

基于结构创新与流程再造的配网接地线装设效率提升研究

黄金华, 邓杰, 吴杰, 卢琳祿

(国网江西省电力有限公司宜春供电分公司, 江西 宜春 336000)

摘要:针对配网美式变压器接地线装设效率低、制约供电可靠性的问题,基于Holm电接触理论与接触电阻-温升耦合机理,设计一种双螺纹公头端子快速接地装置,通过材料选型与结构优化,实现电接触性能与作业效率协同提升;同步构建“技术-流程-考核-培训”四位一体标准化运维管理体系,保障成果长效落地。现场应用表明,使用该装置将接地线平均装设时长从20.0 min降至6.4 min,过程能力指数 C_{pk} 从0.12提升至1.35,年创造直接经济效益约50万元,为配网运检精益化发展提供了技术与管理双重方案。

关键词:配网检修;快速接地装置;Holm电接触理论;接触电阻;标准化管理;运维优化

中图分类号:TM 732 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2026)02-0053-04

0 引言

供电可靠性是城市电网运维的核心考核指标,接地线装设作为配网检修的强制性安全措施,其作业效率直接决定计划停电时长^[1-2]。某地区供电公司城区配网运维中发现,美式变压器接地作业时因无专用工具,存在流程繁琐、耗时长、接触稳定性差等问题,成为制约供电可靠性提升的瓶颈。现有研究多聚焦于接地线热稳定性能、新型导电材料研发^[3-4],针对美式变压器专用接地装置的机理研究、结构创新,以及技术与管理融合的标准化体系建设较为欠缺。为此,文中从技术创新与管理规范双维度出发,基于电接触核心理论,设计一种快速接地装置,配套构建全流程标准化运维管理体系^[5],解决配网接地作业效率与安全管控难题,为配网运检精益化发展提供可复制的实践方案^[6]。

1 快速接地装置的理论机理

接地装置的电气安全与作业效率,核心取决于接触电阻控制与作业流程优化,文中以经典理论为基

础,明确技术设计与管理规范的核心依据。

1.1 Holm电接触理论与接触电阻优化机理

经典Holm电接触理论是接触电阻优化的核心依据^[7],其核心公式为:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{H}{\pi F \zeta}} \quad (1)$$

式中: R_c 为接触电阻, Ω ; ρ 为接触材料电阻率, $\Omega \cdot m$; H 为软质接触材料布氏硬度,Pa; F 为接触面总压力,N; ζ 为接触面形态与污染修正系数。

由公式(1)明确接触电阻三大核心优化路径:低电阻率材料选型要能降低基础阻值,增力结构设计要能提升接触压力、精密加工工艺要能优化接触面贴合度,为装置设计提供了明确的理论指导,各因素影响机理如图1所示。

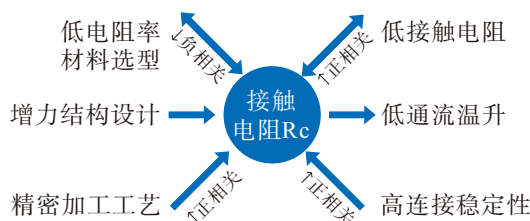


图1 接触电阻优化理论机理模型

1.2 接触电阻-温升耦合机理

接触电阻产生的焦耳热是装置温升过高的核心诱因^[8]。结合焦耳定律与热平衡理论,推导温升关联

收稿日期:2025-12-10

作者简介:黄金华(1975),男,本科,高级工程师,特级技师,从事配电网运行维护与故障治理研究。

公式：

$$\Delta T = \frac{I^2 R_c t}{cm}$$
(2)

式中： ΔT 为装置稳态温升,K； I 为通流电流,A； t 为通流时长,s； c 为材料比热容,J/(kg·K)； m 为接触部位质量,kg。

公式(2)明确了 R_c 与温升的正相关关系,为装置材料选型与安全性能管控提供了量化依据,实现“低阻设计-温升控制-安全提升”的协同优化。

1.3 过程稳定性评价方法

采用过程能力指数 C_{pk} 量化作业过程的稳定性与规范性^[9],公式为：

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right)$$
(3)

式中： USL 为作业时长上限； LSL 为下限； μ 为时长均值； σ 为标准差。 $C_{pk}>1.33$ 表明处于充分受控状态,为作业流程标准化管控提供了量化评价标准。

2 快速接地装置核心技术设计

基于上述理论机理,针对美式变压器作业痛点,完成快速接地装置的核心设计与性能验证,核心技术要点如下。

2.1 核心结构创新设计

如图2所示,设计双螺纹公头端子一体化结构,核心由T2紫铜导电基体、双螺纹连接端、环氧绝缘操作杆三部分组成,主要创新点为：

- 1) 作业流程重构:通过 M12×1.5 专用螺纹端与美式变压器电缆头直接适配,彻底省去传统作业中占比 70.83% 的“拔出肘型插拔头”“连接端加工适配”工序,从结构上实现作业流程极简优化。
- 2) 力-电耦合优化:螺纹副结构可将旋紧力矩转化为持续稳定的接触压力(≥500 N,较传统夹持式提升 3 倍以上),基于公式(1)可显著降低接触电阻,同时保障机械连接的可靠性,杜绝脱落风险。
- 3) 人机工程优化:设计配套 M14×1.5 螺纹连接的高强度环氧绝缘操作杆,优化握把设计,降低操作劳动强度,同时保障绝缘安全^[10]。

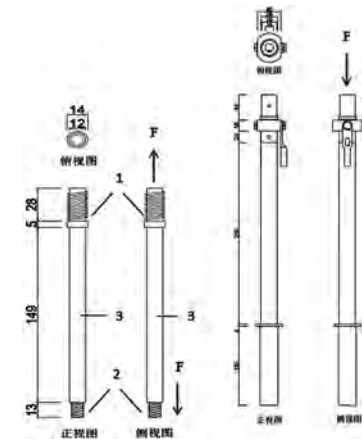


图2 双螺纹公头端子结构原理图

(注:1. M14×1.5 螺纹(连接绝缘杆);2. M12×1.5 螺纹(连接电缆头);3. 导电铜材基体;4. 接触压力 F 示意箭头)

2.2 材料选型与性能验证

基于前述理论机理,核心导电基体选用T2紫铜,其电阻率仅 1.72×10 Ω·m,导电率≥98%,兼具低阻、高导热、适中硬度的特性^[11],从材料层面保障低接触电阻与低热温升。依据国家电力行业规范完成装置全性能测试^[12],核心指标如表1所示。

表1 核心指标

测试项目	测试结果	行业标准要求
接触电阻/mΩ	0.50 ± 0.05	≤1.0
稳态温升(150 A, 2 h)/K	45 ± 3	≤55
绝缘电阻/MΩ	≥1000	≥100
螺纹加工精度/mm	中径公差 ± 0.015	符合 GB/T 197 标准

测试结果表明,装置核心性能远超行业标准要求,电气安全、机械性能均满足配网检修现场作业需求。

3 现场应用案例与效果分析

3.1 某地区城区配网应用案例

选取某地区城北、城南供电所6个班组为试点,覆盖中心城区32台美式变压器,2025年全年开展全周期应用验证,累计完成接地作业182次。

- 1) 传统作业流程共7道工序,平均耗时 20.0 ± 8.5 min,过程极不稳定。
- 2) 新装置作业流程简化为5道工序,直接省去2道耗时工序,试点初期平均装设时长降至 9.2 ± 1.2 min,经标准化作业管控后,巩固期平均时长优化至 6.4 ± 0.6 min。

应用期间,装置未出现接触不良、机械脱落、温升

超标等问题,作业无返工、无安全隐患,验证了装置的现场实用性与可靠性。

3.2 应用效果量化分析

1) 作业效率与稳定性大幅提升:接地线平均装设时长降幅达68%,过程能力指数 C_{pk} 从0.12提升至1.35,作业过程从严重失控转为充分受控,大幅压缩了配网检修停电时长。

2) 经济效益显著:单次接地装拆作业平均缩短25 min,按年均200次作业计算,年度累计减少停电时间83.3 h,参照该地区工商业用电损失标准,年创造直接经济效益约50万元;装置单套成本100元,总投入1.5万元,投资回收期小于1年。

3) 安全效益突出:螺纹连接的高稳定性从根本上杜绝了传统夹持式接地线的安全隐患,低接触电阻设计有效控制了通流温升,提升了检修作业的本质安全水平。

4 运维管理标准化体系建设

为保障技术成果长效落地,结合理论量化标准与现场应用经验,构建“技术-流程-考核-培训”四位一体的标准化运维管理体系,实现配网接地作业的全流程规范化管控。

4.1 技术标准固化

将《美式变压器快速接地装置使用技术规范》纳入该公司《配电网现场运行规程》,基于理论公式与测试数据,明确核心量化标准:

1) 作业核心指标:单台设备接地装设时长 ≤ 8 min,螺纹标准旋紧力矩25 N·m。

2) 装置性能管控:接触电阻 ≤ 0.6 m Ω ,绝缘电阻 ≥ 100 M Ω ,每3个月开展1次性能检测,不合格装置立即更换。

3) 安全操作规范:明确作业前检查、操作步骤、作业后验收的全流程安全要求,杜绝违规操作。

4.2 作业流程标准化

制定《美式变压器接地线装设标准化作业指导书(SOP)》,固化5步标准化作业流程为:工具准备→点位确认→螺纹直连导体端→装设接地端→检查验收,明确每道工序的操作要求、时度标准、质量验收要点,删除无效工序,实现作业流程的统一化、规范化。

4.3 过程管控与考核标准化

建立闭环考核管控机制:

1) 将接地线装设时长、作业规范性、装置维护情况纳入运检人员KPI考核,权重占比10%。

2) 每月基于公式(3)计算各班组作业 C_{pk} 值,对时长超标、 $C_{pk} < 1.33$ 的班组开展溯源分析,及时纠正作业偏差。

3) 建立装置全生命周期台账,记录领用、检测、维护、报废全流程信息,实现设备管理规范化。

4.4 人员培训标准化

开展专项培训与持证上岗管理:

1) 培训内容覆盖理论机理(电接触理论、核心公式)、装置结构、标准化操作流程、安全规范、应急处置。

2) 考核采用“理论+实操”模式,实操考核要求8 min内完成全流程标准化作业,考核合格方可上岗。

3) 每年开展1次复训与考核,持续巩固作业规范性,保障技术成果落地执行。

通过上述标准化体系建设,形成了“技术创新-标准固化-过程管控-效果巩固”的闭环管理,截至2025年12月,该体系已在该公司全范围推广,实现了配网接地作业的精益化、规范化管理。

5 结语

文中针对配网美式变压器接地作业的核心痛点,从技术创新与管理规范双维度开展研究,取得以下核心成果:

1) 技术层面:基于Holm电接触理论与温升耦合机理,创新设计双螺纹公头端子快速接地装置,实现了作业流程重构与电接触性能优化,大幅提升了接地作业效率与安全性能,现场应用效果显著。

2) 管理层面:构建了四位一体的标准化运维管理体系,将理论量化标准转化为可执行的管理规范,实现了作业全流程的标准化管控,保障了技术成果的长效落地。

3) 推广价值:形成的“理论驱动-技术创新-标准固化-闭环管控”全链条方案,可复制推广至环网柜、分接箱等其他配电设备的运检作业优化,对推动配网运检精益化、标准化发展具有重要的工程实践意义。

后续将进一步开展装置轻量化、智能化升级,集成接触电阻、温升无线遥测功能,实现接地状态实时监控;同时,持续完善标准化管理体系,推动配网运检全流程的精益化提升。

参考文献:

[1] 宋宝安,林涛.改造接地线夹提高供电可靠性研究[J].科技与企业,2013(21):214.
[2] 孙洁,王增平,王英男,等.含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J].电力系统保护与控制,2014,42(02):56-62.
[3] 王森,李志忠,徐晓晴,等.大型接地装置的性能测试与综合评价[J].陕西电力,2012,40(01):28-32,56.
[4] Holm R.Electric contacts: theory and application[M].Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.

[5] 《配电线路》编委会.配电线路[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
[6] 姜涛,张东辉,李雪,等.含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J].电力自动化设备,2021,41(09):102-109,125.
[7] 赵帅.配网运维检修管理模式创新研究[J].工程施工技术,2023,1(01):28-30.
[8] 张静波,王海涛.以提升精益化管理为目标的配电运维一体化探析与实践[J].企业管理,2016(增刊2):120-121.
[9] 吕斌,唐敏,周升俊.电连接器接触件优化设计研究[J].电子产品可靠性与环境试验,2006,24(03):54-57.
[10] 姚建国,周大平,沈兵兵,等.新一代配电网自动化及管理系统的设计和实现[J].电力系统自动化,2006,30(08):89-93.
[11] 肖新华,黄明烨,宋志强.基于智能配变终端的低压配电网智能运检体系构建研究[J].供用电,2019,36(06):55-61.
[12] 刘丙江.解读《国家电网公司电力安全工作规程电力线路部分(试行)》[J].农村电工,2006(09):39-41.

(上接第 15 页)

[2] 范京艺.考虑断面短时过载的断面输电能力提高的研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.
[3] 范京艺,毛安家,刘岩,等.基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(01):116-121.
[4] 张锐.架空输电线路动态增容提升能力研究[J].科学技术创新,2025(11):220-223.
[5] 叶鸿声,龚大卫,黄伟中.提高导线允许温度增加线路输送容量的研究及在 500 kV 线路上的应用[J].华东电力,2006

(08):43-46.
[6] 沈鑫怡.基于宏观气象信息的输电线路动态增容技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
[7] 董政鑫.统一潮流控制器接入的输电线路单端量保护方法[D].天津:天津大学,2022.
[8] 付浩东.基于无人机点云数据的超高压输电线路运检管理研究[D].西安:西安理工大学,2024.
[9] 侯宇,王伟,韦微,等.输电线路动态增容技术研究及应用[J].电力系统自动化,2021,45(17):189-198.