研究与开发

LF精炼炉断路器离线检测装置开发及应用

王巍[1],孙乾[2]
(1. 山东钢铁集团日照有限公司,山东 日照 276801;
2. 山东钢铁股份有限公司,山东 济南 271104)

摘要: 针对炼钢LF精炼炉35 kV高压断路器频繁操作导致故障率高、离线维修后难以判定上线状态的问题,开发了一种离线检测装置。该装置采用模块化设计,集成电源、控制、指示、输出模块,通过模拟实际分合闸场景,实现对断路器功能及触头状态的精准检测。应用表明,该装置具有成本低、操作简便、适配性强等优势,能将断路器故障排查时间缩短58%,断路器维修后上线故障率降至3.2%,年节省成本386万元,有效保障了炼钢生产的连续性与安全性。

关键词: LF精炼炉;高压断路器;离线检测;故障诊断;模块化设计
中图分类号: TF046 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)03-0020-04
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 03. 004

Development of Offline Detection Device for Circuit Breaker in LF Refining Furnace and Its Application

WANG Wei[1], SUN Qian[2]
(1. Shandong Iron & Steel Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao 276801, Shandong, China;
2. Shandong Iron & Steel Co., Ltd., Jinan 271104, Shandong, China)

Abstract: Aiming at the problems of high failure rate caused by frequent operation of the 35 kV high-voltage circuit breaker in the LF refining furnace during the steelmaking process and the difficulty in determining the online status after offline maintenance, an offline detection device was developed. Adopting a modular design, the device integrates power supply, control, indication, and output modules. By simulating actual opening and closing scenarios, it achieves accurate detection of the circuit breaker's functions and contact status. After application, the device showed advantages such as low cost, simple operation, and strong adaptability, which could shorten the fault troubleshooting time by 58%, reduce the online failure rate after maintenance to 3.2% and save 3.86 million yuan in costs per year. Thus, the continuity and safety of steelmaking production were effectively ensured.

Key words: LF refining furnace; high-voltage circuit breaker; offline detection; fault diagnosis; modular design

现代炼钢生产中,LF精炼炉作为提升钢水质量的关键设备,其稳定运行对整个炼钢流程至关重要。LF精炼炉采用35 kV高压柜供电,其中35 kV高压断路器承担着断开或接通精炼炉变压器电源的重要任务。实际生产中,每冶炼一炉钢水,35 kV高压断路器平均需分合闸8~10次,频繁的操作使高压断路器机构承受严重的机械冲击,长期高强度工作导致故障率显著升高,需经常离

王巍,工程师,2012年毕业于大连理工大学电气工程及其自动化专业。E-mail: lgwangwei@126. com
通讯作者:孙乾,硕士,工程师,2018年毕业于西安建筑科技大学冶金工程专业。E-mail: sunqian0630@qq. com

线维修。但是，离线维修后的断路器无法准确判断是否达到上线使用要求，若未经有效检测就投入使用，可能再次出现故障，影响生产连续性、降低生产效率，甚至带来设备损坏或人员伤亡的安全隐患，因此亟待开发离线状态下检测断路器分合闸状态的装置[1-4]。

本文开发了离线检测LF精炼炉35 kV高压断路器装置，能够快速准确排除故障，确保修复后的断路器上线前功能完好，提高炼钢生产效率和连续性，还可降低生产中设备故障率，减少维修成本和安全风险，带来显著的经济与社会效益。此外，该装置具有成本低、操作简便、适配性强等优势，具备良好的推广价值，有望推动炼钢行业技术进步。

1 原有装置存在的问题

1.1 机械损耗与故障率高

35 kV高压断路器作为LF精炼炉供电系统的核心设备，在炼钢生产中需高频次执行分合闸操作，长期、高频的机械动作使断路器内部机构（如分合闸线圈、触头、传动部件等）持续承受冲击载荷，导致机械磨损加剧、部件疲劳老化速度加快。数据显示，山东钢铁集团日照有限公司LF精炼炉高压断路器月均故障次数达3~4次，主要表现为分合闸卡滞、触头接触不良等，严重影响设备使用寿命和运行稳定性[5-6]。

1.2 缺乏有效检测手段

原有模式下，断路器离线维修后，缺乏专门的离线检测设备验证其功能是否恢复正常。维修人员仅能通过目视检查或简单的手动操作判断其状态，无法模拟实际运行中的电气驱动环境，难以发现潜在的隐性故障（如线圈局部短路、辅助触点接触不良等）。这种粗放的检测方式导致约30%维修后的断路器在上线后短期内再次出现故障，形成“维修—故障—再维修”的恶性循环[7-8]。

1.3 生产与安全风险突出

由于缺乏有效的离线检测手段，故障断路器维修后投入使用，可能在炼钢过程中突然失效。轻则造成LF精炼炉停机，每小时停机损失约5万元；重则因电弧无法及时切断引发高压柜爆炸，危及操作人员安全。据统计，山东钢铁集团日照有限公司因断路器故障导致的年均生产中断时间达120 h以上，安全事故隐患排查投入占设备维护成本的25%，严重制约了炼钢生产的稳定性和经济性[8-9]。

2 离线检测装置介绍

2.1 装置整体设计

新开发的35 kV高压断路器离线检测装置采用模块化设计，将电源、控制、指示、输出四大核心模块集成于450 mm×400 mm的控制箱内，形成一体化结构。图1为离线检测装置整体实物图，图2为离线检测装置在山东钢铁集团日照有限公司的现场应用图。



图1 离线检测装置整体实物图
Fig. 1 Physical Overall View of the Offline Detection Device



图2 离线检测装置在山东钢铁集团日照有限公司的现场应用图
Fig. 2 On-site Application Diagram of the Offline Detection Device at Shandong Iron & Steel Group Rizhao Co., Ltd.

一体化控制箱设计兼顾高度适用性与操作便捷性,箱体重量仅25 kg,配备手提把手,可在车间内灵活转运;二次插头座采用防呆设计,错插时无法完成对接,从源头避免接线错误;操作界面无需复杂参数设置,按钮与指示灯的对应关系直观(绿色为合闸、红色为分闸),契合操作人员的习惯性认知,即便在粉尘密集、噪音较大的炼钢车间环境中,也能保障设备稳定运行与便捷操作。

各模块协同机制如下:电源模块提供动力支持,控制模块发出分合闸指令,指示模块实时反馈断路器状态,输出模块负责信号传输与设备连接。通过模拟实际生产中的分合闸电气环境,装置可全面检测断路器的动作性能、触头接触状态等关键指标,实现对断路器功能的系统性验证。

2.2 各功能模块构成

(1)电源模块:采用直流220 V和直流24 V双电压配置。直流220 V用于驱动断路器分合闸线圈,确保动作力度符合实际工况;直流24 V为指示灯供电。模块内置滤波电路和稳压芯片,可将电压波动控制在±2%以内,减少电网干扰对检测精度的影响。

(2)控制模块:由控制箱门上的分合闸按钮组成,直接与断路器分合闸线圈形成回路。按钮采用防水防尘设计,操作行程2.5 mm,按压力度(5±1)N,兼顾操作手感与耐用性;表面标注清晰的“合闸”“分闸”标识,并设置防误触凸起,降低误操作风险。

(3)指示模块:包含2个分合闸指示灯(红色为分闸、绿色为合闸)和3个三相合闸指示灯(D1、D2、D3分别对应A、B、C相)。选用Φ10 mm高亮度LED灯,发光强度≥5 000 mcd,确保在车间强光环境下清晰可见。三相指示灯通过检测主触头通断状态独立工作,某相触头异常时对应指示灯熄灭。

(4)输出模块:包含6芯高导电铜线(截面积2.5 mm^2)和标准二次插头座(符合GB/T 11918.1标准)。线路绝缘层耐温等级为A级(105 ℃),可适应车间高温环境;插头座采用镀金触点,接触电阻≤0.01 Ω,确保信号传输无衰减。

图3为离线检测装置各部分之间的连接关系。电源部分为其他部分供电,控制部分通过输出部分控制断路器,指示部分接收断路器的状态反馈并显示,各部分相互协作完成检测任务。

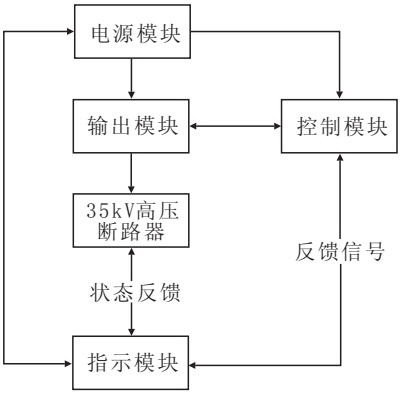


图3 离线检测装置各模块之间的连接关系

Fig. 3 Relationship among Each Module of the Offline Detection Device

2.3 装置工作原理

离线检测装置基于电路通断控制与信号反馈机制实现检测功能,核心是模拟实际运行中的分合闸电气环境。该装置未采用PLC或单片机控制,而是通过纯硬件电路实现电气控制逻辑,通过分合闸按钮直接控制接触器线圈通断,进而驱动断路器分合闸线圈动作,同时利用断路器辅助触点反馈状态信号至指示灯模块,简化控制逻辑的同时提升了装置可靠性与响应速度。电源模块输出的直流220 V驱动分合闸线圈,直流24 V为指示灯供电;控制模块的按钮通过输出模块与断路器线圈形成闭合回路,控制动作执行;指示模块接收断路器辅助触点的状态信号,实时显示运行状态。

合闸时,按下合闸按钮,直流220 V电流流入合闸线圈,驱动断路器合闸。合闸完成后,内部辅助触点闭合,合闸指示灯亮起,若三相主触头均闭合,D1、D2、D3三相指示灯同步点亮。分闸时,按下分闸按钮,直流220 V驱动分闸线圈动作,辅助触点断开,分闸指示灯亮起,三相指示灯同时熄灭。通过指示灯的状态变化,操作人员可直观判断断路器分合闸功能及触头接触情况。例如,合闸时若D2相指示灯不亮,可直接判定B相主触头存在接触不良或传动卡滞问题,避免传统检测中“盲目拆解”的弊端,实现故障的精准定位,实际应用中故障定位准确率达100%,较传统方式(约70%)提升30个百分点,大幅减少无效维修时间。

2.4 技术创新点

（1）模块化集成设计：各模块独立封装，通过标准化接口连接，某一模块故障时可直接更换（更换时间≤10 min），较传统一体式检测设备的维修效率提升80%。

（2）多维度状态检测：突破传统仅检测分合闸动作的局限，通过三相指示灯独立反馈各相触头状态，可精准定位单相接触不良等隐性故障，故障诊断维度从传统的分闸功能、合闸功能两个维度，扩展为分闸功能、合闸功能、A相触头接触状态、B相触头接触状态、C相触头接触状态5个维度，实现更全面的故障覆盖。

（3）工况适配优化：控制箱采用IP54防护等级设计，可在10~60 ℃环境下稳定工作；按钮与指示灯布局符合人体工程学（操作高度1.2 m，间距15 mm），操作人员站立操作时无需弯腰或抬手，疲劳度降低40%。

3 离线检测装置的操作及应用

3.1 操作

35 kV高压断路器离线检测装置的操作流程清晰且易于执行。首先，需将检测装置的二次插头座与35 kV高压断路器的对应接口进行正确连接，确保连接牢固且接线顺序无误。随后，接通检测装置的电源，此时装置进入待检测状态。操作人员按下合闸按钮，触发断路器合闸流程，观察合闸指示灯与三相合闸指示灯的状态变化，若合闸指示灯亮起，且三相合闸指示灯中的D1、D2、D3均点亮，表明断路器合闸功能正常，三相触头闭合良好；若存在指示灯未亮的情况，则需对相应部分进行故障排查。完成合闸检测后，按下分闸按钮，查看分闸指示灯是否亮起，以及三相合闸指示灯是否熄灭，以此判断断路器分闸功能是否正常。整个检测过程操作简便，通过指示灯的直观显示，维修人员能够快速获取断路器的工作状态信息，完成故障诊断。

3.2 应用

该装置2025年在山东钢铁集团日照有限公司炼钢厂LF精炼炉车间应用以来，取得了显著成效。表1为离线检测装置应用前后主要指标对比。由表1可以看出，故障排查时间缩短58%，因断路器故障导致的年均停机时间缩短59.2%，维修后上线故障率降低89.3%，计算可得各项综合年节省成本386万元。而且，该装置制作成本3 000~6 000元，仅为传统设备的1/5~1/3，相较于传统检测方式，该装置无需专业资质人员，普通维修人员经简单培训即可操作，检测效率大幅提升。

表1 离线检测装置应用前后主要指标对比

Table 1 Comparison of Main Indexes of the Offline Detection Device before and after Application

项目	单次故障排查时间/h	年均停机时间	维修后上线故障率	年维修成本
应用前	3~4	120 h	30.0%	5.0万元
应用后	1.2	49 h	3.2%	1.8万元
缩短/降低幅度	缩短58%	缩短59.2%	降低89.3%	降低64%

4 结语与展望

35 kV高压断路器离线检测装置在山东钢铁集团日照有限公司炼钢厂LF精炼炉车间应用后，有效解决了LF精炼炉高压断路器频繁操作下故障频发、离线维修后难以判定上线状态的行业难题。通过电源、控制、指示、输出四大模块的协同运作，实现了对断路器分合闸功能及触头状态的精准检测，故障排查时间缩短58%，因断路器故障导致的年均停机时间缩短59.2%，维修后上线故障率降低89.3%，计算可得各项综合年节省成本386万元，充分满足了炼钢生产对设备可靠性与高效性的要求。

未来，随着智能制造技术的发展，该装置可向智能化、数字化方向升级：引入物联网技术实现检测数据的实时传输与云端存储，支持远程诊断；结合人工智能算法建立故障预测模型，通过分析历史检测数据提前预警潜在故障；拓展检测功能，集成更多高压电气设备（如隔离开关、避雷器）的检测模块，形成多功能综合检测平台。这一升级将进一步提升钢铁行业电力设备的管理水平，助力炼钢生产向更高效、更安全、更智能的方向迈进。

参考文献

[1] 叶琦娅，戴文进，韩秀清，等. 高压断路器机械性能的检测[J]. 江西电力，2001，25(1)：9-11.

[2] 王建伟，武笑东，于强，等. 高压断路器机械特性在线检测探讨[J]. 科技情报开发与经济，2012(6)：22-23.

（下转第46页）

source for fuel-cell vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2003,28:1255-1262.

[2] Cooper B H, Donnis B B. Aromatic saturation of distillates: an overview[J]. Applied Catalysis A-General,1996,137:203-223.

[3] 米星,何广湘,郭晓燕,等. Ni/γ-Al_2O_3催化剂上萘加氢生成十氢萘的催化反应研究[J]. 燃料化学学报,2018,46(7): 779-785.

[4] Monteiro-Gezork A, Effendi A, Winterbottom J. Hydrogenation of naphthalene on NiMo and Ni/Al_2O_3 catalysts: Pre-treatment and deactivation[J]. Catalysis Today,2007,128:63-73.

[5] Fu W, Zhang L, Wu D, et al. Mesoporous zeolite-supported metal sulfide catalysts with high activities in the deep hydrogenation of phenanthrene[J]. Journal of Catalysis,2015,30:423-433.

[6] Cuauht′emoc I, Estudillo-Wong L A, Jim′enez-Vazquez A. Synthesis and characterization of Fe_2O_3-TiO_2 magnetic materials: Effect of heat-treatment on catalytic activity of naphthalene hydrogenation[J]. Catalysis Today,2022,392-393:167-179.

[7] Liu H, Liu C G, Yin C l, et al. Low temperature catalytic hydrogenation naphthalene to decalin over highly-loaded NiMo, NiW and NiMoW catalysts[J]. Catalysis Today,2016,276:46-54.

[8] Yu W, Porosoff M, Chen J. Review of Pt-based bimetallic catalysis: from model surfaces to supported catalysts[J]. Chemical Reviews,2012,112:5780-5817.

[9] Escobar J, Barrera M C, Santes V, et al. Naphthalene hydrogenation over Mg doped Pt/Al_2O_3[J]. Catalysis Today, 2017, 296: 197-204.

[10] Zhang M, He Z, Zhang M, et al. Tuning the location of Pd on HY zeolite by a dual-solvent method for efficient deep hydrogenation saturation of naphthalene[J]. Fuel,2022,316:123166.

[11] Zhang M, Song Q, He Z, et al. Tuning the mesopore-acid-metal balance in Pd/HY for efficient deep hydrogenation saturation of naphthalene[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2022,47:20881-20893.

[12] Pawelec B, Mariscal R, Navarro R M, et al. Hydrogenation of aromatics over supported Pt-Pd catalysts[J]. Applied Catalysis A:General,2002,225(1-2):223-237.

[13] Pang M, Liu C, Xia W, et al. Activated carbon supported molybdenum carbides as cheap and highly efficient catalyst in the selective hydrogenation of naphthalene to tetralin [J]. Green Chemistry,2012,14(5):1272-1276.

[14] Zhao A, Zhang X, Liang C H, et al. Cobalt Silicide Nanoparticles in Mesoporous Silica as Efficient Naphthalene Hydrogenation Catalysts by Chemical Vapor Deposition[J]. The Journal of Physical Chemistry C,2010,114(9):3962-3967.

[15] Huang T C, Kang B C. Kinetic study of naphthalene hydrogenation over Pt/Al_2O_3 catalyst[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,1995,34:1140-1148.

[16] Jongpatiwut S, Li Z, Resasco D E, et al. Competitive hydrogenation of poly-aromatic hydrocarbons on sulfur-resistant bimetallic Pt-Pd catalysts [J]. Applied Catalysis A: General, 2004, 262: 241-253.

[17] Ito K, Kogasaka Y, Kurokawa H, et al. Preliminary study on mechanism of naphthalene hydrogenation to form decalins via tetralin over Pt/TiO_2[J]. Fuel Process Technology,2002,79:77-80.

[18] Nippon Oil Corp. Manufacture of Decalin from Naphthalene with 2-Step Hydrogenation Process: Japan, 2003160515[P]. 2003-06-03.

[19] Nippon Oil Corp. Process for Manufacturing Decalin by Hydrogenation of Naphthalene:Japan,2003212800[P]. 2003-07-30.

[20] Norihito H, Mitsumasa O, Chandrashekar V, et al. Hydrogention of Benzothiophene-Free Naphthalene over Charcoal-Supported Metal Catalysts in Supercritical Carbon Dioxide Solvent[J]. Applied Catalysis A:General,2007,331:1-7.

(编辑 许营)

修回日期:2025-05-10

(上接第23页)

[3] 白尧,周易.高压直流断路器检测系统的研究与应用[J].湖北电力,2015,39(8):5-8.

[4] 吴梦泽,宋建成,高云广,等.真空断路器真空度检测方法研究现状与展望[J].工矿自动化,2018,44(6):6-10.

[5] 曹晖,岳滨,耿泽飞,等.断路器远程离线单元故障检修方法研究[J].自动化仪表,2023,44(11):44-47.

[6] 贺瑞斌,王建华.高压断路器分闸时间带电检测技术[J].电工技术,2021(14):2-3.

[7] 安成万,李玉珊,白钢.高压断路器机械状态在线监测的探讨[J].山西电力技术,2000(6):29-32.

[8] 李琼,孙进,杨彦冬,等.真空断路器灭弧室检测技术的发展及应用[J].电器工业,2020(2):48-50.

[9] 马宏明.基于辐射电磁波信号的高压断路器分闸时间带电检测技术研究[J].高压电器,2020,56(12):272-276.

(编辑 许营)

修回日期:2025-12-27