

通信电源系统绝缘监察装置的研制

孙正军¹ 陈赐秋²

(1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司 北京 100024; 2. 山东大学电气工程学院 济南 250002)

摘要: 介绍了通信高压直流系统中安装绝缘监察装置的必要性,针对现有绝缘检测方法,分析了其存在的缺点,提出了一种性能更为完善的监测方法,并着重介绍了其原理及应用方式。该方法能检测出直流母线、支路对称和非对称接地时的母线电压、接地电阻值,提高了直流系统的绝缘检测装置的可靠性和准确性。通过 Multisim 仿真和现场实验结果表明,该装置可以准确检测绝缘电阻值,查找出故障支路,给故障分析人员提供了极大的方便。最后本文对该装置的使用提出了一些建议。

关键词: 通信;高压直流;非平衡电桥;绝缘监察

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Development of insulation monitoring device for communication power supply system

Sun Zhengjun¹ Chen Yangqiu²

(1. Power China Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China; 2. School of Electrical Engineering of Shandong University, Jinan 250002, China)

Abstract: This paper introduces the necessity of installing insulation monitoring device in high voltage DC (HVDC) system, analysis the shortcomings of the current insulation detection methods, proposed a perfect monitoring method, and emphatically introduces the principle and application of the method. This method can detect the bus voltage and the grounding resistance when bus or branch in the symmetrical grounding or not, so the reliability and the accuracy are improved. The results of multisim simulation and experiments show that the device can detect the insulation resistance accurately, and then find out the fault branch, it is very convenient for fault analysis staff. Finally, some suggestions are put forward for the use of the device.

Keywords: communication; HVDC; unbalanced bridge; insulation monitoring

1 引言

随着我国通信行业的快速发展,通信网络规模的不断扩大,电信运营商对电源设备也提出了更高的要求,安全、稳定、可靠、节能已成为被关注的焦点。针对交流不间断电源(UPS)和直流-48 V供电的缺点,业界提出了240 V高压直流悬浮供电,并在这两年得到了迅猛发展^[1-4]。由于两极悬浮,当某极出现接地后,接地电流会非常小,保护电器不会断开,系统仍能继续运行。如果其一极发生接地后,触摸另一极,将造成电击事故;若另一极再接地,将造成直流短路^[5]。因此,为了保护人身安全和系统可靠运行,系统必须安装绝缘监察装置,及时发现绝缘故障,以免扩大事故^[6]。

目前直流系统绝缘监察方法主要有:电桥法、漏电流

法、低频信号注入法、变频探测法等^[7]。基于电桥平衡原理的检测方法虽被广泛使用,但这种检测方法不能检测直流系统正、负母线绝缘对称下降的情况。漏电流法主要是通过检测支路对地不平衡电流来监察,其缺点是漏电流一般较小,难以测量,严重限制了故障检测的精度和灵敏度。低频探测法是在直流系统母线与大地之间注入低频交流电流信号,经母线流向有接地故障的馈线,并从馈线的接地点返回信号发生器,根据交流电流信号的流向来查找接地故障点。由于注入信号频率较低,对地分布电容很大,检测精度和灵敏度都受到影响,甚至可能无法检测到接地故障,同时母线注入低频交流电流信号后,电压纹波系数会增大。变频探测法也存在着同样的缺点^[8-9]。为此,本文采用了一种平衡电桥与非平衡电桥相结合的方法绝缘检测方法,能克服上述缺点^[10]。

2 检测方法

正常情况下,采用平衡电桥实时监测母线对地电压,一旦发生变化,超过一定限度时,可及时判断发生了非对称绝缘故障,通过投切电阻将电桥转换为非平衡模式,同时加快电阻投切频率为每 2 s 1 次,便可迅速计算正、负母线对地绝缘电阻。由于同时对称接地概率很小,且正常情况下电桥每隔 10 min 转换 1 次,也能很快监视正负极同时发生接地故障情况。一旦发现绝缘故障,加快投切电阻频率,启动支路巡检,通过支路安装漏电流传感器检测出的剩余电流值,便可判断是哪个支路发生了故障,并计算出接地电阻值。采用上述方法,系统能立即发现单极绝缘故障,当出现对称性的两极绝缘故障时,系统也能尽快发现,而且变频率投切电阻,避免了频繁投切对系统造成冲击。

2.1 母线绝缘检测

2.1.1 非平衡电桥法等效电路

图 1 是非平衡电桥测量法的原理图。图中 U_1 、 U_2 为正、负母线采样电压, R_x 、 R_y 分别为母线正、负两端对地绝缘电阻,即被测量, R_1 、 R_2 为平衡电桥正、负两端采样电阻,取 $R_1 = R_2$, R_3 、 R_4 为非平衡电桥正、负两端采样电阻,取 $R_3 = R_4$, K_1 、 K_2 为继电器开关。在直流系统正常工作情况下, K_1 、 K_2 处于断开状态,接地电阻 R_x 、 R_y 均趋于无穷大;当发生单极接地故障时,则 R_x 或 R_y 为有限值。

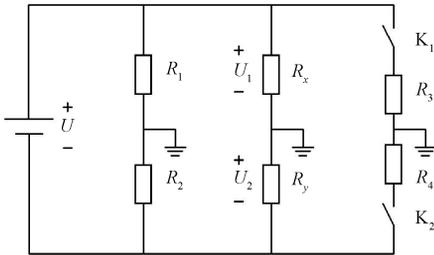


图 1 非平衡电桥等效电路图

当无单极接地故障时, R_x 、 R_y 趋于无穷大,由 R_1 、 R_2 、 R_x 、 R_y 组成的电桥平衡,此时 $U_1 = U_2$ 。

当只有正极接地时, R_x 为有限值, R_y 为无穷大,由 R_1 、 R_2 、 R_x 、 R_y 组成的电桥不平衡,此时 $U_1 \neq U_2$,可以计算出两电压之比为:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 // R_x}{R_2} \quad (1)$$

当只有负极接地时, R_x 为无穷大, R_y 为有限值,由 R_1 、 R_2 、 R_x 、 R_y 组成的电桥不平衡,此时 $U_1 \neq U_2$,可以计算出两电压之比为:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2 // R_y} \quad (2)$$

当两极均接地时, R_x 、 R_y 均为有限,由 R_1 、 R_2 、 R_x 、 R_y 组成的电桥有平衡和非平衡两种状态,当 $R_x = R_y$ 时, $U_1 = U_2$,当 $R_x \neq R_y$ 时, U_1 、 U_2 两电压之比为:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 // R_x}{R_2 // R_y} \quad (3)$$

设 U_s 为电压整定值,可取 U_s 为 100 V,当只有单极接地时,由 $|U_1| < U_s$ 、 $|U_2| > U_s$,可判断正极对地绝缘下降,发出告警;由 $|U_1| > U_s$ 、 $|U_2| < U_s$,可判断负极对地绝缘下降,发出告警,由式(1)、(2)可分别计算出 R_x 、 R_y 。但通常由于正、负接地电阻阻值都很大,当其相互差值很大但又属于安全范围时, $|U_1 - U_2|$ 会超出整定值,会误报警;当系统两极接地时,如果正、负接地电阻相等或相近但又超出范围时,电桥平衡, $|U_1| > U_s$ 、 $|U_2| > U_s$, $|U_1 - U_2|$ 接近于 0,无法报警。而且系统也无法判断是单极接地还是两极均接地。因此需通过 R_3 、 R_4 这两个电阻的相互切换,使电桥始终保持在一个不平衡状态。通过两次的测量,分别记录 U_1 、 U_2 ,然后计算出 R_x 、 R_y ,当发现 R_x 及 R_y 小于预设告警值,即发出告警。

2.1.2 公式推导

1) 当 K_1 闭合、 K_2 断开时,采集量取电压 U'_1 、 U'_2 , ($U'_1 + U'_2 = U$),此时接地电阻 R_x 与 R_3 并联,电路原理图如图 2 所示。

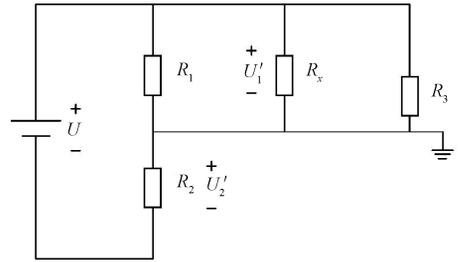


图 2 K_1 闭合、 K_2 断开时等效电路

设流过 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_x 、 R_y 的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_x 、 I_y ,由基尔霍夫电流定律得:

$$I_2 + I_y = I_1 + I_3 + I_x \quad (4)$$

即:

$$\frac{U'_2}{R_2} + \frac{U'_2}{R_y} = \frac{U'_1}{R_1} + \frac{U'_1}{R_3} + \frac{U'_1}{R_x} \quad (5)$$

取 $R_1 = R_2$,整理得:

$$R_x = \frac{U'_1 R_1 R_3 R_y}{(U'_1 - U'_2) R_3 R_y + U'_2 R_1 R_3 - U'_1 R_1 R_y} \quad (6)$$

2) 当 K_2 闭合、 K_1 断开时,采集量取电压 U''_1 、 U''_2 ,此时接地电阻 R_y 与 R_4 并联,电路原理图如图 3 所示。

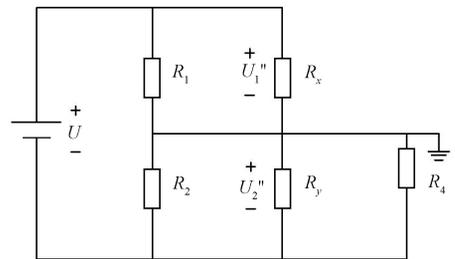


图 3 K_2 闭合、 K_1 断开时等效电路

同理可得到:

$$\frac{U''_2}{R_2} + \frac{U''_2}{R_y} + \frac{U''_2}{R_4} = \frac{U''_2}{R_1} + \frac{U''_2}{R_x} \quad (7)$$

取 $R_3=R_4$,由式(6)和式(7)联立可求得 $R_x、R_y$:

$$\begin{cases} R_x = \frac{(U'_1U''_2 - U''_1U'_2)R_1R_3}{(U''_1U'_2 - U'_1U''_2)R_3 - (U'_1 + U'_2)U''_2R_1} \\ R_y = \frac{(U''_1U'_2 - U'_1U''_2)R_1R_3}{(U''_1U'_2 - U'_1U''_2)R_3 - (U''_1 + U''_2)U'_1R_1} \end{cases} \quad (8)$$

设 R_{set} 为绝缘电阻整定值,一般为 $20\sim 30\text{ k}\Omega$ ^[11],当 $R_x < R_{set}$ 或者 $R_y < R_{set}$ 时,绝缘漏电报警,同时显示正、负对地电压,对地绝缘电阻值。

2.2 支路检测

因为不管系统哪个分支路发生了接地故障,都会在系统正负极母排反映出来^[12]。为了判断是哪个分路故障,还需要在每个分支路安装漏电流传感器,通过测量剩余电流值判断该支路后端发生了接地故障。测量原理如图4所示,当回路绝缘水平正常时,穿过传感器的直流电流大小相等,方向相反,此时传感器中的合成磁场为0,其输出也就为0;当回路绝缘水平下降到一定范围时,该回路中出现合成直流电流,对应该回路的传感器中合成磁场就不为0,其输出也就不为0。通过支路巡检,便可查找出该故障支路^[13]。

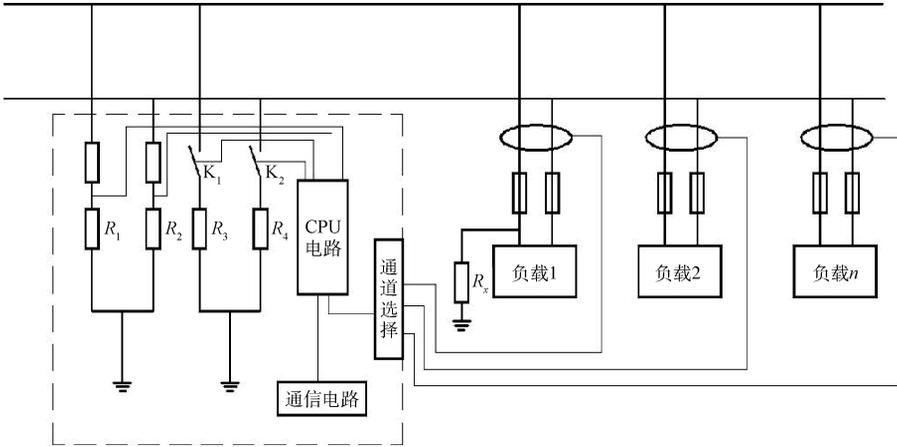


图4 支路漏电流检测示意

3 硬件实现

3.1 母线电压检测及非平衡电桥切换部分

如图5所示,由于母线电压较高,采用4个 $100\text{ k}\Omega$ 电阻和1个 $3\text{ k}\Omega$ 电阻串联分压采样,通过控制光继电器 AQY210EH 的导通来实现电桥电阻投切。

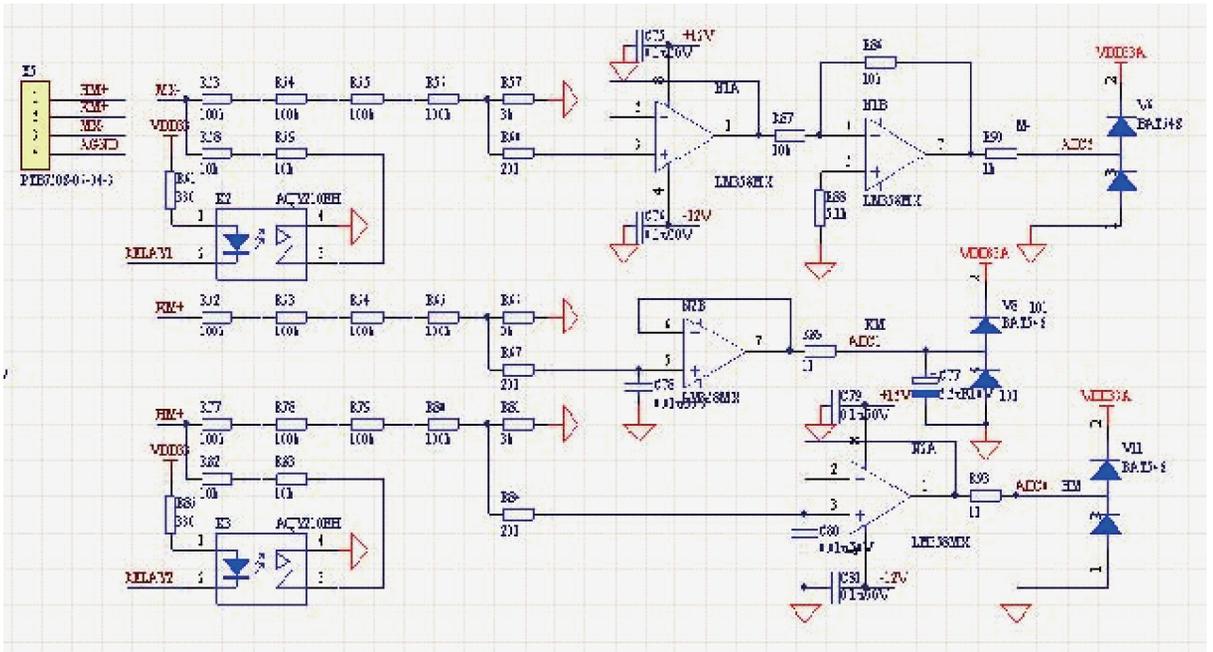


图5 非平衡电桥硬件实现图

输入到处理器的电压为:

$$U_- = \frac{3U_2}{403} \quad (9)$$

$$U_+ = \frac{3U_1}{403} \quad (10)$$

通信高压直流系统标称为 240 V, 最高电压为 288 V。假如负极金属性接地 ($R_y \approx 0$), $U_1 \approx 288$ V, 则 U_+ 最大值

为 2.144 V, 小于 3.6 V, 满足处理器输入电压范围的要求。

3.2 支路漏电流检测

由于漏电流传感器输出的电压值为 $0 \sim \pm 5$ V, 而处理器内部 A/D 转换仅支持 $0 \sim 3.6$ V, 所以需要将采集的电压经过处理, 处理电路如图 6 所示。

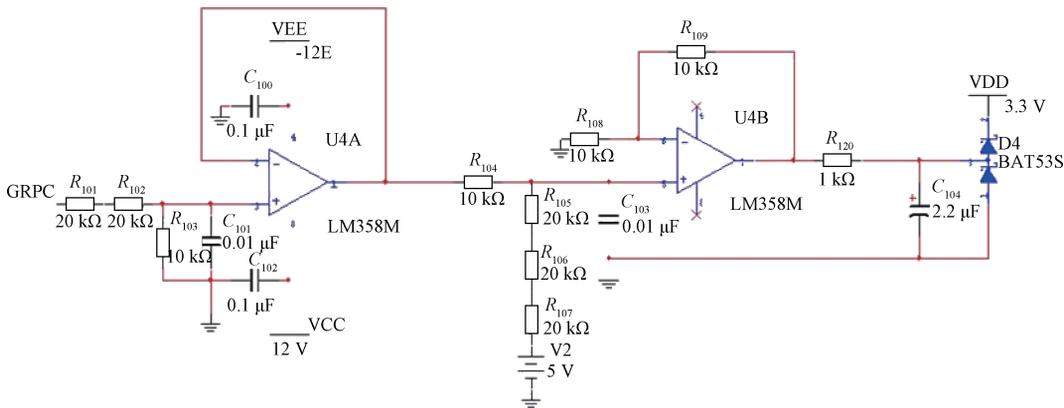


图 6 支路漏电流检测电路

图 6 中 R_{101} 、 R_{102} 、 R_{103} 为采集量分压电阻, U_{4A} 的输出电压为 $-1 \sim +1$ V, U_{4B} 的输入电压为:

$$U_{4B} = \frac{5U_{4AO} + 5}{6} \quad (11)$$

则 U_{4B} 的输入电压范围为 $0 \sim +1.667$ V, 通过 U_{4B} 放大 2 倍后, 输出电压范围为 $0 \sim 3.333$ V, 满足处理器输入电压范围的要求。

对于多支路, 采用多路开关 CD4051 进行选通控制, 如图 7 所示。当发生支路绝缘故障时, 启动支路巡检程序, 通过处理器向 CD4051 芯片的 A、B、C、INH 引脚发送信号, 依次选通支路, 查找出发生故障的支路数^[14]。

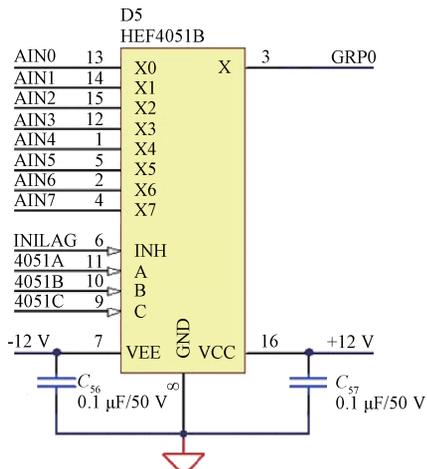


图 7 多路开关选通支路电路图

4 软件流程图

整个检测系统的软件流程图如图 8 所示^[15-16]。当平衡

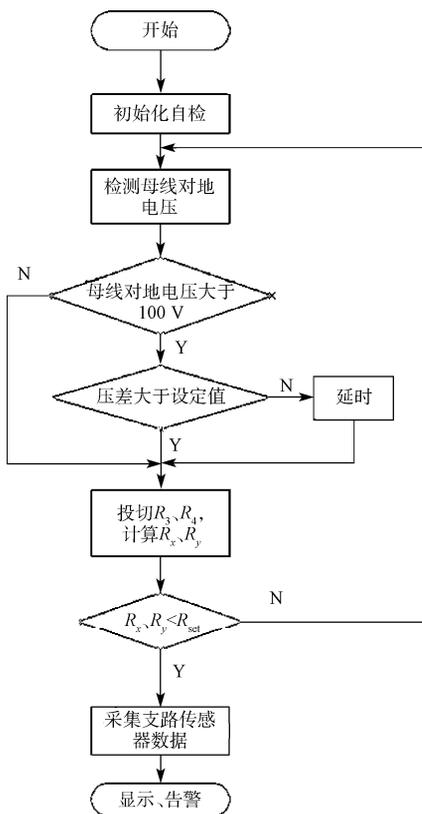


图 8 软件流程图

电桥检测到母线其中某极对地电压小于 100 V, 或者压差大于设定值, 立即投切 R_3 、 R_4 , 计算出实际母线对地绝缘电阻, 与设定值相比较, 当小于设定值时, 采集支路漏电流传感器数据, 判断支路数, 输出绝缘告警; 如果母线对地电压

大于 100 V,压差也在正常范围之内时,设定延时如每隔 10 min投切 1 次电阻,这样对称绝缘下降也能及时检测出来,而且避免了频繁投切电阻对系统造成外加的扰动。

5 测试分析

先在 Multisim 中仿真,设直流母线电压为 268 V,分别在正、负母线与地之间并联 10 kΩ、20 kΩ、30 kΩ、100 kΩ、200 kΩ 的电阻,模拟正负母线绝缘故障。其中 U_1 为正母线对地绝对值电压, U_2 为负母线对地绝对值电压,模拟测试结果如表 1 所示。

表 1 模拟测试数据

| $R_x/k\Omega$ | $R_y/k\Omega$ | U_1/V | U_2/V |
|---------------|---------------|---------|---------|
| 0 | 0 | 134.47 | 134.06 |
| 10 | 10 | 6.72 | 261.82 |
| 20 | 0 | 12.49 | 256.04 |
| 0 | 20 | 256.31 | 12.22 |
| 20 | 20 | 134.47 | 134.06 |
| 30 | 0 | 17.73 | 250.80 |
| 100 | 0 | 44.87 | 223.67 |
| 200 | 0 | 67.17 | 201.37 |

将绝缘监察装置安装在 DUM-240/40H10 高压直流机柜上进行测试,如图 9 所示。测试项目包括直流母线间电压超标、不同阻值单极接地和两极同时接地绝缘告警等。整流柜输出直流电压为 268 V,分别测量母线电压,数据如表 2 所示,测得的支路接地电阻和告警信息如表 3 所示。



图 9 在 DUM-240/40H10 机柜上实际测量

表 2 母线电压测试结果

| 标称接地电阻值/kΩ | | 理论值/V | | 实测值/V | |
|------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| R_x | R_y | U_1 | U_2 | U_1 | U_2 |
| 10 | 0 | 6.34 | 261.66 | 6 | 261 |
| 20 | 0 | 12.1 | 255.9 | 12 | 256 |
| 30 | 0 | 17.35 | 250.65 | 17 | 250 |
| 100 | 0 | 44.44 | 223.56 | 44 | 223 |
| 200 | 0 | 66.75 | 201.25 | 68 | 199 |

表 3 支路接地电阻测量和告警信息

| 测试类别 | 告警阈值/kΩ | 实测 $R_x/k\Omega$ | 实测 $R_y/k\Omega$ | 告警信息 |
|--|---------|------------------|------------------|-------------|
| $R_+ = 10\text{ k}\Omega$ | 20 | 10.2 | 400.0 | 支路、母线正告警 |
| $R_- = 10\text{ k}\Omega$ | 20 | 398.9 | 10.3 | 支路、母线负告警 |
| $R_+ = 10\text{ k}\Omega$ $R_- = 10\text{ k}\Omega$ | 20 | 10.2 | 10.4 | 延时后,母线正、负告警 |
| $R_+ = 20\text{ k}\Omega$ | 25 | 19.9 | 398.2 | 支路、母线正告警 |
| $R_- = 20\text{ k}\Omega$ | 25 | 397.9 | 20.1 | 支路、母线负告警 |
| $R_+ = 20\text{ k}\Omega$ $R_- = 20\text{ k}\Omega$ | 25 | 20.1 | 20.1 | 延时后,母线正、负告警 |
| $R_+ = 30\text{ k}\Omega$ | 25 | 29.8 | 399.5 | 不告警 |
| $R_- = 30\text{ k}\Omega$ | 25 | 400.1 | 30.2 | 不告警 |
| $R_+ = 30\text{ k}\Omega$ $R_- = 30\text{ k}\Omega$ | 25 | 30.1 | 30.3 | 不告警 |
| $R_+ = 100\text{ k}\Omega$ | 200 | 99.8 | 398.6 | 支路、母线正告警 |
| $R_- = 100\text{ k}\Omega$ | 200 | 397.8 | 99.9 | 支路、母线负告警 |
| $R_+ = 100\text{ k}\Omega$ $R_- = 100\text{ k}\Omega$ | 200 | 100.0 | 99.8 | 延时后,母线正、负告警 |

注:表中 $R_+ = 10\text{ k}\Omega$ 表示支路正极对地接 10 kΩ 电阻; $R_- = 10\text{ k}\Omega$ 表示支路负极对地接 10 kΩ 电阻; $R_+ = 10\text{ k}\Omega$ 、 $R_- = 10\text{ k}\Omega$ 表示支路正负极对地均接 10 kΩ 电阻,其余类同

由上述表格可看出,母线电压实际测量值基本符合仿真数据,正、负母线对地电压与理论值相对误差较大,支路接地电阻测量误差 $< 3\%$,以上符合设计指标要求和实际工程需要。该绝缘监测装置能够正确判断出故障类型和查找出接地故障支路。

6 结论

采用平衡电桥与非平衡电桥相结合的测量方法设计的绝缘监察装置,实现了正、负极对地电压、接地电阻的实时测量计算,能准确地判断正、负母线对地绝缘电阻下降和同等下降时的绝缘故障,避免了误报和不报警等事件的发生,可靠性高,灵敏度高,操作方便。在实际使用绝缘监察装置时给出如下建议。

- 1) 母线必须安装;
- 2) 配电屏支路一般不多,定位速度不会影响太大,所以建议安装;

3)列头柜支路较多,要定位查找需要耗时比较长,而且每一馈电回路都需要安装漏电流传感器,造成列头柜成本较高,不建议安装,可通过采用手持式绝缘检查仪人工来判断。

参考文献

- [1] 朱世雄. 国外数据通信设备高压直流供电新系统(上)[J]. 邮电设计技术,2009(4):68-69.
- [2] 刘希禹. 通信供电系统的发展趋势[J]. 电源技术应用,2010,13(8):1-2.
- [3] 林勇. 数据通信机房高压直流供电技术的应用分析[J]. 电信快报,2010(12):12-15.
- [4] ASAKURA K, INAMORI J, MURAI K, et al. Development of higher-voltage direct current power feeding system in telecommunications buildings and data centers[C]. ICPE & ECCE,2011:2005-2009.
- [5] NORITAKE M, IINO T, FUKUI A, et al. A study of the safety of the DC 400V distribution system[C]. INTELEC,2009:1-6.
- [6] 蒋威. 关于高压直流供电系统的研究报告[J]. 通信电源技术,2012(29):62-63.
- [7] 陈志强,宋凡峰,刘畅. 一种新颖的直流系统在线绝缘检测方法[J]. 电工电气,2009(6):40-42.
- [8] 李富颖. 关于直流系统绝缘检测装置的研究[D]. 保定:华北电力大学,2010.
- [9] YIN G H, LIU Y H, XU H, et al. The new DC system insulation monitoring device based on phase differences of magnetic modulation[C]. ICSAI,2012:585-589.
- [10] 成林俞,戴瑜兴,熊书华,等. 直流系统在线绝缘监测的研究及其实现[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(6):860-865.
- [11] QI SH G, HOU F P, JING H. Study and application on high voltage DC power feeding system for telecommunications in China[C]. INTELEC,2012:1-5.
- [12] 孙文波,侯福平. 浅析240V直流系统绝缘监察装置的原理及应用[J]. 通信电源技术,2012(29):32-44.
- [13] 黄海宏,全成,黄锦. 基于差流检测法的分布式直接地巡检系统[J]. 电子测量与仪器学报,2009,23(11):36-41.
- [14] 潘杰,尹斌,阮金金. 直流系统绝缘监测技术研究与应用[J]. 电子设计工程,2012,20(10):73-75.
- [15] 于培永,邵天宇,邓磊,等. 直流系统绝缘监测装置的软件设计[J]. 电子测量技术,2013,36(12):4-7.
- [16] 孙洋,张鑫,范兴明. 基于非平衡电桥与电流传感法的电动汽车绝缘检测系统设计[J]. 桂林电子科技大学学报,2015,35(3):245-249.

作者简介

孙正军,1983年出生,硕士,注册电气工程师,主要研究方向为电力电子技术、智能配电网技术等。

E-mail:sunjz@bhid.com

陈旻秋,1995年出生,本科,主要研究方向为电力系统运营、智能电网技术等。

E-mail:bj_cyq@sina.com