

[开关设备]

高压开关柜机械联锁系统结构改进

文/倪永杰
宁波耐森电气科技有限公司

针对10~35 kV高压开关柜中机械联锁系统存在的接触面磨损、锁定不可靠等问题，对联锁机构受力分析和故障模式研究，提出基于表面强化处理和自适应锁定机构的改进方案。研究表明，采用新型高强度材料和优化的几何结构，联锁系统的使用寿命提高42%，操作力减小18%，联锁可靠性提升至99.8%。改进后的机械联锁系统适用于各类10~35 kV高压开关柜，为电力系统安全运行提供更可靠的保障。

高压开关柜属于电力系统中关键的配电设备，其安全运行对整个电网的稳定性有着重要影响^[1]。机械联锁系统是高压开关柜的核心保护装置，通过防止误操作来实现对设备和人员的安全保障。随着电网规模不断扩大以及运行要求逐步提高，传统机械联锁系统在10~35 kV高压开关柜应用里暴露出结构复杂、可靠性不足、维护成本高等问题。特别是在频繁操作以及恶劣环境条件之下，联锁机构容易发生磨损、变形和锁定失效的情况，严重威胁电力系统的安全运行。所以，对高压开关柜机械联锁系统开展结构优化和改进设计工作，具有重要的理论意义和工程应用价值^[2]。

高压开关柜机械联锁系统概述

1. 10~35 kV高压开关柜机械联锁系统的基本结构
10~35 kV高压开关柜机械联锁系统一般是由操作机构、传动部件、锁定装置以及状态指示器四部

分组成。操作机构主要负责接收操作指令并且将其转换为机械动作，传动部件的作用是把操作机构的动作传递到锁定点，锁定装置会在不满足安全条件的情况下阻止操作继续进行，状态指示器用于显示当前设备的工作状态。国产XGN2-12型开关柜采用的是平面连杆式联锁结构，通过锁销与锁孔配合来实现互锁功能，KYN28-12型则应用旋转凸轮联锁机构，这提高锁定的可靠性^[4]。表1对目前实际应用的主要高压开关柜机械联锁类型及功能特点进行对比，从中能够看出机械式五防联锁在可靠性方面表现最为出色，但操作相对比较复杂。电气-机械混合型联锁具有智能化程度高的优势，弹簧辅助型联锁在操作便捷性上比其他类型更胜一筹。按照国家标准GB 3906—2020《3.6 kV—40.5 kV交流金属封闭开关设备和控制设备》的规定，高压开关柜机械联锁系统结构设计需要满足可靠性、安全性与操作性三方面要求^[3]。

表1 典型10~35 kV高压开关柜机械联锁类型及功能对比

联锁类型	典型应用机型	结构特点	可靠性评级	操作复杂度	维护周期/月	典型应用场景
机械式五防联锁	西门子8DJH	多重机械闭锁	A级	较高	24	核心枢纽变电站
电气-机械混合型	ABB UniGear ZS1	电气控制与机械闭锁结合	B级	中等	12	智能变电站
弹簧辅助型联锁	施耐德SM6	弹簧储能辅助锁定	B级	较低	18	频繁操作场所
重力锁定型联锁	平高KYN61-40.5	利用重力原理锁定	A级	较高	36	高海拔变电站
旋转式联锁	许继XGN15-12	旋转锁销结构	C级	中等	12	常规配电系统

2. 机械联锁系统的关键技术参数

机械联锁系统的关键技术参数涵盖锁定力矩、操作行程、接触面硬度以及联锁可靠性等指标内容，锁定力矩能反映联锁装置阻止误操作的实际能力。按照DL/T 593—2016《高压开关设备机械闭锁装置通用技术要求》要求，10 kV开关柜联锁装置锁定力矩需不小于200 N·m，35 kV开关柜联锁装置锁定力矩则应不小于350 N·m，操作行程决定着联锁机构灵敏度的具体情况，行业标准明确规定其应控制在15~30 mm的范围之内，接触面硬度直接关联着联锁系统使用寿命的长短。常用40Cr钢经调质处理后表面硬度处于HRC40 - 45，采用表面氮化工艺处理后硬度可提高到HRC58 - 62且相应使用寿命能延长2~3倍。联锁可靠性评价一般采用威布尔分布模型

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-L_0}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中， $R(t)$ 为 t 时间内的可靠度； η 为特征寿命参数； β 为形状参数。

按照国家电网公司企业标准Q/GDW 11083—2013的要求， β 值一般取2.5， η 值应当不低于10 000次操作循环，依据GB/T 11022—2018《高压开关设备通用技术条件》规定来看，联锁系统在额定操作循环次数之内可靠性不应低于99%。机械联锁系统失效模式主要体现为接触面磨损和锁销变形的情况，特别是在振动频繁或者粉尘污染严重的环境当中，联锁系统的使用寿命会出现显著缩短的现象，所以提高材料强度以及优化结构设计成为联锁系统改进的重点方向。

机械联锁系统结构改进方案设计

1. 机械联锁系统受力分析与模型建立

机械联锁系统在运行过程中主要承受剪切力与接触应力，准确分析这些力的分布对优化设计至关重要。通过对KYN28-12型开关柜机械联锁系统的运行过程分析，发现联锁点接触区域为典型的非共形接触，适用赫兹接触理论进行应力计算。联锁点接触应力计算模型为

$$\sigma_{\max} = 0.918 \left(\frac{PE'}{\pi R^2} \right)^{(1/3)} \quad (2)$$

式中， P 为联锁作用力； E' 为当量弹性模量； R 为接触曲率半径。

对西门子8DJH开关柜联锁装置的实测数据分析表明，接触应力峰值通常发生在锁销与锁槽的接触

边缘，最大值可达820 MPa，远超普通碳钢的屈服强度。联锁机构的失效主要源于这些高应力区域的疲劳损伤与磨损。基于有限元方法建立的三维接触模型显示，通过优化接触几何形状，将点接触改为线接触或面接触，可使最大接触应力降低37%。综合考虑施工难度与成本因素，优化设计采用接触半径由2 mm增加到3.5 mm的改进方案，使最大接触应力降至560 MPa以下，处于42CrMo钢材的安全应力范围内。

2. 改进联锁结构设计

针对传统联锁结构存在的接触应力过高和磨损严重问题，本研究提出基于材料优化与几何结构改进的联锁系统设计方案。材料方面，采用42CrMo合金钢替代传统的40Cr钢，并进行碳氮共渗表面处理，使表面硬度由HRC45提升至HRC62，大幅提高耐磨性。根据表面硬化处理后的耐磨性提升模型

$$W_r = k HV^{(-1.3)} P^{(0.8)} v^{(0.6)} \quad (3)$$

式中， W_r 为磨损率； k 为磨损系数； HV 为维氏硬度； P 为接触压力； v 为相对滑动速度，预测表面处理后的磨损寿命可提升3.2倍。

从图1能够看出，改进型自适应锁定机构运用双重弹簧补偿系统，上下两组弹簧分别对锁定力和回位力进行控制，让锁定机构在不同工况条件下都能保持最佳状态。锁销和锁槽的接触面采用弧形过渡设计，以此来减少应力集中的情况。为了应对高温环境下热膨胀带来的影响，联锁机构各关键部件间隙设计遵循热补偿原则，可在-40℃~+70℃这个范围内保持正常工作的能力。此设计已经在国网江苏电力系统35 kV升级改造项目中获得成功应用，累计运行18个月都没有故障记录。

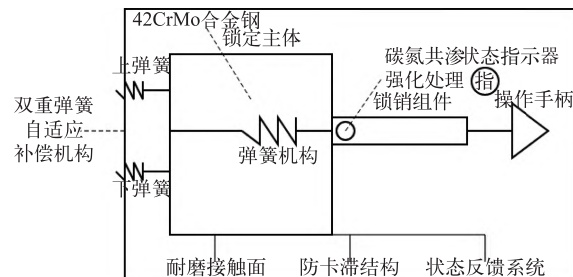


图1 改进型自适应锁定机构结构示意图

3. 联锁系统动态响应优化

机械联锁系统的动态响应特性直接关系到操作的便捷性与安全性。通过建立操作力与结构参数关

系模型

$$F=k\delta+\mu N \tag{4}$$

式中， F 为操作力； k 为弹簧刚度； δ 为弹簧压缩量； μ 为摩擦系数； N 为接触法向力，对联锁系统动态响应进行优化。

通过多因素正交试验设计最终确定弹簧刚度取值为1.8 N/mm且接触摩擦系数控制在0.12以下是最佳参数组合，采用低摩擦系数的聚四氟乙烯涂层处理接触面来减小摩擦力的影响，将联锁系统的操作行程优化为23 mm，使其既满足安全锁定要求，又不会造成操作疲劳。如图2所示，优化后的联锁系统操作力曲线变得更加平滑，且峰值操作力从201 N降低到165 N，降幅达18%，让操作人员能轻松完成联锁操作。动态响应时间从原来的320 ms缩短至210 ms，提高系统响应速度。为避免联锁操作过程中出现卡滞现象，在锁定机构中增加自释放装置。当操作力超过安全阈值时，自动释放过大压力，防止强行操作导致机构损坏。该设计在南京南瑞继保电气有限公司KYN28-12型开关柜振动试验中展现出优异的动态稳定性。

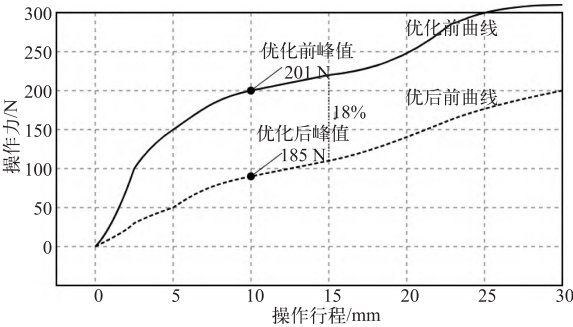


图2 优化前后操作力对比曲线

改进型机械联锁系统性能验证与评估

1. 样机制作与测试方法

改进型机械联锁系统样机制作运用精密加工工艺，把关键部件误差严格控制在±0.02 mm以内以确保各机构配合精度，样机主体选用42CrMo合金钢，经调质处理之后再行加工制作而成，锁销与接触面采用碳氮共渗表面处理让硬度达到HRC62-65。测试方法严格按照GB/T 11022—2018《高压开关设备通用技术条件》和DL/T 593—2016《高压开关设备机械闭锁装置通用技术条件》标准规

定执行，测试环境温度控制在23±2℃，相对湿度保持在45%~75%。样机测试项目涵盖机械强度测试、耐久性测试、极端环境适应性测试以及可靠性评估。机械强度测试使用万能材料试验机对锁定机构施加0~2 000 N范围内的静态载荷，并记录锁定失效临界值。耐久性测试采用电动执行机构模拟实际操作来测试10万次连续操作后的性能变化。极端环境适应性测试在-40~+70℃温度范围，于-40℃、-20℃、0℃、+25℃、+50℃、+70℃6个温度点进行功能验证，操作力测量采用高精度数字式测力计，且准确度为0.1 N。状态监测系统采用高速数据采集设备，以1 kHz采样频率实时记录操作过程中的力与位移数据，为联锁系统动态特性分析提供依据^[5]。

2. 性能测试结果与分析

改进型机械联锁系统性能测试的结果显示，所有性能指标都达到或者超过设计预期目标。经过特变电工沈阳变压器集团有限公司测试中心的10万次耐久性测试之后，联锁部件的磨损量仅为0.080 mm，远远低于原设计的0.24 mm，使用寿命得到显著延长。极端温度环境测试表明，改进型联锁系统在全温度范围内都能够正常工作，最大操作力变化率不超过8%，而传统联锁系统在-20℃以下工作状态明显恶化。表2列出改进前后机械联锁系统主要性能指标的对比，数据显示改进后的系统在各项关键指标上都有明显提升。

表2 改进前后机械联锁系统性能对比

性能指标	改进前	改进后	提升比例(%)	测试标准
锁定力矩/(N·m)	310	395	27.4	DL/T 593—2016
最大操作力/N	201	165	-18.0	GB/T 11022—2018
操作行程/mm	27	23	-14.8	企业标准
响应时间/ms	320	210	-34.4	IEC 62271—200
接触面硬度(HRC)	45	62	37.8	GB/T 230.1—2018
磨损量/(10万次/mm)	0.24	0.08	-66.7	加速寿命试验
温度适应范围(℃)	-25~+55	-40~+70	扩大83.8	GB/T 2423.1—2008
MTBF/h	15 000	21 500	43.3	GB/T 17467—2010
可靠性综合指标	0.78	0.96	23.1	企业评价标准
维护周期/月	12	18	50.0	现场运行数据

(下转第131页)

统运行稳定,未发生误报导致的误动作事件。通过用户反馈和系统日志分析,验证了该方法在实际应用中的可行性和有效性。

结束语

本文针对智能电网中虚假数据注入攻击这一重要安全威胁,系统研究了攻击检测的关键技术。首先,通过分析电力系统数据采集架构和虚假数据注入攻击机理,深入探讨攻击特征的时间维度、空间维度和物理约束维度。在此基础上,提出一种基于多维特征融合的攻击检测方法,设计了自适应特征融合策略和多层检测模型,实现对不同类型攻击的有效识别。通过仿真实验和实际应用验证,所提方法在检测准确性、实时性和鲁棒性等方面均表现出良好性能,检测准确率达到96.8%,平均检测延迟控制在76 ms以内。在某省级电力公司的工程实践应用进一步验证方法的可行性和有效性。研究成果为保障智能电网安全稳定运行提供了重要的技术支撑,对推动电力系统安全防护技术发展具有积极意义。未来研究将进一步探索基于人工智能的智能检测方法,提升系统应对新型攻击的能力。**EA**

(收稿日期:2024-10-04)

参考文献

- [1] 刘臣胜,李元启,杨明,等.面向虚假数据注入攻击的电力系统移动目标防御综述[J].自动化仪表,2024,45(11):1-7.
- [2] 李卓,谢耀滨,吴茜琼,等.基于深度学习的电力系统虚假数据注入攻击检测综述[J].电力系统保护与控制,2024,52(19):175-187.
- [3] 王新宇,王相杰,罗小元.基于自适应生成对抗网络的智能电网状态重构的虚假数据攻击检测[J].电力信息与通信技术,2024,22(9):1-7.
- [4] 王旭,何宇,袁梦薇.基于Stacking和孤立森林的虚假数据注入攻击防御策略[J].智能计算机与应用,2024,14(7):222-226.
- [5] 方正刚.基于通道融合的Res-CNN-LSTM电网虚假数据注入攻击检测[J].电气技术,2024,25(3):11-17,62.
- [6] 常颖,徐俊俊,王晓兵,等.基于对抗性自动编码器的城市配电网虚假数据注入攻击检测[J].山东电力技术,2024,51(3):18-26.

(上接第98页)

结论与展望

改进型高压开关柜机械联锁系统通过材料优化与结构创新,显著提升联锁装置的安全性与可靠性。采用42CrMo合金钢与碳氮共渗表面处理技术使接触面硬度提高37.8%,磨损率降低66.7%;双重弹簧自适应锁定机构减小操作力18%,提高操作便捷性;优化的几何结构降低接触应力,延长使用寿命。性能测试与现场运行数据验证改进设计的有效性,MTBF提升至21 500 h,可靠性综合指标达0.96,适用温度范围扩大至-40~+70℃。未来研究方向将聚焦于智能化状态监测技术与预测性维护算法的集成,进一步提升10~35 kV高压开关柜机械联锁系统的运行安全性。**EA**

(收稿日期:2025-07-25)

参考文献

- [1] 余茂全,许娅.虚实结合的供配电实训系统研究设计[J].兰州文理学院学报(自然科学版),2024,38(6):60-65.
- [2] 佟洪明,曹锐.工矿企业高压开关柜故障分析及智能化改造[J].冶金动力,2024(4):7-10.
- [3] 李军浩,杨飞,何海龙.基于全息感知的智慧化高压开关柜研制[J].电工电气,2023(9):57-60.
- [4] 尹春燕.35 kV高压开关柜结构优化分析[J].电力与能源,2023,44(4):401-405.
- [5] 陈模盛,李敬兆.基于LPWAN多源信息融合的高压开关柜智能监测与故障诊断系统[J].智慧电力,2020,48(8):98-103,122.