

便携式直流绝缘检测算法研究与应用

黄海宏¹, 黄煜炜¹, 刘鑫²

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 国网安徽省电力有限公司检修分公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 针对便携式直流绝缘检测装置要求, 提出一种基于单桥臂的动态差值算法, 并基于该算法设计了一款便携式直流绝缘检测校验一体机。详细分析了单桥臂绝缘监察系统降低继电保护装置误动作风险的原理, 展示了直流漏电流传感器零漂变化, 推导出能够克服直流漏电流传感器零漂的动态差值算法。通过直流绝缘检测校验一体机实验表明, 该算法计算精度较高, 可有效解决直流漏电流传感器零漂影响, 并能保证直流系统安全。

关键词: 便携式直流绝缘检测; 动态差值算法; 单桥臂; 不平衡桥; 一点接地误动

中图分类号: TM721.1; TM855 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23269

Research and Application of Portable DC Insulation Detection Algorithm

HUANG Haihong¹, HUANG Yuwei¹, LIU Xin²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009,

Anhui, China; 2. State Grid Anhui Maintenance Corporation, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: Aiming at the requirements of portable DC insulation detection devices, a dynamic difference algorithm based on single-arm was proposed, and a portable DC insulation detection and verification integrated machine was designed based on this algorithm. The principle of the single-arm insulation monitoring system to reduce the risk of malfunction of the relay protection device was analyzed in detail, and the zero drift change of DC leakage current sensor was demonstrated. The dynamic difference algorithm that can overcome the zero drift of DC leakage current sensor was deduced. The experimental result of the DC insulation detection and verification integrated machine shows that the algorithm has high calculation accuracy, the zero drift effect of DC leakage current sensor can be solved effectively, and the safety of DC power system can be ensured.

Key words: portable DC insulation detection; dynamic difference algorithm; single-arm; unbalanced bridge; one point ground fault

直流电源系统是发电厂和变电站中保护、信号、通讯等回路的电源, 其绕行回路长, 分布支路多, 经常会由于线路老化或人为损伤等原因, 造成线路绝缘下降, 甚至直接接地, 进而引发继电保护装置误动作, 甚至熔断器熔断或主回路跳闸等严重后果^[1-3]。为了保证这些分支网络可靠运行, 防止因绝缘问题导致事故发生, 发电厂和变电站中均安装微机型直流绝缘监察装置。但随着时间推移和环境变化, 一些老场站会出现绝缘监察装置漏报或误报现象, 形成直流系统的安全运行隐患。其中首要原因就是直流漏电流传感器会发生零点漂移现象^[4], 造成绝缘电阻计算不准, 引起绝缘监察装置漏报或误报。因此需要开

发出便携式绝缘检测校验仪器, 在发生故障时辅助查找故障支路, 还可以校验已有绝缘监察装置精度。

作为检测仪表, 便携式绝缘检测校验仪器应确保原有直流系统安全, 不能引起继电保护装置误动作。文献[5-6]分析了一点接地引发继电保护误动作原理, 并提出单桥臂系统设计方式, 但未对检测算法进行分析。同时, 便携式绝缘检测校验仪器应便于操作, 故选用开合式的钳型直流漏电流传感器, 但钳型直流漏电流传感器零漂较大, 不能满足计算精度要求。为克服直流漏电流传感器零漂, 文献[7-8]提出动态差值法思想, 并结合双桥臂系统进行了算法分析。

作者简介: 黄海宏 (1973—), 男, 博士, 教授, Email: hhaihong741@126.com

本文结合单桥臂设计方式和动态差值法思想,详细推导了适用于便携式绝缘检测的单桥臂母线绝缘算法和支路绝缘动态差值算法,该算法可以有效降低一点接地引发继电保护装置误动作风险,并能抵消漏电流传感器零漂影响。基于该算法设计了一款便携式的绝缘检测校验一体机,利用该一体机进行试验,证明了算法的有效性和计算精度。

1 防止一点接地误动的单桥臂设计

双桥臂直流绝缘监测系统原理图如图1所示。图中, R_p 和 R_n 为正、负极直流母线对地电阻; C_p 和 C_n 为正、负极直流母线对地电容; R 为平衡桥电阻; R_0 为切换桥检测电阻; S_p 和 S_n 为正、负极桥臂切换开关; R_j 为出口动作继电器线圈内阻。正常运行时,通过桥臂开关 S_p 和 S_n 定时切换,形成不平衡桥,引起电压波动,测量不同开关状态下的 u_p 和 u_n 便可以计算出直流系统对地电阻^[9-10]。

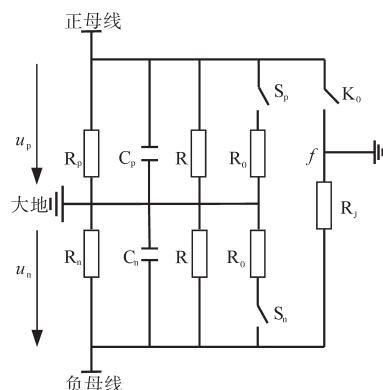


图1 双桥臂直流绝缘监测系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of dual-arm DC insulation monitoring system

一般而言,由于直流母线正、负极均不接地,所以当某一点发生接地时,不会对系统运行产生影响,只有两点接地才会影响系统安全,但根据现场运行经验表明,一点接地同样可能引发继电保护装置误动作。根据文献[5]分析可知,直流系统发生一点接地误动作需要3个条件:直流系统对地电容达到一定数量级;保护出口继电器线圈正电源侧发生一点接地;绝缘监察装置正常运行过程中直流母线负极对地电压超过了保护出口继电器动作电压。

图1所示的双桥臂直流绝缘监测系统在运行过程中,当投入正极检测电阻后,必然会造成系统正极对地等效电阻减小,从而引起系统负极对地电压升高。若此时系统正极对地电阻远小于

系统负极对地电阻,或者检测电阻阻值选取不合适,可能会造成直流系统负极对地电压大于继电器动作电压,为继电保护误动作提供了一个条件。为了杜绝检测电阻投入引起绝缘监测装置误动作,可以采用单桥臂直流绝缘监测系统,原理图如图2所示。

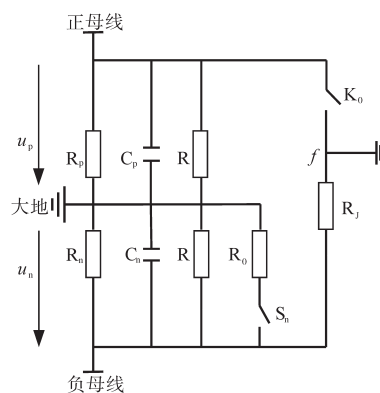


图2 单桥臂直流绝缘监测系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of single-arm DC insulation monitoring system

图2所示的单桥臂直流绝缘监测系统,由于只有负极母线和地之间有检测电阻进行切换,检测电阻投入时,使得系统负极对地电阻减小,从而减小负极母线对地电压,不会出现由于检测电阻投切使得负极对地电压超过继电器动作电压的情况,可以有效降低由于一点接地引发的继电保护误动作风险。

2 直流漏电流传感器零漂

电流检测主要包括霍耳效应、电磁感应、光电效应和磁光效应等方法,由于直流漏电流是一种差值小信号,仅在mA级别,通常采用电磁感应方式检测剩余电流,常用测试方法是基于磁调制原理。目前,大多数直流漏电流传感器采用的是磁通门技术,利用互感器电磁隔离的原理,将需要检测的直流电流信号转换为固定比率的直流电流或者直流电压信号^[11]。

直流漏电流传感器为了维持内部的磁场平衡,采用内部的方波震荡器产生电流来补偿原边电流,使输出电压或电流能够准确反映原边电流,故可用来检测直流小电流和差值电流。在使用时,用直流漏电流传感器夹住某一条线路,测量的是该线路中流过的直流电流,夹住两条线路测量的是两条线路中电流的差值,即漏电流。

但是由于温度变化、磁芯饱和或者传感器内部噪声、漂移失调等原因,直流漏电流传感器会

存在一定的零点漂移,尤其是开合式的钳型漏电流传感器由于磁路不是完全紧密结合,零点漂移现象更为严重。图3所示为某型号的三个钳型直流漏电流传感器的零漂随时间变化图,每隔2 min测量一次传感器零漂;图4所示为某型号的一个钳型直流漏电流传感器分别两次测得的零漂随时间变化图。

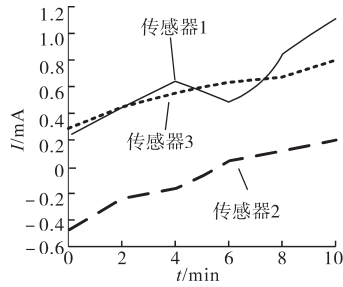


图3 三个漏电流传感器零漂随时间变化图

Fig.3 The zero drift of three leakage current sensors changes with time

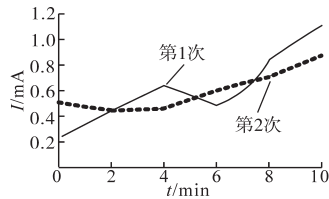


图4 一个漏电流传感器两次零漂随时间变化对比图

Fig.4 Comparison of two zero drift changes with time for a leakage current sensor

从图3可以看出,该型号钳型漏电流传感器零漂随时间波动较大,虽为同一型号,但是零漂各不相同。从图4可以看出,即使是同一个传感器,在不同环境下,零漂变化也不相同,且没有固定规律,不能采用数据拟合等方式得出零漂变化曲线。在实际绝缘电阻计算中,如果测得的漏电流误差达到0.1 mA级别就会带来较大误差,而上图所示传感器零漂最大可达1 mA级别,由此计算出的绝缘电阻将无法反映真实绝缘情况。闭合式直流漏电流传感器相对于开合式传感器通常精度更高,零漂更稳定,但不能满足便携式绝缘检验仪器需要,所以必须采取相应办法克服传感器零漂影响。

3 算法研究

3.1 母线绝缘算法

单桥臂系统检测母线绝缘状况原理如图5所示。图5a是桥臂开关S打开时的等效电路,此时分别测量正、负母线对地电压 u_{p1} 和 u_{n1} ;图5b是桥臂开关S闭合时的等效电路,此时分别测量正、负

母线对地电压 u_{p2} 和 u_{n2} 。

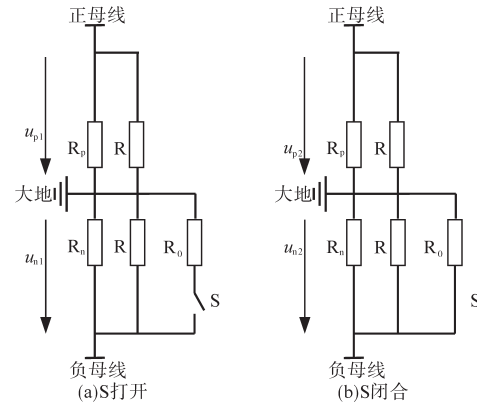


图5 单桥臂检测母线绝缘原理图

Fig.5 Schematic diagram of single-arm detection bus insulation

由图5a,根据电阻串联分压公式可得:

$$\frac{R_p // R}{R_n // R} = \frac{u_{p1}}{u_{n1}} \quad (1)$$

由图5b,根据电阻串联分压公式可得:

$$\frac{R_p // R}{R_n // R // R_0} = \frac{u_{p2}}{u_{n2}} \quad (2)$$

由式(1)可得:

$$R_p // R = \frac{u_{p1}}{u_{n1}} R_n // R \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可得:

$$R_n // R = \frac{u_{n1} u_{p2} - u_{p1} u_{n2}}{u_{p1} u_{n2}} R_0 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可得:

$$R_p // R = \frac{u_{n1} u_{p2} - u_{p1} u_{n2}}{u_{n1} u_{n2}} R_0 \quad (5)$$

求解式(5)可得:

$$R_p = \frac{u_{n1} u_{p2} - u_{p1} u_{n2}}{u_{n1} u_{n2} R - (u_{n1} u_{p2} - u_{p1} u_{n2}) R_0} R R_0 \quad (6)$$

求解式(4)可得:

$$R_n = \frac{u_{n1} u_{p2} - u_{p1} u_{n2}}{u_{p1} u_{n2} R - (u_{n1} u_{p2} - u_{p1} u_{n2}) R_0} R R_0 \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)即可求得直流母线正、负极对地绝缘电阻值。

3.2 支路绝缘算法

单桥臂系统检测支路绝缘状况原理如图6所示。图中, R_{kp} 为支路 k 正极对地电阻, R_{kn} 为支路 k 负极对地电阻。图6a是桥臂开关S打开时的等效电路,此时分别测量正、负母线对地电压 u_{p1} 和 u_{n1} 以及支路 k 的漏电流 I_{k1} ;图6b是桥臂开关S闭合时的等效电路,此时分别测量正、负母线对地电压 u_{p2} 和 u_{n2} 以及支路 k 的漏电流 I_{k2} 。

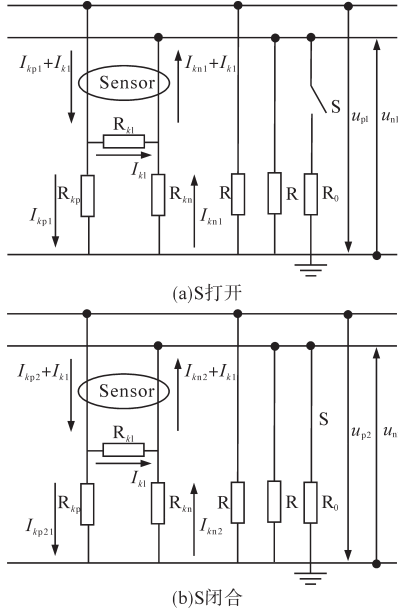


图6 单桥臂检测支路绝缘原理图

Fig.6 Schematic diagram of single-arm detection branch insulation

根据漏电流传感器原理可知:

$$I_{k1} = (I_{kp1} + I_{kl}) - (I_{kn1} + I_{kl}) = I_{kp1} - I_{kn1} \quad (8)$$

$$I_{k2} = (I_{kp2} + I_{kl}) - (I_{kn2} + I_{kl}) = I_{kp2} - I_{kn2} \quad (9)$$

根据图6a和欧姆定律可得:

$$I_{kp1} = u_{p1}/R_{kp} \quad (10)$$

$$I_{kn1} = u_{n1}/R_{kn} \quad (11)$$

根据图6b和欧姆定律可得:

$$I_{kp2} = u_{p2}/R_{kp} \quad (12)$$

$$I_{kn2} = u_{n2}/R_{kn} \quad (13)$$

将式(10)和式(11)代入式(8)可得:

$$\frac{u_{p1}}{R_{kp}} - \frac{u_{n1}}{R_{kn}} = I_{k1} \quad (14)$$

将式(12)和式(13)代入式(8)可得:

$$\frac{u_{p2}}{R_{kp}} - \frac{u_{n2}}{R_{kn}} = I_{k2} \quad (15)$$

式(14)减去式(15)可得:

$$\frac{u_{p1} - u_{p2}}{R_{kp}} - \frac{u_{n1} - u_{n2}}{R_{kn}} = I_{k1} - I_{k2} \quad (16)$$

设正、负母线之间电压为 u_m ,则

$$u_{n1} = u_m - u_{p1} \quad (17)$$

$$u_{n2} = u_m - u_{p2} \quad (18)$$

将式(17)和式(18)代入式(16)可得:

$$\frac{u_{p1} - u_{p2}}{R_{kp}} + \frac{u_{p1} - u_{p2}}{R_{kn}} = I_{k1} - I_{k2} \quad (19)$$

$$\frac{u_{n2} - u_{n1}}{R_{kp}} + \frac{u_{n2} - u_{n1}}{R_{kn}} = I_{k1} - I_{k2} \quad (20)$$

进一步化简式(19)和式(20)可得:

$$R_{kp}/R_{kn} = \left| \frac{u_{p1} - u_{p2}}{I_{k1} - I_{k2}} \right| = \left| \frac{u_{n1} - u_{n2}}{I_{k1} - I_{k2}} \right| \quad (21)$$

设两个开关时刻间隔几秒时间,在这么短的时间内温度、湿度和传感器摆放方式等几乎相同,此时传感器零漂也会几乎不变^[7-8]。设传感器零漂为 ΔI ,两个时刻的真实漏电流分别为 I_{k1}^* , I_{k2}^* ,则可得:

$$I_{k1} = I_{k1}^* + \Delta I \quad (22)$$

$$I_{k2} = I_{k2}^* + \Delta I \quad (23)$$

将式(22)和式(23)代入式(21)可得:

$$R_{kp}/R_{kn} = \left| \frac{u_{p1} - u_{p2}}{I_{k1}^* - I_{k2}^*} \right| = \left| \frac{u_{n1} - u_{n2}}{I_{k1}^* - I_{k2}^*} \right| \quad (24)$$

由式(24)可以看出,式(21)中传感器测量得到的漏电流的差值等于真实漏电流差值,已经抵消了漏电流传感器零漂的影响,且电压也是两个时刻的差值,也可以抵消电压传感器或者AD芯片存在的零漂,进一步提高计算精度。但式(21)计算的是支路正、负极对地绝缘电阻的并联值,为进一步确定支路正、负极对地电阻,需根据测量的电压分情况确定。

若直流系统仅正极接地,负极不接地,此时 R_{kn} 趋向于无穷,则式(21)计算的值为 R_{kp} 。同理,若直流系统仅负极接地,正极不接地,此时 R_{kp} 趋向于无穷,则式(21)计算的值为 R_{kn} 。

若直流系统正、负极均接地,可分两种情况:当计算的支路绝缘电阻并联值大于绝缘电阻报警值或预警值时,该支路的正、负极接地电阻必然大于绝缘电阻报警值或预警值,该支路绝缘情况没有问题;当计算的支路绝缘电阻并联值小于绝缘电阻报警值或预警值时,该支路绝缘情况可能存在问题,需对该支路进行检查。

4 一体机设计和实验验证

4.1 便携式绝缘检测校验一体机设计

便携式绝缘检测校验一体机系统如图7所示,主要分为数据采样和计算显示两个部分。数据采样采用霍尔电压传感器和钳型直流漏电流传感器,并采用16位的AD采样芯片以满足采样数据的数据精度;开关切换、数据处理和算法计算采用型号为TMS320F28335的DSP,程序用C语言编写,计算结果通过一块液晶屏幕实时显示。

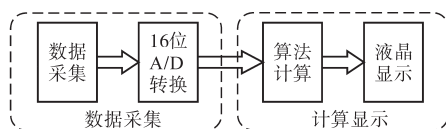


图7 直流绝缘检测校验一体机系统图

Fig.7 System diagram of DC insulation testing and verification integrated machine

采集单元主要承担的工作是采集不同开关时刻正、负极母线对地电压和漏电流传感器测量的电流。被测电压首先通过限流电阻转换为不高于 10 mA 的电流,然后经过变比为 10 mA:25 mA 的电流型霍尔电压传感器,在传感器副边感应出相应的电流,最后通过对地电阻转换为电压信号送入 AD 芯片。被测漏电流首先通过变比为 100 mA:2.5 V 的钳型直流漏电流传感器,把原边检测到的漏电流转换为电压信号。由于检测的漏电流相对较小,转换后的电压信号偏低,与后级 AD 的测量范围相差较远,为提高测量精度,设置同向放大电路和跟随电路将其电压信号放大后再送入 AD 芯片进行数模转换^[12-13]。

采集到的电压和漏电流经过 AD 芯片转换送入 DSP,首先通过电压判断接地情况,如果仅单极性接地,则此时液晶屏幕可直接显示接地极的绝缘阻值;如果正、负极均接地,则显示支路正、负极绝缘电阻并联值。该一体机还可以通过按键设置模拟接地电阻值,可同时输出 4 组模拟接地电阻,对已有的微型直流绝缘监察装置进行检

测能力校验。

4.2 实验验证

为了验证基于单桥臂的母线绝缘算法和支路动态差值算法的有效性,使用直流稳压电源输出直流 240 V 模拟正、负母线,选用额定量程为 100 mA 的钳型直流漏电流传感器检测支路漏电流,其输出电压 ± 2.5 V 对应电流 ± 100 mA,选用不同阻值功率电阻作为支路绝缘电阻。平衡桥电阻 $R=30$ k Ω ,切换桥检测电阻 $R_0=30$ k Ω ,桥臂切换时间间隔为 500 ms^[14-15]。进行了 3 次单支路正、负极均接地实验,验证母线绝缘算法;由于便携式绝缘检测校验一体机可同时测量 3 个支路,所以分别进行 1 次三支路单极性接地实验和 1 次三支路正、负极均接地实验,验证支路绝缘算法。实验数据分别如表 1~表 3 所示。

由表 1 数据可以看出,母线绝缘算法可以准确计算出母线对地绝缘电阻值;由表 2 数据可以看出,支路绝缘算法在单极性接地时可以准确计算出接地极各支路接地电阻;由表 3 数据可以看出,支路绝缘算法在多支路正负极均接地时可以准确计算出各支路正、负极接地电阻并联值。综上,本文推导的基于单桥臂的母线绝缘算法和支路动态差值算法实际有效,精度较高,且在检测电阻投切过程中会使直流母线负极对地电压减小,能有效降低一点接地引起保护继电器误动作风险。

表 1 验证母线绝缘算法实验数据

Tab.1 Verify the experimental data of the bus insulation algorithm

实际值		测量参数				显示结果	
$R_p/k\Omega$	$R_n/k\Omega$	u_{p1}/V	u_{n1}/V	u_{p2}/V	u_{n2}/V	$R_p/k\Omega$	$R_n/k\Omega$
40.06	30.06	127.55	112.32	151.38	88.62	40.19	30.51
50.00	60.00	116.21	123.94	146.24	93.79	49.28	59.01
90.40	60.00	126.60	112.23	156.00	83.10	89.62	59.33

表 2 三支路单极性接地验证支路算法实验数据

Tab.2 Three-branch unipolar grounding verification branch algorithm experimental data

实际值	测量参数						计算值
$R_n/k\Omega$	u_{p1}/V	u_{n1}/V	u_{p2}/V	u_{n2}/V	I_{k1}/mA	I_{k2}/mA	$R_n/k\Omega$
30.06					2.383	1.965	29.41
50.00	178.40	60.90	190.80	48.60	1.551	1.300	49.00
90.40					0.576	0.438	89.09

表 3 三支路正负均接地验证支路算法实验数据

Tab.3 Three-branch both positive and negative polarity grouding rertification branch algorithm experimental data

实际值		测量参数						显示结果	
$R_p/k\Omega$	$R_n/k\Omega$	u_{p1}/V	u_{n1}/V	u_{p2}/V	u_{n2}/V	I_{k1}/mA	I_{k2}/mA	理论值/k Ω	计算值/k Ω
25.07	30.06					0.952	2.149	13.67	13.89
40.06	50.00	116.20	123.00	132.80	106.40	0.938	1.671	22.24	22.65
90.40	60.00					-1.007	-0.545	36.06	35.93

5 结论

本文分析了一点接地引起继电保护误动作的基本原理,提出了防止一点接地误动的单桥臂绝缘检测系统设计,并详细推导了便携式绝缘检测母线绝缘算法和支路动态差值算法,该算法推导过程简洁明了,能够克服直流漏电流传感器存在的零漂,提高计算精度。经便携式绝缘检测校验一体机实验,结果表明该算法精度较高,符合国家标准和便携式绝缘检测设备要求。但是,在直流系统正、负极均接地时,该算法仅能求得支路正、负极对地电阻并联值,因此有待进一步研究。

参考文献

- [1] 黄海宏,陈伟,王海欣.多直流支路接地检测方法的研究[J].电子测量与仪器学报,2011,25(9):793-799.
Huang Haihong, Chen Wei, Wang Haixin. Study of detecting method for several branches grounding[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(9): 793-799.
- [2] 陈宁,陈嘉瑶,钟志平.基于电压注入法的电动汽车绝缘电阻在线检测[J].电气传动,2019,49(2):66-73.
Chen Ning, Chen Jiayao, Zhong Zhiping. Isolation resistance on-line detection for electric vehicle based on voltage injection[J]. Electric Drive, 2019, 49(2): 66-73.
- [3] 赵梦欣,陈国峰,余伟成.直流系统绝缘监测的直流漏电流法改进方案[J].电力系统自动化,2009,33(14):83-89.
Zhao Mengxin, Chen Guofeng, Yu Weicheng. Improved scheme of DC leakage current method for DC system insulation monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 83-89.
- [4] 黄煜炜,秦金飞,刘妮妮,等.直流绝缘双臂不平衡桥差流检测方法[J].电器与能效管理技术,2019,11(6):57-61.
Huang Yuwei, Qin Jinfei, Liu Nini, et al. Differential current method of unbalanced bridge with double bridge arm for DC insulation detection[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2019, 11(6): 57-61.
- [5] 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.
- [6] 任东红,樊树根.直流电源系统接地引起保护误动的分析及对策[J].供用电,2011,28(3):39-43.
Ren Donghong, Fan Shugen. Analysis and measures to protection misoperation caused by grounding of DC power supply system[J]. Power Supply, 2011, 28(3): 39-43.
- [7] 周军,朱博楠,杨圣强,等.基于动态差值法的直流系统绝缘

- 监测技术[J].电工技术学报,2015,30(1):235-241.
Zhou Jun, Zhu Bonan, Yang Shenqiang, et al. Dynamic difference value method for insulation monitoring in DC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 235-241.
- [8] 钱烈江,李长云,徐曦,等.间接零点漂移消除法的直流系统绝缘监测研究[J].自动化仪表,2018,39(12):26-29.
Qian Liejiang, Li Changyun, Xu Xi, et al. Research on DC system insulation monitoring by using indirect zero drift elimination method[J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(12): 26-29.
- [9] 甘江华,王佰超,尹强,等.基于组合桥的在线绝缘监测方法[J].自动化仪表,2019,40(9):14-18.
Gan Jianghua, Wang Baichao, Yin Qiang, et al. On-line insulation inspection method based on combined bridge[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(9): 14-18.
- [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.
Cheng Linyu, Dai Yuxing, Xiong Shuhua, et al. Online insulation supervising for DC system and its realization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(6): 860-865.
- [11] 戚继飞,阳桂蓉,罗志强.相位差磁调制直流漏电流传感器误差分析[J].自动化与仪器仪表,2018,9(5):149-152.
Qi Jifei, Yang Guirong, Luo Zhiqiang. Error analysis of phase difference magnetic modulation DC leakage current sensor[J]. Automation and Instrumentation, 2018, 9(5): 149-152.
- [12] 黄海宏,颜碧琛,赵常威,等.氧化锌避雷器泄漏电流检测的优化FFT分析[J].电子测量与仪器学报,2019,33(4):87-94.
Huang Haihong, Yan Bichen, Zhao Changwei, et al. Optimized FFT analysis for leakage current detection of zinc oxide arrester[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(4): 87-94.
- [13] 郭永新,袁绍民,杨燕,等.基于STM32的绝缘电阻监测仪的研究[J].电气传动,2017,47(3):74-77.
Gou Yongxin, Yuan Shaomin, Yang Yan, et al. Based on the STM32 research of insulation resistance meter[J]. Electric Drive, 2017, 47(3): 74-77.
- [14] 黄晶,朱武.基于双平衡桥探测直流系统接地故障检测的新方法[J].电测与仪表,2017,54(8):75-79.
Huang Jing, Zhu Wu. A new method to detect DC circuit grounding fault based on the double balanced bridge[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8): 75-79.
- [15] 敖非,陈仕娟,许立强,等.绝缘监测装置接地故障检测桥电阻参数研究[J].湖南电力,2018,38(1):11-15.
Ao Fei, Chen Shijuan, Xu Liqiang, et al. Study of bridge resistance parameters of ground fault in the insulation monitoring device[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(1): 11-15.

收稿日期:2021-03-26

修改稿日期:2021-04-28