

变电站直流接地巡检的选线校核机制研究

雷兴¹, 徐楠¹, 潘学萍², 戴春怡¹, 许昭德³, 董志赞¹

(1. 国网上海市电力公司检修公司, 上海 201204; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098;
3. 深圳奥特迅电力设备股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 变电站直流接地巡检装置选线时, 会受巡检装置互感器零漂、互感器剩磁、互感器稳定性等因素影响而发生误选或漏选, 影响故障排查。在推导平衡电桥法和不平衡电桥法计算接地电阻的基础上, 分析接地故障误选、漏选的原因及两种电桥法的局限性。根据故障前后电流电压的状态量、接地电阻的计算量及三者的电气联系进行故障特征辨识, 提出基于逻辑事件驱动的自动巡检模式来辨识零漂支路和接地支路, 并采用归谬法对接地电阻计算过程进行校核。该巡检模式及校核方法经现场实际数据验证正确、实用, 不仅能提高直流查找效率, 还为直流系统的状态检修提供了有效信息。

关键词: 直流接地; 接地电阻; 状态监测; 校核; 零漂; 采样跳变

Research on line selection checking mechanism of substation DC ground fault patrol

LEI Xing¹, XU Nan¹, PAN Xueping², DAI Chunyi¹, XU Zhaode³, DONG Zhiyun¹

(1. Maintenance Company of Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201204, China;
2. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Shenzhen Auto Motion Electric Power Equipment Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: When the grounding inspection device of substation DC system selects fault branch, the existences of zero point drift, transformer remanence, and transformer stability may impact the efficiency of grounding troubleshooting, which will lead to wrong selection or missed selection. The calculation of grounding resistance based on balanced bridge and unbalanced bridge method is derived, and the reasons of wrong selection or missed selection are analyzed. According to the logical relationship between state variables such as voltage, current and calculated value such as grounding resistance before and after the fault, the characteristics of the faults are identified based on circuit schematic. Automatic inspection mode based on logic event driven is proposed to identify branch with zero drift and grounding branch, and the calculation process of grounding resistance is checked based on absurdum. The real data validate this inspection mode and check method, which can not only improve the accuracy of DC lookup, but also provide useful information for status maintenance.

Key words: direct current grounding; grounding resistance; condition monitoring; verification; zero drift; sampling jump

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)20-0076-07

0 引言

直流系统是变电站内三大隐蔽工程之一, 其故障易引起继电保护不正确动作^[1-2], 因此必须对直流系统进行在线监视, 实现快速故障诊断和状态评估^[3-4]。

支路选线方法主要分为低频信号注入法^[5-6]和直流电桥法^[7]。低频信号注入法会因系统分布电容

过大而误选, 且环网方式时会造成支路存在谐波环流^[8], 目前主要用于便携式接地电阻测试仪。

直流电桥法不受分布电容影响, 检测灵敏度较高, 被微机绝缘检测仪广泛采用^[9]。但缺乏对“多支路绝缘下降信息”的校核, 无法排除干扰信息, 判别时可能误选或漏选。文献[10]举例说明了互感器零漂造成的误选, 但该文未提出辨识以及消除方法。

为此本文分析了误选和漏选的原因和特征, 通过特征辨识, 提出了基于逻辑事件驱动的自动巡检模式, 实现动态调用不平衡电桥法来辨识零

漂支路,相对于定时调用不平衡电桥法的自动巡检模式能更快速诊断并排除故障;分析了不平衡电桥法失效情况及其数学解释,提出了基于归谬法的校核方法。

1 接地电阻的计算

1.1 母线接地电阻

母线接地电阻检测原理采用电桥法,其原理如图1所示。其中 U_p 、 U_n 为正母线和负母线电压; R_{b1} 、 R_{b2} 是相同数值的标准电阻,他们分别固定在直流母线两端,称为平衡桥电阻; R_{L1} 、 R_{L2} 是相同数值的标准电阻,通过继电器投切到直流母线上,称为测试桥电阻; R_x 、 R_y 为待测接地电阻值,图中接地点电压为零。平衡桥电阻和测试桥电阻数值的选取要考虑母线电阻的功率和漏电传感器的最大检测能力^[11]。

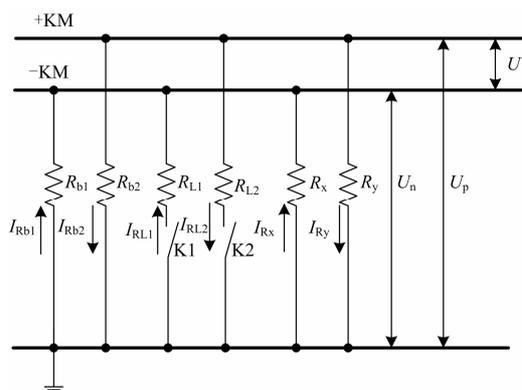


图1 母线接地电阻的不平衡电桥法检测原理
Fig. 1 Detection principle of bus grounding resistance based on unbalanced bridge

测量时通过切换开关K1、K2的接通和关断,根据测量得到的 U_n 和 U_p 来计算出直流母线对地绝缘电阻。

K1闭合时等效电路如图2。

根据图2可得:

$$U_{n1}/R_{b1} + U_{p1}/R_{b2} + U_{n1}/R_{L1} + U_{n1}/R_x + U_{p1}/R_y = 0 \quad (1)$$

K2闭合时等效电路如图3所示。

根据图3可得:

$$U_{n2}/R_{b1} + U_{p2}/R_{b2} + U_{p2}/R_{L2} + U_{n2}/R_x + U_{p2}/R_y = 0 \quad (2)$$

联合式(1)和式(2)可解得 R_x 和 R_y ,如下:

$$R_x = (U_{n1} \cdot U_{p2} - U_{n2} \cdot U_{p1}) / (A \cdot U_{p2} - B \cdot U_{p1}) \quad (3)$$

$$R_y = (U_{n2} \cdot U_{p1} - U_{n1} \cdot U_{p2}) / (A \cdot U_{n2} - B \cdot U_{n1}) \quad (4)$$

式中:

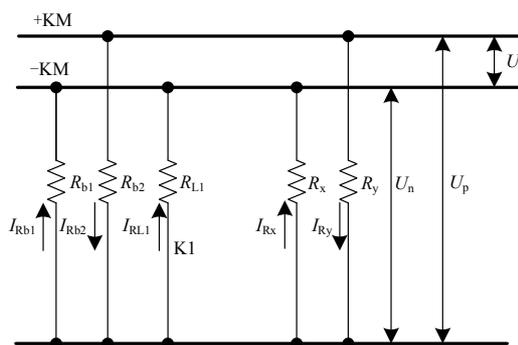


图2 K1闭合母线绝缘电阻测量电路
Fig. 2 Measurement circuit of bus insulation resistance with closed K1

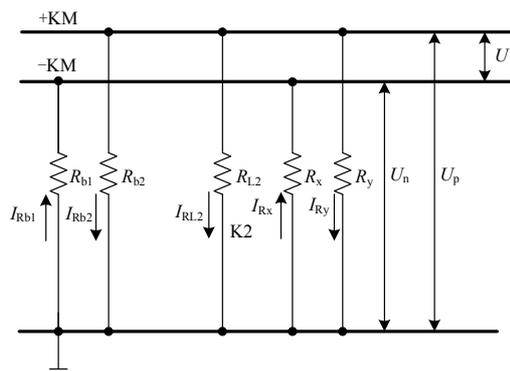


图3 K2闭合母线绝缘电阻测量电路
Fig. 3 Measurement circuit of bus insulation resistance with closed K2

$$A = -(U_{n1}/R_{b1} + U_{p1}/R_{b2} + U_{n1}/R_{L1})$$

$$B = -(U_{n2}/R_{b1} + U_{p2}/R_{b2} + U_{p2}/R_{L2})$$

从式(3)和式(4)可知, R_x 和 R_y 只受测量电压 U_{n1} 、 U_{n2} 、 U_{p1} 、 U_{p2} 和固定电阻 R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_{L1} 、 R_{L2} 的影响。

1.2 支路接地电阻

直流电桥法利用母线正极对地电压、母线负极对地电压、支路直流漏电流计算支路正负极对地绝缘接地电阻值,再结合支路绝缘报警整定值进行选线。

直流支路检测原理如图4所示,其中 I_1 、 I_2 对应1#支路和2#支路总漏电流。

1.2.1 平衡电桥法

直流平衡电桥法计算支路绝缘电阻时,首先判断支路总漏电流的方向,定位支路正极或负极绝缘降低,然后与正母线对地电压或负母线对地电压计算接地电阻值。结合图1、图4可得出单支路接地基于平衡电桥法的等效电路如图5所示,其中 I_0 为

支路总漏电电流，图中所示方向为参考方向。

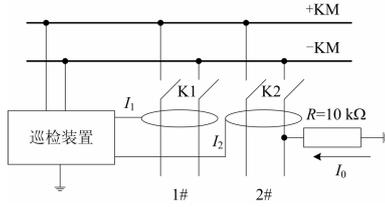


图 4 支路绝缘电阻测量电路

Fig. 4 Measurement circuit of branch insulation resistance

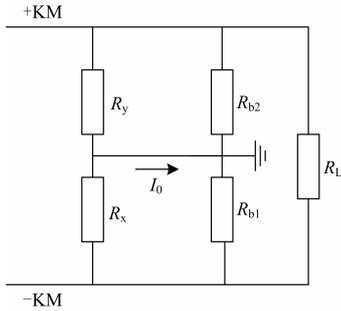


图 5 单支路接地等效电路图(平衡电桥)

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of single grounding branch based on balanced bridge method

I_0 为负：正母线对地电阻值为无穷大
负母线对地电阻值 $R_n = U_n / I_0$ (5)

I_0 为正：正母线对地电阻值 $R_p = U_p / I_0$ (6)
负母线对地电阻值为无穷大

1.2.2 不平衡电桥法

直流不平衡电桥法计算支路绝缘电阻时，同样使用正母线对地电压、负母线对地电压、支路直流总漏电电流测量计算，但需要通过投切测试桥电阻改变正母线对地电压、负母线对地电压和支路总漏电电流。

闭合 K2(投入 R_{L2})时，支路等效电路如图 6(a)所示，此时 U_p 、 U_n 、 I_0 分别取值 U_{p1} 、 U_{n1} 、 I_1 。闭合 K1(投入 R_{L1})时，支路等效电路如图 6(b)所示，此时 U_p 、 U_n 、 I_0 分别取值 U_{p2} 、 U_{n2} 、 I_2 。电流流出节点 A 为正方向， R_y 和 R_x 分别为某支路的正母线对地绝缘电阻值和负母线对地绝缘电阻值。

根据图 6(a)可得：

$$I_1 - U_{n1}/R_x - U_{p1}/R_y = 0 \quad (7)$$

根据图 6(b)可得：

$$I_2 - U_{n2}/R_x - U_{p2}/R_y = 0 \quad (8)$$

联合式(7)和式(8)求解得：

$$R_x = (U_{p1}U_{n2} - U_{p2}U_{n1}) / (U_{p1}I_2 - U_{p2}I_1) \quad (9)$$

$$R_y = (U_{p2}U_{n1} - U_{p1}U_{n2}) / (U_{n1}I_2 - U_{n2}I_1) \quad (10)$$

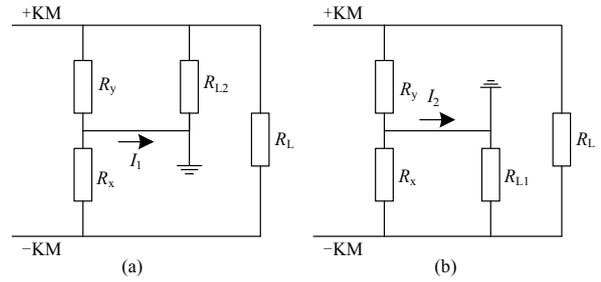


图 6 单支路接地等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram of single grounding branch

2 接地误选漏选原因分析

漏电电流采用霍尔电流传感器，具有非接触测量、精度高、线性度好等优点，在绝缘在线监测中具有独特的优势。但其 A/D 转换器存在的偏移误差及基准电压源不稳定可能会导致电流零点偏移和采样跳变，从而影响接地电阻的计算。

2.1 零漂

直流漏电流传感器测量对象信号微小，容易受外界干扰(如地磁干扰，互感器放置不同，零点漂移也不同)；直流漏电流传感器磁线圈剩磁；直流漏电流传感器检测电路如运放等的漂移(温漂、时漂等)均为直流，长时间运行后，使电流传感器存在零漂问题，所以根据式(5)、式(6)计算支路绝缘接地电阻值容易产生误选支路，甚至会发生漏选。

采用平衡电桥法时，误选、漏选包括四种类型：

1) 零漂支路并未发生接地故障，由于其他支路发生接地故障导致母线电压下降从而误选。

2) 零漂支路发生单极绝缘降低时，零漂电流方向和故障漏电电流方向相反时，可能漏选；方向相同时，则可能误选。

3) 零漂支路相继发生两极绝缘降低时，可能漏选。

4) 零漂支路同时发生两极绝缘降低时，无法判断，一定漏选。

2.2 采样跳变

霍尔电流传感器通过采样电阻上的电压反映出补偿线圈的电流，而被测电流与补偿线圈电流成正比^[12]。当 A/D 转换器的电压源不稳定时，电流采样则会发生跳变。

跳变可能由供电不稳、纹波大、CT 线圈老化剩磁、采样的振荡电阻不稳定等原因造成。出厂时 CT 可能有跳变，但是本身绝缘电阻高，没有体现出来。当线路长时间运行，绝缘降低快至报警值时，若此时发生较大跳变，则会误选。

跳变的波动，每一个 CT 都不一样，一般为 0~1 mA

之间,大部分好的 CT 都在 0.3 mA 以内。

当出现 CT 供电问题时,一般会出现多个误报,需要更换 CT 供电电源。还可重新对 CT 校准,对 CT 线圈通一个正 30 mA 和负 30 mA 的电流,可以达到消磁的效果。若还不行,则只能更换 CT。

2.3 平衡电桥法和不平衡电桥法的比较

平衡电桥法查找直流接地快速,但存在动作死区。当正母和负母对地绝缘同等降低时,即图 5 中 R_x 和 R_y 相等,不能检测到漏电电流,因此无法查找出故障支路。

不平衡电桥法不存在死区问题,但为了探测正负极同时接地,需不断地接入单侧探测接地电阻,实际上等效于增加了一种人为的扰动,导致正负母线对地电压不断变化,使运行和检修人员无法依据传统手动测试电压方式判断母线状况,同时查找速度比较慢。

平衡电桥和不平衡电桥在处理零漂和采样跳变方面:

1) 直流漏电电流传感器零漂对计算支路接地电阻的影响分析。针对 1.2.1 节的算例,当支路 1#和 2#存在零漂电流时,其支路接地电阻计算如下。

1#支路零漂电流为 2 mA,则 1#支路漏电电流 $I_{10}=2$ mA;根据式(6)计算得 $R_{y1}=176/2=88$ k Ω 。

1#支路零漂电流为-2 mA,则 1#支路漏电电流 $I_{10}=-2$ mA;根据式(5)计算得 $R_{x1}=(-44)/(-2)=22$ k Ω 。

2#支路零漂电流为-2 mA,则 2#支路漏电电流 $I_{20}=(-2)+(-4.4)=-6.4$ mA,根据式(5)计算得 $R_{x2}=(-44)/(-6.4)=6.875$ k Ω 。

如上 1#支路所示,零漂由于存在正方向偏移和负方向偏移,因此平衡电桥法检测接地电阻时可能会误选,也可能会漏选。对于故障前绝缘良好的零漂支路发生单极接地时,平衡电桥法可以通过故障后漏电电流减除故障前漏电电流(即零漂电流)来消除零漂影响。

零漂支路单极接地前绝缘无论是否良好,不平衡电桥法都可通过差分量(I_1-I_2)消除零漂影响。

2) 直流漏电电流传感器中的磁线圈剩磁、信号干扰、采样电路不稳定都可能导致测量电流跳变。例如某电站长年运行下某支路直流漏电电流传感器检测实际直流漏电流有 0.5 mA 的跳变,同时支路绝缘电阻还没有达到报警值(50 k Ω)。以图 4 定为 220 V 系统为例分析如下:

1#支路负母线对地绝缘降低为 60 k Ω ,此时 U_p 、 U_n 分别为 180 V、-40 V, I_1 可能为-0.667 mA、-1.167 mA;即负母线对地绝缘电阻值对应为 60 k Ω 和 34 k Ω ,而 2#支路负母线对地有一个 10 k Ω 电阻,

直接报警,可能同时带出 1#支路的绝缘降低。

相同的条件,使用不平衡电桥推算,由于 1#支路直流漏电流传感器的采样值跳变而误选:多选出 1#支路。

零漂是稳定的,而跳变是随机的,若刚好采样在跳变期,则会发生误选,所以采样跳变无法通过不平衡电桥法的差分量来解决。可用统计分析法进行排查,在一天多次记录某支路绝缘接地电阻值的报警,然后使用统计法即可判断出来。

3 选线校核机制

3.1 特征分析

在计算接地故障后进行选线时,不仅考虑接地电阻的绝对值,还要考虑故障前后电流电压等状态量的相对变化量——电压电流变化方向和变化大小符合真实接地。即根据电压大小和漏电电流大小的连续变化,分析电阻与电压、电流的关联逻辑来校核。通过电路推导,可得出如下特征:

1) 当某支路存在零漂电流时,即故障前零漂电流为漏电电流,故障前后漏电电流不变,其接地电阻和电压成线性变化,因为电压降低可能导致接地电阻变小而满足接地电阻门槛值,但应排除该支路为故障支路。

2) 绝缘较低的支路,存在较小漏电电流,其他支路接地时,电压降低,但相应本支路电流也减小,不会误选。

3) 没有零漂的支路发生接地故障时,漏电电流增大,对地电压降低,接地电阻变小。

4) 当某支路存在漏电电流时,故障前后漏电电流单调递增,则零漂电流方向与支路绝缘降低后出现漏电电流的方向相同,存在误选的可能性。

5) 当某支路存在漏电电流时,故障前后漏电电流非单调递增,可能是故障前的零漂电流方向与故障后由于绝缘降低引起漏电电流的方向相反,或是故障前该支路一极绝缘降低引起的漏电电流方向与故障后另一极发生接地引起的漏电电流方向相反。为准确计算接地电阻,需要做差流,避免漏选。

6) 对于正负母线绝缘电阻相继下降的情况,在目前的时间辨识度下,是能够区分两极接地的先后顺序的。平衡电桥法会先报某一极接地,然后又不报故障接地。此时就需要切换至不平衡电桥法来查找接地电阻,避免漏选。

7) 对于正负母线绝缘电阻同时下降,平衡电桥法没有任何反应。只能通过定时驱动不平衡电桥法来排查接地故障。

正常情况下,是无法区分 1)和 2)的较小漏电流

流是因为零漂还是因为绝缘降低导致的。所以不能根据支路存在漏电电流来判断该支路发生零漂。

零漂支路发生接地故障时,为了准确计算接地电阻,需要在测量漏电电流中减除零漂电流 I_{zd} 。此时式(7)、式(8)分别变为式(11)、式(12):

$$(I_1 - I_{zd}) - U_{n1}/R_x - U_{p1}/R_y = 0 \quad (11)$$

$$(I_2 - I_{zd}) - U_{n2}/R_x - U_{p2}/R_y = 0 \quad (12)$$

在式(11)、式(12)中存在 R_x 、 R_y 和 I_{zd} 三个未知量,若只发生单极接地时(R_x 、 R_y 中有一个为无穷大),则式(11)、式(12)为两个方程求解两个未知量,可解。若发生两极接地,则是两个方程求解 3 个未知量,无法准确求解,需要在线监测 CT 零漂电流值来进行求解。因此,直流系统绝缘趋势分析不仅包括接地电阻,还应包括零漂电流。

3.2 基于事件驱动的自动模式

目前采取的自动模式,是基于时间序列驱动,即定期的由平衡电桥法(平衡模式)切换至不平衡电桥法(不平衡模式)进行短时检测,一定程度上兼顾平衡电桥法的快速性和不平衡电桥法的容错性。

本文提出基于逻辑事件驱动的自动模式,是在正常运行条件下采用平衡电桥法,当发生接地故障后,通过动态分析故障前后测量信息的变化及诊断推理,辨识出可能误选情况;当平衡电桥法可能导致漏选或误选时,则动态调用不平衡电桥法。该模式根据实际需求动态调用不平衡电桥法,更有效兼顾平衡电桥的快速性和不平衡电桥的容错性,提高了查找速度和容错水平。

基于事件驱动的自动模式的校核逻辑流程图如图 7 所示。

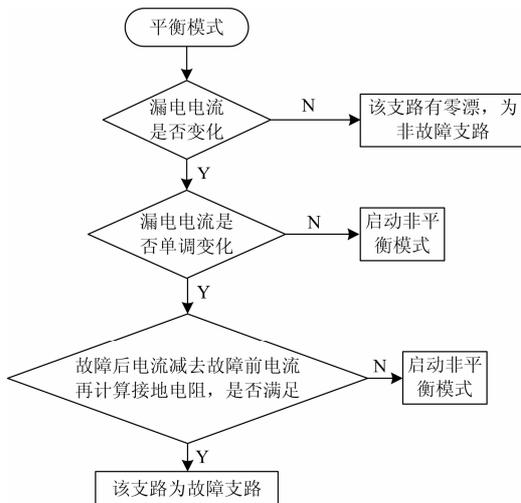


图 7 基于事件驱动的自动模式

Fig. 7 Automatic mode based on event driven

3.3 基于归谬法校核

从数学上分析电桥法的容错能力:

1) 平衡电桥法相当于根据 1 个方程(式(5)或式(6)),已知两个变量求解 1 个未知量。当两个已知量只要有 1 个出错,则求解结果错误,根据单一时间断面的数据无法容错。

2) 不平衡电桥法相当于根据两个方程(式(7)和式(8)),已知 6 个已知量,求解两个未知量。当其中 1 个未知量为无穷大(单极接地时),相当于减少了 1 个未知量;此时若出现零漂,相当于增加 1 个新的未知量,此时又变成求解两个未知量,还是有解的。但若出现两极接地,同时又有零漂时,相当于两个方程求解 3 个未知量,不平衡电桥法无解。

采用归谬法进行校核,即根据平衡电桥法求得的 R_x 、 R_y 反求 U_p 、 U_n 。首先假定所有支路接地电阻计算值为真,然后由计算出的接地电阻参与多接地支路等效计算 U_p 、 U_n 。若计算出的 U_p 、 U_n 和测量的 U_p 、 U_n 不同,则说明平衡电桥法未正确处理零漂电流。不平衡电桥法类似。

支路 i 正母负母对地电阻分别为 R_{yi} 、 R_{xi} , i 从 1 到 n ,其等效电路如图 8。

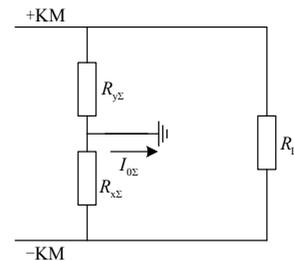


图 8 多接地支路等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit diagram of multiple branch grounding

其中:

$$\text{负母对地总电阻 } R_{x\Sigma} = R_{x1} // R_{x2} \dots R_{xn} // R_{b1}$$

$$\text{正母对地总电阻 } R_{y\Sigma} = R_{y1} // R_{y2} \dots R_{yn} // R_{b2}$$

根据图 8 可以得到:

$$U_p = U \cdot R_{y\Sigma} / (R_{x\Sigma} + R_{y\Sigma}) \quad (13)$$

$$U_n = -U \cdot R_{x\Sigma} / (R_{x\Sigma} + R_{y\Sigma}) \quad (14)$$

从式(13)、式(14)可知,当某个支路接地电阻计算错误,将导致计算的母线电压与实测的母线电压不同,说明支路存在电桥法无法准确计算的特殊情况。采用归谬法可对上述特殊情况起到告警作用。

4 算例分析

对上海某变电站 2006 年建成运行中的直流 220 V 系统监测分析(实际电压 243.5 V),使用微机

绝缘监测仪 WJY3000 A, 直流系统分出 48 路馈出回路。选出 4 路支路进行分析, 选择支路分别为:

1#支路直流采样回路正常, 无零漂, 采样结果稳定性好, 绝缘性好;

4#支路直流采样回路正常, 无零漂, 采样结果稳定性好, 负母线绝缘电阻值降低;

17#支路直流采样回路正常, 有零漂, 采样结果稳定性好, 负母线绝缘电阻值降低;

33#支路直流采样回路正常, 无零漂, 采样结果稳定性跳变大, 负母线绝缘电阻值降低。

采用选线校核机制, 对现场系统进行数据记录如表 1~表 5。(注: R_{Bp} 和 R_{Bn} 分别为平衡桥法计算正对地和负对地电阻值, R_{Np} 和 R_{Nn} 分别为不平衡桥法计算正对地和负对地电阻值, 单位 $k\Omega$)

表 1 2014 年 6 月 10 日记录数据

Table 1 Record data in June 10, 2014

支路编号	1#	4#	17#	33#
U_p			122.1	
U_n			-121.4	
I_0	0.05	1.83	1.15	-1.95
R_{Bp}	>200	66.7	106.2	-
R_{Bn}	-	-	-	62.3
R_{Np}	-	68.5	72.2	52.8
R_{Nn}	-	>200	>200	127.2

表 2 2014 年 7 月 11 日记录数据

Table 2 Record data in July 11, 2014

支路编号	1#	4#	17#	33#
U_p			121.9	
U_n			-121.6	
I_0	0.06	1.85	1.21	-2.23
R_{Bp}	>200	65.9	100.7	-
R_{Bn}	-	-	-	54.5
R_{Np}	-	67.6	68.3	57.9
R_{Nn}	-	>200	>200	157.1

表 3 2014 年 8 月 10 日记录数据

Table 3 Record data in August 10, 2014

支路编号	1#	4#	17#	33#
U_p			122.0	
U_n			-121.5	
I_0	0.04	1.79	1.17	-2.03
R_{Bp}	>200	68.2	104.3	-
R_{Bn}	-	-	-	59.9
R_{Np}	-	69.1	71.4	57.3
R_{Nn}	-	>200	>200	177.4

表 4 2014 年 9 月 10 日记录数据(定检试验 1#负接 10 K)

Table 4 Record data in September 10, 2014

支路编号	1#	4#	17#	33#
U_p			178.6	
U_n			-64.9	
I_0	-6.36	2.85	1.79	-1.42
R_{Bp}	-	62.7	99.8	-
R_{Bn}	10.2	-	-	45.8
R_{Np}	10.3	63.9	69.8	47.3
R_{Nn}	>200	>200	>200	187.5

表 5 2014 年 9 月 10 日记录数据 (定检试验 1#负母线直接接地实验)

Table 5 Record data in September 10, 2014

支路编号	1#	4#	17#	33#
U_p			243.1	
U_n			-0.4	
I_0	-10.14	3.71	2.40	-0.37
R_{Bp}	-	65.6	101.2	-
R_{Bn}	0.04	-	-	1.3
R_{Np}	0.03	64.7	70.5	1.8
R_{Nn}	>200	>200	>200	110.7

通过表 1~表 5 实验数据分析, 表 4 数据选线为 1#和 33#, 由于 33#的直流传感器采样不稳定造成多选; 表 5 与表 4 有同样的结果。

使用选线校核机制结合表 1~表 5 的数据, 由于 4#、17#、33#支路已经存在绝缘降低, 使用数学统计算法分析变化趋势, 变化率大的为优先提示信息。所以对表 4 提示 1#优先排查的支路; 而同样分析表 5, 1#支路也是优先排查的支路。而基于 3.1 节的校核方法对故障前后的数据分析和逻辑推导, 可分析出 CT 零漂大的直流传感器 17#。基于 3.2 节的校核方法对故障后的数据分析和推导, 可挑选出 33#支路存在采样跳变。校核完成后, 形成相应的校核报告, 告知运维人员 17#存在零漂, 33#存在采样跳变。

5 结论

本文针对变电站直流系统接地故障在线诊断的巡检模式和校核机制进行研究, 提出了基于逻辑事件驱动的自动选线模式, 实现动态调用不平衡电桥法, 保证在绝大多数情况下利用平衡电桥法快速诊断, 在少数需要容错的情况下才调用不平衡电桥法进行诊断, 兼顾了平衡电桥法的快速性和不平衡电桥法的容错能力。当不平衡电桥法失效时, 基于归缪法的校核机制能够发现并告警。

诊断过程中求取的接地电阻可形成历史曲线,

方便监测二次回路绝缘的变化趋势并预警；求取的零漂电流大小为 CT 的状态检修提供了有效数据。

参考文献

[1] 南寅, 王雪楠, 樊树根, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 134-139.
NAN Yin, WANG Xuenan, FAN Shugen, et al. A safety DC insulation monitoring system which can prevent protective relay misoperation because of one point earthing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 134-139.

[2] 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.

[3] 戴春怡. 交直流电源与测量表计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[4] 张毅, 张泉, 李永丽. 直流系统接地检测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 27-30.
ZHANG Yi, ZHANG Quan, LI Yongli. Ground fault detection for DC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(1): 27-30.

[5] 季涛, 谭思圆, 徐丙垠, 等. 基于波形分析的直流系统接地故障检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 69-72.
JI Tao, TAN Siyuan, XU Bingyin, et al. New method based on waveform analysis to detect earth fault in DC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 69-72.

[6] 王洪涛, 李天云, 刘辉军. 基于二维线性跟踪器的二次系统直流接地故障检测新方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 204-208.
WANG Hongtao, LI Tianyun, LIU Huijun. New method to detect DC circuit grounding fault in secondary systems based on linear tracker[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 204-208.

[7] 向小民, 胡翔勇. 直流系统绝缘监察装置[J]. 中国电力, 1999, 32(8): 38-39, 50.
XIANG Xiaomin, HU Xiangyong. Insulation monitoring on DC system[J]. Electric Power, 1999, 32(8): 38-39, 50.

[8] 李冬辉, 史临潼. 发电厂和变电站直流系统接地故障检测总体方案[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 56-59.
LI Donghui, SHI Lintong. An overall scheme to detect grounding faults in DC system of power plants and substations[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 56-59.

[9] 费万民, 张艳莉, 吕征宇, 等. 基于新原理的直流接地故障检测仪[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 51-53.
FEI Wanmin, ZHANG Yanli, LÜ Zhengyu, et al. New principle based apparatus for measuring insulating resistance between ground and DC power supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 51-53.

[10] 尹星光, 何铭宁, 徐玉凤, 等. 直流感地巡检装置误、漏选线问题分析[J]. 继电器, 2008, 36(10): 83-85.
YIN Xingguang, HE Mingning, XU Yufeng, et al. Analysis on the wrongly or missed line selection with DC ground fault patrol device[J]. Relay, 2008, 36(10): 83-85.

[11] 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.

[12] 张维娜, 杜忠. 霍尔电流传感器在绝缘在线监测中的应用[J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 30-32.
ZHANG Weina, DU Zhong. The application of Hall current sensor in on-line monitoring measurement of insulation[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(2): 30-32.

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-01-29

作者简介:

雷 兴(1980-), 男, 博士, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制, 继电保护自动化; E-mail: leixing993@163.com

徐 楠(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;

潘学萍(1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 葛艳娜)