

能够防止一点接地导致继电保护误动的 安全型直流绝缘监测系统

南寅¹, 王雪楠¹, 樊树根², 赵志群¹

(1. 北京人民电器厂有限公司, 北京 102600; 2. 宝鸡供电公司, 陕西 宝鸡 721004)

摘要: 通过对电力直流系统一点接地导致的继电保护误动的机理分析, 提出基于系统电容分析的直流系统安全性评估方法。结合一点接地引起继电保护误动的条件和国家电网十八项反事故措施要求, 提出在直流绝缘监测中控制负极对地电压的安全性设计措施, 主要包括单臂检测电桥和临时修正电桥。对具体实施方案及相应的算法进行了描述, 并依据安全性评估方法及安全性设计措施, 设计出能够防止一点接地导致继电保护误动的高安全型的直流绝缘监测系统。

关键词: 一点接地; 直流绝缘监测; 系统电容分析; 控制负极对地电压; 单臂检测电桥; 临时修正电桥

A safety DC insulation monitoring system which can prevent protective relay misoperation because of one point earthing

NAN Yin¹, WANG Xue-nan¹, FAN Shu-gen², ZHAO Zhi-qun¹

(1. Beijing People's Electric Plant CO., LTD, Beijing 102600, China; 2. Baoji Power Supply Company, Baoji 721004, China)

Abstract: Through the mechanism analysis of protective relay misoperation because of one point earthing in power DC system, this paper proposes safety assessment measures based on system capacitance analysis. Combined with conditions of protective relay misoperation caused by one point earthing and State Grid eighteen anti accident measures, it proposes safety design measures that control negative voltage to earth in DC insulation monitoring system, mainly includes the single arm detection bridge and temporary fixed bridge, and describes the specific implementation plan and corresponding algorithm. According to these measures, a higher safety DC insulation monitoring system is designed which can prevent protective relay misoperation because of one point earthing.

Key words: one point earthing; DC insulation monitoring; system capacitance analysis; control of negative voltage to earth; detection bridge with one arm; temporary fixed bridge

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0134-06

0 引言

电力系统以往的教材及技术资料均强调, 直流系统发生一点接地时, 仍可继续运行, 但必须及时发现和消除, 以免第二点发生接地后造成继电保护的误动或拒动。但根据现场运行经验, 直流系统一点接地, 同样可能导致出口保护继电器的误动, 从而导致变电站主变跳闸或发电厂的发电机组停运, 严重影响生产。

随着电力系统的快速发展, 电网智能水平的不断提高, 厂站规模或容量在不断增加, 继电保护装置、自动装置、测控装置的数量也在不断增加。而这些装置为提高自身抗干扰能力, 在其电源输入端均设有对地的共模电容, 造成直流电源系统正负极

对地电容的大量增加; 随着厂站直流网络集中辐射供电方式或分层辐射供电方式的实施, 厂站几十公里的电缆的芯线与屏蔽层之间存在有分布电容, 且电缆越长分布电容越大, 而由于屏蔽层两端接地, 实际上这种分布电容就是电缆芯线对地之间的分布电容。

由于直流电源系统正负极对地分布电容的大量增加, 使得“直流系统一点接地仍能继续运行, 两点接地才能造成保护装置的误动或拒动”这种长期被认知的理念发生了颠覆性改变^[1-6]。

1 机理分析

设直流系统母线电压为 U , 直流系统正负极对地电阻分别为 R_+ 、 R_- , 直流系统对地电容为 C_+ 、

C ; 继电保护的输出接点 K_0 , 出口动作继电器线圈 CKJ , 线圈内阻为 R_c , 最小动作电压为 U_d , 动作时间为 T_d ; 安装在直流系统的直流绝缘监测装置平衡电桥电阻 $R_1=R_2=R$ 。其电路示意图如图 1。

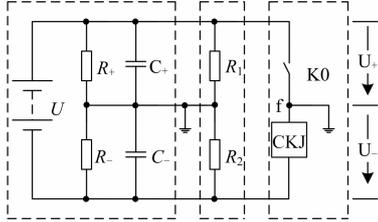


图 1 直流系统电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DC system

假设某一时刻 t_0 , 由于直流系统两极对地绝缘电阻不均等下降, 或直流系统正极绝缘下降, 或直流绝缘监测装置运行所致, 使得 $U_+ > U_d$; 在此时, 继电保护回路上的 f 点发生接地, 由于保护出口继电器 CKJ 线圈具有内阻 R_c , 所以, 必会导致负极对地电压的降低。若系统电容足够小, 为了便于分析, 假设为零, 即直流系统无对地电容, 则负极对地的电压变化过程如图 2。

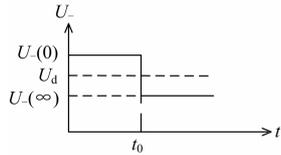


图 2 电容为零时的负极电压变化示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of negative voltage changes when system capacitance is zero

在此过程中, 可以看出, 由于线圈电阻 R_n 连接至负极和大地之间, 使得负极对地电压降到了继电器的动作电压以下, 此时, 继电器不会动作。

但是, 直流系统对地电容一般情况下不为零, 所以, 当电容存在时, 发生保护出口继电器线圈一点接地后的直流母线负极对地电压的变化呈现出电容放电的过程, 如图 3 所示。

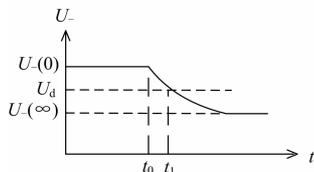


图 3 电容不为零时的负极电压变化示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of negative voltage changes when system capacitance is not zero

放电曲线符合

$$U_-(t) = U_-(\infty) - (U_-(\infty) - U_-(0)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

其中:

$$\tau = (R // R // R_n // R_+ // R_-) \cdot (C_+ + C_-)$$

设电压下降至继电器动作电压的时刻为 t_1 , 若 $T_d < (t_1 - t_0)$, 即当施加在继电器线圈两端的电压下降至继电器的动作电压 U_d 的时间超过了继电器的动作时间 T_d , 则继电器一定会发生误动作。

由上述分析可以看出, 在出口保护继电器线圈正电源侧发生一点接地, 造成保护装置误动, 应同时具备三个条件^[7]:

- 1) 直流系统对地电容达到一定数量级;
- 2) 保护出口继电器线圈正电源侧发生一点接地;
- 3) 在保护出口继电器线圈正电源侧接地之前, 直流系统负极对地电压超过了保护出口继电器动作电压。

2 直流绝缘监测的安全性措施

2.1 基于系统电容分析的安全性评估

一点接地之所以能够导致继电保护误动作, 与近年来系统对地电容不断的增加存在很大关系, 所以, 在直流绝缘监测中, 通过采集和分析系统对地电容来评估系统的安全性是十分必要的。

由图 1 可以看出, 在出口继电器 CKJ 线圈正极发生一点接地前, 直流系统负极对地初始电压为

$$U_-(0) = \frac{R // R}{R // R + R_+ // R} \cdot U$$

一点接地发生后, 直流系统负极对地稳态电压为

$$U_-(\infty) = \frac{R // R // R_c}{R // R // R_c + R_+ // R} \cdot U$$

设继电器得电后持续 t_1 时间后动作, 继电器动作电压为 U_d , 为了使继电器不误动作, 必须保证

$$U_{t1} < U_d$$

而

$$U_{t1} = U_-(\infty) - (U_-(\infty) - U_-(0)) \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}}$$

其中:

$$\tau = (R // R // R_n // R_+ // R_-) \cdot (C_+ + C_-)$$

$$C = C_+ + C_-$$

所以有

$$\tau = \frac{-t_1}{\ln(U_d - U_-(\infty)) - \ln(U_-(0) - U_-(\infty))}$$

为了保证不发生继电保护误动，可以满足

$$C < \frac{-t_1}{\ln(U_d - U_-(\infty)) - \ln(U_-(0) - U_-(\infty))} \cdot \frac{1}{R // R // R_+ // R_- // R_c}$$

设

$$C_g = \frac{-t_1}{\ln(U_d - U_-(\infty)) - \ln(U_-(0) - U_-(\infty))} \cdot \frac{1}{R // R // R_+ // R_- // R_c}$$

考虑电容测量误差、电阻测量误差、电压测量误差，留取一定的余度，可取

$$C \geq 0.7C_g$$

作为判断是否可能发生继电保护误动的条件。

由上述推导可以看出，继电保护是否误动和初始电压、稳态电压、继电器动作时间、继电器线圈内阻及系统绝缘电阻相关。所以，若要确定电容值，至少需要输入：继电器动作时间 t_1 ，继电器动作电压 U_d ，继电器线圈内阻 R_c ^[8]。

2.2 基于控制负极对地电压的安全性电桥

2.2.1 合理选择平衡电桥电阻

为了检测直流电源系统正负极对地绝缘电阻，传统的绝缘监测装置内设平衡电桥和检测电桥，其等效原理图如图 4 所示，由于具有正极对地的检测电阻和负极对地的检测电阻，所以，称这种检测电桥为“双臂检测电桥”。

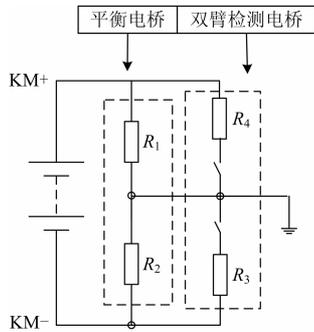


图 4 双臂检测电桥电路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of detection bridge with two arms

一般来讲，平衡电桥具有两个作用，其一为实现绝缘监测基本功能，其二为钳制直流系统正负极对地电压，从系统安全角度上看，后者作用更为突出。平衡电桥设计的不合理，可能削弱钳制直流系统正负极对地电压作用，当直流系统正极对地绝缘

降低后，有可能较早地使直流系统达到危险的运行状态。

根据国家电网发布的反事故措施^[9]，结合直流系统一点接地导致继电保护误动的机理分析，本文以负极对地电压是否超过额定电压的 55% 作为判定直流系统是否安全的条件。

仅当正极绝缘下降或正负极绝缘同时下降且正极下降较负极下降严重时才可能使直流系统达到危险运行状态，为了便于分析，假设正极绝缘下降且负极绝缘未下降，则负极对地电压为

$$U_- = U_n \cdot \frac{R}{R // R_+ + R} = U_n \cdot \frac{R + R_+}{R + 2R_+}$$

式中： U_- 为直流系统负极对地电压； R_+ 为直流系统正极对地绝缘电阻； R 为直流绝缘监测装置平衡电桥电阻。

为了保证系统安全，需使

$$U_- < 55\%U_n$$

两式联立，可得

$$R_+ > 4.5R$$

可以看出，当直流系统负极绝缘良好状态下，正极对地绝缘电阻必须大于平衡电桥阻值 4.5 倍，才能保证负极对地电压不超过额定电压的 55%，即保证直流系统不因一点接地导致继电保护误动。表 1 列举了几个不同阻值的平衡电桥及其达到危险运行条件所需的正极对地绝缘电阻的最大值（以负极对地绝缘电阻为无穷大计）。

表 1 平衡电桥电阻对直流系统的影响

Table 1 Resistance of balance bridge effect on DC system

序号	平衡电桥电阻	达到危险运行条件
		所需的 R_+
1	100 kΩ	450 kΩ
2	50 kΩ	225 kΩ
3	30 kΩ	135 kΩ

由表 1 可以看出，选择平衡电桥电阻为 100 kΩ 时，正极对地绝缘下降至 450 kΩ 后就可能导致系统进入危险运行状态，而平衡电桥电阻为 30 kΩ 时，需使正极对地绝缘下降至 135 kΩ 后才能导致系统进入危险运行状态。平衡电桥电阻越小，对直流系统正负极对地电压钳制越有效。

但是，平衡电阻若是太小，当绝缘监测装置平衡电桥负极电阻断路时，也会因一点接地导致保护误动作，动作原理如图 5 所示，连接到正极和大地之间的平衡电阻和保护出口继电器 CKJ 线圈呈现出“电阻分压”状态，当继电器 CKJ 线圈分得的电压超过继电器动作电压，同样会造成继电保护误动

作。经过调研, 系统最灵敏的中间继电器线圈内阻一般不大于 $20\text{ k}\Omega$, 所以, 为了防止因平衡电桥负极电阻断路引起保护误动作, 平衡电阻的阻值不宜低于 $20\text{ k}\Omega$ 。

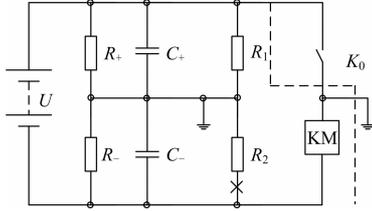


图 5 平衡电桥断路导致保护误动原理图

Fig. 5 Schematic diagram of protective relay false trip because of balance bridge opening

2.2.2 单臂检测电桥技术

如图 4 所示的双臂检测电桥, 在运行过程中, 当投入正极对地检测电阻后, 势必会造成系统负极对地电压的升高, 加之由于检测电桥电阻参数选择不合理, 在检测桥投入或退出时造成系统正负极母线对地电压大幅度变化、甚至达到接近全电压变化。在系统正负极母线对地绝缘监测过程中, 如果不能完全控制和管理系统负极对地电压, 就可能使负极对地电压达到保护出口继电器动作电压, 从而为继电保护误动作提供了一个条件。

本文提出单臂检测电桥, 其电路示意图如图 6 所示。由于仅具有负极对地的检测电阻电路, 所以称其为“单臂”检测桥, 不同于目前市场上正负极对地分别设有检测电阻的“双臂”电桥电路。单臂检测电桥的特点在于检测电桥电路仅由负极对地检测电阻及其切换开关构成, 在检测电桥工作时, 由于电桥电阻并联在负极和大地之间, 所以不仅不会造成直流母线负极对地电压的增大, 反而使其减小, 控制了负极对地电压的增大, 在检测电桥工作过程中能够降低由于一点接地引发的继电保护误动的风险^[10]。

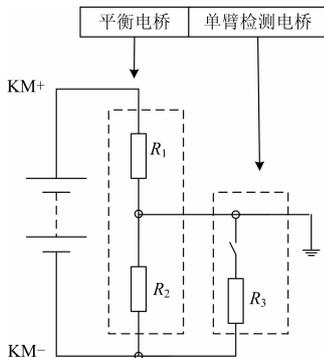


图 6 单臂检测电桥电路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of detection bridge with one arm

2.2.3 临时修正电桥技术

直流电源系统正负极对地绝缘电阻是一个多形式、多参数、不确定的组合形式。通过对直流一点接地引起保护误动案例的深入研究, 除了在检测电桥投入或退出时造成系统正负极母线对地电压大幅度变化外, 还有可能由于直流系统正负极对地绝缘电阻的不均衡造成。

本文提出临时修正电桥, 用于临时修正直流系统正负极对地电压的不均衡, 电路示意图如图 7。临时修正电桥的功能, 是为了使负极对地电压不超过负极对地安全电压整定值, 而负极对地安全电压需根据直流系统最灵敏的继电器进行整定, 一般不大于额定电压的 55% ^[5]。临时修正电桥根据直流系统正负极对地电压的偏移状况, 向直流母线负极对地投入电阻, 使直流母线负极对地电压不超过负极对地安全电压整定值 (负极对地安全电压应根据系统最灵敏的继电器的动作电压进行整定, 保守状态下可设定为继电器额定电压的 55%), 从而使直流系统在一定程度上达到安全运行条件^[11]。

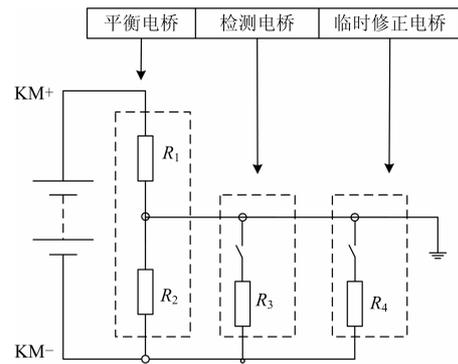


图 7 临时修正电桥电路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of temporary fixed bridge

临时修正电桥的实施, 需要获取的信息量如下。

- U_- : 直流系统负极对地电压;
- U_+ : 直流系统正极对地电压;
- R_- : 直流系统负极对地绝缘电阻;
- R_+ : 直流系统正极对地绝缘电阻;
- R : 直流绝缘监测装置平衡电桥电阻。

临时修正电桥的实施步骤如下。

1) 采集直流系统正极对地电压 U_+ 和负极对地电压 U_- , 设

$$K = \frac{U_-}{U_+}$$

当 K 大于某定值或小于某定值时, 或 U_- 大于某定值时, 或 U_+ 小于某定值时, 启动临时修正电桥。

2) 当正极对地绝缘下降较负极对地绝缘下降严重时, 向负极投入电阻进行修正, 补偿电阻的阻值 R_b 按下式计算。

$$R_{b-} = \frac{K_b \cdot R_+ \cdot R_-}{R \cdot R_- - K_b \cdot R_+ \cdot R_- + (1 - K_b) \cdot R_+ \cdot R_-}$$

其中, K_b 为补偿后负极对地电压与正极对地电压的比值。

此处, 希望正极对地电压和负极对地电压相等, 即 $K_b=1$, 则上式可简化为

$$R_{b-} = \frac{R_+ \cdot R_-}{R_- - R_+}$$

3 安全型直流绝缘监测系统

基于上述的安全性措施, 北京人民电器厂有限公司设计开发了 GZ1 直流绝缘监测系统, 该系统由 GZ1J 直流绝缘监测装置和 GZ1L 直流漏电流传感器构成, 主要用于标称电压 DC220 V、DC110 V 的电力直流不接地系统, 作直流系统的母线过电压/欠电压、对地绝缘下降、交流窜入直流、两组直流互窜等故障监测用, 可广泛应用于电力系统变电站、发电厂以及煤矿、钢铁、冶金、化工等大型厂矿企业的直流不接地供电系统。GZ1 直流绝缘监测系统连接图如图 8。

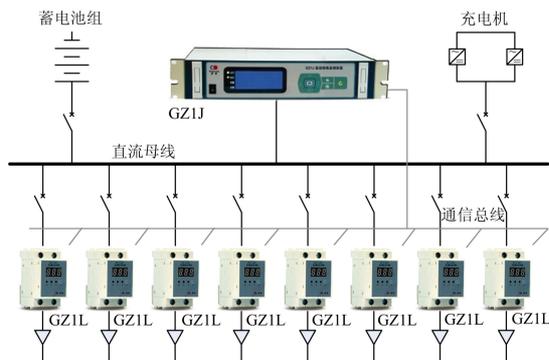


图 8 GZ1 直流绝缘监测系统连接图

Fig. 8 System connect diagram of GZ1 DC insulation monitoring system

GZ1 直流绝缘监测系统具有如下特点:

1) 高安全性

基于系统电容分析和控制负极对地电压的安全性措施, 能够有效防止直流系统一点接地引起的继电保护误动问题。

2) 全面监控

除了具有直流绝缘监测、接地选线、母线过电压/欠电压监控功能外, 还具有交流窜入直流故障监

控、两套直流互窜监控功能, 适用于直流不接地系统各种故障的监控。

3) 简单易用

简单的接口设计, 易于安装和配置, 给予用户最直观的应用体验: 直流漏电流传感器与绝缘监测装置采用数字信号传输, 系统接线简洁; 直流漏电流传感器可以与直流断路器一体化安装, 也可以独立安装, 方便维护与管理; 直流漏电流传感器具有就地显示功能, 可以在接地选线结束后显示故障信息, 方便维护人员进行故障定位与排查。

4) 高可靠性

先进的设计、严谨的工艺、苛刻的检测, 打造出产品的高可靠性, 确保产品长期安全可靠运行。

4 结语

本文通过对直流系统一点接地导致的继电保护误动的机理分析, 提出基于系统电容分析和控制负极对地电压的安全性设计措施, 对相应的算法进行了描述, 并依据该措施设计出能够防止一点接地导致继电保护误动的高安全型的直流绝缘监测系统。

参考文献

[1] 李秉宇, 陈晓东. 河北南网绝缘监测装置的性能研究及校验方法的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 231-237.
LI Bing-yu, CHEN Xiao-dong. Research on the performance of insulation detection system and improvement of the calibration method in Hebei south power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 231-237.

[2] 沈梦甜, 谢智浩, 尹星光. 直流绝缘监测仪现场校验结果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 226-228.
SHEN Meng-tian, XIE Zhi-hao, YIN Xing-guang. Analysis of field calibration result of DC insulation monitor apparatus[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 226-228.

[3] 孙鸣, 马娟. 直流系统微机型绝缘监测装置电阻选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 128-131.
SUN Ming, MA Juan. The resistor selection of microcomputer-based insulation monitor for DC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 128-131.

[4] 王德志. 一起 330 kV 断路器偷跳事件的分析及改进[J].

- 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 119-120.
- WANG De-zhi. Analysis and improvement of a 330 kV circuit breaker's non-fault trip[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 119-120.
- [5] 赵兵. 二次直流系统一点接地故障理论分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 138-146.
- ZHAO Bing. Theoretical analysis of one point earthing in secondary DC system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 138-146.
- [6] 樊树根. 直流电源系统两点或一点接地引起保护出口继电器误动的分析[J]. 直流电源技术, 2011, 1(1): 64-67.
- FAN Shu-gen. Protective relay false trip because of one point or two point earthing in DC power system[J]. DC Power Technology, 2011, 1(1): 64-67.
- [7] 任东红, 樊树根. 直流电源系统接地引起保护误动作的分析及对策[J]. 供用电, 2011, 28(3): 44-48.
- REN Dong-hong, FAN Shu-gen. Analysis and measures for protection misoperation caused by grounding of DC power supply system[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(3): 44-48.
- [8] 北京人民电器厂有限公司. 一种用于直流绝缘监测装置的电桥及其运行方法: 中国, 201310039435.2[P]. 2013-01-31.
- Beijing People's Electric Plant CO., LTD. A type of electric bridge and operation method used in DC insulation monitoring device: China, 201310039435.2[P]. 2013-01-31.
- [9] 国家电力调度中心. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)及编制说明[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- National Electric Power Dispatching and Communication Center. China State Grid Corporation important eighteen anti-accident measures (revised edition) and preparation instructions[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [10] 北京人民电器厂有限公司. 可克服继电保护误动的直流绝缘监测系统: 中国, 201020650028.7[P]. 2010-12-03.
- Beijing People's Electric Plant CO., LTD. DC insulation monitoring system which can prevent protective relay false trip: China, 201020650028.7[P]. 2010-12-03.
- [11] 首瑞(北京)投资管理集团有限公司. 可补偿正负极对地电压偏移的直流绝缘监测装置: 中国, 201120377456.1[P]. 2011-09-30.
- Soar (Beijing) Investment Management Group CO., LTD. DC insulation monitoring device which can adjust positive and negative voltage offset: China, 201120377456.1[P]. 2011-09-30.

收稿日期: 2013-07-04; 修回日期: 2013-09-26

作者简介:

南寅(1962-), 男, 本科, 主要研究方向为低压电器设计和电力系统自动化装置设计;

王雪楠(1981-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化装置设计; E-mail: QQ3385854@126.com

樊树根(1948-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为直流电源技术及其应用。