

双重化直流系统中直流混用现象探讨

戴缘生, 荣吉良, 林思海

(上海电力公司超高压输变电公司, 上海 201204)

摘要: 列举了发生在某变电站完成直流系统双重化改造后, 发生的三次因直流混用而导致的直流系统绝缘异常案例, 并归纳出直流混用发生的电气现象。然后, 结合直流系统的特点和绝缘监测仪的工作原理, 通过电路分析的方法得出一定结论, 解释了直流混用时的现象。最后结合具体情况提出了直流混用时合理的处理方法。

关键词: 双重化; 直流系统; 混用

Discussion about mixed use of different direct currents in double direct current system

DAI Yuan-sheng, RONG Ji-liang, LIN Si-hai

(Shanghai Extra High Voltage Power Transmission of SMEPC, Shanghai 201204, China)

Abstract: This paper presents three examples about mixed use of different direct currents, which happened in a double direct current system power station. Then some special electrical appearances are concluded in these examples. By the theory DC system and insulation monitoring apparatus, circuit analysis and some conclusions are given to explain the appearances. At last, reasonable suggestions and methods are taken to resolve this problem.

Key words: duplication; direct current system; mixed use

中图分类号: TM76 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)05-0084-05

0 引言

变电站继电保护直流电源系统是站内所有继电保护、自动化以及二次控制回路、断路器分合闸等设备工作的电源, 是变电站名副其实的“心脏”。目前, 变电站直流系统通常采用不接地系统, 这样当发生一点接地时, 由于不能构成回路, 一般来说对继电保护设备没有太大影响。但如果再发生另一点接地, 产生寄生回路, 将会导致继电保护误动、拒动和直流电源短路等不可估量的后果。因此, 对直流绝缘的监测和接地后的处理也是继电保护专业的一项重要工作。但是, 由于直流系统遍布变电站各个地理位置, 在运行中容易受到环境、天气以及人为因素的影响, 所以直流接地发生时准确、及时、安全的发现、查找以及处理历来是一项重要而困难的工作。从传统的“试拉法”, 到目前多用的微机式绝缘监测仪的自动接地巡线功能的出现, 极大地提高了对直流系统的监控水平, 但并非所有情况下的直流系统故障都会被及时发现并准确找到接地支路, 甚至会出现一些奇怪的“假接地”现象, 让人迷惑不解。本文就将介绍一种直流接地现象, 并分析导致它的几种成因和探讨处理方法。

1 “直流混用”导致的绝缘降低现象

某 500 kV 变电站在一年前完成了直流电源系统双重化的改造工作, 即拥有两组独立的电压为 110 V 的蓄电池组, 两块独立的直流馈线屏, 并配有新型微机绝缘监测仪。然而, 在接下来的一段时间内接连发生过三次“奇怪”的直流接地现象, 其表现大致相同: 直流绝缘监测仪报警, “第一组直流母线负极接地”, “第二组直流母线正极接地”, 但无论是“自动巡线”还是使用“手动巡线”功能都无法找到接地支路。之所以称这种接地现象“奇怪”, 不仅在于监测装置反映出两组直流出现接地的时间相同, 还在于以前几次均准确找到接地支路的较先进的巡线方法居然找不出接地支路。下面就分别介绍下这三个接地现象的案例。

1.1 案例一: 闪光电源与控制直流混用

某日, 该站一条 220 kV 线路开关机构大修后继保人员做联跳试验。近控位置时合上开关一切正常; 开关切远控位置后, 运行人员打来电话称绝缘监测装置报绝缘异常。停下工作进入控制室观察, 绝缘检测装置报“I 母正极、II 母负极对地绝缘降低”。经过试验发现, 这种现象出现需满足以下条件: 开关

在合位、控制屏 KK 开关在分位、远近控小开关在远控位置、控制屏后“第一组控制直流小开关”ZKK1 在推上位置。而且, 在远控位置时, 控制屏上本应表示开关合闸位置红灯不亮。

鉴于这种现象, 基本确定原因应该在本线回路中, 经过查线发现: 实际到“第一组控制直流小开关”的直流源是来自直流馈线屏 2 的第二组母线直流 \pm KM2, 而在本站直流改造中, 闪光电源 +SM 全部取自第一组直流 +KM1。这样我们就知道 (如图 1 所示): 当就地合开关并切至“远控位置”后, 本开关的控制监视回路中 KK 小开关 14-15 接通, DL 闭合, 直接导致 +SM(+KM1) 与 -KM2 通过分闸线圈 Y2 连通, 也就是说两组本应隔离的直流系统产生了联系。

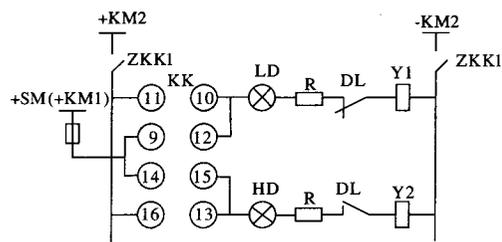


图 1 闪光直流与第二组直流混用示意图

Fig.1 Mixed use between flash DC with second DC

其后果是: 绝缘监测仪报第一组直流正极绝缘降低, 对地电压约为 +30 V; 第二组直流负极绝缘降低, 对地电压约为 -30 V。将 ZKK1 小开关上级直流换成 \pm KM1 后, 两条母线绝缘降低现象同时消失。

1.2 案例二: 重合闸过程中的直流混用

同样是在案例一中的开关机构大修工作中, 运行人员报告绝缘监测仪报警: 第一组直流正极绝缘降低, 第二组直流负极绝缘降低, 并未查出是哪条回路。查看记录, 发现绝缘装置报警并未常发, 过了一会便消失。到达开关现场, 此时电试班在就地做开关相关项目测试时, 为了确认刚才的直流系统异常和该电试工作有关, 让电试人员将刚才的试验项目重做一遍, 控制室内绝缘装置发出同样的绝缘报警信号。经过仔细询问电试人员, 得知他们刚才做的项目是测试三相重合闸试验, 而具体试验方案是第一组跳圈和合闸线圈之间的配合试验, 他们的试验方案的简单示意图如图 2。

可见, 由于电气试验用的试验仪器提供两付空触点, 其中触点 1 模拟合闸, 触点 2 模拟分闸。但是这两付触点只有一个公共端引出, 也就是说他们之间没有完全独立。那么在合闸线圈 HQ 与分闸线

圈 TQ2 配合做重合闸试验时, 当触点 2 闭合时显然出现 +KM1 与 -KM2 来励磁线圈 TQ2。也就在此时, 第一组直流系统的正极与第二组直流系统的负极发生了联系。

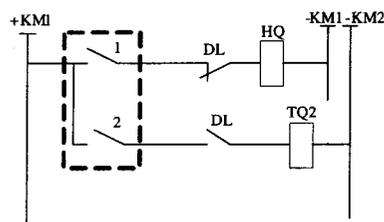


图 2 重合闸动作中的不同组正负直流混用

Fig.2 Mixed use caused by different negative and positive DC in breaker auto-closed process

1.3 案例三: 端子排绝缘降低导致直流混用

某夜大雨后, 该站内直流系统报警: 第一组直流正极绝缘降低, 对地电压 +5 V; 第二组直流负极绝缘降低, 对地电压 -7 V, 绝缘监测仪接地巡线也无法找出接地支路。随着雨停, 监测仪显示第一组直流正极绝缘、第二组直流负极绝缘逐渐恢复, 但分别仍只有 +10 V 和 -13 V 左右。采用“试拉法”, 直到拉掉某 500 kV 主变的“非电气量保护直流小开关”后, 两组直流绝缘同时恢复正常; 同样拉掉该主变“有载调压控制直流小开关”后直流绝缘也同时恢复。经过查看图纸和分析, 基本确定来自室外有载调压控制柜, 在这里非电气量保护直流 (第一组直流) 正极与有载调压控制直流 (第二组直流) 负极 (在端子排上) 之间的绝缘降低, 从而使绝缘监测装置报警。事后随着天气转好, 直流绝缘降低现象也逐步消失, 且两组直流同时恢复正常。

2 直流混用现象的理论分析

2.1 直流混用的基本特征

通过以上三个案例, 可大致归纳出这种绝缘降低现象的共性:

① 直流接地绝缘监测仪报警, 两组独立直流系统同时出现绝缘降低;

② 两组直流系统的绝缘降低的, 是一组为正极, 而另一组一定是负极;

③ 正极和负极绝缘降低电压的绝对值基本相同, 且常常不为零, 甚至比较高 (如 30 V);

④ 直流接地绝缘监测仪往往无法通过自动支路寻线功能找到接地支路;

⑤ 人为找到“接地支路”后, 拉开任一组直流小开关后, 两组直流绝缘降低现象会同时消失。

其实, 这种“奇怪”的接地现象并不是真正意义

上的直流正极或负极电源系统对地绝缘降低, 因为没有真正意义上的“接地点”, 而是由于双重化后的本应完全隔离的两组直流电源系统之间发生了“混用”。为什么在发生“混用”后会出现以上现象呢? 可以从直流绝缘监测原理来分析。

2.2 直流系统与直流混用的电路分析

对于不直接接地系统的直流电源系统来说, 对它的绝缘监视是一项重要工作, 从早期的电桥平衡原理、电子式电桥到现在的微机型绝缘监测仪, 性能日益完善。一般现在使用微机绝缘检测仪后, 直流系统的等效电路图如图 3 所示。

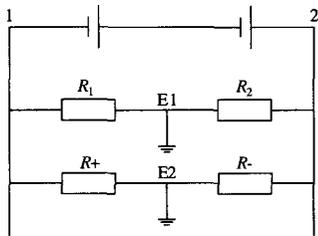


图 3 直流绝缘监视系统绝缘原理图

Fig.3 The DC insulation monitoring system

图 3 中 R_1 、 R_2 是绝缘监测仪的采样电阻一般在 $47 \sim 220 \text{ k}\Omega$ 之间, 且 $R_1=R_2$; 而 $R+$ 和 $R-$ 是直流系统正、负极对地绝缘电阻, 新变电站的 $R+$ 和 $R-$ 一般不低于 $10 \text{ M}\Omega$, 老变电站也在 $1 \text{ M}\Omega$ 以上。需要说明的是, 图中 R_1 、 R_2 中间的接地 $E1$ 是在绝缘检测仪上的工作接地, 而 $R+$ 和 $R-$ 间的接地点 $E2$ 是一个“虚拟”的接地 (因为直流系统本身是不接地系统)。

如果我们用一个高内阻 (认为内阻 R_v 无穷大) 的电压表来测量 1 和 2 两点的电压 U_1 和 U_2 , 那么等效原理图如图 4 所示。

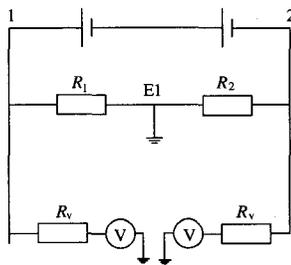


图 4 直流测量系统原理图

Fig.4 The DC measurement system

在正常状态下, $R+$ 和 $R-$ 往往比 R 也大一个数量级, 所以可忽略 $R+$ 和 $R-$ 的大小, 那么 U_1 和 U_2 的大小只决定于 R_1 、 R_2 的大小, 即:

$$U_1 = U_n * \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$U_2 = -U_n * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

当 $R_1=R_2=R$, $U_n=110 \text{ V}$ 时, 可得: $U_1=+55 \text{ V}$, $U_2=-55 \text{ V}$

如果将接地点 $E1$ 去掉后, 则会发现电压表无法测出稳定的电压值, 因为这时没有了地电位的参考点。

假设在这两组独立直流地正、负极之间有一个大小为 R_x 的电阻将它们“联系”起来, 如图 5 所示。简化该图后进行电路分析, 电路图如图 6。

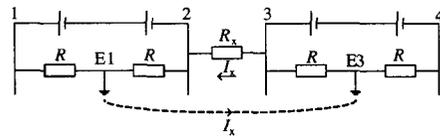


图 5 两组直流通过电阻混用原理图

Fig.5 The mixed use of two different DC systems caused by a resistor

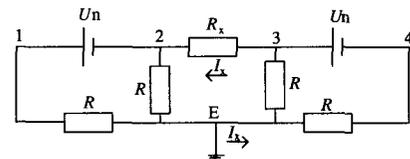


图 6 直流混用电路分析图

Fig.6 The circuit analysis of mixed use of two different DC systems

电路分析后可得:

$$U_1 = U_n - \frac{U_n}{2} \times \frac{1}{1 + \frac{R}{R_x}} \quad (3)$$

$$U_2 = -\frac{U_n}{2} \times \frac{1}{1 + \frac{R}{R_x}} \quad (4)$$

$$U_3 = \frac{U_n}{2} \times \frac{1}{1 + \frac{R}{R_x}} \quad (5)$$

$$U_4 = -U_n + \frac{U_n}{2} \times \frac{1}{1 + \frac{R}{R_x}} \quad (6)$$

$$I_x = \frac{U_n}{R + R_x} \quad (7)$$

若取 $R_1=R_2=R=80 \text{ k}\Omega$ 。

① 当两组直流系统完全隔离时, 即:

$$R_x \rightarrow +\infty \text{ 时:}$$

$$U_1=U_3=+U_n/2=+55 \text{ V}$$

$$U_2=U_4=-U_n/2=-55 \text{ V}$$

$$I_x = 0$$

即两组直流系统之间没有电的联系。

② 完全接触时(注意这时并没有短路, 只是相当于两组蓄电池串联起来了), 即: $R_x=0$ 时:

$$U_1=+110 \text{ V, 上升为正全电压;}$$

$$U_2=U_3=0, \quad \text{相当于两组分别直接接地;}$$

$$U_4=-110 \text{ V, 下降为负的全电压;}$$

$$I_x = \frac{U_n}{R}, \quad \text{完全取决于采样电阻 } R \text{ 大小;}$$

当 $R=80 \text{ k}\Omega$ 时, $I_x \approx 1.375 \text{ mA}$ 。

③除了以上两种极端情况下, 更多情况下, $U_1 \sim U_4$ 的大小是取决于 R 与 R_x 的比值大小, 取几个 R_x 值带入公式计算可得表 1 所示计算值。

表 1 混用电阻 R_x 对直流系统电压影响表

Tab.1 The influence of R_x to DC voltage

序号	1	2	3	4	5	6
$R_x/\text{k}\Omega$	1	10	80	160	1000	10000
R/R_x	80	8	1	0.5	0.08	0.008
U_1/V	+109	+104	+82	+73	+60	+56.4
U_2/V	-0.7	-6	-28	-37	-51	-54.6
U_3/V	+0.7	+6	+28	+37	+51	+54.6
U_4/V	-109	-104	-82	-73	-60	-56.4
I_x/mA	1.38	1.2	0.69	0.46	0.1	0

从表 1 所示可知: 随着 R_x 的值由小变大(也就是说两组直流系统之间的绝缘状况越来越好)时, 各点对地电位的偏移会越来越小, 并逐渐接近于正常值。同样也能看出, 这种“混用”方式下我们测量各点所得的电位值存在明显的对称性。尽管实际测量中得到的值并没有如上面理论计算下那么完全对称, 但基本上也遵循这种规律。如果某电压线圈通过不同直流的正、负极来励磁的话, 那么 R_x 就是电压线圈的阻抗(一般有几十千欧), 这时两组直流的正、负极电压都降低, 但并不等于零, 甚至有 20~30 V。这就基本解释了案例一和案例三中的电压测量结果(案例二中是瞬时降低, 无法准确测量)。

3 绝缘装置的检测和巡线

3.1 直流接地巡线原理

传统的直流系统绝缘检测装置采用的是电桥

平衡原理, 其最大的缺陷是无法对正负极绝缘同时降低时做出正确的判断, 并且要运行人员人为地进行拉线巡检排除故障。目前微机绝缘监测装置中通常采用交流和直流两种方法。

交流方式原理是在电桥平衡装置发出告警信号后, 低频信号发生器将低频信号注入直流系统, 通过检测各个支路的低频分量来判断是否该支路发生接地。这种方法的缺陷是无法排除分布电容的干扰, 并且会加大直流系统的纹波系数, 进而对直流系统造成影响。

直流方式是利用接地支路产生的不平衡直流电流, 通过直流互感器检测此直流来判断接地。直流差流式支路检测方式中的重点是每个馈线支路中接入的小电流直流互感器, 目前可采用霍尔元件、磁偏调制 CT 两种方法, 后者用得较多, 如目前在上海地区使用较多的新型绝缘监测仪 WJY2000A 使用的就是智能型磁偏 CT。每个智能型 CT 中含 CPU 芯片处理器, 该芯片可直接将 CT 被检信号直接转换为数字信号通过串口传至绝缘监测主机。

3.2 直流监测巡线方式的接地分析

直流差流磁偏原理如图 7 所示。

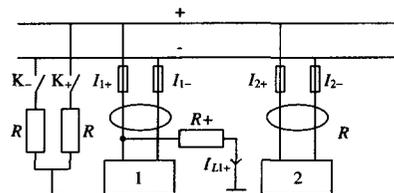


图 7 正极接地时差流法原理图

Fig.7 The differential current detecting principle after positive point to ground

直流系统绝缘正常时 K_+ 、 K_- 均闭合, 由于正负导线电流相等 $I_{1+} = I_{1-}$ 、方向相反, 合成磁通为零, 所以直流 CT 中没有差流。当回路 1 中正极通过电阻 R_+ 接地时, 不平衡电流 $I_{L1+} = I_{1+} - I_{1-}$, 这个电流可以在直流 CT 中测量出来。

根据其他几个已知条件, 通过电路分析就可以算出该支路不平衡电流:

$$I_{L1+} = \frac{U}{2R_+ + R} \quad (8)$$

那么绝缘电阻就是:

$$R_+ = \frac{U - I_{L1+}R}{2I_{L1+}} \quad (9)$$

3.3 直流混用情况下的巡线分析

如果是本文讨论的两组直流系统混用的话(如图 8 所示), 直流 CT 测量的不平衡电流就应该是式

$$(7) \text{ 中的 } I_x = \frac{U_n}{R + R_x}.$$

而且不平衡电流在回路 1 和回路 2 中均有, 这时如果绝缘监测系统设置的灵敏度满足的话, 可能会寻线出这两个支路。目前一般直流 CT 可以监测出大于 1 mA 的电流, 而从不平衡电流 I_{L1+} 和 I_x 的计算式 (8) 和式 (7) 可以看出, 绝缘监测仪寻线的灵敏度更取决于装置内部接地电阻 R 的大小。当 R 取 80 kΩ 时, 要使 I_{L1+} 或 I_x 大于 1 mA, 无论是一点接地还是直流混用情况下, 接地电阻或“混用电阻”不应该大于 20 kΩ, 也就是说装置灵敏度为 20 kΩ。

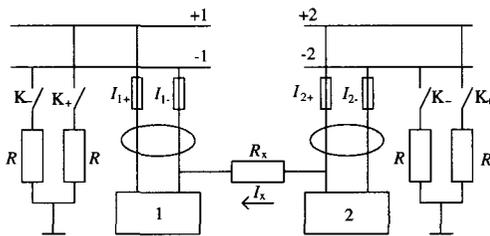


图 8 直流混用时直流差流法巡线原理图

Fig.8 The differential current detecting principle after mixed use of two different DC systems

在前面案例中, “混用电阻”都比较大, 从而 I_x 都无法达到绝缘监测装置设置的灵敏度要求, 在报警后的寻线过程中就有可能找不出所谓的故障支路来了。

4 直流混用时故障判断和处理

实际上, 尽管两组串接导致的直流异常现象与直流系统直接接地(两点接地)相似, 但并没有真正的与大地之间绝缘破坏而产生的接地点, 所以并不能归为“直流感地”的范畴。发生了上述现象后, 由于绝缘监测装置并不能查找出“接地”的回路, 所以“试拉”法往往很费时费力。但是, 如果仅仅依据前面所说的直流混用现象, 我们并不能马上断定是“直流混用”, 因为有可能两组直流系统各有一个真正的接地也会产生这种现象。如果能判别出到底是“直流混用”还是“两点接地”, 那么有利于我们缩小“试拉”的回路范围, 因为一般只有 220 kV 以上保护才会用两组直流。

有人提出, 既然是两组“直流混用”了, 那么可短时将直流馈线屏上的直流母线分段开关合上, 这时就没有分别, 也就没有“混用”之说了, 如图 9 所示。

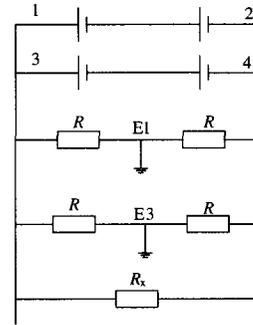


图 9 两组直流系统并联运行原理图

Fig.9 The parallel use principle of two different DC systems

可见, 如果真的是“直流混用”, 而且 R_x 值不是太小时, 两组直流绝缘降低的现象会同时消失。但如果导致“直流混用”的 R_x 太小(接近于零), 或者两组直流系统中“两点接地”, 那么, 后果将是跳开该支路直流小开关(接地在某支路时), 甚至熔断直流屏中总的直流熔断器(接地都在直流母线上时)。这样, 本来此时全站本来就已经是一组直流了, 后果将是灾难性的。

所以, 我们需要采用其他方法来判别。从前面知道, 绝缘监测仪在工作时需要采样母线电压, 同样也提供了工作的接地点, 而“直流混用”导致两条直流母线电压同时变化现象的原因是, 两个工作接地点通过大地形成了回路, 所以可采用如图 10 所示方法: 绝缘监测仪屏内任选一组直流系统, 短时解开电压采样回路 $K+$ 和 $K-$ (通常是直流小熔丝)。如果真是“直流混用”的话, 这时 $I_x=0$, 另一组未拉采样直流的直流母线的电压会马上恢复正常(即 $U_1=+55 \text{ V}$ 、 $U_2=-55 \text{ V}$), 反之亦然。在实践中, 这种方法被证实是可靠而安全的。

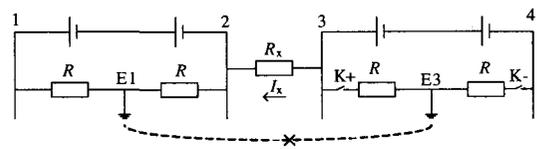


图 10 直流混用判断处理方法原理图

Fig.10 The principle of judgment and treatment to DC system's mixed use

5 结论

直流系统是变电站的“心脏”, 而随着变电站的不断改造, 越来越多的变电站的直流系统逐步实现了双重化的配置。双重化后的直流系统也带来了新

(下转第 95 页 continued on page 95)

1TWJ 失磁, 其动合触点 1TWJ1 分开。图 2 中的中间继电器 1ZJ 随之也失磁, 动断触点 1ZJ1 分开闭合造成强油风冷启动电源回路接通, 起动油泵及风扇。

2 解决方案

根据现场设备的实际接线, 制定了两套因地制宜的改造方案思路, 均能简洁、正确而又迅速地解决主变强油风冷回路不正常启动的问题:

方案 1: 冷却器自动投入回路中的跳闸位置触点直接取主变变高、变中和变低开关的辅助触点如图 5, 从而使主变低压侧进线刀闸 31G 不能控制冷却器自动投入或退出。

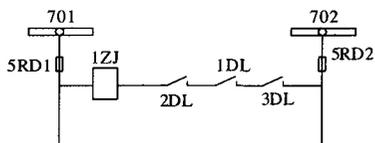


图 5 改后的冷却器自动投入控制回路

Fig.5 The new automatic forced-oil-air-cooling device control loop

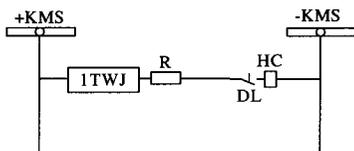


图 6 改后的#1 主变低压侧开关合闸监视回路

Fig.6 The new low-voltage breaker side of the #1 transformer reclosing monitoring-circuit

方案 2: 取消主变低压侧进线刀闸 31G 的动合触点 31G1, 使 3DL 合闸监视回路不受进线刀闸 31G

闭锁, 如图 6。

3 结束语

本文根据某 220 kV 变电站的沈阳变压器厂生产的 SFPSZ7-1500/220 型主变强油风冷自投装置运行的特点, 对强油风冷自投装置误动的原因进行了深入的分析, 找出了误动作的根源, 并针对 SFPSZ7-1500/220 型主变强油风冷自投装置在该站运行的特点, 考虑到与现有的设计相兼容性, 对现有强油风冷闭锁回路的设计进行了更改, 提出了相应的解决对策, 制订了改造方案, 通过方案的实施彻底消除了装置误动的问题, 确保了主变运行的可靠性与安全性, 保证了电网的安全运行。

参考文献

- [1] 变压器制造. 变压器试验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 电力变压器检修导则编写组. 电力变压器检修导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [3] 董其国. 电力变压器故障与诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 王世阁, 钟洪璧. 电力变压器故障分析与技术改进[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2008-04-18; 修回日期: 2008-04-28

作者简介:

成展鹏 (1975-), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护研究工作; E-mail: huzuo8000@yahoo.com.cn

胡佐 (1980-), 男, 工程师, 工学硕士, 从事电力系统继电保护研究工作。

(上接第 88 页 continued from page 88)

的问题, 如两组直流系统混用的问题。直流混用的后果比较严重, 而其现象又十分与众不同, 出现的概率和情况又千变万化, 给传统的直流接地判断方法带来了困难, 就连新型的微机绝缘监测装置也常常无法正确找出故障回路。所以, 有必要研究直流混用时的物理现象、电路分析方法, 并给出合理的判断和解决方案, 这也应该是微机绝缘监测装置今后需要完善的一个重要功能。

参考文献

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

DAI Chun-yi. AC&DC Power Supply and Measurement

Meter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

- [2] 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, 2 (1): 27-30.

ZHANG Yi, ZHANG Quan, LI Yong-li. Ground Fault Detection for DC System[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 2 (1): 27-30.

收稿日期: 2008-04-29; 修回日期: 2008-05-12

作者简介:

戴缘生 (1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护工作; E-mail: rorman_dys@hotmail.com

荣吉良 (1968-), 男, 高级技师, 主要从事电力系统继电保护工作;

林思海 (1977-) 男, 技师, 主要从事电力系统继电保护工作。