煤矿高压防爆开关综合保护新技术

陈 奎，张 丽，孙常青

（中国矿业大学 信息与电气工程学院，江苏 徐州 221008）

摘要：：针对煤矿高压防爆开关综合保护装置主要存在的短路故障越级跳闸和漏电保护动作不准确的问题进行了深入的研究。提出了利用微机保护的通讯闭锁功能来解决短路故障越级跳闸问题的新方法；针对煤矿电网中性点接地方式不同和消弧线圈控制方式的不同，提出了分别利用导纳法、电导法和导纳增量法的分类漏电保护原理来实现漏电保护。实验和现场一年多的运行证明，利用上述原理设计的高压防爆开关综合保护装置具有防止短路故障越级跳闸、漏电保护动作准确、适应性强等的特点，基本解决了现有保护存在的问题，具有较高的推广价值。

关键词： 漏电保护； 越级跳闸； 综合保护； 高压防爆开关； DSP

A new technology of HV flameproof switchgear comprehensive protection in coal mine

CHEN Kui, ZHANG Li, SUN Chang-qing
（China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China）

Abstract: This paper conducts a thorough research to the problem of short circuit override trip and inaccurate leakage protection action mainly existing in HV flameproof switchgear comprehensive protection. A method of using communication atresia of microcomputer protection to solve the problem of short circuit override trip is put forward. Moreover, it puts forward classification leakage protection principle respectively using mobility method, conductivity method and admittance increment method to realize leakage protection, according to the differences of neutral grounding mode and arc suppression coil control mode in coal mine power network. Proved by experiments and practical application for more than one year, this comprehensive protection of HV flameproof switchgear designed by above-mentioned principle which has the characteristic of preventing short circuit override trip, accurate leakage protection action and strong adaptability etc, basically solves many problems in existing protection and has high value of promotion.

Key words: leakage protection; override trip; comprehensive protection; HV explosion-proof switch; DSP

中图分类号：TM77 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2009)24-0137-05

0 引言

随着煤矿现代化程度的不断提高和井下高压电供电距离的增加，对煤矿井下供电系统的可靠性、安全性和连续性的要求越来越高。由于煤矿井下工作环境恶劣，经常出现漏电故障，漏电故障若不及时排除会存在较大危害，如可引起瓦斯、煤尘的爆炸，提前点燃雷管等事故，直接危及人身安全和矿井生产。同时电网相电压的升高，长期运行将导致绝缘击穿，甚至发生两相或三相短路故障。因此，《煤矿安全规程》中规定煤矿井下高压防爆开关中应装设短路、过负荷、漏电保护和监视线保护[1]。虽然，许多学者针对高压综合保护装置进行了设计和研究[1~7]，但是在煤矿实际应用中仍然存在短路故障时上级开关容易越级跳闸，漏电保护动作不准确等一些缺点。因此，对煤矿高压防爆开关综合保护装置进行研究，具有很大的理论意义和应用价值。

1 具有通讯闭锁的短路保护新方法

现在煤矿上的高压防爆开关的短路保护和过流保护在理论应用上不存在问题。但是，由于煤矿上各开关之间输电电缆有可能距离很短，如只有几百米、几十米，或者上级保护的整定值比下级线路末端的最小短路电流还小，因此二者之间必然造成越级跳闸，从而影响煤矿的供电和生产。如通过整定值来解决越级跳闸，则保护的灵敏度不够，且煤矿安全规程也不允许，针对上述情况本文提出了在不改变原有电流保护整定方法的基础上通讯闭锁短

路保护，来实现短路保护的选择性。其原理如下：

当下级开关检测到短路故障后首先对上级开关发出短路保护闭锁信号，一直到短路故障切除。上级开关接到短路闭锁信号后将短路保护闭锁。为防止下级开关或保护故障造成短路故障不能及时切除，上级闭锁功能一般只维持很短时间（即躲下级保护跳闸时间，一般可设 100～200 ms），此时不论闭锁信号是否解除，短路保护都恢复工作。

2　漏电保护新方法

漏电故障在煤矿供电故障中占到 80%以上，因此研制可靠的漏电保护非常必要。但是现在应用的综合保护中的漏电保护都是按照《矿用隔爆型配电装置》的国家专业标准的规定设计的，其方法为零序电流型漏电保护或零序功率方向型漏电保护[4]。这两种漏电保护都是针对中性点不接地电网设计的。这是由于上个世纪 80 年代我国煤矿供电大都采用中性点不接地运行方式。但是，随着煤矿供电距离的不断增加，电网对地电容电流不断增大，现金已经大部分都改为了中性点经消弧线圈接地方式运行。因此，上述漏电保护方法已经无法实现准确保护。同时，上述漏电保护还存在易受漏电故障点接地电阻的影响等缺点[8~11]，据此，本文针对中性点接地方式的不同以及消弧线圈的不同调节方式，提出了分类的漏电保护原理，从而提高了漏电保护的准确性和适应性。其原理如下：

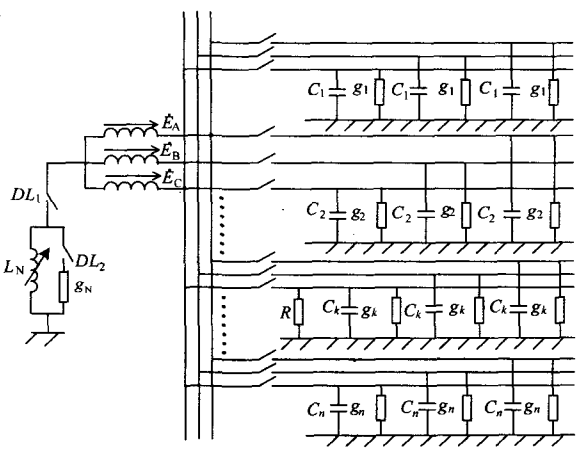

图 1 煤矿高压电网漏电的零序网络图

Fig.1 Zero sequence network of coal mine HV power network when leak current fault happens

图 1 为煤矿 6 kV 电网的第 K 条线路发生经电阻 R 的漏电故障时的网络图。图中当 DL_1 打开时为中性点不接地系统，当 DL_1 闭合时为中性点经消弧线圈接地系统，L_N 为消弧线圈电感，g_N 为预调式消弧线圈所并电导。由于煤矿高压电网的对地绝缘电阻一般较大，因此，各线路对地电阻 r 可以忽略不计。现假设在第 K 个开关的负荷侧发生漏电故障，则流过各个开关的零序电流如下。

（1）中性点不接地电网

对中性点不接地系统：第 i 个非故障线路开关所测零序电流为：

$$\dot{I}_{0f\cdot i}=3\dot{U}_0 g_i+\mathrm{j}3\dot{U}_0\omega C_i\approx\mathrm{j}3\dot{U}_0\omega C_i \quad (1)$$

故障线路开关所测零序电流为：

$$\dot{I}_{0g\cdot k}=-3\dot{U}_0(g-g_k+\mathrm{j}\omega(C-C_k))\approx -3\mathrm{j}\dot{U}_0\omega(C-C_k)=-\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}\dot{I}_{0f\cdot i} \quad (2)$$

可见，在中性点不接地电网中故障线路开关所测的零序电流等于所有非故障部分零序电流之和，且方向相反，因此可以根据这些特征来实现漏电保护。零序电流型漏电保护和零序功率方向型漏电保护基于上述原理而提出的。但是在煤矿实际应用中由于漏电故障又包括金属性、高阻性等多种类型的漏电故障。随着接地电阻的增大，零序电压和零序电流不断减小，造成零序电流型漏电保护经常出现拒动现象，而零序电流功率型漏电保护出现误动或拒动现象[9]。

由上述分析可见，在中性点不接地电网发生漏电故障时，故障线路检测的零序电流不仅与电网的对地电容有关，而且也与发生漏电故障处的接地电阻有关。而现有防爆开关中的漏电保护是以零序电流来整定的，如果整定过大则可能造成高阻接地时出现拒动现象；当整定过小时则可能出现误动现象。而漏电故障时的接地电阻的阻值是个不确定的值，所以无法通过整定来完全消除上述出现的拒动或误动现象。下述基于导纳法的漏电保护就可解决上述问题，其原理如下[9~11]：

非故障线路所测导纳为：

$$\dot{Y}_{0\cdot i}=\frac{\dot{I}_{0i}}{\dot{U}_0}=3g_i+\mathrm{j}3\omega C_i\approx\mathrm{j}3\omega C_i \quad (3)$$

故障线路所测导纳为：

$$\dot{Y}_{0\cdot k}=-\Big(\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}3g_i+\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}\mathrm{j}3\omega C_i\Big)= -\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}\dot{Y}_{0\cdot i}\approx -\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{n}\mathrm{j}3\omega C_i \quad (4)$$

由式（3）和（4）可见，通过检测导纳的大小和方向就可判断出故障线路。为了防止非故障线路的误判，对于非故障线路由于互感器等误差造成误动作，一般采用方向判拒时，应附带大小的判断。由于防爆开关后电缆长度一般都较短，其导纳与整个电网的相比可忽略不计，当考虑到互感器误差和测量误差时，因此其动作值可简化为：

$$\dot{Y}_{0\cdot i} \leq -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{j}3\omega C_i \tag{5}$$

式（5）中的总电容可由煤矿电网每年所测的电容电流值计算出，或根据电网所带电缆的长度等信息估算出。

（2）中性点经消弧线圈接地电网

非故障线路开关所测零序电流同式（1）。由于消弧线圈电感电流的影响故障线路开关所测零序电流为：

$$\dot{I}_{0g\cdot k} = -\dot{U}_0(g_{\mathrm{N}} + \mathrm{j}(\sum_{i=1}^{n} 3\omega C_i - \frac{1}{\omega L} - 3\omega C_k)) = -(\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} \dot{I}_{0f\cdot i} + \dot{I}_{\mathrm{L}} + \dot{I}_{\mathrm{RN}}) \tag{6}$$

当消弧线圈无并（串）电阻时，可近似认为 $\dot{I}_{\mathrm{RN}} = 0$。

可见，在中性点经消弧线圈接地系统中非故障线路开关所测零序电流特性与中性点不接地系统相同，而故障线路开关所测零序电流的大小和方向与消弧线圈的补偿电流有关。由于现在煤矿上采用的消弧线圈大都为自动跟踪补偿的消弧线圈，其补偿状态可能为欠补偿、全补偿和过补偿状态中的任何一种，且接近于全补偿状态。因此故障线路开关所检测到的零序电流不一定大于其本身线路的对地电容电流，且方向也与补偿度有关。所以，上述零序电流型和零序功率方向型漏电保护在原理上就无法实现选择性。针对消弧线圈接地系统漏电保护的问题，有学者提出了利用零序 5 次谐波法来实现漏电保护，但是在高压防爆开关保护中由于无法实现群体比幅、比向，且各电网 5 次谐波的含量也不相同，因此，该方法无法在高压防爆开关漏电保护中应用。因此，针对上述漏电保护存在的问题，本文提出了能够克服上述缺点的新的漏电保护方法。

现在煤矿上应用的消弧线圈的调节方式主要包括预调式和随调式。其中预调式消弧线圈大都串或并联电阻用来防止谐振的发生，而随调式消弧线圈则一般无此电阻。

①中性点经预调式消弧线圈接地电网

由图 1 可知，故障线路的零序测量导纳为：

$$\dot{Y}_{0\cdot k} = \frac{\dot{I}_{0\cdot k}}{\dot{U}_0} = -(\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} 3g_i + g_{\mathrm{N}} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} \mathrm{j}3\omega C_i - \mathrm{j}\frac{1}{\omega L}) \approx -(g_{\mathrm{N}} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} \mathrm{j}3\omega C_i - \mathrm{j}\frac{1}{\omega L}) \tag{7}$$

而非故障线路则同式（4）。

对上式取实部则可得：

$$\begin{cases} \dot{Y}_{0\cdot k\cdot R} \approx -g_{\mathrm{N}} \\ \dot{Y}_{0\cdot i\cdot R} \approx 0 \end{cases} \tag{8}$$

通过式（8）可见，故障线路的电导远大于非故障线路的电导，且其值主要由消弧线圈所并（或串）电导有关，而系统对地绝缘电阻可忽略不计。因此，可以通过电导的大小和方向来判断故障。其整定值与消弧线圈所并（或串）电导的大小有关。一般可按照消弧线圈所并（或串）电导的一半来整定。

②中性点经随调式消弧线圈接地电网

理论上通过式（8）仍然可以判断出故障，但由于系统对地绝缘电阻很大，因此会影响到漏电保护的准确性，该方法在实际应用中仍存在问题。此时可通过导纳增量法来实现，其基本原理是利用随调式消弧线圈的补偿滞后的特性（随调式消弧线圈对电网进行补偿时需要首先检测到漏电故障的发生，然后通过控制投切各种开关或可控硅开实现补偿。这个补偿过程需要一定的时间）来实现的，其原理为：非故障线路补偿前后其零序导纳都同式（4），补偿前后差值为 0。而故障线路补偿前同式（4），补偿后：

$$\dot{Y}_{0\cdot k} = \frac{\dot{I}_{0\cdot k}}{\dot{U}_0} = -(\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} 3g_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} \mathrm{j}3\omega C_i - \mathrm{j}\frac{1}{\omega L}) \approx -(\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{n} \mathrm{j}3\omega C_i - \mathrm{j}\frac{1}{\omega L}) \tag{9}$$

补偿前后的导纳增量绝对值为：

$$\begin{cases} \left|\Delta \dot{Y}_{0\cdot k}\right| = \dfrac{1}{\omega L} \\ \left|\Delta \dot{Y}_{0\cdot i}\right| = 0 \end{cases} \tag{10}$$

因此，可以利用式（10）来判断出故障线路。有的随调式消弧线圈为了提高漏电保护的准确性，在发生漏电故障后，自动将补偿电流短时加以改变，来实现漏电保护，此时，该方法可以实现 2 次判断

而提高保护的准确性。由于消弧线圈大都工作在全补偿状态附近，因此上述方法可以参照电网电容的一半来整定。

3 装置的设计与实验运行

图 2 为依据上述各种保护原理设计的微机综合保护装置结构图。装置中的主控单元采用高性能DSP2812作为微控制器，并采用ALTERA 公司的CPLD作为逻辑控制单元，大大减少了分离元件数量以及PCB板的面积，使得该装置具有更高的可靠性；A/D芯片采用高速的 14 位的模数转换芯片 MAX125。装置中零序电压来自电压互感器二次开口三角，零序电流来自安装在开关中的零序电流互感器的二次侧。装置保护部分程序流程如图 3 所示。

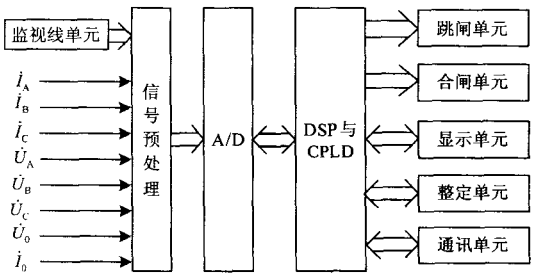

图 2 基于 DSP 的高压防爆开关综合保护装置框图

Fig.2 Block diagram of HV explosion-proof switch comprehensive protection device based on DSP

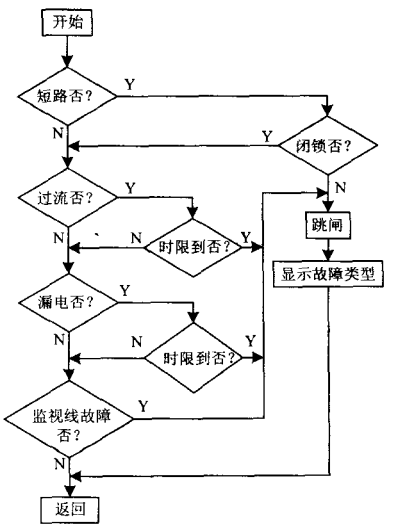

图 3 综合保护程序流程图

Fig.3 Program flow chart of comprehensive protection

为了验证上述新方法的正确性，对通讯闭锁式短路保护、中性点不同运行方式进行了下的漏电保护进行了实验。

在进行短路实验时，同时在两台保护中输入同样大小的电流，来验证解决越级跳闸的问题。其中保护 1 的整定值为 10 A，作为上级保护，保护 2 的整定值为 8 A，作为下级保护。

表 1 短路实验数据(闭锁时间 100 ms)

Tab.1 Data of short circuit experiment (atresia time is 100 ms)

电流/A	保护 1 动作否	保护 2 动作否	动作时间/ms
9	不动作	动作	42
11	不动作	动作	38
15	不动作	动作	32
20	不动作	动作	32

由表 1 可见通过采用通讯闭锁可以避免由于一般短路保护造成的越级跳闸问题。

漏电保护是利用本校 660 V/1140 V 煤矿模拟电网进行的。其原理图同图 1，但该模拟电网只有 3 条线路，本实验是在线路 1 上进行相关实验。分别对中性点不接地电网、中性点经预调式消弧线圈和随调式消弧线圈分别进行接地电阻为 0 Ω、500 Ω、1 kΩ、2 kΩ的漏电实验，漏电保护均正确动作。且改变电网参数各漏电保护也都可准确动作。

上述微机综合保护装置已有几十台在煤矿投入运行，一年多的运行情况表明，该装置未出现过短路越级跳闸的现象，并且漏电保护动作都准确无误。

4 结论

本文提出的利用通信闭锁失短路保护和分类式漏电保护新方法经实验验证和现场运行表明，该方法有效地解决了煤矿电网普遍存在的短路故障越级跳闸和漏电保护动作不准确的现象。同时本方法与原有漏电保护相比具有以下优点：①漏电保护不受接地点过渡电阻影响；②适应性强，不仅可以用于中性点不接地系统，同时也可以用于中性点经预调式（或随调式）消弧线圈接地系统。对两种中性点接地方式并存的煤矿，尤其是在两种中性点运行方式交替的阶段，该装置更具有实用价值。

参考文献：

[1] 矿用隔爆型配电装置国家专业标准[S].1985.
National Professional Standards of Mining Explosion-proof Switchgear[S]. 1985.

[2] 张小鸣. 矿用高低压开关综合保护器的 DSP 实现[J]. 测控技术，2004，23（11）:69-73.
ZHANG Xiao-ming. A DSP Implementation of Mine HV and LV Switch Integrated Protective Devices[J].

Measurement & Control Technology, 2004, 23 (11):69-73.

[3] 高 宏. 智能高压综合保护器的设计[J]. 科技情报开发与经济，2007，17（23）:268-269.
GAO Hong. Design of the Intelligent comprehensive Protector with High-voltage Switch[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007.

[4] 中华人民共和国能源部. 煤矿安全规程.能源安保[19921017]号[M]. 北京：煤炭工业出版社，1992.
People's Republic of China Department of Energy. Coal Mine Safety Regulations Energy Security No. [19921017][M]. Beijing : Coal Carbon Industry Press,1992.

[5] 李艳东. 煤矿漏电保护装置的现状及发展方向[J]. 科技咨询导报，2007，20:209.
LI Yan-dong. Status and Development of Leakage Protection System for Coal Mine[J]. Science and Technology Consulting Herald, 2007，20:209.

[6] 陈奎，唐轶. 双屏蔽电缆监视线保护原理的研究[J]. 华北电力大学学报，2000，23（3）：50-54.
CHEN Kui, TANG Yi. Study on the Protection principle of the Phase screened Cable Monitor Wire[J]. Journal of North China Electric Power University，2000，23（3）：50-54.

[7] 梁 睿，王崇林，刘建华，等. 一种新算法在监视线保护中的应用[J]. 高电压技术，2008，34（3）：504-507.
LIANG Rui, WANG Chong-lin, LIU Jian-hua, et al. Application of a Novel Algorithm in the Cable Monitor Wire Protection[J]. High Voltage Engineering，2008，34（3）：504-507.

[8] 王泉根. 高压漏电保护装置误动作的一般原因及解决方法[J]. 电世界，2006，47（3）：55.
WANG Quan-gen. General Causes and Solutions of Mal-operation on High Voltage Leakage Protection Device[J]. Electrical World, 2006，47（3）：55.

[9] 唐轶，陈奎，陈庆，等. 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究[J]，中国电机工程学报，2005，25（6）：49-54.
TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing, et al. Study on Earthed Faultlocation Method in Indirectly Grounding Power System Using Maximum Value of Absolute Value Summation of Measurement Admittance Mutual Difference[J]. Proceedings of the CSEE，2005，25（6）：49-54.

[10] 曾祥君,尹项根,张 哲,等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J].中国电机工程学报，2001，21（4）：5-10.
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Study on Feeder Grounding Fault Protection Based on Zero Sequence Admittance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001，21（4）：5-10.

[11] 唐轶,陈奎,陈庆,等. 馈出线测量导纳互差求和小电流接地选线研究[J].电力系统自动化，2005，29（11）：69-73.
TANG Yi, CHEN Kui, CHEN Qing, et al. Study on the Earthed Fault Detection Method in Indirectly Earthed Power System Using Summation of Outgoing Feeder Measurement Admittance Mutual Difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005，29（11）：69-73.

收稿日期：2009-03-06 修回日期：2009-04-11

作者简介：

陈 奎(1973-)，男，博士，副教授，现从事电力系统继电保护和煤矿供电系统的研究和教学工作。E-mail: jdbh2001@163.com

（上接第 136 页 continued from page 136）

CAO Feng-mei，REN Yan-ming，WANG Zhao，et al. Advices on Interoperability Test of Substation Automation System[J]. Automation of Electric Power Systems，2005，29（3）：86-89.

[4] 任雁铭，秦立军，杨奇逊. IEC61850 通信协议体系介绍和分析[J]. 电力系统自动化，2000，24（8）：62-64.
REN Yan-ming，QIN Li-jun，YANG Qi-xun. Study on IEC61850 Communication Protocol Architecture[J]. Automation of Electric Power Systems，2000，24（8）：62-64.

[5] 李晓朋，赵成功，李刚. 基于 IEC 61850 的数字化继电保护 GOOSE 功能测试[J]. 继电器，2008，36(7)：59-61.
LI Xiao-peng，ZHAO Cheng-gong，LI Gang. Goose Test of Digital Relays Based on IEC61850[J]. Relay，2008,36(7):59-61.

收稿日期：2009-04-17； 修回日期：2009-06-15

作者简介：

王 涛(1975-)，男，硕士，高工，主要研究方向为继电保护；E-mail: wh5611@sina.com

高厚磊(1963-)，男，教授，博士生导师，主要研究方向为继电保护，数字化变电站应用技术等；E-mail: houleig@sdu.edu.cn

邹贵彬(1971-)，男，副教授，主要研究方向为电力系统动态模拟，基于行波的保护原理及实现技术。