

变电站直流系统接地故障查找策略综述

程媛^{1,✉}, 张健韬^{1,2}, 李仲强¹, 徐强¹, 程瑶¹

(1. 国网安徽电力有限公司超高压分公司, 安徽合肥 230000; 2. 合肥工业大学电气工程学院, 安徽合肥 230000)

摘要: [目的]随着电力电子设备以及人工智能等高新技术的高速发展, 直流系统已经在变电站内普及应用。而变电站直流系统的接地故障已然成为影响变电站安全稳定运行的重要因素。[方法]首先对变电站直流系统进行简介, 分析其组成部分和直流接地故障的典型类型及其恶劣影响; 然后重点阐述了目前常见的5种直流接地故障查找策略的原理。[结果]结合其各自的研究现状及应用场景, 对比分析得出各种查找策略的优缺点。[结论]文章结合当今存在的问题和技术发展趋势, 从故障精准定点, 复杂故障判别, 检测精度及便携式绝缘检测装置续航能力提升等多个角度, 对直流接地故障查找在国内外的未来研究方向进行了展望。

关键词: 直流系统; 直流接地; 绝缘监测; 变电站; 接地故障

中图分类号: TM7; TM862

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0057-08

开放科学(资源服务)二维码:



Summary of Grounding Fault Finding Strategies in Substation DC System

CHENG Yuan^{1,✉}, ZHANG Jiantao^{1,2}, LI Zhongqiang¹, XU Qiang¹, CHENG Yao¹

(1. Super High Voltage Branch of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] With the rapid development of power electronic equipment and artificial intelligence and other high-tech, DC (Direct Current) system has been popularized and applied in substations. The grounding fault of the substation DC system has become an important factor affecting the safe and stable operation of the substation. [Method] Firstly, the DC system of the substation was introduced, and its components, typical types of DC ground faults and their adverse effects were analyzed. Then, the principle of five common DC ground fault finding strategies was emphasized. [Result] Based on their respective research status and application scenarios, the advantages and disadvantages of various finding strategy are compared and analyzed. [Conclusion] Combined with the existing problems and technical development trends, the future research directions of DC grounding fault detection at home and abroad are prospected from the perspectives of accurate fault location, complex fault identification, finding accuracy and the improvement of the endurance of portable insulation detection device.

Key words: DC system; DC grounding; insulation monitoring; substation; grounding fault

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

变电站直流系统是维持变电站内保护装置、测控装置、通信装置等重要负荷不间断电能供应的重要支撑。自上世纪末开始, 欧、美、日等国家便展开了对直流系统的一系列研究^[1-3]。随着电力电子设备的迅猛发展, 以及各类半导体技术的日益成熟, 直流

系统因具备低电能损耗、高供电可靠性、节能环保、高分布式电源接纳度等突出优势, 开始在变电站内得到普及应用^[4-5]。

变电站直流接地故障为直流系统最常见的一种故障类型, 若直流系统发生接地将会影响到变电站内设备的状态检测及保护, 更严重的可能会导致继

电保护误动、拒动以及熔断器熔断等恶劣后果。因此,准确查找变电站直流系统接地故障,对于变电站安全稳定运行至关重要。

文章简述了变电站直流系统的构成,对变电站直流系统接地故障查找的常见方法及其存在的主要问题进行研究,并结合现状问题和未来趋势提出对新型直流接地查找方法的展望。

1 变电站直流系统简介

1.1 直流系统的作用

变电站直流系统是为变电站内线路测控装置、保护装置、稳控装置、操作装置、电压互感器并列屏等设备提供直流电源的系统^[6]。它能够独立于变电站内的交流系统,能够在站内的交流电源断电的情况下,由蓄电池组继续为设备提供不间断的直流电,是维护继电保护及测控设置稳定运行的重要保障,较交流系统而言,具有容量大、输出电压稳定、供电可靠性高等突出优势。

1.2 直流系统的组成部分

直流系统主要由充电机、蓄电池、直流母线、直流馈线等附属设备组成。目前,国内电压等级较高的变电站直流系统通常采用“三充两直”的双重化配置,如图 1 所示,即采用三台充电机带两段直流母线,通常情况下为#1 充电机连接 I 段直流母线, #2 充电机连接 II 段母线, #3 充电机作为备用^[7]。充电机有两路输入均为 380 V 交流电,且能够通过交流配电单元实现自动切换,将其中一路输入分配给充电模块,通过充电模块将其整流为 220 V 或 110 V 的直流电,输送至两段直流母线,并给蓄电池充电。两组蓄电池则作为各自直流母线的“后备”直流电源^[8]。直流母线的起点在站内的直流馈电屏,通过树状供电方式,分两段供电给站内高、中、低压保护小室直流分屏,再经过空气开关供电至相应的保护、测控装置,以 500 kV 变电站直流系统为例,具体接线如图 2 所示。

1.3 常见的直流系统接地故障及其影响

直流系统正常运行过程中不允许接地,若发生接地故障可能影响到设备及人身安全,不同的接地故障将造成不同的影响^[9-10]。

一点接地:直流系统发生一点接地时,暂时不会

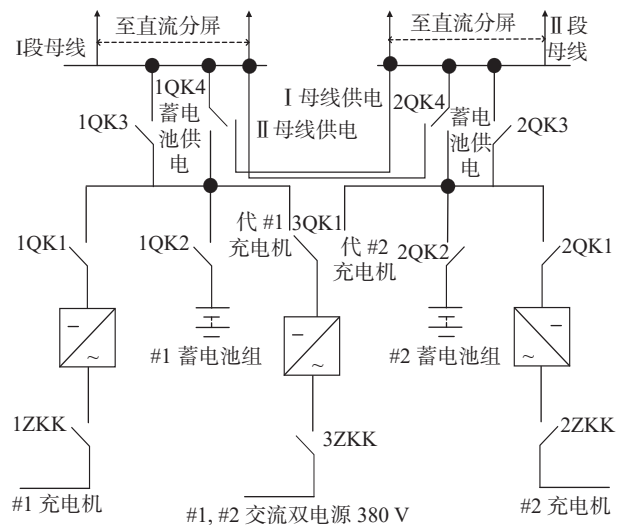


图 1 变电站直流系统配置图

Fig. 1 Layout diagram of substation DC system

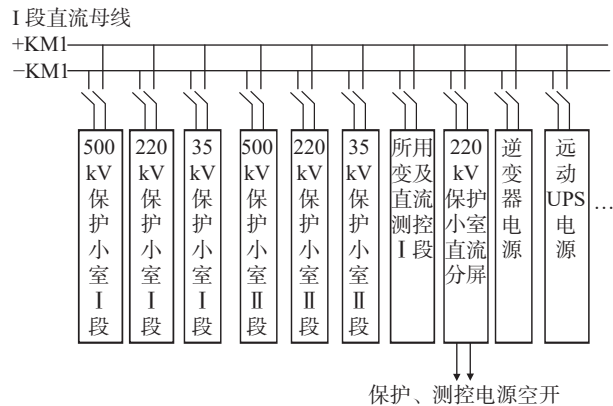


图 2 500 kV 变电站直流系统接线图

Fig. 2 Wiring diagram of 500 kV substation DC system

造成严重影响,但若未及时排查,易造成两点接地,因此应在两小时之内快速消除一点接地。

两点接地:直流系统发生两点接地时,可能会引起短路、继电保护装置误动、断路器的拒动或误动等情况,将对系统运行造成严重后果^[11]。

交流窜入:交流分量窜入直流系统中,变电站内交流系统接地,因此交窜直除了可能造成保护误动、拒动以外,还可能会引起二次设备的烧毁^[12]。

环路接地:某些电厂或变电站直流系统采用环路的供电方法,即负荷侧的两路进线电源未进行隔离直接供电^[13]。当采用环路供电方式时,若环路中发生接地,则可能同时影响到两段直流母线的电压。

此外还存在有直流系统间接接地、非金属接地、正负母线同时接地等接地类型,均会对直流系统造

成恶劣影响。因此,快速准确地排除直流系统接地故障是维持变电站内保护装置、事故照明、信号回路、自动装置,乃至电力系统安全稳定运行的必要前提。

2 直流系统接地故障的查找方法

直流系统接地故障的查找方法,按照查找过程是否停电可以分为拉路法和不停电查找。

2.1 拉路法

拉路法又为“瞬时停电”法查找故障,其选线方式为向调度申请,按照先室内后室外,先负荷后电源的顺序,逐一拉开各条出线,每条支路停电时间不超过3 s,直到拉开某条出线时接地故障消失,则完成故障选线^[14-16]。该方法原理简单,广泛应用于早期的变电站直流系统接地故障查找。但依赖人工手动操作且工作量大,同时会使得出线所带负荷暂时失电,不适用于重要负荷支路^[17-18]。为简化在应用拉路法过程中需向调度申请且逐条拉开出线支路的步骤,文献[19]提出一种基于稳态特征量的直流接地故障选线策略,利用调度端已装设的SCADA系统,仅需一次拉路即可完成故障选线。其选线的主要依据是对比拉路前后所有出线支路的零序电流变化量,其中零序电流变化量最大的即为故障支路。由于零序电流变化量判别过程中,受限于消弧线圈的调谐率,因此该方法主要应用于中性点经消弧线圈接地的电力系统。

2.2 不停电查找

为避免拉路过程中造成的短暂负荷失电,目前由于各类绝缘接地查找仪以及绝缘监测系统的不断发展,催生出多种不停电的直流接地查找方法。

2.2.1 低频注入法

低频注入法又名“信号注入法”,具体原理示意图如图3所示。该方法的绝缘检测原理是等效恒压源通过两个隔直电容向直流系统正负母线和大地之间注入低频载波脉冲信号,通过对比各支路交流传感器二次侧流入和流出的电流,判别是否存在直流接地故障。例如支路1不存在接地故障,交流传感器二次侧不感应直流电流,则流入和流出支路1交流传感器的电流 I_{11} 和 I_{12} 数值相等;若支路2存在正极接地,交流传感器将感应出注入系统的低频交流信号,二次侧输出不再为零, I_{21} 与 I_{22} 不相等,差值为 I ,判定该支路存在接地。

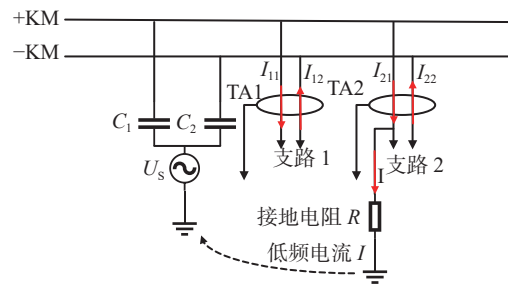


图3 低频注入法原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of low frequency injection method

若注入交流电压为 \dot{U}_s ,测得感应电流为 \dot{i} ,则可得图4的等效电路,其中, R 为计算支路接地电阻值, C_+ 和 C_- 分别为支路正负对地分布电容, Z_f 为分布电容的阻抗值,有:

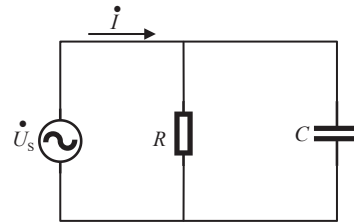


图4 低频注入法等值电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of low frequency injection method

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

$$Z_f = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2)$$

$$C = C_+ + C_- \quad (3)$$

可见,若所测出线支路中含大电容元器件或存在较大的对地电容,则测得电流值会随之增大,严重影响对地电阻的测量精度。同时,人为注入的低频载波脉冲,容易增大系统的纹波电压,可能对其余设备的正常运行造成恶劣影响^[20]。

为改善低频注入法的不足,改进研究的方向主要分为两类:第一类是设法从各支路的检测电流信号中,提取有用的低频信号,以改善测量精度。近年来由于小波变换分析法和各类优化算法的快速发展,此类算法也常被应用于改善低频注入法的测量精度受支路对地电容影响的不足^[21-23]。即利用小波分析等方法从混合信号中滤除因对地电容引起的高次谐波及其他干扰信号,从而提取出注入的低频信号,用于故障选线的判别。或通过跟踪器进行信号降噪,

直接提取一阶微分电流、电压信号,后通过算法拟合,计算对地电阻值^[24]。第二类研究方向是,改变低频信号的注入位置,从而规避因设备容量的限制而造成的测量精度降低。考虑到多数 220 kV 及以上电压等级的变电站内,各支路的电压采样值都源于母线电压互感器的二次侧,因此传统的低频注入法注入低频信号的位置通常选定在母线电压互感器的二次侧。文献 [25] 考虑到注入低频信号的检测精度可能受母线电压互感器的容量影响,因此改为从接地变压器的一次侧中性点处注入低频信号,有效提升了故障选线过程中的低频电流检测精度。

2.2.2 电桥法

目前,电桥法因原理简单被广泛运用于变电站的直流绝缘装置监视中,常见的方法是平衡电桥,不平衡电桥,以及两者结合的双桥法等。平衡电桥的原理是设置两个检测电阻与直流系统的正负极对地电阻构成平衡电桥,若出现系统某点接地,则电桥无法平衡。但运用该方法进行系统绝缘判别时,仅适用于正极或负极单一极的绝缘下降,当两极同时出现绝缘下降则存在判别死区^[26]。不平衡电桥相对平衡电桥而言,可以通过切换开关 K_1 和 K_2 来控制检测电阻 R 的投退,其原理示意图如图 5 所示。

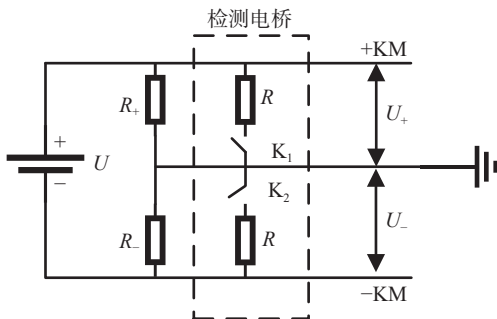


图 5 不平衡电桥原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of unbalanced bridge method

先后投入正极检测电阻和负极检测电阻,可分别得出等效电路图如图 6(a) 和图 6(b) 所示。测量两次系统对地电压偏移,列写二元一次方程组求解正负极对地电阻值。如图 6(a) 为 K_1 闭合, K_2 断开时,有:

$$U = U_{1+} + I_1 R_- \quad (4)$$

$$U = I_1 (R // R_+ + R_-) \quad (5)$$

同理, K_1 断开, K_2 闭合时,有:

$$U = U_{2-} + I_2 R_+ \quad (6)$$

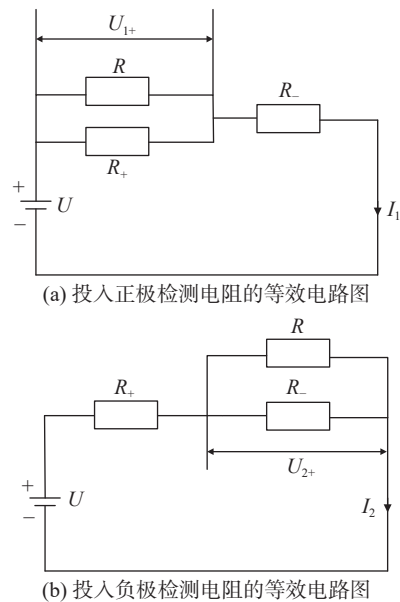


图 6 不平衡电桥法等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram of unbalanced bridge method

$$U = I_2 (R_+ + R_- // R) \quad (7)$$

式中:

U ——直流系统正负母线间电压(kV);

I_1 和 I_2 ——为两次投切电阻时,流经正负极母线负载的电流(kA);

U_{1+} 和 U_{2-} ——投入的切换桥电阻两段电压值(kV)。

I_1 , I_2 , U_{1+} 以及 U_{2-} 均可测得,由上述公式既能计算出正负极母线对地绝缘电阻 R_+ 和 R_- 数值。

但这种不断手动投切检测电阻的电压测量方式,较传统方式而言增加了工作量,且会导致正负极对地电压的反复变化,对系统造成一定程度的扰动。为最大程度利用平衡电桥判别的快速性,和不平衡电桥无死区的优点,可通过接地时动态调用不平衡电桥^[27],不平衡电桥结合小波分析及低频注入法^[28],增加检测电阻构成双平衡桥^[11]等方式来降低故障误报率。

同时,采用电桥法进行绝缘监测时,需要通过直流漏电流传感器测量支路中流过的漏电流。而此类漏电流传感器多采用霍尔元件,易受外界因素的影响出现零点漂移或采样跳变,因而在故障选线过程中可能会出现误判或漏判。为了抑制零点漂移,在传统电桥法的基础上又衍生出了动态差值法^[29],在不平衡电桥基础上,通过两次快速投切检测电阻的

方法,进行测量电流的采样,利用测量电流变化量绝对值计算对地电阻,以抵消零点漂移造成的测量电流误差。

2.2.3 漏电流检测法

漏电流检测法,是一种建立在双不平衡电桥检测法基础上的新型直流接地故障选线法^[30-32]。其较低频注入法而言,优势在于不再需要向系统内注入可能造成影响的低频交流信号,而是先利用双不平衡电桥,两个检测电阻轮流判别系统正负极的绝缘下降情况,若判定确有整体绝缘降低情况出现,再通过无接触式漏电流传感器直接检测流过各个支路正负两极的直流电流差值大小及方向,从而实现故障选线。其原理示意图如图7所示,即如果流入支路漏电流传感器的电流 I_+ 和流出电流 I_- 相等,则传感器输出为零,表明无接地故障;反之,则表明存在直流接地。因该方法检测的是直流电流,不受分布电容影响,同时采用的是无接触式漏电流传感器,不需要固定安装在各支路上,此常被应用于各类便携式绝缘检测仪中。

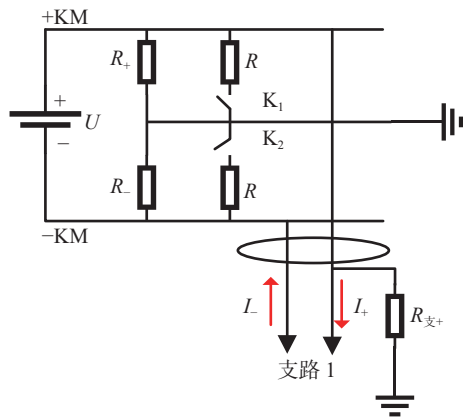


图7 漏电流检测法原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of leakage current detection method

但漏电流检测法的支路对地绝缘电阻的计算方法是:计算母线电压与某条支路的漏电流比值,因此,当该支路正负极同时发生低电阻接地时,计算结果将会产生较大误差。同时,由于变电站直流系统可能采取不同接线方式,若解环运行,漏电流将同时流经上下级电网,仅判别支路漏电流,可能会形成误报;合环运行时,漏电流将会被分流,造成计算的绝缘电阻值高于设定的告警值,将会形成漏报^[33]。为解决上述问题,文献^[34]在传统漏电流检测法的检测电

桥基础上进行改进,在主母线安装母线电压表和对地电压表,下级支路仅安装母线电压表,既能测量下级支路电压用于支路对地电阻计算,又能避免不同运行方式时,上级支路的漏电流流经下级支路引起的测量误差。为避免双桥臂检测电路投切检测电阻过程中,抬升负母线对地电压,可能导致一点接地时的保护装置误动,文献^[11]将电路改进为单桥臂的形式,仅在负母与地之间投切检测电阻,有效避免了保护装置的误动,同时简化了电路结构,更适用于便携式绝缘检测装置。

2.2.4 变频探测法

变频探测法,是针对提升低频注入法的测量精度的一种改进,其原理为:向直流系统的主母线注入两组同幅值、不同频率的低频交流信号,后测量故障支路中感应出的低频信号,并根据测得的两电流比值进行系统的绝缘监测和故障选线。但该方法与低频注入法存在相似的问题,即利用低频电流进行判别,绝缘电阻计算结果易受对地电容影响而导致误判,同时需要注入低频信号,仍会影响系统的电压纹波系数^[35]。为解决上述问题,现有研究开始对变频探测法进行改进,在选择注入低频信号时应满足电力系统电压纹波要求^[36];为降低直流系统母线对地电容的影响,在不平衡电桥法的基础上进行改进,将切换桥检测电阻替换为短路电容或短路电容与检测电阻并联的桥臂,按照两次不同频率,轮流通过切换开关投入至系统^[37-39],其原理图如图8所示。其中AC为串入直流系统的低频信号源, R_d 为故障支路接地电阻, C_d 为支路分布电容, C_{T+} 和 C_{T-} 分别为正负母线投入短路电容。

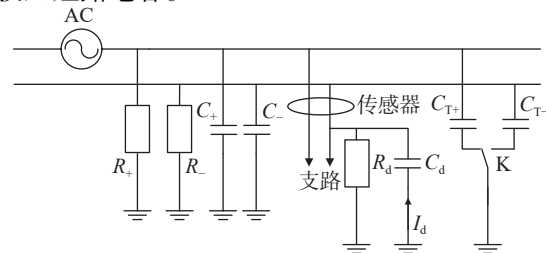


图8 改进变频探测法原理图

Fig. 8 Schematic diagram of improved frequency conversion detection method

由于改进变频探测法的投切桥采用了短路电容,是低频交流信号的主要通路,较传统的电阻而言,能够有效降低电压降,从而提升信号检测精度。

3 结论

目前国内外对于直流系统的接地故障已衍生出了多种查找方法,但仍然存在以下问题:

1) 目前的各类查找方法能够实现较精确的选线定位,但对于具体故障点的定位仍存在进一步的研究空间。尤其是针对变电站内较长的出线电缆支路,大部分埋设于电缆沟内部,若无法精确定位具体的故障点,在进行故障排查时仍需投入大量的人力和物力资源。

2) 对于直流系统出现多点接地或寄生回路等较为复杂的接地故障时,目前的查找方法难以判别。某些继电保护装置动作后产生的寄生回路,会造成直流系统绝缘监测装置报出接地告警,但难以通过告警信息判别故障类型。当前变电站内主要采用拉路法对寄生回路的进行判别。因此,不停电的复杂接地故障判别法也将是未来该领域的重要研究方向。

3) 绝缘检测精度仍有待提高。目前电桥法中采用的检测电阻,以及低频注入法中注入系统的低频信号,都受不同电压等级的约束;交流窜电检测时,电压经过 AD 采样,也将造成采样值与期望值之间的误差。若能进一步探寻适用于不同电压等级直流系统的接地查找方法,并且有效提升绝缘检测的精度,将大幅促进变电站直流系统的绝缘检测技术发展。

4) 便携式直流绝缘监测仪充电问题亟待解决。目前国内外已将便携式直流绝缘监测仪普遍应用至直流接地故障查找的过程中,然而长时间、长距离且无法直接从封闭电缆取电的故障排查应用场景,即是对便携式直流绝缘监测仪续航能力的极大考验。随着小型蓄电池研究技术的日益精进,若在便携式直流绝缘监测仪内部嵌入小型蓄电池,或将有效提升其供电可靠性。

参考文献:

- [1] 严胜, 罗湘, 贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 205-215. DOI: 10.7500/AEPS20180508006.
YAN S, LUO X, HE Z Y. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(3): 205-215. DOI: 10.7500/AEPS20180508006.
- [2] ITO Y, ZHONGQING Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system [C]//The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, China, August 14-16, 2004. New York, USA: IEEE, 2004: 1740-1745.
- [3] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T, et al. DC micro-grid for super high quality distribution-system configuration and control of distributed generations and energy storage devices [C]//2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, June 18-22, 2006. New York, USA: IEEE, 2006: 1-7. DOI: 10.1109/pesc.2006.1712250.
- [4] 刘源俊, 杜贵平, 黎嘉健, 等. 变电站直流电源系统现状与展望 [J]. *电源学报*, 2020, 18(3): 86-94. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.3.86.
LIU Y J, DU G P, LI J J, et al. Status-quo and prospect of substation DC power systems [J]. *Journal of power supply*, 2020, 18(3): 86-94. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2020.3.86.
- [5] 郭桥石, 聂嘉, 吴世坤. 新型电子灭弧技术在机械开关中的应用 [J]. *电气技术*, 2020, 21(2): 119-123. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2020.02.023.
GUO Q S, NIE J, WU S K. Applications of new electronic arc extinguishing technologies in mechanical switches [J]. *Electrical engineering*, 2020, 21(2): 119-123. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2020.02.023.
- [6] 林贤麟, 林继涛, 何美铃. 变电站直流系统接地故障检测技术 [J]. *电工技术*, 2021(22): 176-178, 184. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2021.22.059.
LIN X L, LIN J T, HE M L. Grounding fault detection technology for DC system in substation [J]. *Electric engineering*, 2021(22): 176-178, 184. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2021.22.059.
- [7] 余文波, 洪玫, 黄晓鲁, 等. 220 kV 变电站直流电源系统双重化的典型设计 [J]. *继电器*, 2007, 35(6): 68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2007.06.016.
YU W B, HONG M, HUANG X L, et al. The typical dual model design in DC supply system of 220 kV transformer substation [J]. *Relay*, 2007, 35(6): 68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3415.2007.06.016.
- [8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程: DL/T 724—2000 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Specification of operation and maintenance of battery DC power supply equipment for electric power system: DL/T 724—2000 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [9] 李明珀, 王斌, 林翔宇, 等. 直流系统一点接地引起断路器跳闸的原因分析 [J]. *广西电力*, 2020, 43(4): 56-59. DOI: 10.16427/j.cnki.issn1671-8380.2020.04.014.
LI M P, WANG B, LIN X Y, et al. Analysis of a circuit breaker tripping caused by one-point grounding in DC system [J]. *Guangxi electric power*, 2020, 43(4): 56-59. DOI: 10.16427/j.cnki.issn1671-8380.2020.04.014.
- [10] 周军, 吴瑜坤, 李书瀚. 主从式便携直流系统绝缘检测装置设计 [J]. *电子器件*, 2021, 44(3): 718-724. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.03.036.
ZHOU J, WU Y K, LI S H. Design of master-slave portable insulation detection device for DC system [J]. *Chinese journal of electron devices*, 2021, 44(3): 718-724. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.03.036.
- [11] 黄海宏, 黄煜炜, 刘鑫. 便携式直流绝缘检测算法研究与应用 [J]. *电气传动*, 2022, 52(20): 44-49. DOI: 10.19457/j.1001-

- 2095.dqcd23269.
HUANG H H, HUANG Y W, LIU X. Research and application of portable DC insulation detection algorithm [J]. *Electric drive*, 2022, 52(20): 44-49. DOI: 10.19457/j.1001-2095.dqcd23269.
- [12] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2017.08.013.
HUANG J, ZHU W. A new method to detect DC circuit grounding fault based on the double balanced bridge [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2017, 54(8): 75-79. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2017.08.013.
- [13] 张大兴,甘晓瑜,张勇贤.变电站直流系统发生交流窜入故障查找及检测校验[J].*中国设备工程*,2022(6):159-160. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2022.06.100.
ZHANG D X, GAN X Y, ZHANG Y X. Detection and verification of AC channeling fault in substation DC system [J]. *China plant engineering*, 2022(6): 159-160. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2022.06.100.
- [14] 高林,邱世超,李萌.变电站直流系统接故障分析与查找策略[J].*大众标准化*,2022(18):49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1350.2022.18.018.
GAO L, QIU S C, LI M. Analysis and search strategy of substation DC system connection fault [J]. *Popular standardization*, 2022(18): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1350.2022.18.018.
- [15] TAN M G, CUI H, WEI B C, et al. A new DC system fault detection method based on improved unbalanced bridge [C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, Xi'an, China, October 22-25, 2017. New York, USA: IEEE, 2017: 419-423. DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2017.8188889.
- [16] 张世中.直流接地故障分析及查找方法[J].*山东工业技术*,2016(17):291-292. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2016.17.256.
ZHANG S Z. Analysis and finding method of DC grounding fault [J]. *Journal of Shandong industrial technology*, 2016(17): 291-292. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2016.17.256.
- [17] 邓刚,叶伟,程磊,等.基于深度学习的站用交直流电源系统故障诊断方法[J].*电子设计工程*,2022,30(20):189-193. DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2022.20.038.
DENG G, YE W, CHENG L, et al. Fault diagnosis method of station AC/DC power system based on deep learning [J]. *Electronic design engineering*, 2022, 30(20): 189-193. DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2022.20.038.
- [18] 张燕霞,吴列莹.缩短查找直流接地故障的时间[J].*广东输电与变电技术*,2007(3):27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6324.2007.03.010.
ZHANG Y X, WU L Y. Measures to shorten detection time of DC system grounding fault [J]. *Guangdong power transmission technology*, 2007(3): 27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6324.2007.03.010.
- [19] 朱涛.基于SCADA系统的小电流接地故障选线方法研究[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(13):141-147. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180962.
ZHU T. Fault line selecting method in non-solidly-earthed network based on SCADA system [J]. *Power system protection and control*, 2019, 47(13): 141-147. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180962.
- [20] 李冬辉,史临潼.发电厂和变电站直流系统接地故障检测总体方案[J].*电网技术*,2005,29(1):56-59. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3673.2005.01.012.
LI D H, SHI L T. An overall scheme to detect grounding faults in DC system of power plants and substations [J]. *Power system technology*, 2005, 29(1): 56-59. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3673.2005.01.012.
- [21] 刘渝根,陈超,杨蕊菁,等.基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J].*高压电器*,2020,56(1):169-174. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.025.
LIU Y G, CHEN C, YANG R J, et al. Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy [J]. *High voltage apparatus*, 2020, 56(1): 169-174. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.025.
- [22] 黄知超,钟奕,李彩林,等.一种基于谐波小波的单相接地故障选线方法[J].*电测与仪表*,2012,49(1):22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2012.01.005.
HUANG Z C, ZHONG Y, LI C L, et al. A method of single phase-to-ground faulty line selection based on harmonic wavelet [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2012, 49(1): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2012.01.005.
- [23] 王斌,方青,薛玉峰,等.小波变换在直流接地故障检测中的应用及其在LabVIEW平台的实现[J].*制造业自动化*,2011,33(14):105-108. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2011.07.30.
WANG B, FANG Q, XUE Y F, et al. Application of wavelet transform in DC system grounding fault detecting and its realization on platform of LabVIEW [J]. *Manufacturing automation*, 2011, 33(14): 105-108. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2011.07.30.
- [24] 柴玉华,李辰月,蒋祝巍. Coiflet小波和多目标优化在直流接地故障检测中的应用[J].*电测与仪表*,2016,53(2):62-66. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2016.02.011.
CHAI Y H, LI C Y, JIANG Z W. The application of coiflet wavelet and multi-target optimization in the detection of DC system grounding fault [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2016, 53(2): 62-66. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2016.02.011.
- [25] 王洪涛,李天云,刘辉军.基于二维线性跟踪器的二次系统直流接地故障检测新方法[J].*电网技术*,2012,36(5):204-208. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2012.05.016.
WANG H T, LI T Y, LIU H J. New method to detect DC circuit grounding fault in secondary systems based on linear tracker [J]. *Power system technology*, 2012, 36(5): 204-208. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2012.05.016.
- [26] 周军,刘娜,李曙光.基于等效半波注入法的小电流接地故障选线[J].*电测与仪表*,2020,57(4):55-60. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.04.009.
ZHOU J, LIU N, LI S G. Small current grounding fault line selection based on equivalent half wave injection method [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2020, 57(4): 55-60. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.04.009.
- [27] 杜吉飞.直流系统绝缘监测关键技术研究[D].北京:北京交通大学,2020.
DU J F. Research on key technology of insulation monitoring for DC system [J]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

- [28] 徐以超, 聂德宇, 顾赞, 等. 基于不平衡电桥与小波变换的直流系统接地故障综合检测研究 [J]. *电器与能效管理技术*, 2021(9): 78-84. DOI: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.09.013](https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.09.013).
XU Y C, NIE D Y, GU Y, et al. Study on DC system ground fault detection relating to unbalanced bridge and wavelet transform [J]. *Electrical & energy management technology*, 2021(9): 78-84. DOI: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.09.013](https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2021.09.013).
- [29] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6753.2015.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2015.01.030).
ZHOU J, ZHU B N, YANG S Q, et al. Dynamic difference value method for insulation monitoring in DC system [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2015, 30(1): 235-241. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6753.2015.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2015.01.030).
- [30] 郭兴强, 党政, 纪哲夫, 等. 变电站直流系统接地故障解析及新型检测方法的研究 [J]. *电子测量技术*, 2020, 43(3): 81-85. DOI: [10.19651/j.cnki.emt.1903337](https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.1903337).
GUO X Q, DANG Z, JI Z F, et al. Analysis of grounding fault in DC system of substation and research on new detection method [J]. *Electronic measurement technology*, 2020, 43(3): 81-85. DOI: [10.19651/j.cnki.emt.1903337](https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.1903337).
- [31] 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): 26-30. DOI: [10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2018050040](https://doi.org/10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2018050040).
QIAN L J, LI C Y, XU X, et al. Research on DC system insulation monitoring by using indirect zero drift elimination method [J]. *Process automation instrumentation*, 2018, 39(12): 26-30. DOI: [10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2018050040](https://doi.org/10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2018050040).
- [32] 孔玉辉, 李良权, 徐立军, 等. 基于接地故障特征增强识别的直流漏电流传感保护功能设计 [J]. *电子设计工程*, 2022, 30(13): 54-58. DOI: [10.14022/j.issn1674-6236.2022.13.011](https://doi.org/10.14022/j.issn1674-6236.2022.13.011).
KONG Y H, LI L Q, XU L J, et al. Design of DC leakage current sensing protection function based on enhanced recognition of ground fault features [J]. *Electronic design engineering*, 2022, 30(13): 54-58. DOI: [10.14022/j.issn1674-6236.2022.13.011](https://doi.org/10.14022/j.issn1674-6236.2022.13.011).
- [33] LEI X, XU N, SHEN W, et al. Improvement of on-line monitoring method for insulation of substation DC system [C]// 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, Shenyang, China, June 8-12, 2015. New York, USA: IEEE, 2015: 1350-1355. DOI: [10.1109/CYBER.2015.7288140](https://doi.org/10.1109/CYBER.2015.7288140).
- [34] 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. DOI: [10.14022/j.cnki.dzsjgc.2012.10.007](https://doi.org/10.14022/j.cnki.dzsjgc.2012.10.007).
PAN J, YIN B, RUAN J J. Research and application of DC system insulation monitoring technology [J]. *Electronic design engineering*, 2012, 20(10): 73-75. DOI: [10.14022/j.cnki.dzsjgc.2012.10.007](https://doi.org/10.14022/j.cnki.dzsjgc.2012.10.007).
- [35] 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): 83-88, 107. DOI: [10.3321/j.issn:1000-1026.2009.14.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1026.2009.14.017).
ZHAO M X, CHEN G F, YU W C. Modification of the DC leakage method for DC system insulation monitoring [J]. *Automation of electric power systems*, 2009, 33(14): 83-88, 107. DOI: [10.3321/j.issn:1000-1026.2009.14.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-1026.2009.14.017).
- [36] 李策. 带交流窜入检测功能的新型绝缘监测装置的设计研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017. DOI: [10.7666/d.Y3262710](https://doi.org/10.7666/d.Y3262710).
LI C. Design and research on a new type insulation monitoring device with the function of detecting AC into DC [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [37] 周军, 刘毕杰, 李曙光. 基于改进变频二次注入法的直流系统绝缘检测技术 [J]. *电测与仪表*, 2019, 56(16): 129-133. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2019.016.021](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2019.016.021).
ZHOU J, LIU B J, LI S G. Insulation detection technology of DC system based on improved frequency conversion secondary injection method [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2019, 56(16): 129-133. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2019.016.021](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2019.016.021).
- [38] 吴瑜坤, 李书瀚, 王岩. 基于变频投切电阻的直流系统绝缘检测方法 [J]. *吉林电力*, 2021, 49(3): 29-33. DOI: [10.16109/j.cnki.jldl.2021.03.009](https://doi.org/10.16109/j.cnki.jldl.2021.03.009).
WU Y K, LI S H, WANG Y. Insulation detection method of DC system based on frequency conversion switching resistance [J]. *Jilin electric power*, 2021, 49(3): 29-33. DOI: [10.16109/j.cnki.jldl.2021.03.009](https://doi.org/10.16109/j.cnki.jldl.2021.03.009).
- [39] 贾红舟, 彭冠炎, 刘艳华. 直流电源系统中电缆与断路器的配合 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(增刊2): 74-78. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.012](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.012).
JIA H Z, PENG G Y, LIU Y H. Coordination between cable and circuit breaker in DC power supply system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(Suppl. 2): 74-78. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.012](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.012).

作者简介:



程媛

程媛 (第一作者, 通信作者)

1997-, 女, 助理工程师, 主要从事变电运维工作(e-mail)972547433@qq.com。

张健韬

1999-, 男, 硕士研究生在读, 主要研究方向电气工程及其自动化(e-mail)13578552065@163.com。

(编辑 叶筠英)