

文章编号:1671-251X(2015)05-0063-05 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.05.016
王茗,李威,杨海.一种矿井直流供电系统漏电检测方法[J].工矿自动化,2015,41(5):63-67.

一种矿井直流供电系统漏电检测方法

王茗, 李威, 杨海

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:针对传统的接触网直流供电系统漏电检测方法中存在检测死区、母线对地电压偏离度过大等问题,提出了一种基于平衡电桥法与切换电桥法的新型漏电检测方法;分析了该方法的检测原理,从降低母线对地电压偏离度的角度出发,建立了平衡电阻与切换电阻的计算模型。Simulink 仿真结果表明,该方法能够很好地降低母线对地电压的偏离度,提高了供电系统的稳定性。

关键词:直流供电系统;漏电检测;平衡电桥法;切换电桥法;电压偏离度

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:2015-04-30 08:43

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150430.0843.016.html>

A kind of leakage detection method of mine DC power supply system

WANG Ming, LI Wei, YANG Hai

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In view of problem of traditional leakage detection method of DC power supply system in overhead line system that it has detection dead zone and big voltage deviation between bus and ground, a new kind of leakage detection method based on balancing bridge method and switching bridge method was proposed. Detection principle of the method was analyzed and computational model of balancing resistors and switching resistors were established from the perspective of lowering voltage deviation between bus and ground. The Simulink simulation results show that the new method can reduce voltage deviation between bus and ground, and improve stability of the power system.

Key words: DC power supply system; leakage detection; balancing bridge method; switching bridge method; voltage deviation

0 引言

接触网直流供电系统正常工作的时候,不会在绝缘电阻上产生漏电流或漏电流较少。但受潮湿的空气、温度变化导致的热胀冷缩及灰尘、绝缘老化、人为损毁等因素的影响,绝缘电阻的阻值会下降^[1-2],从而引入较大的泄漏电流,可能引起信号回路、控制回路、继电保护装置等的误动作,甚至引发严重的电力系统事故^[1]。

目前常用的漏电检测方法有绝缘检测法、低频小信号注入法以及霍尔磁式平衡检测法^[2],绝缘检

测法又分为平衡电桥法与切换电桥法。这些方法都存在一定的缺陷:平衡电桥法无法检测正负母线对地绝缘电阻均下降的情况,存在检测死区^[3];切换电桥法容易拉偏母线对地电压,导致继电保护装置误动作^[4]。低频小信号注入法受对地分布电容的影响较大,且因为外加交流信号,使得直流系统的电压纹波系数增大^[1]。霍尔磁式平衡检测法存在严重的温漂和零漂问题,影响测量精度^[2]。另外,目前国内只有神华神东煤炭集团在煤矿矿井运输系统中引入了无轨电车的形式,故还没有针对煤矿井下无轨电车运输系统漏电流检测的同类产品。为此,研制

收稿日期:2014-10-31;修回日期:2015-03-13;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA06A411)。

作者简介:王茗(1990—),男,浙江淳安人,硕士研究生,主要研究方向为直流系统及漏电检测系统开发,E-mail:wangm_2013@163.com。

一种检测原理先进、故障定位迅速、检测精度高的直流系统漏电检测装置具有重要的现实意义。

由于接触网直流供电系统的电压较高,其实验成本也比较高,且存在很大的安全问题,而通过计算机仿真分析具有经济、方便、安全和组态灵活等突出优点,在产品开发前期能很好地指导系统的参数设置和系统调试。因此,本文采用 Simulink 软件构建了基于平衡电桥法与切换电桥法的新型漏电检测装置的仿真模型,利用图形用户界面(GUI)构建了仿真界面并进行了联合仿真;观察并记录了不同绝缘状态下,接触网直流供电系统母线对地电压及漏电流的大小。仿真结果表明,新型漏电检测方法能精确地测量正负母线对地漏电阻和漏电流的大小,且不存在检测死区,对系统电压的影响也比较小。

1 漏电检测原理

新型漏电检测方法结合了平衡电桥法与切换电桥法,通过构建 2 种不同的电桥状态并实时获取母线对地电压,联立方程组求解出母线对地电阻的大小,进而得到母线对地漏电流的大小。在构建电桥电路时,通过合理选择电阻大小,可以将母线电压对地偏离度控制在规定范围内。漏电检测原理如图 1 所示。

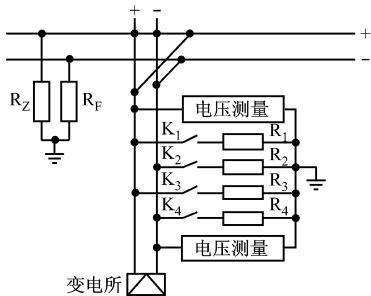


图 1 漏电检测原理

图 1 中, R_Z 为正对地绝缘电阻, R_F 为负对地绝缘电阻; R_1, R_2 为平衡电阻且 $R_1 = R_2$; R_3, R_4 为切换电阻且 $R_3 = R_4$ 。通过控制开关 K_1, K_2, K_3, K_4 的开闭,分别向系统投入平衡电阻与切换电阻;通过测量正对地电压与负对地电压,利用基尔霍夫电流定律联立方程组,即可解出绝缘电阻的大小^[5],进而可以通过欧姆定律计算出系统漏电流的大小。

2 漏电检测计算模型

母线对地泄漏状态可以分为 2 类:① 单极母线绝缘泄漏,即正母线(负母线)对地绝缘良好,而负母线(正母线)对地绝缘下降;② 双极母线绝缘泄漏,

即正负母线对地绝缘均下降。下面分 2 种情况予以讨论。

2.1 单极母线绝缘泄漏

假设正对地绝缘下降,此时负母线对地绝缘电阻可忽略。以图 1 为例, R_Z 下降时,闭合 K_1, K_2 ,打开 K_3, K_4 ,其等效电路如图 2 所示。

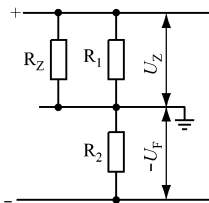


图 2 正泄漏等效电路

在平衡电桥状态下,根据基尔霍夫电流定律,可得

$$\frac{U_Z}{R_1 // R_Z} = \frac{-U_F}{R_2} \quad (1)$$

式中: $R_1 = R_2 = R$; U_Z, U_F 为正负母线对地电压。

令母线间电压 $U_N = U_Z - U_F$,可得投入平衡电阻时正对地电压偏离额定值($U_N/2$)的范围 ϵ_1 以及此时的漏电流 I_R :

$$\epsilon_1 = \frac{\left| U_N/2 - U_N \frac{R // R_Z}{R + R // R_Z} \right|}{U_N/2} = \frac{R}{2R_Z + R} \quad (2)$$

$$I_R = U_N \frac{R // R_Z}{R + R // R_Z} \frac{1}{R_Z} = \frac{U_N}{2R_Z + R} \quad (3)$$

根据 DL/T5044—1995《火力发电厂、变电所直流系统设计技术规定》,动力系统的直流母线电压应为直流系统额定电压的 87.5%~112.5%^[6],即 $\epsilon_1 \leq 0.125$,由式(2)可得 $3.5R \leq R_Z$ 。

以轨道供电常用的 DC1 500 V 为例,即 $U_N = 1\,500\text{ V}$,假设漏电流的阈值为 1.4 mA ^[3],则联合式(3)可得 $R_Z \geq 468.75\text{ k}\Omega$,则平衡电阻 R 可以取 $130\text{ k}\Omega$ 。综上,对于单极母线绝缘泄漏,以电压偏离 12.5% 的上限值作为报警阈值,以 $130\text{ k}\Omega$ 电阻作为平衡电阻,可以满足实时检测单极母线绝缘泄漏故障的要求,且引入平衡电阻后电压偏离度也能满足要求。

2.2 双极母线绝缘泄漏

当 R_Z 和 R_F 同时下降时,其母线对地电压偏离额定值($U_N/2$)的范围 ϵ_2 可以表示为

$$\epsilon_2 = \frac{U_N/2 - \frac{U_N R_Z}{R_Z + R_F}}{U_N/2} = \frac{R_F - R_Z}{R_Z + R_F} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,当 R_Z, R_F 相差很大时($R_F \leq 7R_Z/9$ 或 $R_F \geq 9R_Z/7$),电压的偏离度也比较大,这

与第 1 种情况很类似,故也可以将母线对地电压偏离度的上限值(12.5%)作为该泄漏状态的报警阈值。但是,当 R_Z, R_F 相差不大时,母线对地电压偏离度不大,无法通过测量电压偏离度的方法判断是否存在故障。这时就需要引入切换电桥法。切换电桥时,母线对地电压也会发生改变,为了缩小正负母线对地电压差,采用补偿切换原则:正母线绝缘电阻小于负母线绝缘电阻时($U_Z < -U_F$),切换负桥臂电阻;负母线绝缘电阻小于正母线绝缘电阻时($U_Z > -U_F$),切换正桥臂电阻^[5]。通过测量绝缘电阻的值,得到此时系统漏电流的大小,进而可判断漏电流是否超过设定值(1.4 mA)。

假设正母线绝缘电阻小于负母线绝缘电阻,以图 1 为例,先闭合 K_1, K_2 ,打开 K_3, K_4 ,投入平衡电阻,测量正负母线对地电压 U_{Z1}, U_{F1} ,如图 3(a) 所示;再闭合 K_1, K_2, K_4 ,打开 K_3 ,投入切换电阻 R_4 ,测量正负母线对地电压 U_{Z2}, U_{F2} ,如图 3(b) 所示。

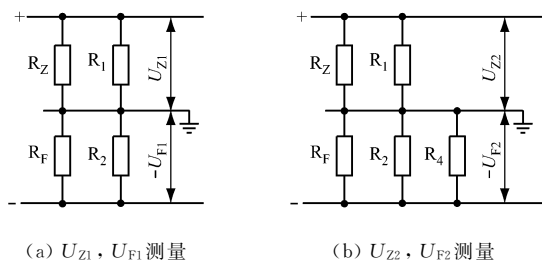


图 3 双极泄漏等效电路

结合图 3 和基尔霍夫电流定律可得

$$\begin{cases} \frac{U_{Z1}}{R_1 // R_Z} = \frac{-U_{F1}}{R_2 // R_F} \\ \frac{U_{Z2}}{R_1 // R_Z} = \frac{-U_{F2}}{R_4 // R_2 // R_F} \end{cases} \quad (5)$$

分析可知,当 R_Z 与 R_F 相等时,投入切换电阻 R_4 ,则电压偏离度及通过正母线绝缘电阻的漏电流达到最大值。此时,正对地电压偏离额定值($U_N/2$)的范围 ϵ_3 为

$$\epsilon_3 = \frac{\left| U_N/2 - U_N \frac{R}{R + R // R_4} \right|}{U_N/2} = \frac{R}{2R_4 + R} \leq 0.125 \quad (6)$$

由式(6)可得 $R_4 \geq 3.5R$,故可取 $R_3 = R_4 = 500 \text{ k}\Omega$ 。

2.3 绝缘电阻与漏电流的计算模型

当正母线绝缘电阻小于负母线绝缘电阻时,根据式(5)可以求得正负母线对地绝缘电阻 R_Z, R_F 分别为

$$\begin{cases} R_Z = \frac{-RR_a(U_{Z2}U_{F1} - U_{Z1}U_{F2})}{U_{F1}U_{F2}(R - R_a) + R_a(U_{Z2}U_{F1} - U_{Z1}U_{F2})} \\ R_F = \frac{RR_a(U_{Z2}U_{F1} - U_{Z1}U_{F2})}{U_{Z1}U_{F2}R - U_{Z2}U_{F1}R_a} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_a = R_1 // R_3 = R_2 // R_4$ 。

此时流过正绝缘电阻的漏电流 I_{RZ} 为

$$I_{RZ} = \frac{U_N(R_1 // R_Z)}{R_a // R_F + R_1 // R_Z} \frac{1}{R_Z} = \frac{U_N R_1 (R_F + R_a)}{R_1 R_Z (R_F + R_a) + R_F R_a (R_Z + R_1)} \quad (8)$$

同理可得当负母线绝缘下降程度更严重时,投入切换电阻 R_3 进行测量,其正负母线对地绝缘电阻 R_Z, R_F 分别为

$$\begin{cases} R_Z = \frac{RR_a(U_{Z2}U_{F1} - U_{Z1}U_{F2})}{U_{Z1}U_{F2}R_a - U_{Z2}U_{F1}R} \\ R_F = \frac{-RR_a(U_{Z2}U_{F1} - U_{Z1}U_{F2})}{U_{Z1}U_{Z2}(R_a - R) + R_a(U_{Z2}U_{F1} - U_{Z1}U_{F2})} \end{cases} \quad (9)$$

此时流过负绝缘电阻的漏电流 I_{RF} 为

$$I_{RF} = \frac{U_N(R_2 // R_F)}{R_a // R_Z + R_2 // R_F} \frac{1}{R_F} = \frac{U_N R_2 (R_Z + R_a)}{R_2 R_F (R_Z + R_a) + R_Z R_a (R_F + R_2)} \quad (10)$$

由以上分析可知,通过选取适当的平衡电阻与切换电阻,能够在保证母线对地电压偏离度满足规定要求的情况下,获得泄漏电阻的大小,进而获得漏电流的大小。其基本原理:实时检测正负母线对地电压的大小,当电压偏离度超过设定的阈值(12.5%)时,分别投入平衡电阻与切换电阻,检测正负母线对地绝缘电阻,计算其漏电流大小并报警。当电压偏离度在设定的阈值范围内时,还应定期投入平衡电阻与切换电阻,测量绝缘电阻与漏电流,当漏电流超过设定的阈值(1.4 mA)时报警。

3 仿真分析

3.1 等效 24 脉波整流机组的建模仿真

目前我国的轨道交通直流牵引整流变电站以等效 24 脉波为主流,其功能是将中压交流电源(10 kV 或 35 kV)经降压整流变为 DC1 500 V 或 DC750 V,然后经过接触网(轨)向机车供电。等效 24 脉波整流机组由 2 台 12 脉波的轴向分裂式牵引整流变压器组成,采用 Simulink 中的电力仿真模块来建立其仿真模型,如图 4 所示。其中电源为三相电压源,经过移相变压器 $\Delta/\Delta+7.5^\circ$ 和 $\Delta/\Delta-7.5^\circ$ 移相后接入 Y/Y-Y/ Δ 连接变压器 T_1 和 T_2 ,使得每台整流变压器的输出电压相位相差 30° 。每台

12 脉波整流变压器由 2 个 6 脉波桥式整流器 Bridge1、Bridge2(Bridge3、Bridge4)以并联的方式构成^[7]。

24 脉波整流机组仿真模型处于稳态时的直流侧电压波形如图 5 所示。电压在 1 个周期 (0.02 s) 内共有 24 个脉波,脉动间隔为 $\pi/24$;电压平均值为 1 660 V,符合标准要求(1 000~1 800 V)^[8]。

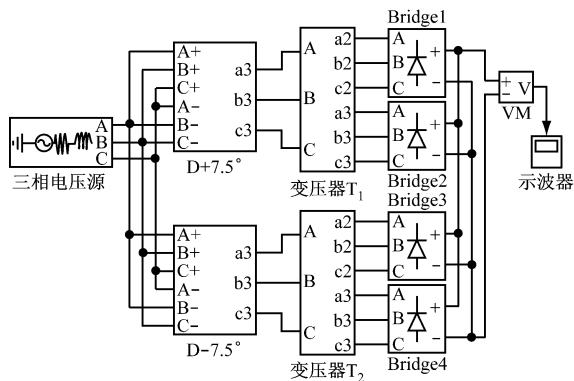


图 4 24 脉波整流机组仿真模型

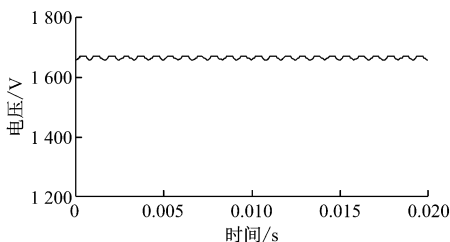


图 5 24 脉波整流机组输出电压波形

3.2 新型漏电检测方法建模

在 24 脉波整流机组模型的基础上建立了漏电检测仿真模型,如图 6 所示。通过控制开关 K_5 、 K_6 的开闭并设置 R_Z 、 R_F 的值来构建不同的绝缘状态;电压采样模块 VM_1 实时采样母线间电压,用于观察母线电压变化;电压采样模块 VM_2 、 VM_3 实时检测正负母线对地电压,通过控制开关 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 的开闭来测量绝缘电阻,进而得到正负母线对地漏电流的大小。电流采样模块 CM_1 与 CM_2 实现对漏电的直接测量,该测量值作为漏电电流的理论结果,

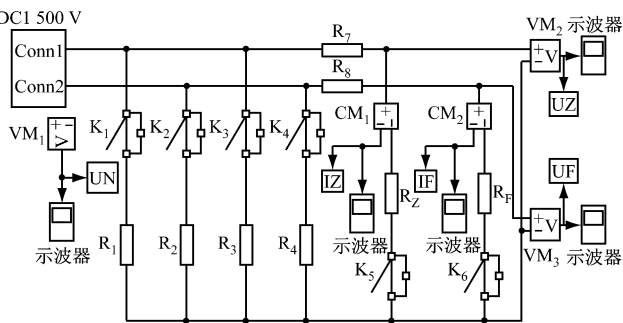


图 6 漏电检测仿真模型

通过比较计算值与该理论值的误差来判断漏电检测方法的可行性。所有采样模块采样结果在示波器中直接显示,且通过 To Workspace 功能块 UN, IZ, IF, UZ, UF 将数据迁移到工作空间中进行处理。利用 GUI 构建了该模型的控制面板,如图 7 所示。

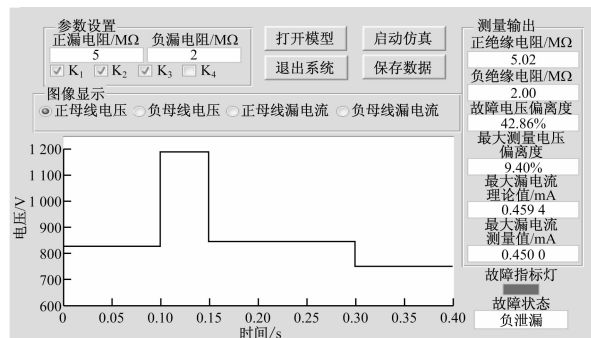


图 7 漏电检测仿真模型控制面板

3.3 仿真结果

分别用大小为 $500\text{ k}\Omega\sim 5\text{ M}\Omega$ 的绝缘电阻模拟接触网直流供电系统的各种绝缘泄漏状态,主要的仿真结果见表 1。故障电压偏离度指在正常绝缘状态下,引入设定绝缘电阻后的正负母线对地电压偏离度最大值;测量电压偏离度指引入切换电阻后的正负母线对地电压偏离度。通过对绝缘泄漏故障的仿真分析可知,新型漏电检测方法可将绝缘电阻与漏电流的测量误差控制在 1% 以内。存在测量误差的主要原因:供电电压是通过降压整流得到的,而不是标准的 DC1 500 V;线路中存在线路电阻,对电压的测量会有一定的影响。

通过分析电压偏离度可知,当正负母线对地绝缘电阻相差比较大时($R_F \leq 7R_Z/9$ 或 $R_F \geq 9R_Z/7$),故障电压偏离度超过了报警阈值(12.5%),但在检测过程中投入切换电阻后,其电压偏离度被拉回到了正常水平,这说明利用新型漏电检测方法进行接触网直流供电系统漏电流检测时,能很好地降低母线对地电压偏离度,提高系统的稳定性。而当正绝缘电阻相差不大时,其故障电压偏离度没有超过报警阈值。当两者的值都比较大时,其漏电流比较小,属于正常状态,如第 1 组数据;但当两者都比较小时,其漏电流超过了报警阈值(1.4 mA),属于双极泄漏故障,如第 8 组数据。

4 结语

提出了一种将平衡电桥法与切换电桥法相结合的新型井下接触网直流供电系统漏电检测方法,并通过 Simulink 仿真结果验证了该方法的可行性。

表 1 漏电检测方法仿真结果

序号	绝缘电阻设定值/ $M\Omega$		绝缘电阻测量值/ $M\Omega$		电压偏离度/%		理论漏电流/ mA	测量漏电流/ mA
	R_Z	R_F	R_Z	R_F	故障	测量		
1	5.0	4.0	5.03	4.02	11.11	10.94	0.230 7	0.229 5
2	5.0	2.0	5.02	2.01	42.86	9.40	0.455 0	0.453 1
3	3.0	4.0	3.02	4.02	14.29	10.67	0.306 9	0.305 1
4	3.0	2.0	3.01	2.01	20.00	10.07	0.457 6	0.455 8
5	1.0	1.3	1.01	1.31	13.05	9.24	0.909 8	0.905 1
6	1.0	0.5	1.00	0.50	33.34	4.91	1.745 4	1.738 5
7	0.5	0.8	0.50	0.80	23.08	6.06	1.764 1	1.757 1
8	0.5	0.6	0.50	0.60	9.09	7.92	1.795 0	1.790 4

相对于传统的直流系统漏电检测方法,新型漏电检测方法具有以下优点:可实时检测母线对地绝缘状态与漏电流大小,不存在检测死区;大大降低了母线对地电压偏离度,对母线对地电压的影响小;不受系统对地分布电容的影响,检测精度高。

参考文献:

[1] YIN Guohui, LIU Yuhai, XU Hai, *et al.* The new DC system insulation monitoring device based on phase differences of magnetic modulation[C]//Proceedings of International Conference on Systems and Informatics, Yantai, 2012: 585-589.

[2] 邓晨华. 直流系统绝缘在线监测与蓄电池故障预测

[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[3] 贾秀芳,赵成勇,李黎,等. 直流系统绝缘监测综合判据[J]. 电力系统自动化,1999,23(16):47-49.

[4] 苏义鑫,刘林伟. 平衡电阻法监测直流系统绝缘[J]. 电力系统自动化,2003,27(14):65-68.

[5] 中兴通讯股份有限公司. 一种直流电源绝缘检测装置及其检测方法:中国,102830283A[P]. 2012-12-19.

[6] DLT 5044—1995 火力发电厂、变电所直流系统设计技术规定[S].

[7] 赵顺. 地铁接触网故障测距研究及实现[D]. 成都:西南交通大学,2012.

[8] GB/T 10411—2005 城市轨道交通直流牵引供电系统[S].