

配电变压器带电清洗装置研究与应用

操亮亮*, 方黎明, 张艳, 叶国新, 杨林剑

(国网安徽省电力有限公司桐城市供电公司, 安徽 桐城 231400)

摘要: 文章针对变压器在日常维护带电清洗过程中, 存在着触电、短路等安全风险的情况, 研制一种配电变压器带电清洗设备, 包括高压电力清洗机构、控制终端和电动推车等结构, 通过小型射频遥控器远距离控制电动推杆的高度调节和喷射枪的角度方向, 搭配自动的清洗程序, 实现一键式操作, 无需额外的人工介入, 同时能监测环境温湿度, 提高清洗效率与安全性。

关键词: 配电变压器; 带电清洗; 智能控制; 环境监测

中图分类号: TM421

Research and Application of Live Cleaning Device for Distribution Transformers

CAO Liangliang*, FANG Liming, ZHANG Yan, YE Guoxin, YANG Linjian

(State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Tongcheng Power Supply Company, Anhui Tongcheng 231400, China)

Abstract: In view of safety risks such as electric shock and short circuit in the daily maintenance and cleaning process of transformers, this paper develops a distribution transformer electric cleaning equipment, including high-voltage electric cleaning mechanism, control terminal and electric trolley. The device can remotely control the height adjustment of the electric push rod and the angle direction of the spray gun through a small RF remote control and is equipped with an automatic cleaning program. The one-button operation is realized without additional manual intervention, and the environmental temperature and humidity can be monitored to improve cleaning efficiency and safety.

Keywords: distribution transformer; live cleaning; intelligent control; environmental monitoring

随着社会经济的快速发展, 电力建设的升级改造, 电网二次设备种类繁多, 为保障企业客户用电的安全稳定, 不停电运行成为重要准则。但是, 由于配电变压器由于多在户外或半露天环境工作, 运行维护成为设备健康运行的关键。

长期以来, 由于静电、扬尘等因素的影响, 配电变压器表面极易积累污染物。当积累的污染物达到一定程度, 在潮湿空气环境下, 会在变压器表面形成导电水膜, 从而引发漏电现象。严重时导致变压器损坏和停电事故, 给生产和生活带来极大的不便和损失^[1]。

目前, 针对变压器表面污染物的处理, 运维人员通常采用人工清洗的方式, 但是, 这种工艺需要作业人员不停移动清洗喷头, 不仅清洗效率低下, 清洗效果易受人因素干扰^[2]。

因此, 研究和开发一种高效、可靠的配电变

基金项目: 国网安徽省电力有限公司桐城市供电公司科技项目(配电变压器带电清洗装置研究与应用)(123456789)。
收稿日期: 2024-12-27

器带电清洗装置具有重要的现实意义和应用价值。本论文旨在探讨如何改进现有的清洗技术和装置, 以提高清洗效率和质量, 确保配电变压器的安全稳定运行。

1 变压器带电清洗技术

1.1 现有配电变压器的带电清洗方式

1.1.1 干冰清洗

干冰清洗是利用干冰颗粒在高速冲击下的升华和冷却作用, 去除变压器表面的污垢^[3]。干冰颗粒在撞击污垢表面时迅速升华, 产生的膨胀力使污垢破碎并脱落。同时, 干冰的低温特性可以有效防止清洗过程中的过热和静电产生。

1.1.2 高压水枪清洗

通过高压水枪产生的强大水流冲击力来清洗变压器表面的污垢。这种方式对于去除较厚的污垢和附着物具有较好的效果, 但需要注意控制水压和水流方向, 以避免对变压器造成损伤。

1.1.3 化学溶剂清洗

使用特定的化学溶剂对变压器表面进行浸泡或喷洒，使污垢溶解或分解，然后再用清水冲洗干净。化学溶剂清洗具有较强的去污能力，但需要选择对变压器绝缘性能无影响的溶剂，并确保清洗后的残留溶剂得到妥善处理。

1.1.4 带电蒸汽清洗

利用高温蒸汽的热膨胀和冲击力来去除污垢。蒸汽在接触变压器表面时迅速冷凝，释放出的热能有助于软化和分解污垢，同时蒸汽的流动性能够将污垢带走^[4]。

1.2 现有配电变压器带电清洗的不足

配电变压器是一种在电力系统中用于将高压电能转换为适合用户使用的低压电能的关键设备。它通过电磁感应原理工作，能够有效地调节电压，保障电力的稳定输送和分配。

常见的配电变压器规格型号多样，主要以容量见表 1（如 50、100、250 kV·A 等）和电压等级（如 10/0.4 kV）来区分。变压器型号中的字母和数字也包含着特定的含义，例如 S 代表三相，Z 表示有载调压。不同的规格型号适用于不同的用电场景和负荷需求，在选择时须综合考虑实际情况，以确

保电力系统的安全与高效运行。

在带电清洗过程中，存在着触电、短路等安全风险。尤其是对于高压水枪和化学溶剂清洗，若操作不当，很容易导致电气事故的发生；一些清洗方式对于顽固污垢或狭窄空间内的污垢难以彻底清除，导致清洗后的变压器表面仍存在残留污垢，影响其散热和绝缘性能，因此对于难以清洁的部位不得不停电后人工清洗，工作效率低，作业量较大，见图 1。

化学溶剂清洗所使用的溶剂可能会对环境造成污染，而干冰清洗产生的二氧化碳排放也不符合环保要求^[5]；部分带电清洗设备体积庞大，需要专业人员定期进行保养和维护，增加了清洗成本和难度。

2 装置结构及工作流程

2.1 装置结构设计

为解决以上技术问题，在国网安徽省电力有限公司桐城市供电公司科技项目（配电变压器带电清洗装置研究与应用）资金支持下，研制一种带电清洗设备，其主体结构包括：高压电力清洗机构、控制终端和电动推车。其中高压电力清洗机构包含绝缘清洁液喷射枪、电动云台、电动推杆和清洁液贮藏桶；控制终端包含控制终端机、手持遥控器 and 数字环境温湿度显示器；电动推车包含推车平台和推车启动系统。其中高压清洗装置、电动推杆和电控开关受控制终端控制，通过小型 PLC 控制清洗喷枪内的小型水泵将清洁剂吸入并喷出。通过自动控制的电动云台调整清洗角度，实现远距离控制的情况下进行多角度的清洗工作，装置结构见图 2。

核心机构 1：高压电力清洗机，其整体安置在电动推车平台上，通过玻璃纤维或者聚四氟乙烯材料进行绝缘处理。通过远程控制可以直接控制推车

表1 配电变压器索引表

序号	编号	变压器高度/mm	最小公称爬电距离/mm	污秽等级	变压器尺寸
1	S11-50/10	1 075	148	零级	1 000 mm × 460 mm × 1 075 mm
2	S11-100/10	1 255	160	一级	1 145 mm × 535 mm × 1 255 mm
3	S11-250/10	1 440	200	二级	1 240 mm × 690 mm × 1 440 mm



图1 难于清洁部位须停电人工清洗图示

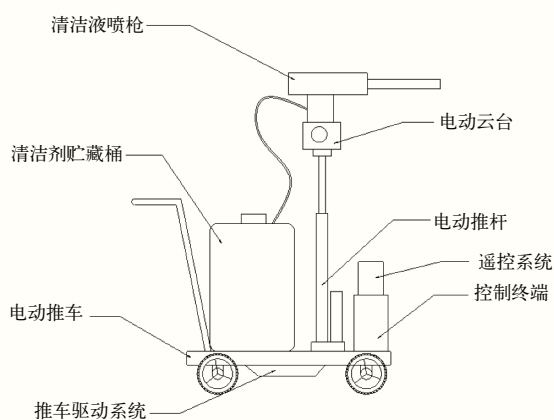


图2 结构示意图

移动，以达到最优的工作位置。

核心机构 2：控制终端，其中的显示屏、高压清洗机、电动推杆和电控开关受控制终端控制。

核心机构 3：耐高压绝缘喷枪，其绝缘喷头上设有若干个喷嘴，这些喷嘴的喷射方向能够进行调节，并且在绝缘喷头顶部分设置了摄像头，该摄像头与控制器相连。

核心机构 4：数字式环境温湿度表，通过实时检测环境温度变化。

2.1.1 高压喷嘴设计

喷嘴的流量计算公式如下^[6]：

$$q = \frac{\mu \cdot d^2 \cdot \sqrt{p}}{0.69^2} \quad (1)$$

式中： q 为喷射液体流量，L/min； d 为喷嘴出口截面直径，mm； μ 为流量系数，根据实际取 0.85； p 为射流压力，MPa。

冲刷冲洗绝缘子时，采用的是喷嘴悬挂在伸缩臂上，故而应该考虑到水冲洗时的反冲力，该反冲力不能超过总体设备重量的 1/3，否则会发生危险。反冲力的计算公式如下：

$$F = 0.745q \cdot \sqrt{p} \quad (2)$$

式中： F 为射流的反冲力，N； q 为喷射液体流量，L/min； p 为射流压力，MPa。

2.1.2 控制设计

在配电变压器带电清洗装置的控制系统设计，基于 PMAC 主板构建了运动控制系统，见图 3。

PMAC 主板以其出色的性能和高精度的控制能力成为核心。通过编程和参数设置，实现对清洗装置各部分运动的精确调控。从喷头的移动轨迹到清洗液的喷射速度，每一个细节都被精准掌控，遥控器见图 4，图 5。

该控制系统的设计，不仅提高了清洗效率和质量，还保障了操作人员的安全，为配电变压器的维护提供了强大的技术支持。

控制系统的硬件部分主要包括 PMAC 核心控制接口板、驱动器、ESP32 模块、电机、电动两通阀门、光电开关及警示灯等。

2.1.3 程序设计

在配电变压器带电清洗装置的控制程序中，为实现系统的稳定运行和精准控制，研发人员舍弃了传统的 PID 算法，转而采用模糊控制算法，见图 6。

模糊控制算法能够有效应对交流伺服电机控制

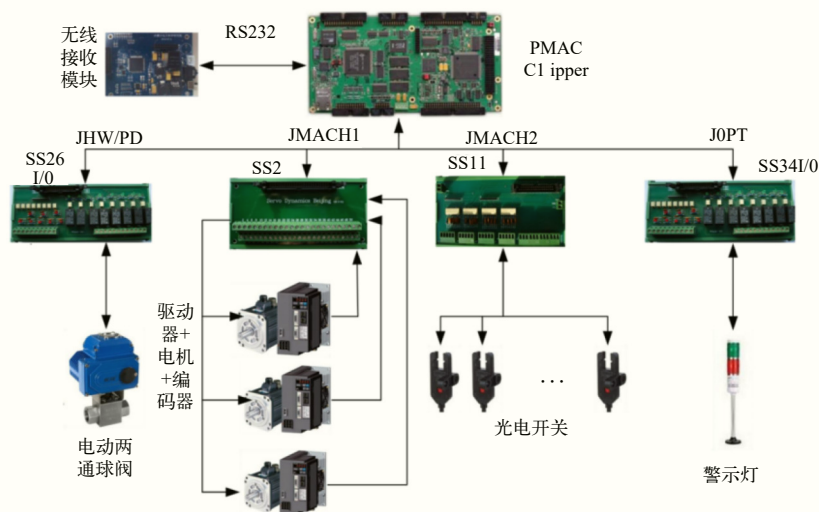


图3 基于 PMAC 的机器人运动控制系统图

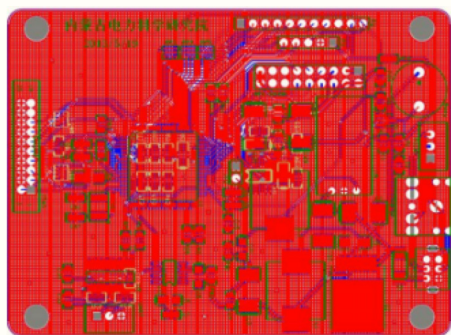


图4 遥控器 PCB 电路板

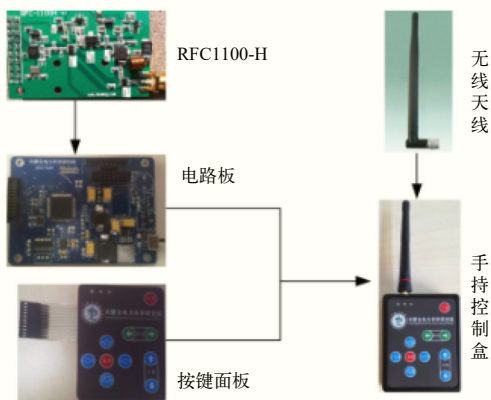


图5 遥控器组成示意图

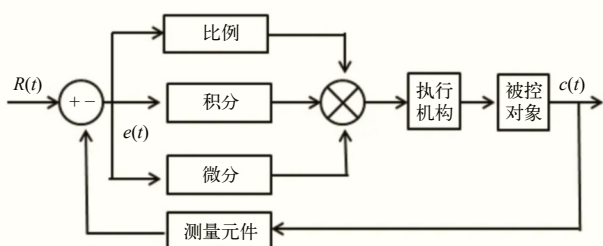


图6 模糊控制算法

中的复杂情况。它不需要精确的系统模型，通过模糊逻辑和模糊规则来处理系统的非线性、耦合性以及负载扰动和噪声检测等问题。

在调试过程中，该算法根据实时采集的系统数据，对控制策略进行动态调整。当检测到负载扰动时，迅速做出反应，自动调整控制参数，从而避免系统出现大幅波动，确保清洗装置能够稳定、精确地运行，提高清洗效果和工作效率。

2.2 装置现场操作流程

配电变压器带电清洗装置现场操作的流程如下：

1) 现场准备：对操作现场进行勘察，确认环境

安全，无影响操作的障碍物和危险因素。放置警示标识，划定操作区域，防止无关人员进入。检查并确保清洗装置及相关设备完好，工具齐全。

2) 安全防护：操作人员穿戴好绝缘防护装备，检查绝缘工具的绝缘性能，确保符合安全要求。

3) 设备连接与检查：将带电清洗装置与电源、水源等连接妥当。检查水路系统是否泄漏，电动设备接线是否异常。开启清洗装置，进行初步调试，检查设备运行是否正常。

4) 清洗操作：操作人员在安全距离外，操作清洗装置的喷枪或喷头，对准配电变压器需要清洗的部位。按照从上到下、从外到内的顺序进行清洗，注意控制清洗的压力和角度，避免对设备造成损伤。对于顽固污渍，可适当增加清洗时间和压力，但要确保在安全范围内。

5) 观察与监控：在清洗过程中，密切观察清洗效果，确保污垢被有效清除。同时监控设备的运行状态，如压力、流量等，以及配电变压器的运行状况，如有异常应立即停止操作。

6) 清洗结束：完成清洗后，关闭清洗装置的电源和水源。拆卸连接管道和设备，妥善存放。

7) 现场清理：清理操作现场的工具和杂物。对清洗产生的废水和废弃物进行妥善处理，符合环保要求。

8) 记录与总结：记录清洗操作的过程、时间、效果等信息。总结操作经验，对出现的问题进行分析和改进。

须注意的是，在实际操作中，必须严格遵循相关的安全操作规程和标准。

装置图见图7所示，配电变压器带电清洗装置的使用效果显著。经实际应用数据表明，使用该装置后，变压器的散热性能提升了20%，有效降低了运行温度，高温故障发生率减少了80%。

在清洁效果方面，污垢清除率高达95%以上，使变压器的绝缘性能显著增强，局部放电量降低了70%。

同时，装置操作便捷，平均清洗一台变压器仅需1h，大大提高了工作效率。而且，清洗过程中对设备正常运行无任何干扰，保障了电力的持续稳定供应。

综上所述，配电变压器带电清洗装置有效提升



图7 装置图

了设备的可靠性和稳定性，为电力系统的安全运行提供了有力保障。

3 本装置创新点

通过小型射频遥控器远距离控制电动推杆的高度调节和喷射枪的角度方向，搭配自动的清洗程序，实现一键式操作，无需额外的人工介入。

高压电力清洗机，其整体安置在电动推车平台上，通过远程控制可以直接控制推车移动，以达到最优的工作位置。

通过实时检测环境温湿度变化，防止触电事故发生。

4 结束语

综上所述，该装置在安全效益方面，能够有效消除隐患，保障变压器正常运行和避免重大事故；在经济效益方面，大大节省了人力和时间，降低了变电设备清洗成本；在社会效益方面，实现了不停电清洗，满足了企业生产需求，防止了污闪事故的发生。配电变压器带电清洗装置具有显著的优势和广阔的应用前景，值得在电力领域进一步推广和应用，为电力行业的稳定、高效发展贡献力量。

参考文献

- [1] 许兴国. 干式变压器雷电波冲击响应分析[J]. 科技创新导报, 2016, 13(31):40-41.
- [2] 李启林. 带电清洗技术在10 kV电力设备上的应用[J]. 清洗世界, 2009, 25(11):5-11.

- [3] 刘江山, 张致, 李宽宏, 等. 10 kV配电房干冰清洗喷嘴的电场特性分析[J]. 高压电器, 2021, 57(7):162-168.
- [4] 王志龙, 张晋, 李荣立, 等. 电气设备带电水蒸汽清洗技术[J]. 绝缘材料, 2009, 42(3):69-72.
- [5] 谭祖雁. 配网绝缘化学清洗喷枪的研制[J]. 华东科技(学术版), 2017(12):240.
- [6] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2006.

作者简介

操亮亮(1989—), 男, 硕士研究生, 副高级工程师, 研究方向: 电网安全, E-mail: caoliang24497@126.com。

(责任编辑: 刘艳玲)

资讯

内蒙古超特高压公司：加强特高压输电线路防山火特巡

2025年3月12日，国网内蒙古超特高压公司运检人员沿着±800 kV锡泰线、1 000 kV锡胜线开展防山火线路特巡，全力筑牢特高压电网安全防线。

近日，锡林郭勒盟地区气温逐渐回升，伴随出现大风天气，平均风力可达6级以上，森林草原火灾风险逐渐增大。国网内蒙古超特高压公司立即启动预警响应，强化落实责任，加强与当地森林草原防灭火指挥部、气象、能源等部门的沟通联络，密切跟踪本地山火预警信息和应急响应情况；组织精干力量对特高压输电线路通道开展拉网式排查，重点巡查山火易发区域；利用“人工+无人机+在线监测装置”立体巡检模式，提高巡查效率和精准度，确保第一时间发现火情和设备隐患。

同时，国网内蒙古超特高压公司强化应急准备、预案培训和实战演练，提前检查防山火应急物资、设备及车辆，确保物资充足、设备完好、车辆可用，保证重要岗位24 h值班、值班电话24 h畅通，确保一旦发生火情，能够快速反应、有效处置。该公司还组织人员向沿线居民开展电力设施保护宣传，禁止在线路保护区内烧荒、焚烧垃圾等行为，介绍山火危害和电力设施保护知识，引导居民自觉参与山火防控工作。

信息来源：国网内蒙古东部电力有限公司