

矿井低压电网中性点接地方式与漏电保护技术的研究

陈奎, 孙常青, 唐轶

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在分析矿井低压电网中性点不同接地方式下漏电电流特征的基础上, 从人身触电电流、漏电保护等方面详细比较了各种接地方式的优缺点, 得出了中性点经高阻接地或中性点经电抗串高阻接地更适合矿井低压电网的结论。针对上述中性点接地方式的特征, 论述了零序电导法在矿井低压电网选择性漏电保护中的应用, 分析了其在漏电保护动作准确性和整定简单等方面的优越性。利用通信闭锁和相对值的方法提高了附加直流电源漏电保护的快速性和动作值的稳定性。通过实验验证了上述方法的有效性。

关键词: 人身触电; 漏电保护; 矿井低压电网; 选择性; 中性点接地

Research on neutral grounding mode and technology of leakage protection in mine low-voltage electric network

CHEN Kui, SUN Chang-qing, TANG Yi

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the analysis of leakage characteristic of different neutral grounding modes in mine low-voltage electric network, advantages and disadvantages of different grounding modes are compared in detail from the aspects such as contact current of person and leakage protection, and the conclusion that neutral grounding by high resistance or reactance series high resistance is much more preferable to mine low-voltage electric network is derived. In allusion to characteristic of neutral grounding mode above, the application of zero-sequence conductance in mine low-voltage electric network selective leakage protection is discussed, and the superiority such as the accuracy in leakage protection action and setting easily is analyzed. The stability of operating value and quick-activity in the leakage protection of addition DC power are improved by communication lockout and comparative method. The efficiency of the above method is proved by experiment.

Key words: personal electric shock; leakage protection; mine low-voltage electric network; selectivity; neutral grounding

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0237-05

0 引言

我国矿井低压电网中性点接地方式的选择主要是从供电安全的角度来考虑的, 并综合考虑有利于漏电保护的可靠性实现。其中供电安全包括人身安全和设备安全。人身安全主要是人身触电是否有伤亡。其涉及的因素很多, 但总体来说, 人身触电电流越小、触电时间越短则越安全。目前, 我国对人身触电是否有伤亡有两个标准来衡量: 一是人身触电电流小于安全电流值30 mA; 我国井下低压电网漏电保护的电阻值就是依据这一安全电流值确定的。为达到这一人身触电安全电流值, 最初井下低压均采用电容电流补偿技术, 但由于是固定补偿, 因此不可能实现全补偿; 同时由于电缆、电气设备

介质损耗和补偿电抗器有功损耗电流不能被补偿, 使得补偿后的人身触电电流仍远大于30 mA^[1-2], 因此这一标准实际上无法实现。随着人们认识的深入, 意识到人们无法控制人身触电电流小于30 mA, 而可以控制人身触电的时间, 开始逐步认同由国际电工委员会IEC推荐, 德国学者柯宾·奥西朴卡提出的人体触电的极限电流安全参量曲线, 即触电电流与触电时间的乘积小于30 mA·s^[1-2]。而上述安全条件的实现除靠减小人身触电电流外, 主要靠缩短漏电保护的動作时间来保证。

根据煤矿井下低压电网中性点接地方式的特征, 现有低压供电系统中总开关的漏电保护大都采用附加直流漏电保护原理。为保证总开关与分支开关之间的选择性, 一般只能靠延长来实现, 而

该时间又与漏电保护应快速跳闸相矛盾^[3]。分支开关的选择性漏电保护主要采用零序电流保护或零序电流方向保护原理。零序电流保护易受电网条件的限制,仅适用于分支线路比较多、电容比较大的场合。对于中性点经电抗接地电网的灵敏度则更低,甚至无法使用。在井下低压电网的条件下,该方法使用有一定的困难。零序电流方向保护反映的是零序电压和零序电流之间的相位关系,当所有非故障支路的零序电流之和太小时,需在电网上并入一组三相电容器来增大零序电流^[3-4]。该方法不能使用在中性点经电抗接地电网,并且这两种方式在现场应用中的准确性和可靠性都有待提高。因此,对矿井低压电网中性点接地方式的选择,以及相应中性点接地方式下的漏电保护进行研究,对保证矿井安全生产和人身安全都具有重大意义。

1 矿井低压电网中性点接地方式的选择

我国矿井低压电网中性点接地方式以中性点不接地、中性点经电抗接地为主,包括少量的中性点经高阻接地、中性点经电抗串电阻接地。井下低压电网等效图如图1所示,当K1打开时为中性点不接地方式;K1、K2闭合、K3、K4打开时为中性点经电抗接地方式;K1、K3闭合、K2、K4打开时为中性点经电抗串高阻接地方式;K1、K4闭合、K2、K3打开时为中性点经高阻接地不接地方式。电网各相对地电容为C、对地绝缘电阻为r, C_N为附加直流隔离电容,由于C_N值较大,其容抗较小,在分析时可以忽略不计。

假设A相发生人身触电或漏电故障,其电阻值为R,则漏电电流为:

$$I_{jd} = \frac{3\dot{U}_A}{3R + Z_0} \quad (1)$$

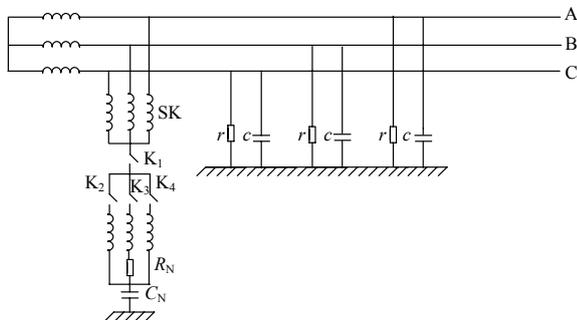


图1 井下低压等效电网

Fig.1 Underground low voltage equivalent electric network

对图1进行分析,可得不同接地方式下的漏电电流分别如式(2)~(5)所示。

中性点不接地:

$$I_{jd} = \frac{U_\phi}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r+6R)}{9(1+r^2\omega^2C^2)R^2}}} \quad (2)$$

式中, U_φ 为系统相电压。

中性点经高阻接地:

$$I_{jd} = \frac{U_\phi}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r'(r'+6R)}{9(1+r^2\omega^2C^2)R^2}}} \quad (3)$$

其中, $r' = \frac{3R_N r}{3R_N + r}$ 。

中性点经电抗接地:

$$I_{jd} = \frac{U_\phi}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r(r+6R)}{9[1+r^2(\omega C - \frac{1}{3\omega L})^2]R^2}}} \quad (4)$$

中性点经电抗串电阻接地:

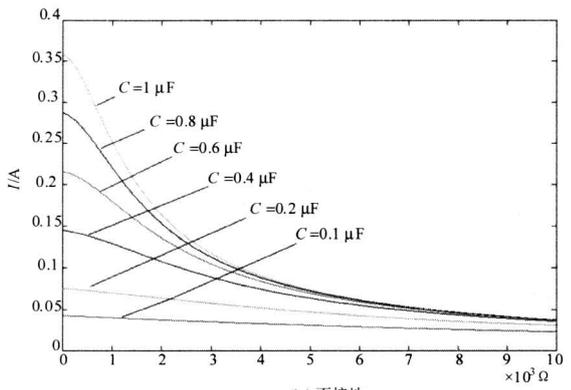
$$I_{jd} = \frac{U_\phi}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r''(r''+6R)}{9[1+r''^2(\omega C - \frac{\omega L}{3R_N^2 + 3\omega^2 L^2})^2]R^2}}} \quad (5)$$

式中, $r'' = \frac{3(R_N^2 + \omega^2 L^2)r}{3(R_N^2 + \omega^2 L^2) + R_N r}$ 。

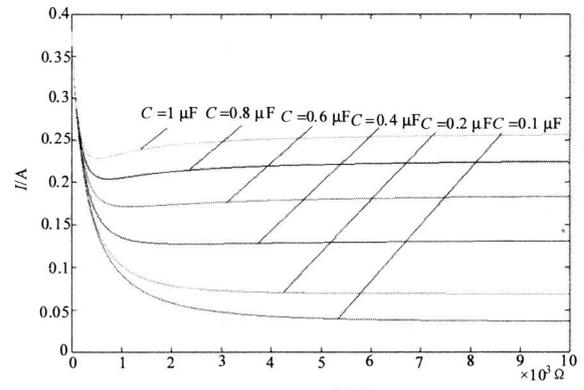
据统计,我国井下低压电网的对地分布电容0.1~1.0 μF/相^[1,4]。因此,可仿真出式(2)~(5)在不同电网参数下的漏电电流值。图2为漏电电流随漏电阻变化的曲线,其中r=50 kΩ,图中横坐标为漏电阻,纵坐标为漏电电流。图3为人身触电电流随电网绝缘电阻变化的曲线,图中横坐标为漏电阻,纵坐标为漏电电流。其中图3(c)和图3(d)为过补偿状态。

对于r不同值的情况,其漏电电流值的变化规律与图2基本相同。通过对上述漏电电流值的分析可见,矿井低压电网中性点不论采用何种接地方式,当发生人身触电时(一般对于井下低压电网人身电阻在500~1500 Ω,习惯上取1000 Ω)人身触电电流均大于30 mA。

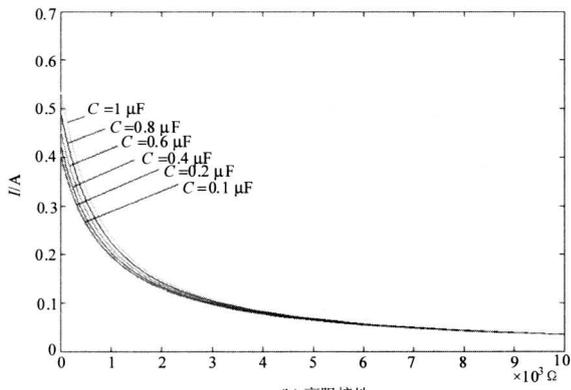
中性点经电抗接地可以减少人身触电电流,但是由于采用固定补偿方式,在绝大多数情况下得不到全补偿,补偿效果最多能达到50%~60%^[1];即使在最佳补偿状态下人身触电电流仍很难达到安全要



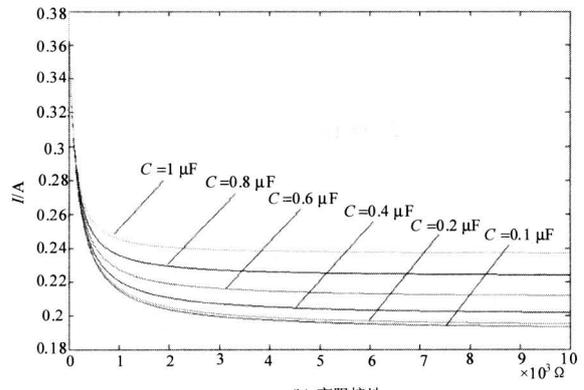
(a) 不接地



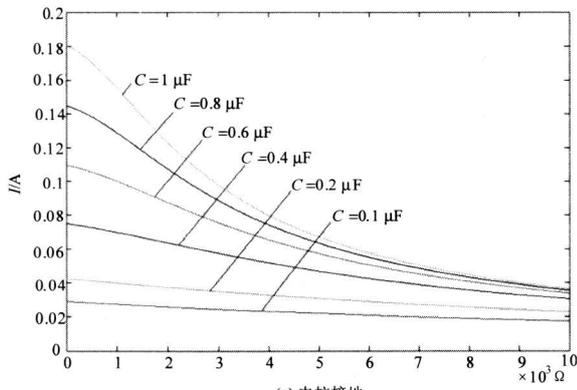
(a) 不接地



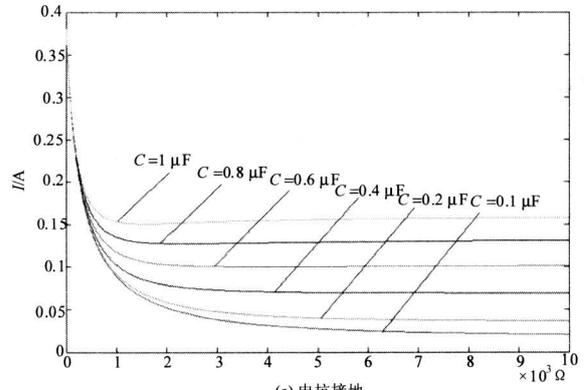
(b) 高阻接地



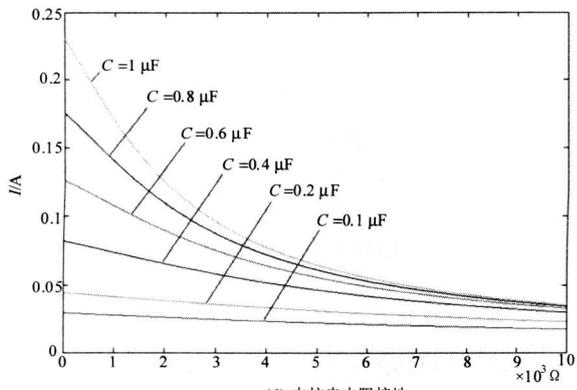
(b) 高阻接地



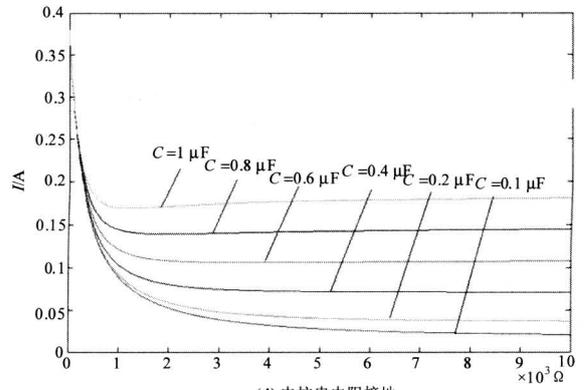
(c) 电抗接地



(c) 电抗接地



(d) 电抗串电阻接地



(d) 电抗串电阻接地

图2 不同接地方式下漏电电流曲线

Fig.2 Leakage current curve of different grounding modes

图3 人身触电时的电流分布曲线

Fig.3 Current distribution curve of personal electric shock

求。同时,中性点经电抗接地时可引起串联谐振过电压,其值可能达到电网相电压的4~5倍以上;当开关的三相触头不同期合闸时,将会造成一相接地假象引起漏电保护误动作。在采用补偿以后,必然减小故障支路的电流。当过补偿时,还会造成故障支路零序电流相位的改变,势必会影响到漏电保护的准确性。

对于中性点经电阻接地方式,只要电阻值选取合适,不仅可以减小人身触电电流值,还可以抑制串联谐振过电压和电弧接地过电压,有利于电网的安全运行。对于中性点经电抗串电阻接地方式,其电抗可以起到一定的补偿作用;串联电阻对于抑制串联谐振过电压和电弧接地过电压,也是有效的。由于中性点电阻的存在,为漏电保护提供了一定的条件。由此可见,最好采用中性点经电阻或电抗串电阻接地方式并加快漏电保护动作的速度,来保证人身安全。

2 矿井低压电网漏电保护

2.1 附加直流电源相对值法漏电保护

总开关所采用附加直流电源漏电保护为保证与下级线路的选择性,要靠延长来实现,两级选择性漏电保护装置之间的动作时限级差约为200~500 ms。为解决上述问题,在本文中采用了上下级通信闭锁的方法。其原理如下:当分支开关检测到本支路有漏电故障时就向总开关发出闭锁信息,一直到故障切除,总开关收到闭锁信息后将保护闭锁。为实现总开关到分支开关之间线路的漏电保护功能和对分支开关的后备保护作用,总开关闭锁功能一般只维持很短时间(即躲下级保护跳闸时间,由于分支开关漏电保护要求50 ms跳闸,考虑到一定的可靠系数一般可设80 ms),此时不论闭锁信号是否解除,总开关的漏电保护都恢复工作。如此设置后总开关的漏电保护延时就为80 ms,与现有漏电保护相比较较好地减小了延时时间,提高了人身触电的安全性。根据现有附加直流电源漏电保护原理动作值易受电网电压波动因素的影响,而采用了附加直流电源相对值的方法,即将电网不同电压下的漏电阻值转换为额定电压下的值来进行判断。

2.2 零序电导法选择性漏电保护

针对现有选择性漏电保护存在的整定困难、准确性较差等问题^[5-11],本文针对中性点经高阻接地或电抗串高阻接地方式分析了基于零序电导的选择性漏电保护在选择性和保护整定等方面的优越性。

由图4可知:非故障线路所测的零序导纳为:

$$\dot{Y}_{0i} = \frac{\dot{I}_{0i}}{\dot{U}_0} = 3g_i + j3\omega C_i \quad (6)$$

故障线路所测的零序导纳为:

$$\dot{Y}_{0k} = \frac{\dot{I}_{0k}}{\dot{U}_0} = -\left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n 3g_i + g_N + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n j3\omega C_i - j\frac{1}{\omega L}\right) \quad (7)$$

对上述测量导纳取其电导部分则可得:

$$\begin{cases} \dot{G}_{0i} = \text{Re}(\dot{Y}_{0i}) = 3g_i \\ \dot{G}_{0k} = \text{Re}(\dot{Y}_{0k}) = -\left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n 3g_i + g_N\right) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可见非故障线路的零序测量电导等于该线路对地电导。故障线路的零序测量电导等于所有非故障线路的零序测量电导与中性点电导之和,且方向与非故障线路相反。因此,可以通过零序测量电导的大小或方向来判断故障线路。由于煤矿低压电网各线路的漏电保护装置一般都安装在其防爆开关内,群体比幅和比相的方法在应用中存在一定的困难,因此,对各支路零序电导大小和方向的测量要求精度较高。

对于非故障线路其零序电流可能非常小,尤其是在高阻接地故障情况下。这时由于零序电流互感器、测量、计算等误差的影响,可能出现方向误判的现象。为了防止此时零序电导方向法的误动作,在本方法中除判断方向外还需判断其大小。

对式(8)取其幅值可知:

$$G_{0k} = \left| -\left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n 3g_i + g_N\right) \right| = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n 3g_i + g_N \geq g_N \quad (9)$$

考虑一定的可靠系数,电导可整定为

$$G_{0k} = (0.7 \sim 0.8) g_N \quad (10)$$

由式(8)~(10)可知,其整定值只与中性点所加电阻有关,而与电网参数无关,现场应用非常简单方便。

基于上述零序电导的漏电保护在应用中除整定电导大小外,与其他漏电保护一样还需整定保护的启动判据零序电压。在本方法中由于电导的判据与漏电阻无关,即与零序电压无关,因此零序电压的整定只需考虑保护的灵敏性和不误动即可。

3 实验与结论

设计了以DSP为核心的低压防爆开关微机综合保护装置^[6-11]对上述结论进行了验证。本实验室煤矿低压模拟电网如图4所示。实验中 $R_N = 1 \text{ k}\Omega$ 。

总漏电保护的整定值为 $11 \text{ k}\Omega$, 闭锁时间 80 ms , $G_{0K} = 0.8g_N$ 。分支线路的漏电保护实验在第三条线路上进行, 可变电阻 R 用来模拟漏电电阻。

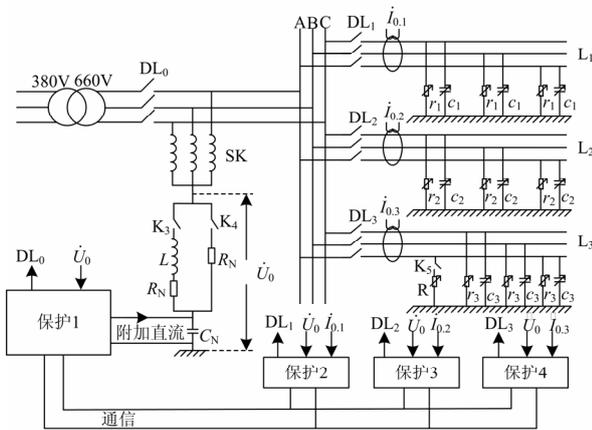


图4 低压电网漏电保护模拟实验图

Fig.4 Experimental simulation picture of low voltage electric network leakage protection

实验时各个断路器处都有一台保护装置, 各个保护的零序电压都取自 \dot{U}_0 , 由于保护中有隔离部分因此不互相影响。零序电流由对应线路的零序电流互感器获取。

通过实验可见只要实验时零序电压大于整定值各分支线路的漏电保护都能准确动作, 且各线路对地参数的改变对保护动作的准确性无影响。当将中性点电阻改为 $R_N = 1.5 \text{ k}\Omega$ 、 $R_N = 2 \text{ k}\Omega$ 时与上述实验结果相同。总开关采用的附加直流电源相对值法漏电保护其实验动作电阻与整定值的误差小于 5% 。当人为将分支故障线路的保护闭锁时总开关均可靠跳闸, 时间小于 100 ms (故障跳闸时间的测量是通过记忆示波器测量零序电压的保持时间来实现的)。

通过分析和实验可知, 井下低压电网中性点经高阻接地和中性点经电抗串高阻接地对减小人身触电电流、抑制串联谐振过电压和电弧接地过电压等方面都有较好的作用, 有利于电网的安全运行。同时由于中性点电阻的存在为漏电保护提供了必要的检测信号, 对提高漏电保护的准确性和快速性非常有利。具有闭锁功能的附加直流电源相对值法漏电保护提高了总开关漏电保护的動作速度, 减小了电网电压波动对动作值的影响。基于零序电导法的选择性漏电保护利用零序电导的大小和方向作为判据, 减小了过渡电阻对漏电保护的影响。整定电导值的大小主要与所加高阻有关而与电网参数无关, 便于现场的应用和推广。

参考文献

- [1] 唐轶, 陈奎, 吕良. 矿井低压配电网中性点接地方式的研究[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30 (7): 40-43. TANG Yi, CHEN Kui, Lü Liang. Research on neutral point grounding method for mine low voltage power distribution network[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30 (7): 40-43.
- [2] 唐轶. 选择性漏电保护[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995. TANG Yi. Selective leakage protection[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.
- [3] Thomas N. The effects of very high resistance grounding on the selectivity of ground-fault relaying in high-voltage longwall power systems[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2001, 37 (2): 398-406.
- [4] 牟龙华, 孟庆海, 胡天禄. 基于故障分量有功功率的选择性漏电保护[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(4): 380-383. MU Long-hua, MENG Qing-hai, HU Tian-lu. Selective ground-fault protection based on active power of faulted components[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31 (4): 380-383.
- [5] 胡天禄. 矿井电网的漏电保护[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1987. HU Tian-lu. The leakage protection of underground network[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.
- [6] 苏文辉, 李钢. 一种能滤去衰减直流分量的改进全波傅氏算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (23): 42-44. SU Wen-hui, LI Gang. An improved full-wave fourier algorithm for filtrating decay INGDC component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (23): 42-44.
- [7] 李永丽, 陈超英, 贺家李. 一种基于半波傅氏算法的继电保护快速算法[J]. 电网技术, 1996, 20 (1): 52-55. LI Yong-li, CHEN Chao-ying, HE Jia-li. A fast algorithm based on half cycle Fourier algorithm for protective relaying[J]. Power System Technology, 1996, 20 (1): 52-55.
- [8] 李斌, 李永丽, 贺家李. 一种提取基波分量的高精度快速滤波算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (10): 39-43. LI Bin, LI Yong-li, HE Jia-li. Accurate and fast filtering algorithm for fundamental component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (10): 39-43.
- [9] 唐轶, 陈庆, 刘昊. 补偿电网单相接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (16): 83-86. TANG Yi, CHEN Qing, LIU Hao. Detecting single phase to ground fault feeder in compensation networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (16): 83-86.

(下转第246页 continued on page 246)

上所有的连接元件。此时虽然失去了选择性，但保证了可靠性，能够及时切除故障，保障电力系统的安全。

5 其他

变压器或者发变组保护的后备保护中也有很多基于母联断路器为跳闸对象的保护方案。

有母联断路器的两段制母线系统中，变压器保护或发变组保护的后备保护范围一般延伸到母线，作为母线保护的远后备，即跳开母联开关。如后备保护动作，则可能是母联开关和变压器相连接的母线故障，在躲开母线保护主保护的动作时限后，由变压器后备保护动作跳开母联，满足继电保护“选择性”要求。

220 kV 变压器复压过流保护一般指向母线侧，保护动作时跳开母联；500 kV 的阻抗保护一般延伸到母线侧，相间阻抗保护动作时也跳开母联开关，尝试隔离故障母线，保住非故障母线。

对于发变组保护也存在这种保护设计方案，如果发变组的后备保护（相过流、零序过流、阻抗保护）动作，也可以切开母联开关，实施隔离故障的措施。

6 结论

本文概要论述了母线保护、母联保护、充电保护等保护功能作用于母联跳闸的保护方案，探讨了每种保护的详细设计方案及这些方案在特殊情况的处理措施，对于电力系统保护运行人员和电力工程设计人员有一定的指导意义。

参考文献

[1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.

(上接第 241 页 continued from page 241)

[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. 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

HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principle of power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.

[2] 贺家李. 电力系统继电保护技术的现状与发展[J]. 中国电力, 1999, 32 (10): 38-40. HE Jia-li. Current situation and development of relay protection of power system technology[J]. Electric Power, 1999, 32 (10): 38-40.
[3] 周玉兰, 王俊永, 王玉玲. 2001年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况与分析[J]. 电网技术, 2002, 26 (9): 58-63. ZHOU Yu-lan, WANG Jun-yong, WANG Yu-ling. Operational situation and analysis of domestic protective relaying and secure automation devices in 2001[J]. Power System Technology, 2002, 26 (9): 58-63.
[4] 任立辉, 樊文东, 程天保. 母线保护中母联死区故障保护逻辑的研究[J]. 继电器, 2006, 34 (10): 12-14. REN Li-hui, FAN Wen-dong, CHENG Tian-bao. Research of busbar protection's logic on dead zone fault of coupler[J]. Relay, 2006, 34 (10): 12-14.
[5] 常凤然. 高压电网失灵保护的若干问题分析[J]. 继电器, 2008, 28 (3): 51-53. CHANG Feng-ran. Analysis of the CB failure protection of HV power network[J]. Relay, 2008, 28 (3): 51-53.

收稿日期: 2010-05-28; 修回日期: 2010-09-28

作者简介:

李 新 (1973-), 女, 本科, 工程师, 从事继电保护技术及管理工作; E-mail: xygdgssjb@yahoo.cn
熊 炬 (1970-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电网调度、继电保护及自动化管理工作;
董 泉 (1971-), 男, 本科, 高工, 从事电网调度、继电保护及自动化管理工作。

earthed fault location 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.

收稿日期: 2009-11-28; 修回日期: 2010-03-15

作者简介:

陈 奎 (1973-), 男, 博士, 副教授, 现主要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