power able selection judgments of the power leakage protection were determined. Thus the judgments would be the zero sequence power direction principle and the zero sequence current inspection method. With the high performance DSP chip and the software phase algorithm, the device could rapidly judge the power leakage and could make a protection action. The paper introduced the hardware design and software design plan of the underground minie power leakage protection system. With the selective power leakage protection test conducted on the low voltage feed switch, the results showed that the power leakage protection system with a safety reliability and a sensitive action could reduce the time to seek the faults, could prevent the accident expansion and could effectively improve the production efficiency and safety power supply in underground mine.

**Key words:** mine electric power network system; power leakage protection; DSP; mine

近几年来，随着煤矿综采机械化水平的不断提高，井下用电设备和装机容量不断增加。以前井下供电系统发生漏电故障时，需要切断较大范围的电网排查，给井下作业环境带来很大的安全隐患，直接威胁井下工作人员的生命安全<sup>[1]</sup>。为了缩小故障停电范围，缩短故障排查时间，提高供电的可靠性，笔者研发了井下漏电保护系统，其能够精确锁定漏电故障点，确保只切除漏电故障线路和设备，非故障部分继续工作，保证矿区的正常安全生产和可靠供电。

### 1 井下电网的漏电原理分析

由于三相电源的中性点不接地，所以电网即使发生漏电故障，电网的线电压也不会发生变化，仍是三相对称的。单相漏电和两相漏电均属于不对称故障，故障发生后电网各相对地电压就不再对称，并且变压器中性点也要发生位移，产生对地电压(零序电压)。如果系统中有零序回路，则在回路中就有零序电流流过。

在工程实际中，矿井低压电网发生两相漏电的

收稿日期：2011-11-26；责任编辑：赵 瑞

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划资助项目（2008BAB3609）

作者简介：孙 勇（1983—），男，辽宁大连人，硕士。Tel：13466836149，E-mail：sunlove25@163.com

网络出版时间：2012-05-15 14:31；网络出版地址：<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120515.1431.023.html>

引用格式：孙 勇. 煤矿井下电网漏电保护系统设计 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (5): 81-85.

概率远不如单相漏电高，其故障程度（仅就漏电而言）也比单相漏电轻。单相漏电故障约占漏电故障总数的90%，而且有约30%以上的单相漏电若不及时切除，将发展成为更加严重的短路故障，所以单相漏电是井下低压电网漏电故障的主流。在下面进一步的故障参数变化规律分析计算中，将以单相漏电作为研究对象。

1) 单相漏电故障时的零序电压。单支路供电系统中，设对地电容为C，对地电容阻抗为 $x_c$ ，对地绝缘电阻为r，正常工作时，系统处于三相平衡状态，此时系统每相对地阻抗参数 $Z_0$ 为

$$Z_0 = -jx_c r / (r - jx_c) \quad (1)$$

当A相发生漏电故障时，将导致系统中性点发生位移，产生零序电压 $\dot{U}_0$ ，设A相电压为 $\dot{U}_A$ ，漏电电阻为R，则 $\dot{U}_0$ 为

$$\dot{U}_0 = -Z_0 \dot{U}_A / (3R + Z_0) \quad (2)$$

对于一个固定的电力系统来说，通常具有固定的r值和C值，而漏电故障的形成通常有一个过程，即在漏电故障发生时，R值是变化的。因此，分析R值变化对漏电参数的影响十分必要。①当 $R=0$ 时，电压初相角 $\theta=0$ ， $\dot{U}_0=\dot{U}_A$ ；②当R由零逐渐增大时， $\theta$ 角逐渐增大， $\dot{U}_0 < \dot{U}_A$ ；③当R趋于 $\infty$ 时， $\dot{U}_0=0$ ， $\theta=\arctan(1/x_c)$ 。此时，系统工作在三相平衡状态，即非故障状态。

2) 单相漏电故障时的零序电流。零序电流是漏电保护中很重要的参数，在中性点不接地放射式电网各分支中的零序电流都将流过漏电点。在漏电支路中测得的零序总电流不包含该支路对地阻抗所产生的零序电流，而为非故障线路零序电流之和。

3) 漏电电流。系统漏电电流的大小是影响系统安全性的重要指标，它决定了触电事故发生时触电者的安全性，也决定了漏电时电弧能量的大小。漏电电流 $I_L$ 按下式确定：

$$I_L = (\dot{U}_0 + \dot{U}_A) / R \quad (3)$$

为了最大程度减小系统的漏电电流，应将R值控制在 $\dot{U}_0 + \dot{U}_A$ 模的最小值附近。

## 2 选择性漏电保护原理

漏电故障的选择性保护一般包括2个方面。

1) 横向选择性。横向选择性是指漏电保护系统仅切断漏电故障所在支路，并保证非漏电故障所在支路的正常供电。选择性漏电保护原理如图1所

示。当 $K_1$ 点发生漏电时，漏电保护系统中只有磁力启动器 $C_4$ 或分支馈电开关 $B_2$ 的选择型漏电保护器动作，使磁力启动器 $C_4$ 切断 $K_1$ 点漏电故障所在支路，而其他装置均不动作。

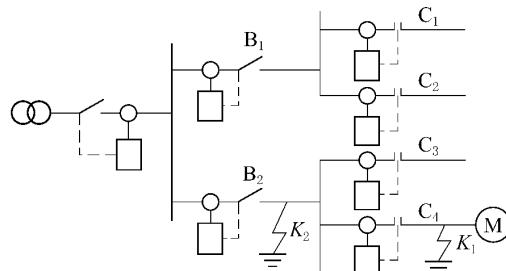


图1 选择性漏电保护原理

2) 纵向选择性。纵向选择性是指漏电保护系统仅切断漏电故障所在段的线路，并保证非漏电故障所在段继续供电。当 $K_1$ 点发生漏电时，只有控制该点磁力启动器中的选择性漏电保护器动作，使磁力启动器切除漏电点，而上一级分支馈电开关中的选择性漏电保护器则不动作。这样可以保证上一级分支馈电开关继续向其他磁力启动器控制的支路正常供电。如 $K_2$ 点发生漏电故障，则只有分支馈电开关中的漏电保护器动作，与总自动馈电开关配合的漏电保护装置不应动作，从而保证总馈电开关继续向分支馈电开关支路供电。

选择性漏电保护的应用可以大幅减小由于漏电故障而引起的停电事故，也便于迅速处理，有利于生产效率的提高。而选择性漏电保护器的关键在于漏电故障线路的选取，即选线。对于单相接地故障选线一般有以下4种方法：零序电流幅值比较法、群体比幅比相法、附加直流电源法和零序功率方向法。这4种传统方法均由模拟电路构成，抗干扰能力差，在井下极其复杂的环境下易产生误动作，应该寻找新的保护算法。通过零序功率方向的原理可以准确判断漏电线路，但无法测量漏电电流值的大小，然而通过零序电流鉴幅法配合使用，就可得到漏电流值的大小，使系统能够准确地判断出故障点，并迅速动作<sup>[2]</sup>。

## 3 选择性漏电保护的实现

当电网发生漏电故障时，会产生零序电压，零序电压分布在整个电网中，且无论在供电单元的任何地方，如变压器的中性点、各线路的人为中性点等处测得的零序电压都是大小相等、相位相同；因

此设计中采用零序电压作为漏电保护启动信号，当零序电压超过基准值时，启动软件对零序电压  $U_0$  和零序电流  $I_0$  进行比相，以准确判断出故障支路。零序电压与零序电流的波形如图 2 所示，其中， $\omega$  为电网所供正弦交流电的角频率， $t$  为时间，图 2a 中零序电流滞后零序电压  $\varphi$  角，图 2b 中零序电流超前零序电压  $\varphi$  角。

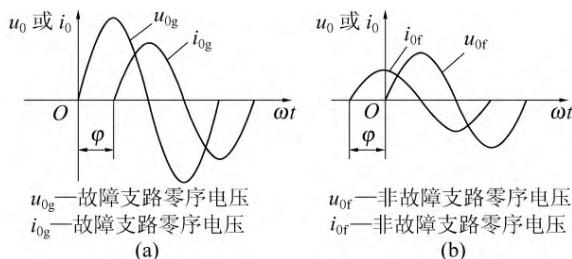


图 2 零序电压和零序电流示意

### 3.1 硬件电路

选择性漏电保护装置采用 TMS320LF2407A 作为微控制器。TMS320LF2407A 是一种 16 位定点数字信号处理器，集成 DSP 的高速信号处理能力和适应于电机控制的外围电路于一体，可以满足漏电保护装置的需要<sup>[3]</sup>，信号采样电路如下。

1) 零序电压采样电路如图 3 所示，零序电压  $U_0$  经过电压互感器限制在  $-3.3 \sim +3.3$  V，再经电压跟随和电平提升后，转变为  $0 \sim 3.3$  V 的电压信号，并最终送至 DSP 的 A/D 口。同时零序电压  $U_0$  经过整形电路，变为方波信号后送至 DSP 的 XINT1 口，作为 DSP 采集零序电压和零序电流的同步信号。

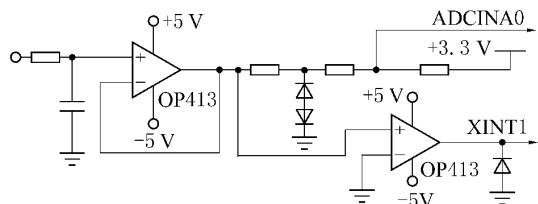


图 3 零序电压采样电路

2) 零序电流采样电路如图 4 所示，零序电流由零序电流互感器取得，并经电阻转换为电压信号，再经电压跟随和电平提升后，转变为  $0 \sim 3.3$  V 的电压信号，并最终送至 DSP 的 A/D 口。

### 3.2 软件设计

1) 程序设计。系统软件采用 C 语言编程，全部程序由主程序和一些功能模块子程序组成。功能模块主要由初始化模块、中断模块、相位比较模

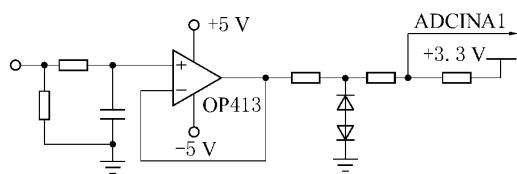


图 4 零序电流采样电路

块、事故处理模块、人机接口模块等组成。初始化模块在开机或复位后执行 1 次，主要包括 I/O 端口、寄存器、LCD 参数、通信参数、实时时钟、EEPROM 数据等的初始化；中断模块包括同步过零中断和定时中断；相位比较模块主要实现  $U_0$  与  $I_0$  的相位关系的运算；事故处理模块由 DSP 判断故障状态并发出相应跳闸信号到跳闸电路。主程序流程如图 5 所示。

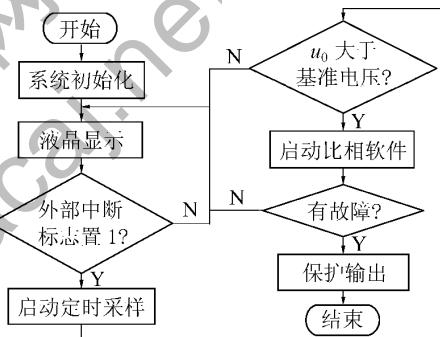


图 5 主程序流程

2) 比相算法。由 DSP 通过硬件电路对零序电压和零序电流进行交流同步采样，若零序电压超过基准电压，启动软件对零序电压  $U_0$  和零序电流  $I_0$  进行比相，用软件计算零序电流的无功分量  $I_{0Q}$ ，对于故障支路， $I_{0Q}$  恒为正；对于非故障支路， $I_{0Q}$  恒为负。在  $U_0$  从负到正时对零序电流进行交流采样，通过软件锁相将零序电流进行 24 倍频数据采集，将定时器的定时周期设为 20/24 ms，即每周采样 24 次。在每个采样周期（软件定时中断子程序）中，读取零序电流值，当 1 个周期采样结束后，把采样序号为 7—18 的零序电流值进行累加得  $I_{0Q}$ 。若  $I_{0Q} > 0$ ，且  $I_0$  值大于动作整定值，漏电保护动作；若  $I_{0Q} < 0$ ，无论  $I_0$  多大，漏电保护都不动作<sup>[4]</sup>。

3) 试验结果。采用此方法，对 2 台额定电压为 3.3 kV，额定电流 400 A 的低压馈电开关进行选择性漏电保护试验。试验时，馈电开关采用放射式供电形式，其中 1 台馈电开关通过  $1\text{ k}\Omega$  电阻接地，

模拟单相接地故障，当检测到零序电压超出基准值时，启动比相程序，并对零序电流进行鉴幅，试验结果证明，当零序电压和零序电流满足相应的相位及幅值条件，馈电开关跳闸。采用零序电流互感器和零序电压互感器分别测量零序电流和零序电压。图6为试验时测到的零序电压和零序电流波形。

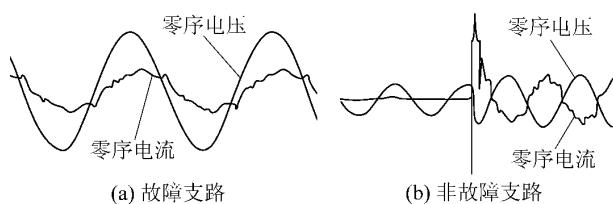


图6 零序电压和零序电流

## 5 结语

漏电保护系统通过对选择性漏电保护的选线方式的优化选择，采用高性能 DSP 芯片和应用软件比相方法大幅提高了保护系统应对井下电网突发事件的反应速度和准确度。在试验和实际矿井应用中，该漏电保护系统能够有效防止电网事故蔓延，为煤矿生产和供电安全提供可靠保障。

(上接第 65 页)

## 5 结语

汪家寨煤矿 P41102 综放工作面分源瓦斯治理技术，有效地解决了制约综放工作面生产能力发挥的关键问题，实现了综放工作面原煤产量的显著提升，原煤产量始终保持在 13 万 t/月以上。实践证明，保护层开采、本煤层预抽、采空区抽采、尾巷抽采、高位拦截钻孔抽采等综合瓦斯治理技术，综合抽采率达到 69.5%，回风流瓦斯体积分数在 0.8% 以下，适合类似 P41102 综放工作面条件的瓦斯治理。实施分源治理技术，提高了瓦斯抽采量和瓦斯抽采率，可以减少落煤和新暴露煤壁瓦斯的涌出量，同时也减少了采空区的瓦斯涌出量，杜绝了瓦斯超限现象，消除了安全隐患。

### 参考文献:

- [1] 王志宏. 煤矿井下用电与安全 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1989.
- [2] 宋建成. 矿井低压电网选择性漏电保护性能的改进方法 [J]. 继电器, 1998, 26 (5): 34–39.
- [3] 任丽香, 马淑芬, 李方慧. TMS320C6000 系列 DSP 的原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 35–39.
- [4] LIU Peng, WANG Wei-dong, XIAO Zhi-bin, et al. Media SOC: A System-on-Chip Architecture for Multimedia Application [J]. IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology, 2005, 45 (4): 203–206.
- [5] 宋建成, 谢恒坤. 基于零序电流方向的选择性漏电保护系统的研究 [J]. 电网技术, 1998, 22 (9): 53–56.
- [6] 牟龙华, 孟庆海, 刘建华. 可通信式智能选择性漏电保护系统的研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 82–86.
- [7] 汪卫兵. 矿井电网单相接地选线方法实现 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (9): 100–102.
- [8] 刘世成, 赵维成. 浅谈煤矿井下漏电保护的发展趋势 [J]. 黑龙江科技信息, 2011 (3): 23–25.
- [9] 高彦, 王念斌, 王彦文. 基于零序功率方向选择性漏电保护系统的研究 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(11): 43–48.
- [10] 郑国莘. 矿用智能化通用性选择性漏电保护馈电开关 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28 (11): 11–14.
  
- [11] 生产能力的关系研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (2): 42–44.
- [12] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册 [K]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 243.
- [13] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 93.
- [14] 文光才. 水城矿区汪家寨煤矿区域防突技术研究 [R]. 重庆: 煤炭科学研究院总院重庆研究院, 2009.
- [15] 张铁岗. 矿井瓦斯综合防治技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 336.
- [16] 于方. 现代煤矿“一通三防”与事故防治新技术及强制性标准实用手册 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [17] 郑志伟. 利用尾巷治理瓦斯技术在大湾煤矿的实践 [J]. 矿业安全与环保, 2011, 38 (3): 82–84.
- [18] 吴桂义, 李仲勋, 李绍泉, 等. 瓦斯综合抽放技术在朱庄煤矿的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37 (10): 50–51.
- [19] 刘建中, 赵保平, 孔祥义, 等. 高位钻孔配合理管抽放治理采面上隅角瓦斯 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (2): 46–48.
- [20] 李春生, 张道树, 王华胜. 综放工作面煤层自然综合治理技术 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (11): 74–77.
- [21] 谢俊文, 许继宗, 李作泉. 易燃厚煤层综放面特大瓦斯涌出综合治理技术 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (4): 6–7.

### 参考文献:

- [1] 王志宏. 煤矿井下用电与安全 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1989.
- [2] 宋建成. 矿井低压电网选择性漏电保护性能的改进方法 [J]. 继电器, 1998, 26 (5): 34–39.
- [3] 任丽香, 马淑芬, 李方慧. TMS320C6000 系列 DSP 的原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 35–39.
- [4] LIU Peng, WANG Wei-dong, XIAO Zhi-bin, et al. Media SOC: A System-on-Chip Architecture for Multimedia Application [J]. IEEE International Workshop on VLSI Design and Video Technology, 2005, 45 (4): 203–206.
- [5] 宋建成, 谢恒坤. 基于零序电流方向的选择性漏电保护系统的研究 [J]. 电网技术, 1998, 22 (9): 53–56.
- [6] 牟龙华, 孟庆海, 刘建华. 可通信式智能选择性漏电保护系统的研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 82–86.
- [7] 汪卫兵. 矿井电网单相接地选线方法实现 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (9): 100–102.
- [8] 刘世成, 赵维成. 浅谈煤矿井下漏电保护的发展趋势 [J]. 黑龙江科技信息, 2011 (3): 23–25.
- [9] 高彦, 王念斌, 王彦文. 基于零序功率方向选择性漏电保护系统的研究 [J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(11): 43–48.
- [10] 郑国莘. 矿用智能化通用性选择性漏电保护馈电开关 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28 (11): 11–14.
  
- [11] 生产能力的关系研究 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (2): 42–44.
- [12] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册 [K]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 243.
- [13] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 93.
- [14] 文光才. 水城矿区汪家寨煤矿区域防突技术研究 [R]. 重庆: 煤炭科学研究院总院重庆研究院, 2009.
- [15] 张铁岗. 矿井瓦斯综合防治技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 336.
- [16] 于方. 现代煤矿“一通三防”与事故防治新技术及强制性标准实用手册 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [17] 郑志伟. 利用尾巷治理瓦斯技术在大湾煤矿的实践 [J]. 矿业安全与环保, 2011, 38 (3): 82–84.
- [18] 吴桂义, 李仲勋, 李绍泉, 等. 瓦斯综合抽放技术在朱庄煤矿的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37 (10): 50–51.
- [19] 刘建中, 赵保平, 孔祥义, 等. 高位钻孔配合理管抽放治理采面上隅角瓦斯 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (2): 46–48.
- [20] 李春生, 张道树, 王华胜. 综放工作面煤层自然综合治理技术 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (11): 74–77.
- [21] 谢俊文, 许继宗, 李作泉. 易燃厚煤层综放面特大瓦斯涌出综合治理技术 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (4): 6–7.