

电力系统交流电窜入直流故障监测与定位

对电力系统直流电源中出现的交流电窜入直流的故障原因进行汇总和分析,并对交流电窜入直流的检测技术和定位技术进行了归纳,依据这些方法设计了具有交流电窜入直流故障监测和定位功能的直流绝缘监测装置。经测试,该装置能够准确检测到交流电窜入直流的故障,并能准确选出故障支路,满足《国家电网十八项电网重大反事故措施》关于直流绝缘监测装置的功能要求。

王 洪¹ 黄 彬² 林雄武¹ 王雪楠³ / 1. 国网冀北电力公司张家口供电公司
2. 国网冀北电力公司 3. 北京人民电器厂有限公司



王 洪/高级工程师

在电力系统中,直流电源的可靠运行对系统的安全稳定起着十分重要的作用,交、直流电缆在长期运行中的磨损,交、直流装置元器件的损坏,或人为操作的不慎,都会导致交流电窜入直流系统。近些年在发电厂和变电站发生的事故表明,交流电窜入直流系统后,容易导致继电保护误动作或断路器误跳闸^[1-2]。文献[3]介绍了西柏坡发电厂220 kV升压站中间开关跳闸的事故概况,分析了交流电窜入直流回路后对继电保护造成的影响,并提出了方法措施;文献[4]介绍了莱芜电厂由于电弧引起的工频交流窜入直流控制回路造成厂用备用电源开关误合闸的故障情况,通过试验、检查和分析找到了问题的原因,并采取相应的处理和防范措施;文献[5]对两个电厂由于交流窜入直流系统引起的事故现象进行了分析和描述。

原华北电网“5.28”交流电窜入直流系统引发的重大电网事故以及类似事

故的频频发生引起了电力相关部门的注意,2005年国家电网公司印发的《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》第8.4.8提出:“应加强对直流系统的管理,防止直流系统故障,特别要重点防止交流电混入直流回路,造成电网事故”,明确地将防止交流电窜入直流系统作为直流系统管理的重要内容^[6];2011年国家电网公司印发的《国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)》第5.1.1.18.3提出:“新建或改造变电站中的直流系统绝缘监测装置应具备交流窜入直流故障的测记和报警功能。原有的直流系统绝缘检测装置应逐步进行改造,使其具备交流窜入直流故障的测记和报警功能”^[7]。

交流电窜入直流系统具有间歇性、隐蔽性等特点,事故发生后,往往带来较为严重的后果,所以对交流电窜入直流系统故障进行监测和定位十分必要。

交流电窜入直流系统故障原因

通过多起交流窜入直流系统故障的排查与分析,总结出引起交流电窜入直流系统故障有如下几种原因。

(1) 接线错误

文献[8]介绍了一起因交流电窜入直流回路导致500 kV母线保护误动作的事故。通过对事故的详细排查,在主变压器A相本体风冷控制箱回路,发现用于变压器本体保护的开入触头与用于冷却器油泵及风扇的控制触头接线反接,变压器本体保护以直流驱动,而冷却器油

关键词/Keywords

交流窜入检测·
交流窜入定位·
直流绝缘监测·
差分电压法·
双线圈传感器·

国家电网冀北电力有限公司2014科技项目
(52010713530V)。

泵和风扇以交流驱动，接线错误导致交流窜入直流，使保护误动作。

(2) 绝缘性能降低

2011年8月，延安朱家330 kV变电站两台主变压器高压侧的4台断路器跳闸。通过对事故原因的详细分析，发现因大雨导致断路器户外操作箱进水，从而使用户主变压器保护的直流系统绝缘性能降低，并通过水与温湿度控制器的交流电发生电气连接，加之中间继电器功率过小，使保护误动作。

(3) 分布电容较大

文献[3]介绍了西柏坡发电厂220 kV升压站开关跳闸的事故概况。通过分析认为，跳闸回路电缆较长导致对地分布电容较大，交流电通过分布电容耦合到直流跳闸回路，加之跳闸继电器动作功率较小，使继电器保护误动作。

文献[9]在理论分析基础上设计了试验方法，通过一系列试验分析了变电站交流窜入直流系统对断路器操作箱跳闸继电器的影响，并重点分析了控制电缆分布电容在继电器误动作方面的作用，同时提出了相应的解决措施。

交流电窜入直流故障的检测技术

检测交流电窜入直流的核心在于如何将交流电压值从叠加的故障电压中分解并进行测量。一般采用差分电压法和隔直电容法两种检测技术来实现检测目的。

1. 基于差分电压法的检测技术

为了将交流电压从叠加的故障电压中分离出来，可采用差分电压法。

设直流系统内可能窜入的交流电频率为 f ，电压采样时间间隔为 Δt ，则在一个周期内的采样点数为

$$n = \frac{1}{f\Delta t} \quad (1)$$

设在第一个周期内采集到的电压分别为 $u_1, u_2, \dots, u_n$ ；下一周期采集到的电压分别为 $u_{n+1}, u_{n+2}, \dots, u_{2n}$ 。采集到的各电压与上一个电压的差值表达式为

$$\begin{aligned} \Delta u_1 &= u_2 - u_1 \\ &\vdots \\ \Delta u_n &= u_{n+1} - u_n \\ &\vdots \\ \Delta u_{2n-1} &= u_{2n} - u_{2n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

在采集到 u_{n+1} 即采集 $n+1$ 个电压后，对计算得到的 $\Delta u_1, \dots, \Delta u_n$ 进行如下运算

$$U_{ac} = A \sqrt{\frac{\Delta u_1^2 + \dots + \Delta u_n^2}{n}} \quad (3)$$

式中， U_{ac} 为当前串入到直流系统的交流电有效值； A 为校正系数。

差分电压法实施原理如图1所示。设有至少一个电压采样调理电路接自直流母线正极KM+和大地之间，或接自直流母线负极KM-和大地之间，电压采样调理电路的输出接至A-D转换器，由A-D转换器将模拟信号转换为可被MCU识别的数字信号，再通过MCU进行计算和判断。一般在绝缘监测装置内部可以通过采集正极或负极平衡电阻两端的电压实现。

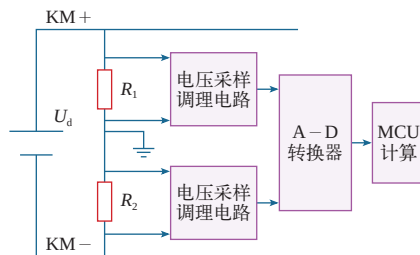


图1 差分电压法实施原理

2. 基于隔直电容的检测技术

由于电容具有“隔直通交”的作用，因此，也可以通过在直流系统正极或负极对大地之间设置一个含有电容的电路分离交流电压。

基于隔直电容的交流电检测技术原理框图如图2所示。图中， R_1, R_2 为设置在直流系统中的平衡电阻；直流母线负极和大地之间串联由电阻 R_3 、电容 C_1 和电阻 R_4 组成的交流信号提取电路。其中根据电压调制的要求，可设置 $R_3 < R_4$ ，以达到降压的目的，电压采样调理电路接自 R_3 两端，其输出接至A-D转换器，由A-D转换器将模拟信号转换为可被MCU识别的数字信号，再通过MCU进行计算和

判断。基于隔直电容的交流信号提取电路还可以接至直流母线正极和大地之间。

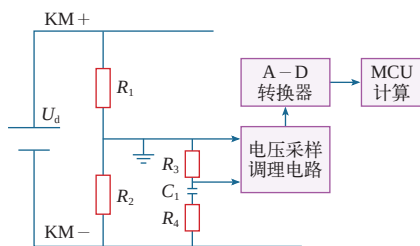


图2 基于隔直电容的交流电检测技术原理

对于交流电压的计算，一般通过取方均根值获得，其计算过程如下：

在采样周期 T 内采集 n 个点的电压值 $U_1, U_2, \dots, U_n$ ，则电压方均根值为

$$U = A \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}{n}} \quad (4)$$

式中， A 为校准用的常数。

交流电窜入直流故障支路的定位技术

交流电窜入直流系统后，交流电源能够通过窜入的支路和直流绝缘监测装置的平衡电桥接地点形成回路，因此，在交流电窜入的支路会流过交流电流。采用信号注入原理的直流绝缘监测装置，一般在各馈线支路上均装设有交流TA，因此，可以通过检测交流TA二次侧是否出现交流信号来实现交流电窜入直流系统支路的定位。然而，采用信号注入原理的直流绝缘监测装置通过向直流系统注入交流信号带来对保护自动装置误动作或拒动作的影响，国家电网公司在《站用交直流一体化电源系统技术规范》中已提出，“绝缘检测装置不宜对直流电源系统注入交流信号”；在2014年颁布的《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》中，进一步明确“不应使用交流低频注入方式的产品”，因此，电力系统的直流绝缘监测装置不采用信号注入法进行支路绝缘性能检测已成趋势。

为了在不采用信号注入原理的直流绝缘监测系统中进行交流电窜入直流系统故障的定位，本文提出以下两种方案。

1. 基于交流法的直接定位技术

本文提出一种新型的传感器，该传感器具有双线圈结构：其中线圈1由具有高磁导率特性的磁心和漆包线组成，用于感应直流漏电流信号；线圈2由普通的矽钢片和漆包线组成，用于感应交流电流。该传感器串接在需要监测的馈线支路中。

一般感应直流漏电流信号的线圈1要接至一个有源振荡电路，当回路中含有直流漏电流时，会打破交变磁通的平衡，使振荡电路输出的正负脉宽产生变化，通过检测正负脉宽的变化获取直流漏电流值，也就是磁平衡调制原理，通过检测漏电流来确定直流绝缘性能下降的支路；由于交流电可以通过电磁感应直接在二次侧体现，当某回路产生交流窜入故障后，交流电流必会流经该回路，通过采集感应交流电流线圈2的二次侧产生的交流信号来确定交流窜入的支路。

具有双线圈结构的传感器原理如图3所示。

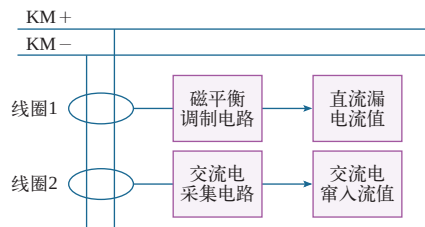


图3 具有双线圈结构的传感器原理

2. 基于直流法的间接定位技术

上述基于双线圈的传感器采用交流电流检测技术，通过交流线圈二次侧的感应信号进行交流电窜入直流系统支路定位，在原理上是直接的，并具有较高的准确性，但是该方案增加了硬件成本，同时增加了产品的不可靠度。本文提出一种基于直流法的间接定位技术，在不增加硬件成本的前提下，实现交流电窜入直流系统故障支路的间接定位。

基于直流法的间接定位技术的实现过程如下：

1) 检测直流母线正极对地电压 U_+ 、负极对地电压 U_- 和串入的交流电压 U_{ac} ，并进行判断，当 U_{ac} 大于设定值 U_{aca} 时，确定直流系统发生交流电串入故障。

2) 对此时的直流母线正极对地电压 U_+ 和负极

对地电压 U_- 进行比较,当 $U_- \leq \Delta U$ 时,判定交流电通过负极串入直流系统;当 $U_+ \leq \Delta U$ 时,判定交流电通过正极串入直流系统,上述 ΔU 为设定值。

3) 检测直流系统各支路的漏电流并进行排序,漏电流值最大的一条支路即为交流电串入的支路。

该方法的实现流程如图4所示。其利用的是交流电窜入直流导致的金属性接地现象。

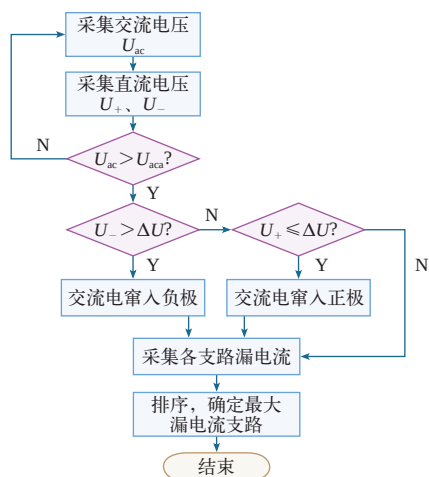


图4 间接定位法流程

设计、仿真与测试

1. 总体设计方案

《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》要求:“用于变电站直流电源系统的系统绝缘监测装置具备交流窜入直流故障的测记和报警功能”,因此,本文在直流绝缘监测装置中进行交流电窜入直流的故障监测与定位设计,该设计的总体方案流程如图5所示。

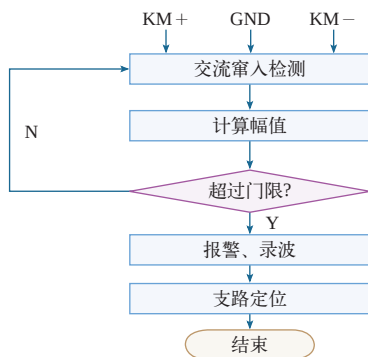


图5 总体方案流程

在交流电窜入检测环节,同时使用差分电压法和隔直电容法,兼顾实时性和准确性;在交流电窜入支路的定位上,选择基于直流法的间接定位技术。

2. 交流窜入后直流系统仿真

模拟交流电窜入直流系统的试验电路如图6所示。图中, U_d 为蓄电池; R_1 和 R_2 为直流系统装设的绝缘监测装置的平衡电阻; U_a 为交流电压源。将直流系统正极、大地和直流系统负极、大地分别接入示波器的通道2和通道1中,使 U_d 输出为DC 230 V, R_1 和 R_2 均为30 kΩ,调节 U_a 使其输出AC 50 V,通过闭合开关S1或S2使交流电源 U_a 窜入直流系统正极或负极。

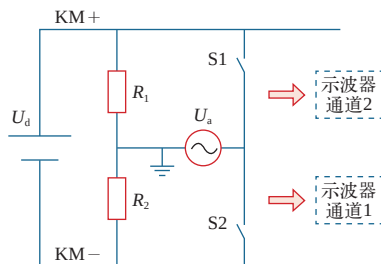


图6 交流电窜入直流正极试验

闭合S1、断开S2,即将交流电源 U_a 接入直流系统正极和大地之间,示波器上显示的波形如图7所示。由图7可以看出,正极对地电压为交流电压,幅值和频率与施加的故障电压一致;而负极对地电压为直流全电压叠加交流电压,直流分量与 U_d 一致,交流分量与施加的故障电压一致。

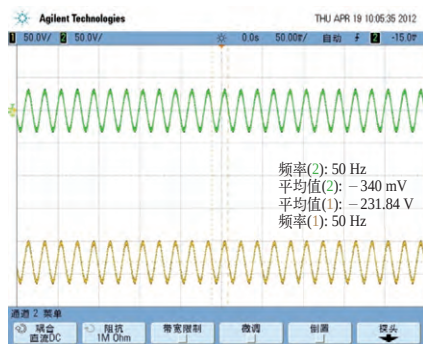


图7 交流电窜入直流正极后的两极电压波形

闭合S2、断开S1,即将交流电源 U_a 接入直流系统负极和大地之间,示波器上的波形如图8所

示。由图8可以看出，负极对地电压为交流电压，幅值和频率与施加的故障电压一致；而正极对地电压为直流全电压叠加交流电压，直流分量与 U_d 一致，交流分量与施加的故障电压一致。

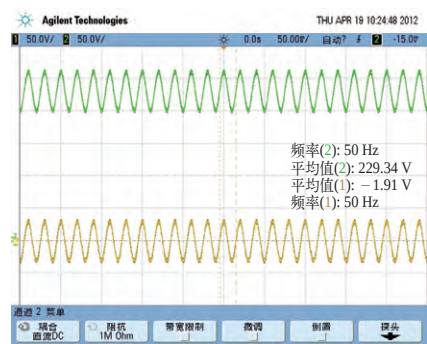


图8 交流窜入直流负极后的两极电压波形

由上述模拟试验可以得出以下结论：

- 1) 交流电窜入直流正极后，正极对地直流电压为零，负极对地直流电压为全电压，且在正极对地和负极对地均叠加有相应的交流电压。
- 2) 交流电窜入直流负极后，负极对地直流电压为零，正极对地直流电压为全电压，且在正极对地和负极对地均叠加有相应的交流电压。
- 3) 交流窜入后，导致直流系统金属性接地。

3. 测试

使用1台直流绝缘监测装置、带64路直流漏电流传感器和调压器进行测试，输入端接220 V，输出一端接地，另一端接至待测的回路；调节调压器，使其输出电压分别为10 V、57 V、100 V和220 V，且分别窜入编号为1、8、32和64的支路中。测试结果如下表所示。

表 测试条件及结果

序号	试验条件		测试结果		
	窜入电压/V	窜入支路	交流电压测量/V	测量准确度 (%)	窜入支路检测
1	10	1#	10.2	2	1#
2	57	8#	57.4	0.7	8#
3	100	32#	100.9	0.9	32#
4	220	64#	221.4	0.6	64#

由测试结果可以看出：电压较小时，交流电压的测量准确度较差，随着电压的增高，测量准

确度逐步提升，可以满足1%的要求；选线准确率为100%。

结束语

本文对直流电源系统交流电窜入直流的故障原因进行汇总和分析，并对交流电窜入直流的检测技术和定位技术进行了归纳，依此设计了具有交流电窜入直流故障监测和定位功能的直流绝缘监测装置。经测试，该装置能够准确检测到交流电窜入直流的故障，并能准确选出故障支路，满足《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》的要求。

参考文献

[1] 王素华, 彭向阳, 韩潇, 等. 变电站直流电源系统改造问题分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (17) : 179-182.

[2] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (4) : 130-133.

[3] 孟凡超, 高志强, 杨书东. 交流串入直流回路引起开关跳闸的原因分析 [J]. 继电器, 2007, 35 (14) : 77-78.

[4] 张云芳, 尚绪勇, 李念震, 等. 220 V工频交流混入直流控制回路造成的开关误跳问题分析 [J]. 山东电力技术, 2009 (4) : 31-39.

[5] 陈岱. 交流窜入直流系统的分析 [J]. 直流电源技术, 2011, 1 (1) : 77-79.

[6] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[7] 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.

[8] 丁晓兵, 赵曼勇, 皮显松, 等. 防止交流串入直流导致母线保护误动的措施 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (22) : 97-99.

[9] 马迎新, 田建光, 徐忱. 变电站二次系统交流串入直流回路对继电器的影响试验研究 [J]. 电工文摘, 2012 (6) : 30-36.

(收稿日期: 2014-11-20) EA