

低压直流系统剩余电流检测技术研究综述

汪倩¹, 陈思磊², 刘家欣³, 薛中正³, 李兴文³

(1. 西安理工大学理学院, 西安 710048; 2. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710048; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 随着“光储直柔”技术的发展,由低压直流系统剩余电流带来的安全隐患逐渐凸显,剩余电流检测技术越来越得到重视。文中总结了低压直流系统剩余电流故障仿真的进展,仿真分析了低压直流系统典型电击事故和多端电源供电系统的循环净电流,给出了剩余电流检测保护装置的配置指导原则;对比了几类剩余电流检测方法的优势与不足,研究了适用于低压直流系统剩余电流的检测方法与算法;基于相关标准搭建了剩余电流测试平台,测试了中国某厂家的剩余电流检测样机的性能;最后总结了低压直流系统剩余电流检测技术的研究进展与发展前景。

关键词: 直流系统; 剩余电流; 模型仿真; 检测算法

Review on Research of Residual Current Detection Technology in Low Voltage DC Systems

WANG Qian¹, CHEN Silei², LIU Jiaxin³, XUE Zhongzheng³, LI Xingwen³

(1. School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. The State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the development of “photovoltaics, energy storage, direct current and flexibility” technology, safety risks brought by low voltage DC system residual current gradually become prominent, and residual current detection technology has been paid more attention. In this paper, at first the progress of residual current fault simulation in low voltage DC system is summarized, and the typical shock accidents of low voltage DC system and the net circulating current of multi-terminal power supply system are simulated and analyzed, and the guiding principle of the residual current detection and protection device is given. Then the advantages and disadvantages of several kinds of residual current detection methods are compared, and the detection methods and algorithms suitable for low voltage DC system residual current are studied. Furthermore, based on the relevant standards, the residual current testing platform is built, and the performance of the residual current testing prototype of a domestic manufacturer is tested. Finally, the research progress and development prospect of low voltage DC system residual current detection technology are summarized.

Key words: DC system; residual current; model simulation; detection algorithm

0 引言

随着中国风电和光伏装机容量持续迅猛发展并跃居世界第一,新型可再生能源成为了中国战略新兴产业。在“碳达峰,碳中和”的目标推动下,预计2060年新型可再生能源的发电量占比将达到

58%。能源产业向以清洁能源为主的转变,成为了直流配用电技术进一步推广与应用的强大驱动力。与交流配用电系统相比,直流配用电系统具有系统复杂度低,容量大,线路损耗小等优点。但同时,直流电网规模逐渐增大,直流负载类型日趋多样,大大增加了直流电网的电气安全隐患^[1]。

收稿日期:2023-02-10; 修回日期:2023-04-06

基金项目:陕西省科技计划项目(2022TD59)。

Project Supported by Shaanxi Provincial Science and Technology Plan Project(2022TD59).

对直流配用电系统保护技术的研究还处于起步阶段,传统应用于交流系统的保护技术难以直接迁移到直流系统中,严重阻碍了直流配电系统的发展。在这之中以直流剩余电流尤为突出。剩余电流是指系统线路中各相线电流矢量和不为零的电流,在低压直流系统中的剩余电流会造成人身触电、电气火灾等危害。通常几十到几百毫安的剩余电流即可造成很大的威胁,而传统的过电流保护技术同样难以对如此小的电流进行准确保护。

直流剩余电流保护已经成为当前的研究热点,但是目前国内用于直流系统的剩余电流动作保护器产品较少,难以直接推广应用到直流配用电系统,还需要进一步的研究。研究直流系统内剩余电流检测技术有利于保障直流系统安全、稳定、高效运行,相关检测装置也能填补目前中国直流电气安全领域的产品空白。文中从系统仿真建模到实验数据分析,再到检测样机研制及测试,对低压直流系统直流剩余电流检测方法及样机,较为全面地介绍了相关研究进展。

1 低压直流系统剩余电流仿真

1.1 低压直流系统典型电击事故仿真

针对低压直流系统进行典型的剩余电流故障仿真,获取典型的剩余电流波形,有助于优化剩余电流动作保护器的配置,进而实现低压直流系统中的剩余电流保护。而对人身触电进行保护为剩余电流动作保护器的主要功能之一,因此近年来,国内外许多学者针对低压直流系统典型电击事故仿真展开研究。

Liu Y等人通过搭建生物触电实验测试平台,获取了电击电压与电流的数据,并利用欧姆定律计算出阻抗值,同时基于MATLAB建立了数值仿真模型,结果表明该模型可以很好地模拟生物电击的暂态过程^[2]。Li L等人通过分析间接电击事故发生时TT、IT、TN 3种系统的接触电压,得到了3种系统的不同的剩余电流保护方法,Wang T通过比较低压交、直流系统的接触电压阈值,得出低压直流系统更为安全的结论^[3-4]。Wang S等人对直流电流电击导致人心室颤动的主要影响因素进行了分析和总结,并根据人体接触电压阈值提出了不同电压水平、不同接地方式下剩余电流动作保护器的开断时间要求^[5]。Zhou N等人根据电流信息、人体阻抗等分析了人体的安全电击电流,并进行了TT、IT、TN 3种不同电击场景的建模仿真,进而计算出不同场

景的人体电击电流^[6]。Liu J等人分析研究了低压直流系统中不同接地电阻下的故障电流,发现接地电阻较大时故障电流更小,难以触发系统短路保护^[7]。Hallemans L等人建立了单极低压直流系统的PSCAD仿真模型,对其相间故障和接地故障进行了研究分析,并进行相关实验,将实验结果与仿真结果对比,得出结论,间接电击事故发生时接触电压为直流母线电压的一半,有可能会使剩余电流动作保护器拒动^[8]。

综上所述,目前对低压直流系统的剩余电流故障仿真还不够全面,特别是针对人体电击事故这一典型场景,对不同情况下的人体阻抗模型研究还不够完善。大多数研究还局限于接触电压的计算,对TN、TT、IT系统下发生直接电击和间接电击事故时流过人体的电击电流的定量研究不足,对剩余电流动作保护器配置的指导作用有限。

标准IEC 60479-1:2018《电流对人和家畜的效应》给出了交直流电的人体电流效应和干燥条件下,大的接触表面积,交流电流和直流电流,路径为手到手的人体总阻抗^[9]。利用人体电流效应数据可以得出在不造成损害前提下人体可以通过的电流值与持续时间。利用阻抗数据可以进行拟合计算得到人体总阻抗的表达式,再利用标准中的人体内阻抗百分比数据得到不同电流路径下的人体内阻抗,从而拟合出不同条件人体直流阻抗 Z_T 的表达式^[10]

$$Z_T = a \cdot e^{bU} + c \cdot e^{dU} \quad (1)$$

式(1)中, a 、 b 、 c 、 d 分别为不同条件下拟合得到的参数。

因此,文[10]基于MATLAB/Simulink构建人体直流阻抗仿真模型,见图1。利用受控电流源CCS(controlled current source)模拟人体直流阻抗,图1中: U 为人体接触电压; I 为发生电击时通过人体的电流; t 为发生电击的时刻; a 、 b 、 c 、 d 分别为式(1)中的参数。

直流TN系统的电源端有一点直接接地,电气装置的外露可导电部分通过保护性中性导体或保护导体连接到此接地点。以TN-S系统为例,对TN系统的典型电击事故进行仿真。利用MATLAB/Simulink构建直流双极TN-S接地系统的直接电击事故仿真模型,以获取在不同工况下典型的人体电击电流,负载的金属外壳都通过PE线相连接,再与中性线M连接后直接接地。在直接电击事故中,人体直接接触直流母线L+或L-。其仿真模型见图2。

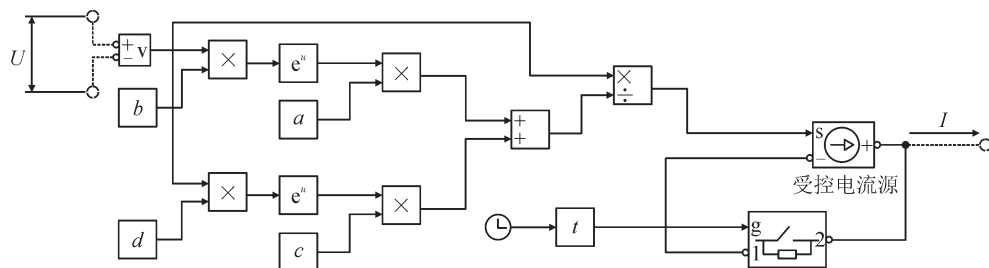


图1 人体直流阻抗仿真模型

Fig. 1 Simulation model of human DC impedance

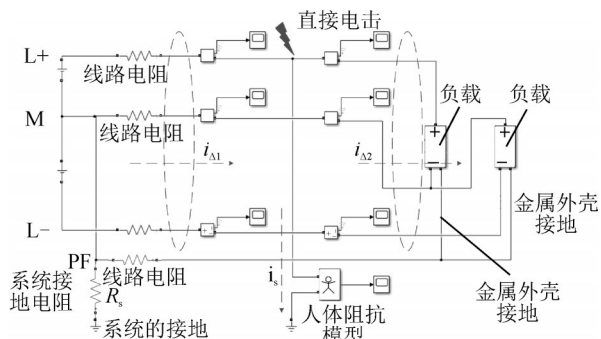


图2 直流双极TN-S系统直接电击事故仿真模型

Fig. 2 Simulation model of direct electric shock accident in DC bipolar TN-S system

此时系统电压选择 ± 375 V, 设置正负极负载电流均为63 A, 系统接地电阻取 4Ω 。以干燥条件, 大的接触表面积, 路径为手到双脚的电击为例, 直接电击的仿真结果见图3^[10]。在0~1 s, 系统正常运行, 由于并未发生电击, 人体电击电流也为0。在1 s时, 发生电击事故, 人体直接接触直流母线L+, 位于电源端和负载端之间。此时, 正负极的负载电压略有下降, 而正极的负载电压下降更多。电源端电流和 $i_{\Delta 1}$ 、人体电击电流 i_s 从0上升至612.7 mA。由标准数据可知, 此时的电击电流已经远大于右手或左手到双脚的直流心脏室颤电流, 有可能对人体造成致命性损伤。

此外, 进行了不同条件的直流TN-S系统直接电击仿真, 其中电压等级分别为750、 ± 375 、220、 ± 110 、60 V, 设置不同负载电流、不同皮肤环境、不同接触面积、不同电击电流路径下的仿真。通过不同条件的仿真可以定量地分析这些条件对剩余电流大小的影响, 也看到在仿真的条件下60 V是一个较为安全的电压等级。

1.2 低压直流系统循环净电流仿真

对低压直流网状多端电源供电系统中的环流进行仿真, 研究其中可能产生的假剩余电流即循环净电流。构建的低压直流网状多端电源供电系统仿真模型见图4^[11]。系统为双极接线、TN接地形式,

由电源1和电源2同时供电。一般来说, L+、L-与M极的线路长度相等, 即其线路电阻也相等 $R_+=R_-=R_-$, 且两极的负载大致平衡, 有 $R_{L1}=R_{L2}$ 。

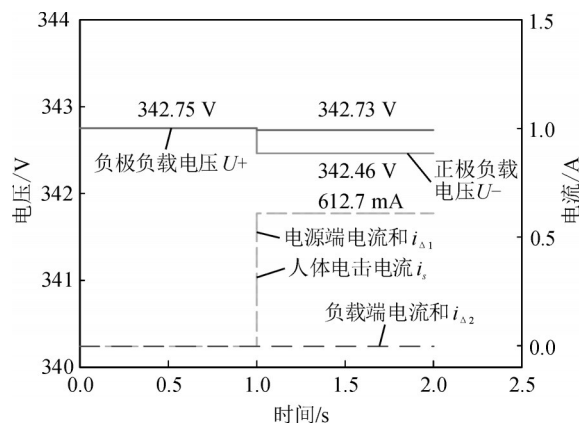


图3 直流双极TN-S系统直接电击仿真结果

Fig. 3 Simulation results of direct electric shock in DC bipolar TN-S system

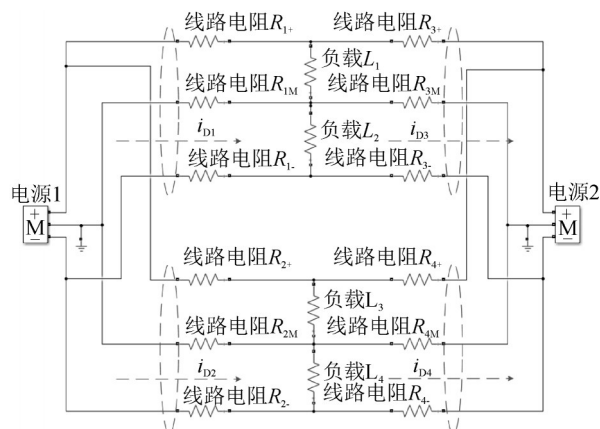


图4 低压直流网状多端电源供电系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of low-voltage DC mesh multi-terminal power supply system

当回路1正线和回路4负线的温度变化时, 线路电阻也会变化。每个回路的电流矢量和见图5^[11]。由于系统拓扑的对称性, 回路3和回路1、回路4和回路2的结果是相同的。随着温度的升高和降低, 各回路电流矢量和的绝对值增大。当单线温度变化 $\pm 12^\circ\text{C}$ 时, 电流矢量和达到90.1 mA。当两线温度

均发生变化时,最大电流矢量和可达 206.5 mA。可以看出,当线路阻抗因温度等原因发生变化时,系统中会产生循环净电流,可能导致RCD误动。

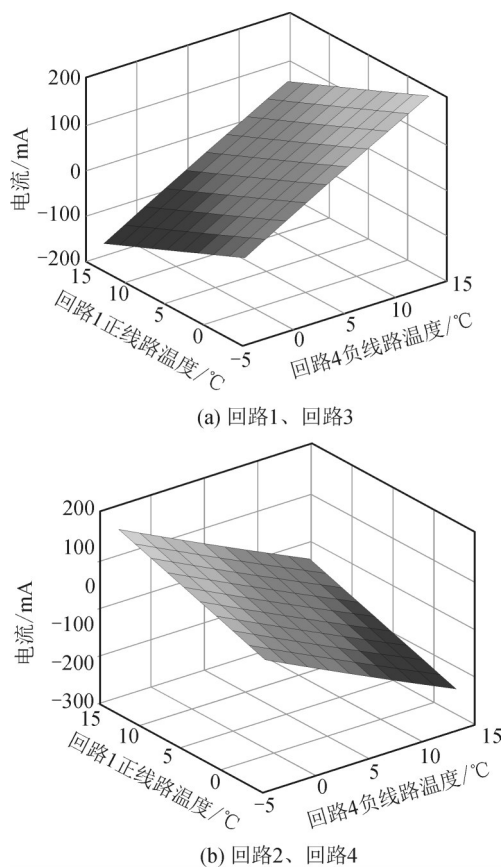


图5 线路温度对循环净电流影响的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the influence of line temperature on circulating net currents

当电源1和电源2的电压变化时,各回路的电流矢量和见图6^[11]。由于系统拓扑的对称性,回路3和回路1、回路4和回路2的结果是相同的。随着电压的变化,各回路电流和的绝对值增大。任意源电压变化2%时,电流矢量和可达123.3 mA。当两个源的电压均变化时,电流之和可达1294.4 mA。这些循环净电流可能会干扰系统的正常运行。

上述仿真结果表明,在低压直流电网多端供电系统中,线路温升和供电电压的变化会在回路中产生循环净电流,对剩余电流的检测和保护产生干扰。因此,对该类系统中RCD的配置和设计提出了更高的要求。

1.3 低压直流系统RCD配置原则

剩余电流保护器的主要功能是对低压系统中由于绝缘破损、接地故障等原因引起的剩余电流进行准确检测,进而对人身触电、电气火灾及设备损坏进行防护。其中,对人身触电进行保护,防止人体受到致命性伤害是重中之重。从以下几方面简

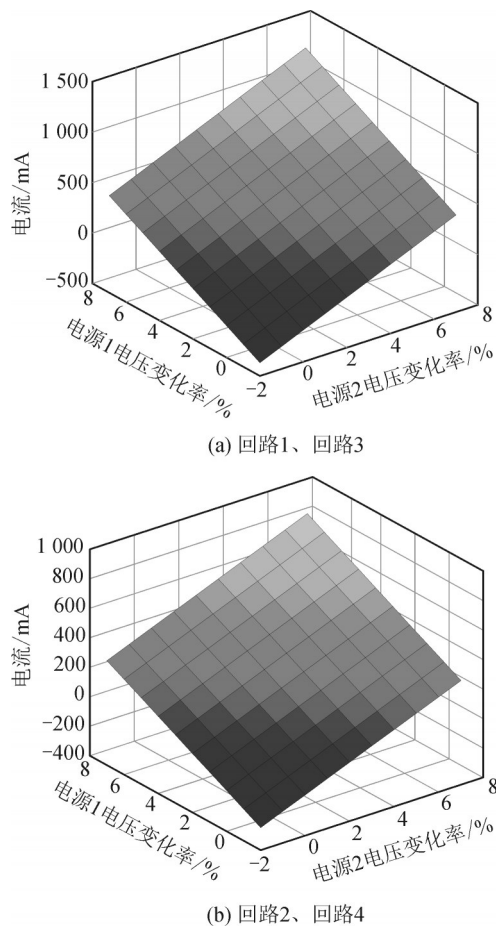


图6 电源电压对循环净电流影响的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the influence of source voltage on circulating net currents

要阐述低压直流系统剩余电流动作保护器的配置原则:

1)额定直流剩余动作电流选择。目前,国际电工委员会制定了IEC/TS 63053:2017《直流系统用剩余电流动作保护电器的一般要求》,对低压直流系统用的无延时型直流剩余电流保护器动作时间作出了规定,见表1。 I_n 表示系统的额定电流,最大为125 A, $I_{\Delta n}$ 表示额定直流剩余动作电流,标准值主要为0.08、0.3、0.6、1 A。对于人身触电保护,设置 $I_{\Delta n}$ 为0.08 A,将直流剩余电流动作保护器的分断时间曲线与人体电流效应曲线相对比,见图7。可以看出分断时间曲线大部分在直流人体电流效应曲线c左侧,两者相交于约500 mA、40 ms处。这意味着,当人体触电且电击电流小于500 mA时, $I_{\Delta n}$ 为0.08 A的直流剩余电流动作保护器能够对人体起到良好的保护作用,避免人体发生心脏室颤,保护其生命安全。当人体电击电流超过500 mA时,直流剩余电流动作保护器也能在40 ms内断开电路,避免人体受到更严重的伤害。而对于电气火灾的防护,设置 $I_{\Delta n}$ 为0.3 A。

表1 无延时型直流剩余电流动作保护器的
最大分断时间标准值

Table 1 Standard value of maximum disconnecting time
of DC residual current action protector without delay

直流剩余动作电流等于下列值时的分断 时间标准值/s					
I_n/A	$I_{\Delta n}/A$	$I_{\Delta n}$	$2I_{\Delta n}$	$3I_{\Delta n}$	1、2、5、10、20、 50、100 A
任何值	任何值	0.30	0.15	0.04	0.40

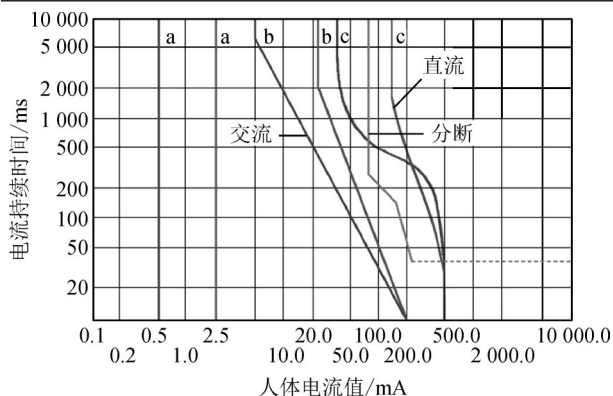


图7 人身触电保护的断分时间曲线与人体电流效应
曲线对比图

Fig. 7 Comparison diagram of disconnecting time curve
and current effect curve of human body shock protection

2)分级保护以及延时选择。直流剩余电流保护器的分级保护应该满足上下级之间的选择性配合。一般上级为延时型,配置在配电回路,用于电气火灾和接地故障的防护。下级为无延时型,配置在终端回路,用于人身触电的保护。延时型仅适用于 $I_{\Delta n}$ 大于0.08 A的剩余电流动作保护器。上级直流剩余电流保护器的最小不驱动时间应该大于下级的最大分断时间。

3)直流剩余电流保护器的接线方式。直流剩余电流保护器在接线时,需要将主回路中带电导体全部接入。对于单极系统,应该将L+与L-全部接入。对于双极系统,应该将L+、L-以及中性线M全部接入。要注意PE线不能被接入,否则直流剩余电流保护器可能在故障时拒动,导致保护失败。

4)TN、TT、IT系统中的剩余电流保护。在TN与TT系统中,剩余电流动作保护器能够对下端产生的直接电击事故进行保护。对于间接电击事故,在TN系统中,由于系统故障电流很大,会触发系统的过电流保护。剩余电流动作保护器可以作为过电流保护的后备,及时断开相应线路。而在TT系统中,系统故障电流较难触发过电流保护,因此需要剩余电流动作保护器作为主保护,及时断开故障回路。在IT系统中,当发生一个点的直接或间接电击事故

时,故障电流很小,对人体基本没有伤害,系统正常运行^[12]。对于两点故障的直接电击事故,其构成的故障回路可能不会穿过直流剩余电流保护器接入的线路,因此直流剩余电流保护器无法正确动作,而此时故障电流也较难触发过流保护。对于这种故障,只能通过绝缘检测装置进行保护。对于两点故障的直接电击事故,同样难以用直流剩余电流保护器进行保护,而此时系统故障电流有较大上升,可能会触发过电流保护。因此对于IT系统,应该以绝缘监测装置IMD(insulation monitoring devices)作为主保护。

5)在假剩余电流的干扰下的配置。在低压直流网状多端电源供电系统中,由于线路电阻、电源纹波等因素的影响,在回路中会产生循环净电流,这可能造成剩余电流动作保护器的误动作。而对同一负载供电的两端电源正极、负极、M极的电流和大小相等,方向相同。因此当剩余电流保护器拥有通讯功能时,利用中央监控系统对两端电源处剩余电流保护器的检测值进行综合判断,以此确定系统中存在真正的剩余电流,还是由循环净电流造成的假剩余电流,从而避免剩余电流保护器的误动作。

2 直流剩余电流检测技术与仿真模型

2.1 直流剩余电流检测方法

剩余电流检测技术的研究起源于20世纪初的欧洲,最初是通过测量发生接地故障电压来进行剩余电流检测,被称为电压型剩余电流保护装置^[13]。但这种保护装置无法实现分级保护,灵敏度低,被很快淘汰。目前常见的剩余电流检测方法有直流电桥法、信号注入法、电磁式电流互感器法、霍尔式检测法、巨磁阻式检测法、磁调制式检测法等。

在20世纪50年代,常采用直流电桥法对系统的绝缘电阻值进行检测,进而实现剩余电流检测^[14-15]。虽然直流电桥法不受线路分布电容的影响,但对于正负母线同时发生接地故障或者正负极绝缘下降水平相等的情况,则无法使用直流电桥法来进行剩余电流检测。并且直流电桥法无法确定故障点的位置,不利于故障的排除。

信号注入法通过向系统线路中注入交流信号,再通过各处电流互感器CT(current transformer)的测量值,即可判断系统的绝缘情况并确定故障点位置,从而实现系统的剩余电流保护^[16-17]。但这一方法需要向系统中注入交流信号,可能会导致系统和相应设备发生故障。

直流电桥法与信号注入法都无法实现在与被测系统绝缘情况下,对系统中剩余电流的精确检测。在20世纪70年代,中国引进了西德和英国开发的电流型剩余电流保护装置,它采用零序电流互感器,实现了在与被测系统绝缘情况下剩余电流的分级保护^[18]。发展到今天,电磁式电流互感器法即通过检测系统各相线路电流和的检测方法已经成为了剩余电流检测的主要方法^[19-21]。当低压直流系统正常运行时,整个系统的剩余电流为零,则在直流线路正极、负极、中性线中流过电流和 i_{Δ} 为零,由此可得

$$i_{\Delta} = i_{L+} + i_{L-} + i_M = 0 \quad (2)$$

式(2)中, i_{L+} 、 i_{L-} 、 i_M 分别为直流线路正极、负极、中性线的电流。

因此线路中的电流在磁芯中感应产生的磁通量和 ϕ_{Δ} 为0,由此可得

$$\phi_{\Delta} = \phi_{L+} + \phi_{L-} + \phi_M = 0 \quad (3)$$

式(3)中, ϕ_{L+} 、 ϕ_{L-} 、 ϕ_M 分别为直流线路正极、负极、中性线在磁芯中产生磁通量。因此在系统正常运行时,磁芯的线圈中产生的感应电势也为零。而当低压直流系统中产生交流剩余电流时,正极、负极、中性线电流和 i_{Δ} 与磁通量和 ϕ_{Δ} 均随时间变化。此时磁芯线圈中会感应出相应的电势 E ,从而在线圈回路中会产生一个感应电流 i 。互感器二次侧线圈中的感应电流与回路中的剩余电流 i_{Δ} 成正比,与线圈的匝数 N_2 成反比

$$i = \frac{k i_{\Delta}}{N_2} \quad (4)$$

式(4)中, k 为与磁芯有关的常数。当二次侧产生的感应电流 i 超过额定剩余动作电流($I_{\Delta n}$)时,执行单元动作,切断相应线路。

电磁式电流互感器检测法通常只适用于交流剩余电流的检测,其检测带宽在10 Hz~20 kHz,对正弦交流剩余电流的检测精度较高,约为3%^[22]。但当交流剩余电流中含有直流偏置时,磁芯仅向一个方向磁化,其工作点不断向饱和区偏移,因此对含有直流分量的剩余电流检测误差较大,甚至造成剩余电流动保护器的拒动,导致保护失败^[23]。因此电磁式电流互感器检测法并不适用于低压直流系统的剩余电流检测。

霍尔式检测法是利用霍尔传感器进行剩余电流检测的方法,常用于交流系统中的剩余电流检测。霍尔传感器是利用霍尔效应将电流产生的微弱磁场转换为电压信号进行测量的器件,它广泛用

于交直流电流的测量^[24]。但霍尔剩余电流传感器磁芯中都需要一定的空间来容纳霍尔元件,由此产生的气隙会增大剩余电流的检测误差,且其灵敏度较差,易受温度影响,不适用于较小电流的剩余电流检测^[25]。

巨磁阻检测法近年来发展迅速,巨磁阻剩余电流传感器是一种利用巨磁阻效应将磁场变化转换为巨磁阻元件电阻变化的器件,能够应用于交直流剩余电流的检测^[26-27]。相较于霍尔式检测法,巨磁阻式检测法的带宽更宽且精度更高。但是由于巨磁阻传感器容易受到温度的影响,且对电流的角度和位置较为敏感,抗电磁干扰能力较差。并且巨磁阻式剩余电流传感器的结构设计较为复杂,且磁芯中依然含有气隙,产生的漏磁会增大检测误差。巨磁阻式剩余电流传感器对工作环境的要求较为苛刻,难以适用于复杂环境下较小剩余电流的检测。

磁调制技术出现于20世纪,最初是用于磁场以及电流的测量^[28-29],近年来被研究用于交直流剩余电流的检测。磁调制式剩余电流传感器主要利用了软磁材料的对称非线性磁化特性^[30],通过周期性的励磁电压或者励磁电流信号产生的磁场,与剩余电流产生的磁场进行耦合,进而通过对耦合后的磁场进行检测来实现剩余电流的检测。Sonoda T等人通过设计一种多磁芯结构的磁调制式传感器,实现了温度、磁场变化情况下交直流系统中剩余电流的检测,具有较高的精度^[31]。Xu Z等人设计了一种单磁芯结构的磁调制式剩余电流传感器,实现了对正弦交流、脉动直流和平滑直流3种情况的剩余电流检测,检测误差在10%以内^[32]。Min Y等人针对单磁芯结构,运用多重反馈回路使磁芯工作于线性区中,提高了检测精度,但其电路结构复杂,成本和功耗较高,且检测延时较大^[33]。

电压型磁调制式剩余电流传感器一般由磁芯、运算放大器、电阻、线圈等组成,一般为单磁芯结构,典型的电压型磁调制式剩余电流传感器结构见图8。电压型磁调制式剩余电流传感器采用单磁芯结构,结构更为简单,成本较低,检测误差更小,可以在直流系统下工作,零漂和温漂较小,是一种适用于低压直流系统交直流剩余电流检测的方法,比其他现有检测方法拥有更好的效果^[34]。

2.2 电压型磁调制式剩余电流检测模型仿真

依据图8中电压型磁调制式剩余电流传感器的结构,基于MATLAB/Simulink构建电压型磁调制式

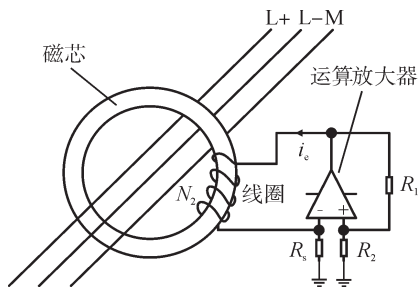


图8 电压型磁调制式剩余电流传感器原理图

Fig. 8 Schematic diagram of voltage type magnetic modulated residual current sensor

剩余电流检测仿真模型, 见图9。仿真模型主要由调制模块、解调模块和剩余电流发生模块、示波器等其他模块组成。

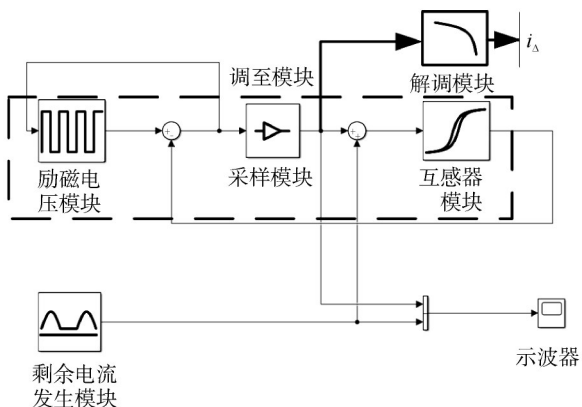


图9 电压型磁调制式剩余电流检测仿真模型

Fig. 9 Simulation model of voltage-type magnetic modulated residual current detection

调制模块包含励磁电压模块、采样模块和互感器模块。励磁电压模块依照前述原理生成励磁电压; 采样模块即为采样电阻 R_s ; 磁芯和线圈共同组成互感器模块依据磁调制法原理获取波形。解调模块的作用就是从励磁电流解耦出剩余电流。通常来说, 为保障解耦出的剩余电流信号精度, 励磁电流的频率应该尽可能高。因此, 可以将低通滤波器作为解调模块。巴特沃斯滤波器有着最小的通带纹波和较好的瞬态响应、频率响应, 可以获取失真少、杂波少的解耦后剩余电流^[35], 因此选择巴特沃斯低通滤波器作为解调模块。

依据上述搭建的电压型磁调制式剩余电流检测仿真模型进行仿真, 当直流系统中产生幅值为 300 mA 的平滑直流剩余电流, 其仿真结果见图 10^[36]。二次侧感应的剩余电流为直流系统回路产生的剩余电流的 $1/N_2$, 在本模型中取线圈匝数 $N_2=50$ 。

对于幅值为 300 mA 的平滑直流剩余电流, 二次侧感应的剩余电流幅值应为 6 mA。由图 10 可知, 解调电流约为 -5.89 mA, 负号代表解调电流与剩

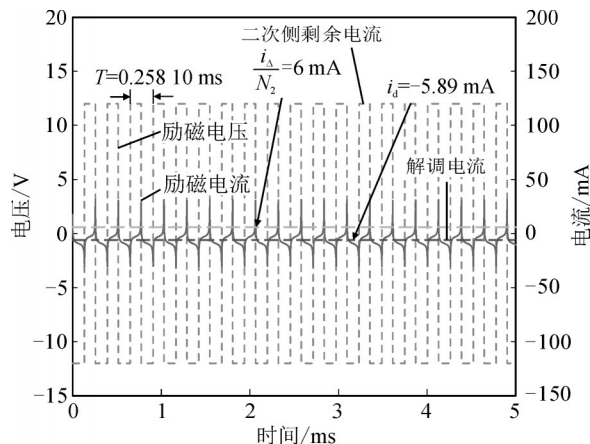


图10 剩余电流为 300 mA 平滑直流剩余电流时的仿真结果

Fig. 10 Simulation results when the residual current is 300 mA smooth DC residual current

余电流极性相反。此时解调电流与剩余电流的相对误差约为 1.8%。

当直流系统中产生幅值为 150 mA、频率为 1 kHz 的正弦剩余电流时, 其仿真结果见图 11^[36]。此时二次侧感应的剩余电流应为幅值为 3 mA、频率为 1 kHz 的正弦剩余电流。由图可知, 解调电流保持为频率约为 1 kHz 的正弦形态, 极性同样与剩余电流的方向相反, 且二者之间的时延很小。此时, 解调电流的幅值约为 2.92 mA, 剩余电流的相对误差约为 2.7%。

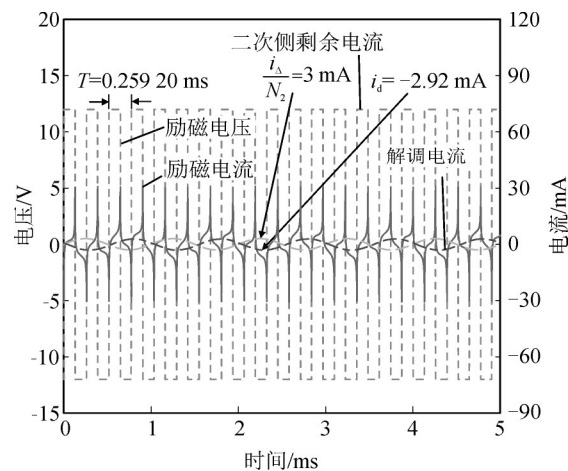


图11 剩余电流为幅值 150 mA、频率 1 kHz 正弦剩余电流时的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of sinusoidal residual current with residual current amplitude of 150 mA and frequency of 1 kHz

综上所述, 构建的电压型磁调制式剩余电流检测仿真模型性能优良, 能够对直流系统中的交、直流剩余电流进行准确检测。同时, 上述仿真结果验证了电压型磁调制式剩余电流检测法的有效性, 为剩余电流检测样机的设计作出指导。

2.3 直流剩余电流检测算法设计

在某些直流系统正常运行时,由于电源滤波效果差,杂散电容和整流器会造成交流干扰。因此,在交流干扰的情况下还需要检测直流剩余电流。此外,一些直流系统正常运行时的交流干扰也会造成直流剩余电流检测困难。因此,为了对低压直流系统中的剩余电流进行更加精确的检测,首先需要选取合适的滤波方法对上述的剩余电流进行滤波处理,再构建相应的算法进行故障判断。

卡尔曼滤波是一种最优化的自回归数据处理算法,其滤波标准是均方误差最小,从而实现递推估计。因其递归运算、计算量较小、实时性好、抗干扰能力强等优点,能够对随机干扰下的线性动态系统进行最优估计,因而在通信、导航等诸多领域有着广泛的应用。卡尔曼滤波能用于交直流剩余电流信号的滤波处理,且卡尔曼滤波在面对较低频的系统纹波干扰时,有着更好的性能,因此选择卡尔曼滤波作为低压直流系统中交直流剩余电流检测的滤波算法^[36]。

基于卡尔曼滤波算法,提出了交直流剩余电流的检测算法,见图12^[36]。为保障高精度且快速的剩余电流检测,采样频率设置为100 kHz。在滤波参数确定后,对剩余电流进行实时采样,每采样一个数据点 $x(i)$,利用卡尔曼滤波算法进行滤波,得到 $xk(i)$ 。然后将 $xk(i)$ 与 m 倍的额定剩余电流动作阈值 $I_{\Delta n}$ 比较,若 $xk(i)$ 较大,则动作计数器进行累加。若 $xk(i)$ 不大于 m 倍的 $I_{\Delta n}$,则判断是否连续 k 个数都小于 m 倍的 $I_{\Delta n}$,若是,则将计数器清零,否则,计数器值不变,以此消除信号中毛刺的影响。若计数器值超过设定的阈值,则输出高电平的动作信号,否则输出电压信号一直为低电平。

3 直流剩余电流实验平台及样机设计与检测结果

针对直流剩余电流产品的设计检测要求,近年来国际电工委员会IEC(international electrotechnical commission)制定了直流系统用剩余电流动作保护器的相关标准IEC/TS 63053:2017《直流系统用剩余电流动作保护器的一般要求》,用以指导直流剩余电流动作保护器的研制^[37]。但是现有直流剩余电流标准化测试方法缺失,标准化测试平台尚未确立,这严重影响着直流剩余电流动作保护器的研制和相关检测算法的开发。

标准IEC/TS 63053:2017《直流系统用剩余电流动作保护器的一般要求》对剩余电流稳定增加、

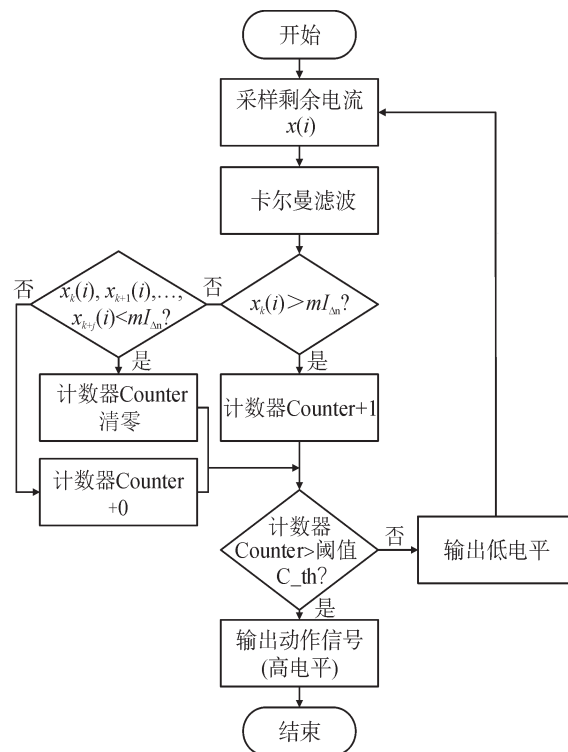


图12 剩余电流检测算法

Fig. 12 Residual current detection algorithm

突然出现剩余电流等类型的剩余电流的检测做了规定^[37]。但是一方面目前应用的直流系统大多由交流系统经过整流器而来,例如直流充电桩,直流市政路灯等系统;另一方面由于直流侧负载的电力电子化,有着交流形态的剩余电流串入直流系统的风险。因此依据标准GB/T 6829—2017《剩余电流动作保护器的一般要求》^[38],也需要对典型的交流剩余电流进行检测。

搭建的低压直流剩余电流实验平台见图13,平台总供电容量10 kVA,使用三相380 V供电。其中,直流电源、直流回馈负载、外接直流负载构成实验平台主回路,剩余电流模拟器、直流变阻器、选通开关构成实验平台的剩余电流模拟回路。实验回路可模拟典型剩余电流产生场景,通过直流变阻器和剩余电流模拟器模拟多种剩余电流,包括剩余电流稳定增加、突然出现剩余电流、正弦剩余电流等。利用此实验平台可进行多种工况下,多种类型的剩余电流实验,实现复杂环境下的剩余电流检测模块的开发、调试、测试。

依据国家标准GB/T 6829—2017《剩余电流动作保护器的一般要求》,通常将交流系统用剩余电流保护器分为AC、A、F、B型4种,以适应不同类型的剩余电流检测^[38]。对于交流系统用剩余电流动作保护器,国外的研究已经较为成熟,ABB、西门子



图 13 低压直流剩余电流实验平台

Fig. 13 Low voltage DC residual current experimental platform

等世界著名的电气公司均推出了 AC、A 型剩余电流动作保护器产品^[39]。而中国的剩余电流动作保护器研究起步较晚,近年来人民电器推出 RDM5Z 系列的 AC 型剩余电流动作保护器,常熟开关厂推出了 CM5ZL 系列的 A 型剩余电流动作保护器^[40]。随着电网的发展,电力电子技术得到广泛应用,线路中的剩余电流变得非常复杂,含有交直流分量。近年来, B 型剩余电流动作保护器成为国内外的研究热点。Bender 公司推出了 RCMB104 系列 B 型剩余电流检测模块, Doepke 公司推出了 DCT035 系列 B 型剩余电流检测模块。然而,目前的 B 型剩余电流动作保护器由于使用环境、动作标准值、分断时间标准、脱口电流范围、剩余电流特征等方面的差异,并不适用于直流系统的剩余电流检测。

但目前国内外用于直流系统的剩余电流动作保护器产品较少,目前美国 Morningstar 公司推出了用于光伏系统的 GFPD-600V 系列剩余电流动作保护器,其动作阈值为 300 mA,且检测误差高达 10%,难以推广应用于直流系统中用于人身触电的剩余电流保护。因此,需要研制检测精度高、速度快、抗干扰强、成本低的低压直流剩余电流检测产品。

中国厂家的一款剩余电流检测样机见图 14,检测样机主要由磁调制式剩余电流传感器、通讯电路、人机交互电路、信号采样电路、动作信号输出电路、主控芯片外围电路等组成。样机通过磁调制式剩余电流传感器进行剩余电流采样,经过主控芯片计算,实时输出剩余电流检测信号。当检测到直流系统中的剩余电流超过设定动作阈值后,主控芯片发出动作信号,经过继电器将信号放大后,输出至断路器切断故障回路。同时主控芯片将报警信号、检测到的剩余电流信息进行上传,并控制指示灯和蜂鸣器报警。

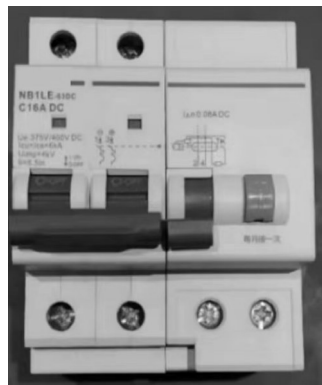


图 14 剩余电流检测样机

Fig. 14 Residual current detection prototype

该剩余电流检测样机进行检测误差测试,结果见图 15。在 $\pm 40 \sim \pm 300$ mA 范围内,相对误差保持在 3% 以内,并且当剩余电流值大于 100 mA 时,检测误差保持在 2% 以内。

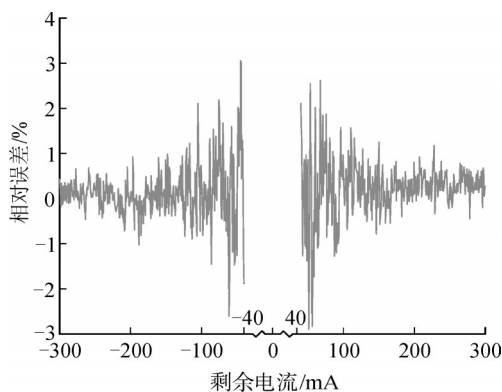


图 15 剩余电流检测样机检测误差

Fig. 15 Detection error of residual current detection prototype

根据标准 IEC/TS 63053:2017,直流剩余电流动作保护器的最大分断时间标准值要求剩余电流为 $I_{\Delta n}$ 时为 0.3 s、 $2I_{\Delta n}$ 时为 0.15 s、 $3I_{\Delta n}$ 时为 0.04 s,且对于稳定增加的剩余电流,要求其在 $0.5I_{\Delta n} \sim I_{\Delta n}$ 动作。根据标准 GB/T 6829—2017,正弦剩余电流动作保护器的最大分断时间标准值在剩余电流为 $I_{\Delta n}$ 时为 0.3 s、 $I_{\Delta n}$ 时为 0.15 s、 $5I_{\Delta n}$ 及以上时为 0.04 s。根据上述标准对样机每一个工况下的每一种动作特性测试项目均进行了至少 5 次试验,典型的结果波形见图 16。幅值为 $3I_{\Delta n}$ 类型为突然出现剩余电流的信号仅在出现 10.4 ms 后检测样机就迅速检测并发出了动作信号实现保护。对多次试验的结果进行平均,其结果见表 2。可以看出,样机的动作特性满足相关标准的要求,能够对交直流剩余电流进行快速、准确检测。

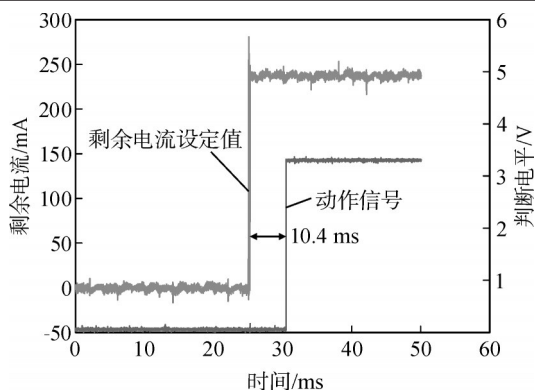


图16 典型的剩余电流检测样机动作特性测试结果

Fig. 16 Test results of typical residual current detection prototype

表2 剩余电流检测样机动作特性测试结果

Table 2 Test results of motion characteristics of residual current detection prototype

回路电流/A	回路电压/V	剩余电流类型	剩余电流/mA	频率/Hz	动作时间/ms	动作电流/mA
空载、5、10、13、16、 20、25、32、40、63、 80、100、125	200、400	突然出现剩余电流	80($I_{\Delta n}$)		133.1	
			160($2I_{\Delta n}$)		67.0	
			240($3I_{\Delta n}$)		11.2	
		剩余电流稳定增加	0~80			63.2
		交流正弦剩余电流	30($I_{\Delta n}$)	50	192.5	
			60($2I_{\Delta n}$)	50	89.9	
			150($3I_{\Delta n}$)	50	11.9	

表3 检测样机与已有产品参数比较

Table 3 Optimal SR parameters of different DC systems

比较内容	检测样机参数	已有产品参数
额定直流动 作电流值/ mA	80 ~ 1 000 可调	300
检测误差/%	小于2	10
电气寿命/次	5 000	2 000
体积/mm ³	微型断路器 89×72×77	塑壳断路器 269×128×112

2)在各类剩余电流检测方法之中,电压型磁通制式检测方法结构简单,成本较低,检测更为精确,且零漂和温漂较小,仿真和实验结果说明该方法可以应用于低压直流系统的剩余电流检测。依据相关标准规定搭建了直流剩余电流检测平台,基于此研制的剩余电流检测样机,取得了优越的检测效果,剩余电流检测误差小于2%。

同时随着直流配用电技术的发展,未来直流领域势必会对直流剩余电流的及时检测提出更高的要求,以保证系统更加安全、高效地运行。未来的剩余电流检测装置存在以下两点发展趋势:

1)发展更优越的性能。从剩余电流检测装置的发展历史来看,AC型、A型、F型、B型乃至如今研发

该样机各项参数与现有产品进行比较结果见表3。样机直流动作特性可调,检测误差达到小于2%。

4 结论

文中综述了低压直流系统内剩余电流检测技术的研究进展,可以概括为以下方面:

1)讨论了低压直流系统典型电击事故仿真的研究进展,对低压直流TN系统模拟了典型电击事故,仿真结果表明TN系统中直接电击事故存在致命危险。总结出了直流系统剩余电流动作保护器的配置原则。

的直流系统用检测装置,其检测剩余电流类型越来越丰富、精度逐渐提高、检测速度与可靠性提升、成本体积逐渐下降。未来的检测装置将会朝着多类型场景下各类剩余电流更为高效的检测与保护方向发展,并进一步降低检测装置的体积与成本。

2)多功能集成与智能化检测。当前的各类用电安全保护设备整体上主要以独立模块自行完成。随着智能电网的发展,将来的用电安全保护装置会集成各类用电安全保障功能,并与5G、物联网等技术融合,达成配电网整体性监测与用电信息智能感知,最终实现更为智能化的监测与用电安全保护。

“光储直柔”技术的推广,带来低压直流配电网的广泛应用。发展直流剩余电流检测技术、维护用电安全,具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 曾 嵘,赵宇明,赵 彪,等.直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6791-6801.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801.

- [2] LIU Yongmei, LIU Guangeng, SHENG Wanxing, et al. An electric shock impedance modeling method of living organisms in low-voltage distribution network[C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). China: IEEE, 2016: 1-5.
- [3] 陈航宇. 不同接地型式的低压配网剩余电流保护适应性研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
CHEN Hangyu. Research on the adaptability of residual current protection in low-voltage distribution network under different grounding patterns[D]. Xiamen: Xiamen University of technology, 2021.
- [4] WANG Ting, MONTI A, GOLDBECK R, et al. Voltage selection and personal safety in low voltage direct current networks at customer end[C]//2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). Bosnia and Herzegovina: IEEE, 2018: 1-6.
- [5] WANG Shouxiang, LI Haozhe, LIU Qi, et al. Research on the requirements for the break time of DC-RCD under different voltage levels and grounding modes in LVDC system[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). China: IEEE, 2020: 3675-3680.
- [6] ZHOU Ning, FENG Guang, ZHAO Zimo, et al. Personal electric shock situation analysis method for distribution network[C]//2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). China: IEEE, 2018: 1654-1658.
- [7] LIU J, SUN K, MA Z, et al. Grounding fault model of low voltage direct current supply and utilization system for analyzing the system grounding fault characteristics[J]. Symmetry, 2021, 13(10): 1795.
- [8] HALLEMANS L, GOVAERTS G, BROECK G V D, et al. Modelling and experimental validation of a pole-to-ground protection device in low voltage DC microgrids[C]//2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications. France: IEEE, 2020: 1-10.
- [9] Effects of current passing through the human beings and livestock: IEC 60479:2005[S]. 2005.
- [10] WANG J, XIE Z, CHEN S, et al. Simulation of residual current in low voltage DC systems[C]//2021 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts (HLM). USA: IEEE, 2021: 81-88.
- [11] CHENG D, ZHANG B, XIONG S, et al. Residual current detection prototype and simulation method in low voltage DC system[J]. IEEE Access, 2022(10): 51100-51109.
- [12] 薛士敏, 李 蒸, 刘存甲, 等. 直流微网接地综述与基于控保协同的保护方法研究初探[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2255-2268.
XUE Shimin, LI Zheng, LIU Cunjia, et al. Review of DC microgrids grounding and study on protection methods based on control and protection cooperation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2255-2268.
- [13] 李皓哲. 低压直流用电系统剩余电流保护方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
LI Haozhe. Research on the protection method of residual current in low voltage direct current power utilization system [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
- [14] 程 爽. 直流漏电保护技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
CHENG Shuang. The study on DC leakage protection technology[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2010.
- [15] 蒙 博, 马 吉. 基于改进电桥法的直流系统接地故障检测方法[J]. 宁夏电力, 2020(6): 36-39.
MENG Bo, MA Ji. Ground fault detection method for DC system based on improved electric bridge method[J]. Ningxia Electric Power, 2020(6): 36-39.
- [16] 孟佳彬, 李智华, 吴春华, 等. 基于高频信号注入法的光伏系统接地故障检测与定位方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 47-54.
MENG Jiabin, LI Zhihua, WU Chunhua, et al. Ground fault detection and location method in PV system based on high frequency signal injection[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(12): 47-54.
- [17] 经鹏宇. 基于低频注入法的船用电缆绝缘监测研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
JING Pengyu. Research on insulation monitoring of marine cable based on low frequency injection method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [18] 胡天禄. 西德、英国漏电保护装置的性能分析[J]. 煤矿机械与电气, 1982(3): 29-35.
HU Tianlu. The performance analysis of West Germany, British leakage protection devices[J]. Coal Mine Machinery and Electric, 1982(3): 29-35.
- [19] 张国军, 张文周, 葛 群, 等. 基于补偿参数的多零序电流互感器的小电流接地系统单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 1-9.
ZHANG Guojun, ZHANG Wenzhou, GE Qun, et al. Single-phase ground fault line selection method of small current grounding system of multiple zero-sequence current transformer based on compensation parameters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 1-9.
- [20] 马铁峰. 磁调制式直流剩余电流保护器的研究和设计[J]. 电器与能效管理技术, 2020(7): 51-58.
MA Tiefeng. Research and design of magnetic modulation DC residual current Protector[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(7): 51-58.
- [21] 计长安, 徐 斌, 胡 翀, 等. 电力物联网环境下的直流剩余电流检测与保护技术[J]. 电工技术, 2021(12): 114-116.
JI Chang'an, XU Bin, HU Chong, et al. DC residual current

- detection and protection technology in the power Internet of things environment[J]. Electric Engineering, 2021(12): 114-116.
- [22] 王尧.复杂波形条件下剩余电流检测技术研究[D].天津:河北工业大学,2012.
- WANG Yao.Research on detection technology of residual current under complicated waveform conditions[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [23] 李倩,李奎,王尧,等.脉动直流剩余电流下AC型漏电断路器动作特性分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(3):100-107.
- LI Qian, LI Kui, WANG Yao, et al. Analysis on tripping performances of AC-type leakage circuit breaker under pulsating DC residual current[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2020, 39(3): 100-107.
- [24] 顾育先.分布式智能直流电流传感技术研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- GU Yuxian. Research on distributed intelligent DC current sensing technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [25] WANG Shouxiang, LI Haozhe, LIU Qi, et al. Design of a DC residual current sensor based on the improved DC component method[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [26] 马建军.基于巨磁阻效应的高精度电流测量技术研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- MA Jianjun. Research on high-precision current measurement technology based on giant magnetoresistance effect [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [27] 梁道,辛守乔.基于巨磁阻的直流电流传感器的磁屏蔽研究[J].电工电气,2021(9):14-17.
- LIANG Xiao, XIN Shouqiao. Research of magnetic shielding based on GMR current sensor[J]. Electrotechnics Electric, 2021(9): 14-17.
- [28] 胡才鑫.大电流调制传感器优化设计及其测量方法[D].兰州:兰州大学,2022.
- HU Caixin. Optimized design of high current magnetic modulation sensor and measurement method[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [29] GU J, YEH C, WANG J, et al. Design of a type B residual current device for fault leakage current detection[C]//2021 IEEE industry applications society annual meeting (IAS). Canada: IEEE, 2021: 1-6.
- [30] 马桐桐.低压交流固态断路器保护技术研究[D].天津:河北工业大学,2022.
- MA Tongtong. Research on protection technology of low voltage AC solid state circuit breaker[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [31] SONODA T, UEDA R, KOGA K. An AC and DC current sensor of high accuracy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(5): 1087-1094.
- [32] XU Zeliang, MIN Yingzong, DU Feng, et al. Type B RCD with a simplified magnetic modulation/demodulation method[C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. China: IEEE, 2009: 769-772.
- [33] MIN Yingzong, DU Feng, CHEN Weigang, et al. An AC/DC sensing method based on adaptive magnetic modulation technology with double feedback properties[C]//2011 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). Germany: IEEE, 2011: 48-52.
- [34] 王守相,李皓哲,刘琪,等.基于激磁电流单周期内负半波持续时间特征的直流剩余电流检测新型相位差法[J].电力系统保护与控制,2021,49(11):45-53.
- WANG Shouxiang, LI Haozhe, LIU Qi, et al. A new phase difference method for DC residual current detection based on the characteristic of the duration of the exciting current negative half wave in a period[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 45-53.
- [35] 黄波.巴特沃斯数字滤波器的设计与仿真实现[J].河南科技,2021,40(36):10-12.
- HUANG Bo. Design and simulation of Butterworth digital filter[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2021, 40(36): 10-12.
- [36] XIE Zhimin, LI Xingwen, WANG Jing, et al. Study of measurement and detection algorithm of LVDC residual current [C]//2020 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM). USA: IEEE, 2020: 20-27.
- [37] General requirements for residual current operated protective devices for DC systems: IEC/TS 63053:2017[S]. 2017.
- [38] 剩余电流动作保护电器的一般要求:GB/T 6829—2017[S]. 2017.
- General requirements for residual current operated protective devices: GB/T 6829—2017[S]. 2017.
- [39] 李奎,王天朔,王尧,等.基于数字恒流技术的B型剩余电流动作特性测试方法的研究[J].电测与仪表,2020,57(1):147-152.
- LI Kui, WANG Tianshuo, WANG Yao, et al. Research on test method of type B residual current operating characteristic based on digital constant current technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 147-152.
- [40] 艾精文,谢智敏,赵宇明,等.剩余电流动作保护器研究综述[J].电器与能效管理技术,2019(24):1-5.
- AI Jingwen, XIE Zhimin, ZHAO Yuming, et al. Overview of research on residual current operated protective devices[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(24): 1-5.

汪倩(1986—),女,博士,副教授,主要研究方向为电弧电接触理论及应用(E-mail: qianwang@xaut.edu.cn)。