煤矿井下高压智能供电系统的研究

范海云，武彦军，张建权，黄智军，温前飞，高玉光

（汾西矿业（集团）有限责任公司曙光煤矿，山西 孝义 032300）

摘要：为解决曙光煤矿井下高压供电系统故障越级跳闸问题，完善其保护性能，分析了故障越级跳闸的原因，并采用远程光纤纵差保护解决了短路保护存在的问题；采用模式识别法解决某一条线路发生单相接地故障造成的横向误跳闸问题；采用直流支撑方法解决失电压线圈引起的晃电即母线电压瞬间跌落问题；采用欠电压保护延时动作方法解决短时电压跌落造成的误跳闸问题。从而实现曙光煤矿下井电缆联络线、中央变电所、采区1#变电所高爆开关馈出线路故障时选择性跳闸，确保供电安全，减少事故的发生。

关键词：越级跳闸；短路保护；纵差保护；故障选线

Research on high voltage intelligent power supply system in coal mine

FAN Haiyun, WU Yanjun, ZHANG Jianquan, HUANG Zhijun, WEN Qianfei, GAO Yuguang

(Fenxi Mining (Group) Co., Ltd., Shuguang Coal Mine, Xiaoyi 032300, China)

Abstract: In order to solve the problem of “leapfrog tripping” of the fault of the high-voltage power supply system in Shuguang Coal Mine and improve its protection performance, the reasons for the faulty leapfrog trip were analyzed, and the long-distance optical fiber longitudinal differential protection was used to solve the problem of short-circuit protection; the pattern recognition method was used to solve the horizontal “false trip” problem caused by a single-phase ground fault on a line; the DC support method was used to solve the “shake power” caused by the voltage loss coil, that is, the instantaneous drop of the bus voltage; the undervoltage protection delay action method was used to solve the “false trip” problem caused by a short-term voltage drop. In this way, the selective tripping of the feeder line of the high-explosive switch of the Shuguang Coal Mine underground cable tie line, the central substation, and the 1# substation in the mining area can be realized to ensure the safety of power supply and reduce the occurrence of accidents.

Key words: leapfrog tripping; short circuit protection; longitudinal differential protection; fault line selection

0 引言

由于煤矿井下大气中有甲烷等可燃可爆气体，矿用电气设备必须采取防爆措施，其结构的复杂性与认证程序的时效性等因素导致我国煤矿现有供电系统的整体技术水平远远落后于地面其他工业的供电技术水平。为了减小单相接地短路电流造成的危害，《煤矿安全规程》规定：煤矿供电的变压器二次侧中性点不得采用直接接地方式，而优先采用不接地方式。但是，随着矿井高压电网电缆总长度的不断增加，中性点不接地系统的单相接地故障电流也在相应增加，分布电容充放电导致的间歇性弧光接地过电压的危险也在增加，对全系统的绝缘构成巨大威胁，甚至会引起两相接地短路故障、电缆放炮事故等。为此，《煤矿安全规程》规定：煤矿井下6 kV以上的高压电网，当单相接地故障电流大于20 A时，必须

采取一定的限制措施。因此，曙光煤矿6 kV供电系统采用经消弧线圈接地方式。在电感电流抵消电容电流的同时，零序功率方向原理的漏电保护选择性失效，因单相接地故障选线正确率低导致的越级跳闸问题至今没有得到很好的解决[1]；另一方面，由于矿井高压电缆相对较短、开关级数多及过电流保护延时短等原因，存在短路故障造成的开关越级跳闸现象，引起大面积停电进而导致停风引起瓦斯积聚、停止排水导致淹井等次生灾害的发生。因此，矿井供电可靠性问题与煤矿安全生产息息相关，必须彻底解决。

1 造成故障越级跳闸的原因

当供电线路发生短路故障时，流过线路上下级开关的电流值大小均能达到整定值，且上级开关延时时限不够，无法区分故障区域，造成纵向上级开关跳闸，甚至可能造成地面6 kV总开关跳闸，整段母线停电，严重扩大了停电范围。

对于采用非有效接地方式的煤矿高压供电系统，当线路的某一相发生单相接地故障时，仅仅依靠开关本地采集的零序电压和零序电流无法正确选线，导致横向、纵向均可能发生误跳闸，造成大面积停电。

当某条线路在距离母线附近处发生相间短路故障时，母线线电压会瞬间跌落20%～40%，其他高压配电装置中的TV电压相应降低。当母线上的电压跌落到其额定电压的70%～65%，且电压跌落维持的时间超过80 ms时，这些配电装置的失电压线圈均会失去磁力而释放，从而导致断路器跳闸；另外，高压配电装置设有欠电压保护，当检测到的电压低于设定的动作整定值时，配电装置欠电压保护动作跳闸。

由于断路器生产质量存在问题，其静触头与动触头之间的接触电阻较大，电流产生的热量导致触头温度升高，反过来增大接触电阻，温度持续升高，触头失去截流能力。一旦该线路发生三相短路故障，则断路器无法遮断短路电流，导致上级开关跳闸。

2 解决故障越级跳闸的技术途径

2.1 解决短路保护存在的问题

要实现短路故障的零延时选择性跳闸，必须采用纵向差动保护[2]。通过广域测量系统（WAMS）技术，各个区域保护装置按预先设计的供电系统网格图，将选取所需矿井高压供电系统的三相电流相量进行集中实时处理，融合关联数据，准确定位故障点及其距该点最近的电源侧高爆开关，通过GOOSE报文发出跳闸指令[3]。高爆开关接到保护跳闸指令后，与自身继电保护做出的判断进行对比，如果判断结果一致，则立即跳开断路器，并将断路器辅助触点返回的信息上传给区域保护装置；如果判断结果不一致，则由区域保护装置进行仲裁。

纵差保护原理示意图如图1所示，在井下中央变电所进线开关2的负荷侧发生短路故障时，流过下井电缆的电流会增大，达到开关2的动作整定值，应瞬时动作，同时地面开关柜检测到的电流也可能达到动作整定值而越级跳闸。如果将下井电缆两端的电流相量相减，其相量差为0，地面开关柜不动作，避免越级跳闸；当1处发生故障时，由于1处故障时产生的电流会流过2处也能达到其动作整定值，这就有可能造成2处发生越级跳闸，为了防止这种现象的发生，用流过开关2的电流相量减去所有馈出线路的电流相量和，如果其相量差为0，说明故障点位于馈出开关的负荷侧，开关2不跳闸；反之说明故障点位于馈出开关的电源测或母线，开关2瞬时动作跳闸，实现零延时瞬动过电流差动保护功能，即$\Delta \boldsymbol{I}=\boldsymbol{I}_0-\boldsymbol{I}_1-\boldsymbol{I}_2-\boldsymbol{I}_3$。根据基尔霍夫电流定律，可以将线路的母线看作是一个节点，流出与流入母线的电流相量差为0。因此当线路1处发生故障时$\Delta \boldsymbol{I}=0$，当3处发生故障时，$\Delta \boldsymbol{I}\neq 0$且$\Delta \boldsymbol{I}\approx \boldsymbol{I}_0$。

下井电缆电流具有单一方向性，即从上级开关流向下级开关，不会出现相反的方向，所以可以通过各个位置电流值的大小来对纵差保护动作特性进行分析。

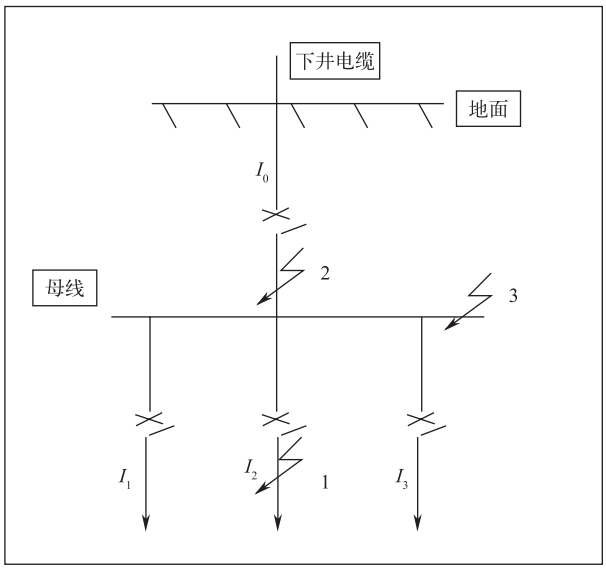


图 1　纵差保护原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal differential protection principle

纵差保护动作区域示意图如图2所示，$|I_2|$、$|I_0|$分别为1、2处发生短路故障时电流的有效值，其中K表示1处和2处短路电流有效值的比值，即$K=|I_0|/|I_2|$，将所得到的K值划分四个区域，以下叙述各个区域的意义：

区域A表示K值的范围为$K\gg2$，即$|I_0|$远远大于$|\boldsymbol{I}_2|$的两倍，说明图1中3处母线发生短路时，安装在干路线路上的断路器必须立即跳闸。

区域B表示K值的范围为$1<K<2$，此时$|I_2|<|I_0|<2|I_2|$，2处短路电流有效值与干路的电流值大小相差无几，这就表明1处发生短路故障时，支路2处的断路器必须立即跳闸。

区域C表示K值的范围为$1<K<2$，$I_0=I_1+I_2+I_3$，而一般$K>2$时表示线路没有发生故障，处于正常工作状态。

区域D表示1处短路电流的有效值小于2处的短路电流有效值，即$I_0<I_2$，而E区表示1、2处的短路电流有效值I_0、I_2都非常小，正常情况这两种情况都不会出现，以此用空白来表示这两种情况。

综上所述，一般设定1、2处短路电流有效值的比值K为动作整定值，并结合电流有效值大小实现无延时且具有选择性的纵向保护。在特殊情况下，某一条支路正常运行时其电流的大小与干路上的电流大小接近，这时线路就处于区域B的工作状态，此时就必须通过延时0.1 s进行短路保护，这样就防止了越级跳闸现象的发生。

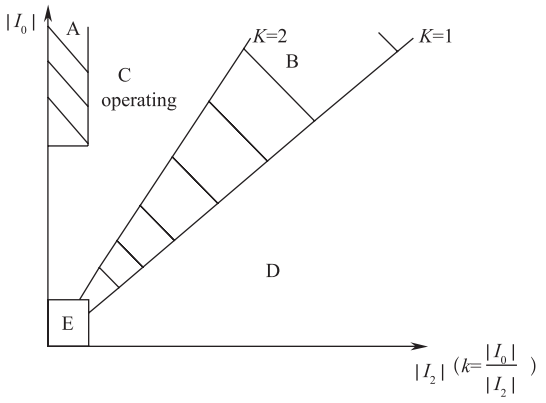


图 2　纵差保护动作区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of action area of longitudinal differential protection

2.2　解决单相接地故障选线问题

对于小电流接地系统，当发生单相接地故障时，仅仅依靠开关本地采集的零序电压和零序电流无法正确选线，导致横向、纵向均可能发生误跳闸[4]。

当任一线路发生单相漏电故障时，先由就地综合保护（智能控制器）通过零序电压、零序电流采样值进行模式识别分布参数初步判别，然后将判断结果上传到区域保护装置。如果只有一个高爆开关，作出“本线路发生单相漏电故障”的判断，则区域保护装置允许该开关跳闸；如果有2个以上高爆开关都作出“本线路发生单相漏电故障”的判断，则由区域保护装置通过供电系统的拓扑结构，根据开关的上下级关系发出指令，由级别最低，也就是距离故障点最近的开关跳闸。如此，可正确选择出发生漏电故障的线路，并缩小故障点查找范围。

众所周知，当采用消弧线圈补偿单相接地故障电容性电流时，零序功率方向原理的选线方法失效，必须采用暂态与稳态算法相融合的综合判断法。

煤矿6 kV高压供电系统模型如图3所示。假设单相接地故障发生在支路3，故障等效电路原

理如图4所示。

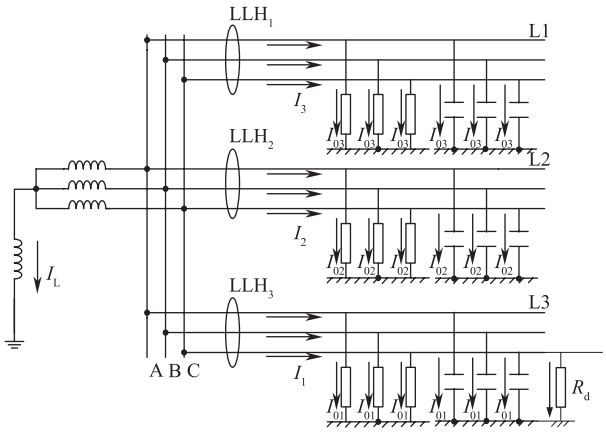


图 3　系统模型图

Fig. 3 System model diagram

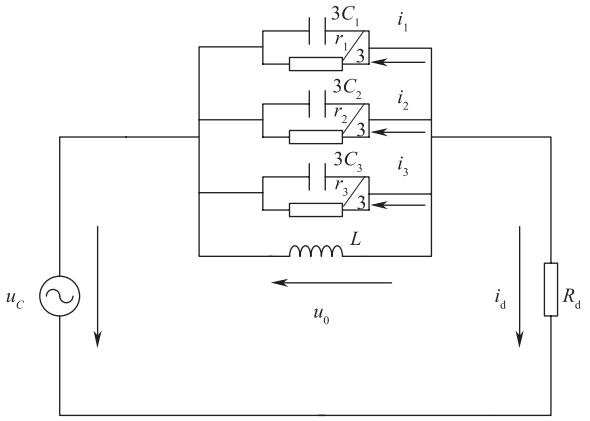


图 4　单相接地故障等效电路图

Fig. 4 equivalent circuit diagram of single-phase ground fault

对图4电路列写每一条线路的暂态方程。线路3为故障线路，其电流表达式为

$$i_3 = i_{c3} + i_r = 3C_3 \frac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} + \frac{u_0}{r_\Sigma} \tag{1}$$

由于式（1）为一个连续的关于时间函数的微分方程，实际上微机是无法处理这种连续信号的，因此要进行离散化的处理。根据表达式中导数的物理意义，将式（1）进行离散化处理得到差分方程为

$$\begin{cases} u_0 = u(k) \\ \dfrac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} = \dfrac{u(k+1) - u(k-1)}{2T} \\ i_3 = i(k) \end{cases} \tag{2}$$

将式（2）代入式（1），并化简得

$$\begin{cases} i(k) = 3C_3 \dfrac{u(k+1) - u(k-1)}{2T} + \dfrac{u(k)}{r_\Sigma} \\ i(1) = 3C_3 \dfrac{u(2) - u(0)}{2T} + \dfrac{u(1)}{r_\Sigma} \\ i(2) = 3C_3 \dfrac{u(3) - u(1)}{2T} + \dfrac{u(2)}{r_\Sigma} \end{cases} \tag{3}$$

由式（3）可知，方程中有两个未知参数，时间T表示输入信号的采样周期，这是人为设定的，视为已知量，所以对信号连续采样4处就可以得到两个方程，解出故障线路的分布电容C_3和三相对地绝缘电阻r_Σ，即

$$\begin{cases} r_\Sigma = \dfrac{u(0)u(2) + u(1)u(3) - u^2(2) - u^2(1)}{i(1)[u(3) - u(1)] + i(2)[u(0) - u(2)]} \\ C_3 = \dfrac{i(2)r_\Sigma - u(2)}{u(3) - u(1)} \times \dfrac{2T}{3r_\Sigma} \end{cases} \tag{4}$$

根据式（4）求得故障线路分布电容和三相对地绝缘电阻的估计值，以此值来进行模式识别。由于发生单相接地故障的支路对地的电阻值很小，与非故障支路的对应参数有明显的区别[5]，其值在故障未消除期间应该变化不大。所以，此时所得计算结果应与实际线路参数吻合。

判据思路：利用模式识别法，先假定井下供电系统中同一电压等级的所有馈出线路都没有发生故障，那么对所有的馈出线路都列出上述暂态微分方程，并求解未知数[6]。如果计算结果与模型中设定的参数一致，那么可以判定这条线路没有故障，反之，计算结果与模型设定的参数不一致的线路就是故障线路。

在现实情况中，由于其他因素的影响，理论计算与真实值之间存在误差，因此实际装置判断故障线路时，要对动作整定值的设定留出一定的裕量。

横向选线：对消弧线圈两端电压和每条线路首端的零序电流进行实时采集，代入以下公式从而求解未知量C与r，即

$$i_0(t+1) = 3C \frac{U_L(t+2) - U_L(t)}{2T} + \frac{U_L(t+2)}{r/3} \tag{5}$$

式中，T为采样周期，取0.0003 125 s。

将每条线路计算所得的C与r值分别写入一个二维数组，再对该二维数组进行赋值得到另一数组（若为正数赋值1，若为负数赋值0），最后共

得到108个二维数组（108条线路），若这108个二维数组中，有一个二维数组符合：有任一维数组中元素保持数值为0的时长超过整定值时，则判定该二维数组为故障线路数组。

2.3 解决失电压线圈自动释放引起的误跳闸问题

对于因短时母线电压跌落造成的失电压线圈失去磁力，进而导致断路器误跳闸的问题，应采取直流电压支撑的方法加以解决，也就是用DC 110 V给失电压线圈供电，并且并联上一个超级电容器。母线电压正常时，线路对超级电容器进行充电；母线电压发生短路故障导致电压发生跌落时，超级电容器就相当于电源进行供电，从而维持失电压线圈保持吸合4 s以上；母线电压恢复之后，重新给超级电容器充电。如果母线电压停电，则失电压线圈4 s以后彻底失电，断路器跳闸，防止自动送电。

2.4 解决欠电压保护存在的问题

欠电压保护是综合保护器依据采集的电压互感器二次电压值低于动作整定值时发出的跳闸指令。该项功能应修改为保护动作可以延时，如果母线瞬间短时跌落至动作整定值，则欠电压保护启动并延时1 s；如果电压在期间内恢复到动作整定值以上，则欠电压保护返回；如果母线电压低于动作整定值时间超过延时，则发出跳闸指令。

3 预期效果

实现下井电缆联络线、中央变电所高爆开关馈出线路故障时选择性跳闸，即该变电所内所有开关负荷侧及其馈出线路发生短路故障时，该开关跳闸；如果该开关没有及时跳闸，本所的进线开关会自动跳闸，但不会导致上级（地面变电所）的开关发生跳闸；该变电所的两段母线如果发生短路故障，这两段母线相应的进线开关也会发生跳闸，但不会导致地面变电所下井电缆开关跳闸。发生单相接地故障时，会实现横向和纵向选择性跳闸，在一定程度上缩小停电面积。此外，所有的电气参数、故障信息和合分闸事件等均上传至地面控制室；在地面控制室实现对井下中央变电所所有开关的远程操作，并具备井下中央变电所无人值守的功能。

4 结束语

本文逐一解决了四个方面的故障“越级跳闸”问题：采用远程光纤纵差保护解决短路故障引起的纵向越级跳闸问题；采用模式识别法解决某一条线路发生单相接地故障造成的横向、纵向“误跳闸”问题；采用直流支撑方法解决失电压线圈引起的“晃电”即母线电压瞬间跌落问题；采用欠电压保护延时动作方法解决短时电压跌落造成的“误跳闸”问题。曙光煤矿下井电缆联络线、中央变电所和采区1#变电所高爆开关馈出线路故障时可实现选择性跳闸，杜绝故障越级跳闸现象，确保供电安全，防止因突然停电引发的瓦斯积聚、淹井等次生灾害的发生。

参考文献

[1] 王彦文．煤矿供电技术[M]．北京：中国矿业大学出版社，2013．
[2] 钱张康．矿井防越级跳闸光纤纵差技术的研究[D]．合肥：安徽理工大学，2019．
[3] 王彦文，赵永梅，孙梦雅，等．一种矿井高压电缆绝缘监测新方法[J]．矿业科学学报，2017，2(6)：582-587．
[4] 张潇，王彦文，赵永梅，等．矿用高压电缆绝缘在线监测方法[J]．工矿自动化，2017，43(4)：60-63．
[5] 徐海瑞，王力，赵广立，等．小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]．河南电力，2012(4)：33-33，66．
[6] 高彦，刘磊，李宁，等．消弧线圈接地系统参数模式识别故障线路的方法[J]．煤炭科学技术，2009，37(3)：51-55．

作者简介

范海云（1985—），男，高级工程师，主要从事煤矿机电自动化技术研究工作。

（收稿日期：2022-05-12）