

复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术研究

杨发宇 王新

云南电网有限责任公司昆明供电局

摘要: 常规的变电站母线侧引流线带电作业检修技术, 主要采用多次倒闸进行检修, 导致检修过程安全性较低。因此, 提出复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术研究。对复杂环境下, 变电站母线侧的电磁场强度进行计算, 由此做好检前准备工作, 根据人体电阻率等参数设定引流线带电作业检修等电位作业点, 执行引流线检修规程, 对引流线进行质量检查与更换等带电作业检修。实验结果表明: 该技术在复杂环境下表现出的带电作业检修过程流经作业人员电流强度较低, 技术安全性较高, 具备实践应用价值。

关键词: 变电站; 变电站引流线; 母线侧引流线; 带电作业; 检修技术; 复杂环境

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2023.11.208

Research on Live Working Maintenance Technology for Bus Side Drainage Line of Substation in Complex Environment

Yang Fayu, Wang Xin

Yunnan Power Grid Co., Ltd. Kunming Power Supply Bureau

Abstract: The conventional maintenance technology for live working on the busbar side drainage line in substations mainly uses multiple trips for maintenance, resulting in low safety during the maintenance process. Therefore, it is proposed to study the maintenance technology for live working on the busbar side drainage line of substations in complex environments. Calculate the electromagnetic field intensity on the busbar side of the substation in a complex environment, and prepare for inspection. Set equipotential operation points for live line maintenance of the drainage line based on parameters such as human body resistivity, implement maintenance regulations for the drainage line, and conduct quality inspection and replacement of the drainage line for live line maintenance. The experimental results indicate that the technology exhibits low current intensity and high technical safety during the maintenance process of live working in complex environments, and has practical application value.

Keywords: substation; Substation drainage line; Bus side drainage line; Live working; Maintenance technology; Complex environment

引言

我国的电力系统中, 变电站是一种至关重要的电力设施, 变电站汇集了电力系统中的输电站和配电站, 以中转的形式将电力的电压等级进行转换。在变电站中, 存在着若干个功能设备, 母线就是其中的一种, 母线对于变电站供电功能的维护起到十分关键的作用。当变电站出现一定的运行故障时, 很可能是母线出现了问题^[1]。在变电站的母线侧, 通常设有多根引流线, 对变电站的母线提供一定的保护作用。这些引流线往往与变电站的母线侧结构相匹配, 采用螺栓连接的耐张线夹等方式与母线进行连接。当变电站的母线侧出现问题时, 需要同时对母线侧的引流线进行检修。然而, 在这一过程中, 存在着诸多的技术困境。

变电站作为连接输电站和配电站的电力设施, 母线

侧的引流线往往处于自然环境恶劣的区域, 雨雪雷电等天气对检修作业过程造成了极大的影响。在这样的情况下, 就要求负载环境下的变电站母线侧引流线的检修作业过程有着更高的技术水平。此外, 由于变电站在供电过程中起到的重要作用, 当变电站的母线侧引流线出现故障或者进行例行的检修工作时, 很难将该部位的电力供应切断, 会对变电站的整体功能造成影响。因此, 变电站的母线侧引流线检修作业往往是一种带电作业的检修形式, 检修作业过程需要更高的技术要求^[2]。近些年来, 部分专家学者对于此类检修作业的作业技术提出了研究。然而, 在当前的带电作业检修技术中, 仍然存在变电站母线侧倒闸操作次数过多、引流线长度估算精度不足等重要问题。基于此, 本研究提出了一种复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术。通过对该技

术的研究,提高这一检修作业过程中的带电作业安全保障以及检修技术的整体水平,为变电站的运行性能提供科学保障。

一、复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术

(一) 检前准备

变电站的母线侧含有很多高压设备,这些高压设备形成了一定范围内的电磁场。基于电磁场对于带电作业检修过程的影响,在进行带电作业检修时,对变电站的电磁场强度进行分析计算。

建立变电站母线侧与电磁场关联的场量间,根据场量间之间的磁化关系对电磁场的自由空间进行描述,如公式(1)所示^[3]。

$$\begin{cases} D = \epsilon_0 E \\ B = \mu_0 H \\ J = \sigma E \end{cases} \quad (1)$$

公式中, D 表示场量间电通密度, B 表示场量间磁通密度, J 表示电流密度, ϵ_0 表示介电常数, E 表示电场强度, μ_0 表示自由空间导磁率, H 表示变电站母线的垂直高度, σ 表示。

其中, ϵ_0 的取值为 $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$ 。

由于变电站母线侧的引流线等元件的波动性,母线侧自由空间的电场产生的激励源随时间的改变而变化,在这样的情况下,对满足带电作业检修的安全要求的边界条件进行分析,如公式(2)所示^[4]。

$$m = \epsilon_1 \left(J + \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right) \quad (2)$$

公式中, m 表示安全检修边界范围, ϵ_1 表示介质交界面的边界条件, ∂ 表示变电站母线侧的电场与磁场的耦合关系, φ 表示电磁场电位, ω 表示带电作业检修的工作频率。

通过上述计算,得出变电站母线侧引流线带电作业检修过程中的安全检修作业范围,做好检前准备工作。

(二) 设定引流线带电作业检修等电位作业点

对变电站母线侧的引流线位置进行分析,得出检修作业的最佳作业点位置。根据上述检前准备过程中分析计算所得的电磁场强度以及安全作业检修范围,对作业人员进入等电位过程的技术进行设计。

实现作业人员与引流线区域的等电位过程可以表示为如图1所示的等值电路。

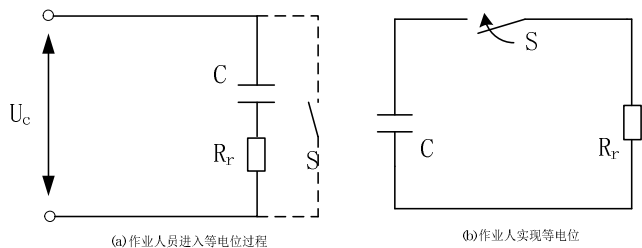


图1 等电位过程的等值电路

如图1所示,作业人员在带电环境下,佩戴好全套安全防护措施进入变电站母线侧引流线的带电作业环

境。图1中, U_c 表示作业人员与引流线作业环境之间的电位差, C 表示实现等电位过程的电容, R_r 表示电阻, S 表示开关。

在实现等电位之前,需要确保作业人员的安全防护措施完好,完成对地电的绝缘后,携带绝缘杆和绝缘手套等设备进行等电位场。

作业人员利用绝缘杆等配套装备进行登杆作业,利用绝缘平台的空气间隙对电磁场进行遮蔽。在绝缘平台处设置绝缘人字梯,通过调整绝缘人字梯的位置与方向,对变电站母线侧的引流线进行检修^[5]。如果引流线周围的带电设备较多,作业空间较为狭小,则在其他带电设备与引流线之间设置绝缘板,避免其他带电设备对引流线检修过程造成的影响。

作业人员到达引流线的安全检修作业范围并实现等电位后,作业人员进入距离超过带电体1.8m的有效安全距离,并采用坐蹲的方式靠近引流线,以便进行更加细致的检修作业。

根据人体的电阻率和相对介电常数对检修过程的等电位作业点进行设定,如表1所示。

表1 等电位作业点设定

等电位作业点	作业点场强 (kV/m)
头顶	27.69
手部(近引流线侧)	68.23
手部(远引流线侧)	77.96
脚部	276.93

按照如表1所示的数据对引流线带电作业检修过程的等电位作业点进行设定。

在本研究中,人体的电阻率取值为0.1S/m,相对介电常数取值为1.06,在实际的变电站母线侧引流线带电作业过程中,需要根据实时的天气环境进行参数的更改,重新设定安全作业的等电位作业点。

(三) 引流线带电作业检修

在设定好的等电位作业点处,作业人员按照下述过程对变电站母线侧的引流线进行检修。

(1) 在进行检修作业之前,在预定位置进行空载测试,确认液压系统、回转、升降和伸缩等功能是否正常运转^[6]。

(2) 进行带电断接空载线路时,需确认另一端的断路器和隔离开关已断开,变压器和电压互感器已退出运行后,才可进行。禁止带负荷断接引线。

(3) 确认线路无接地、绝缘良好且线路上无人工作后,进行带电断接引线操作^[7]。针对母线侧的引流线进行质量检查,更换出现裂痕等质量问题的引流线。

通过上述步骤,完成在复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修。

二、实验

(一) 实验数据采集

采用数学模拟的方法对本研究所提出的变电站母线侧引流线带电作业检修技术进行有效性模拟实验。在变电站的母线侧环境中,对引流线进行模拟,所选用的引流线参数如表1所示。

表1 引流线模拟选用参数

序号	项目	参数
1	型号	2265/2266绝缘跳线
2	耐压等级	25 kV
3	配置	跳线夹2260 跳线型号2754 压接管2022
4	持续大电流	300 A
5	工作长度	3 M
6	导线之间电压	15 kV
7	导线对地电压	10 kV
8	额定电流	250 A

按照如表1所示的型号参数对变电站母线侧引流线的带电作业环境进行模拟。

对带电作业环境及场景参数进行模拟，如表2、表3所示。

表2 带电作业环境模拟

序号	项目	参数
1	作业人员平均身高	1.7 m
2	绝缘软梯头高度	1.2 m
3	绝缘软梯高度	14.1 m
4	绝缘硬体高度	12.0 m
5	绝缘软梯有效绝缘长度	13.4 m
6	短接绝缘软梯长度	2.3 m
7	人体活动范围	0.5 m
8	引流线组合间隙	11.8 m
9	作业人员与邻相导线距离	3.5 m
10	母线垂直高度	12.0 m
11	带电作业工作栏	高1.5 m×长1.0 m×宽0.8 m

表3 带电作业场景参数模拟

序号	项目	参数
1	元电荷量	$1.6 \times 10^{-9} \text{ C}$
2	正负离子复合率	$1.4 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$
3	正离子扩散系数	$32.7 \text{ cm}^2/\text{s}$
4	正离子迁移率	$1.36 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$
5	负离子扩散系数	$22 \text{ cm}^2/\text{s}$
6	负离子迁移率	$1.87 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$
7	真空介电常数	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
8	离子激发率	$5 \text{ cm}^3/\text{s}$

基于上述模拟参数，搭建本次针对复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术的有效性测试实验。基于变电站作业环境的常规环境，设置雨环境、雾环境、雷电环境、霜雪环境、晴天环境共五种作业环境。作业环境的模拟采用库蓝环境模拟设备库中的数据实现。

完成上述准备后，开展本次针对复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术的有效性测试实验。

(二) 实验结果及分析

为了更加直观地体现出本次实验结果的有效性，采用文献[2]和文献[3]所提的技术作业作为对照组进行对比实验，通过分析三种带电作业检修技术的电流强度对

其作业安全性进行评价。

经过实验，得到实验结果如图1所示。

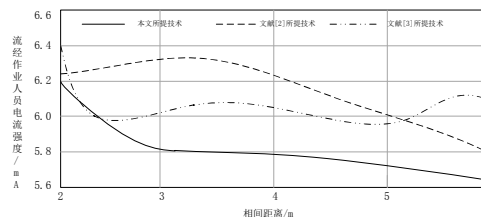


图1 实验结果

由图1可知，在三种带电作业技术中，本研究所提出的技术在不同的相间距离下，表现出的检修过程更加安全，在不同的作业环境下，变电站母线侧引流线带电作业检修过程中流经作业人员的电流强度较其他两种技术更低，在3.5m达到5.8mA后逐渐趋于缓步下降的趋势，最低达到5.62mA，而其他两种带电作业技术能够达到的最低电流强度分别为5.8mA和5.88mA，与本文所提技术有着一定的差距。

从这一实验结果可以看出，本研究所提出的变电站母线侧引流线带电作业检修技术能够有效保障作业过程的安全性，具备应用可行性。

结束语

变电站的检修作业基于复杂的物理环境，一直以来都属于高危作业过程，作业人员的人身安全问题很难得到保障。基于此，本研究提出了一种复杂环境下变电站母线侧引流线带电作业检修技术。通过对该项技术的研究与模拟实验测试，可知该技术的带电作业检修过程流经作业人员的电流强度更低，能够为作业人员提供更加有效的安全保障，提高了变电站运维检修技术的水平。在变电站母线侧引流线的运维工作中，具备较高的应用价值。

参考文献

[1] 梁利辉, 赵志刚, 闫敏, 等. 1000 kV 输电线路不同检修项目带电作业防护研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42 (06): 155-159.

[2] 陈明捷, 何龙飞, 易子琦, 等. 特高压输电线路带电作业沿跳线进出电场方法研究及工器具研制[J]. 电气时代, 2022, (11): 64-66.

[3] 杨亮, 刘芮, 孙逊, 等. 高海拔地区变电站 110~220 kV 母线侧隔离开关引流线带电断、接作业方法研究[J]. 电工技术, 2022, (17): 112-116.

[4] 杨东, 潘峰, 任翔, 等. 基于模糊层次分析法的输电线路设计带电作业检修便捷性综合评估模型[J]. 电力学报, 2022, 37 (02): 172-179.

[5] 郭智琪. 基于零序分量与三相不平衡分析的变电站母线内部故障诊断方法研究[J]. 电气开关, 2022, 60 (03): 15-19+24.

[6] 青灿, 行舟, 智勇, 等. 基于SVM的变电站母线日净负荷曲线大数据识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37 (06): 125-131.

[7] 张雪霏, 贺兰菲, 高晓晶, 等. 基于改进的形态梯度法的变电站母线故障检测技术[J]. 水电能源科学, 2021, 39 (03): 159-163.

作者简介: 杨发宇, 1994年1月, 男, 云南文山, 大学本科, 职务无, 工程师, 研究方向: 变电运行。