电力系统六角图自动化检测技术研究与实践

王有之 李 甜 裴 雪 王笑倩
国网河南省电力公司直流分公司 河南 郑州 450000

摘 要 在电力系统变电站继电保护工作中，主变压器负荷试验（六角图试验）是验证二次接线、CT绕组极性等参数正确性的核心环节。传统六角图检测依赖人工绘制与经验判断，存在效率低下、误差率高、报告生成烦琐等问题，难以满足智能电网精准运维需求。本文基于六角图检测原理与信号处理技术，研发一种智能六角图检测校验装置，从硬件结构、电气电路、软件系统三方面实现检测自动化。装置采用高精度采样模块、智能算法与可视化界面，可自动完成数据采集、相位计算、六角图绘制、结果判断及报告生成。实践表明，该技术显著提升了检测效率与准确性，降低了人工依赖，为电力系统安全稳定运行提供技术支撑，具有广泛的应用推广价值。

关键词 六角图分析；自动化检测；继电保护校验；向量测量

Research and Practice on Automatic Detection Technology for Six-Phase Diagram in Power Systems

Wang You-zhi, Li Tian, Pei Xue, Wang Xiao-qian
DC Branch of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, Henan Province, China

Abstract In the relay protection work of power system substations, the main transformer load test (six-phase diagram test) is a core procedure for verifying the correctness of parameters such as secondary wiring and CT winding polarity. Traditional six-phase diagram detection relies on manual drawing and empirical judgment, which presents problems including low efficiency, high error rates, and cumbersome report generation, making it difficult to meet the precision operation and maintenance requirements of smart grids. Based on the principles of six-phase diagram detection and signal processing technology, this paper develops an intelligent six-phase diagram detection and calibration device, achieving detection automation through three aspects: hardware structure, electrical circuitry, and software system. The device employs high-precision sampling modules, intelligent algorithms, and a visual interface, enabling automatic completion of data acquisition, phase calculation, six-phase diagram plotting, result judgment, and report generation. Practice has shown that this technology significantly improves detection efficiency and accuracy while reducing reliance on manual labor, providing technical support for the safe and stable operation of power systems, and holds extensive application and promotion value.

Key words Six-Phase Diagram Analysis; Automatic Detection; Relay Protection Calibration; Phasor Measurement

随着智能电网建设的推进，继电保护对检测精度与效率要求更高。六角图试验是主变压器投运前及检修后的关键检测手段，通过分析电压电流相位关系，判断CT极性、接线及变比正确性，直接影响差动保护可靠投运。传统检测依赖人工操作相位表、电压表采集数据，凭经验绘制六角图，不仅耗时费力，且受技能水平影响，结论随意性大、错误风险高[1]。同时，手工绘制及报告缺乏标准化工具，易出现格式错误与图形畸变，难以实现数字化管理与追溯。现有部分检测产品虽尝试自动化改进，但在智能判断、报告生成及适配实际工况方面仍有不足。为此，本文研究六角图自动化检测技术，通过软硬件协同设计研发智能检测校验装置，解决传统检测痛点，推动检测工作向规范化、智能化、高效化转型，为电网安全运维提供可靠保障。

1 六角图自动化检测技术理论基础

1.1 六角图检测核心原理

六角图法是基于向量分析的相位检测方法，通过绘制电压、电流向量图，直观反映各电气量的相位关系，进而判断接线正确性。该方法以互成120°的三相对称电压系统为坐标，选用线电压作为参考量，通过测量被测电流在不同线电压向量上的投影，确定电流向量的位置与大小，最终形成六角形向量图其测量分析界面。利用六角图可准确判断同一组CT三相电流相位、功率方向继电器接线、差动保护中不同组别CT电流相位及变比正确性，是电力系统相位检测的经典方法。

自动化检测技术基于传统六角图原理，结合信号处理、计算机与通信技术，实现数据采集、处理、分析及结果输出的全流程自动化。其核心逻辑为：通过高精度传感器采集三相电

压、高压侧与低压侧三相电流信号，经滤波、放大、模数转换等处理后，由中央处理器计算电压电流有效值、相位角、功率因数等参数，依据变压器接线组别生成标准向量图，将实测向量图与标准图比对，智能判断接线状态，最终通过可视化界面展示结果并生成报告。

1.2 关键支撑技术

电力系统理论为自动化检测提供基础支撑，需基于电力系统稳态分析、暂态分析原理，适配不同类型变压器接线组别与运行工况，确保检测结果贴合实际运行需求。信号处理技术是核心环节，通过共模滤波、差分放大、程控增益放大等模块，抑制电磁干扰，提升微弱信号采集精度，为后续分析提供可靠数据[2]。计算机技术与通信技术实现自动化控制与数据交互，嵌入式处理器承担数据计算与逻辑判断任务，以太网、RS232等通信接口支持数据上传与远程监控，实现检测数据的数字化管理。

2 智能六角图检测校验装置设计

2.1 硬件系统设计

1.整体结构设计。装置由面板组件、机箱组件、箱内电气组件及附件构成，采用PP材质防水防潮手提式机箱，外尺寸42 cm × 36 cm × 20 cm，内尺寸38.5 cm × 29 cm × 19 cm，兼顾便携性与防护性能，适配变电站复杂环境。面板集成交流输入插座、32 A漏保断路器、三相电压输出端子、高压/低压侧CT电流输入航空插头、RJ45端口、USB端口、接地端子、充电口、电源开关及工控触摸一体机，满足现场接线、操作与数据传输需求。箱内电气组件包括主控电路板、12 V 300 Wh锂电池、工控一体机电源适配器、网络交换机及连接导线等，主控电路板为核心部件。附件含6只0.1级钳形电流表、电压输出线、短路试验线、电源线、接地线等。整机功耗≤25 W，核心板功耗≤3 W，锂电池连续工作时间≥10 h，满足无外接电源现场作业需求。

2.核心电路设计。主控电路板集成信号采集、处理、控制、通信及电源管理等功能模块，涵盖高精度电压/电流采样互感器、共模滤波、信号隔离、差分放大、可编程增益放大、模数转换、高精度电压基准源、数据存储、电池管理及通信模块等。共模滤波电路抑制现场电磁干扰；采样保护、差分及程控增益电路实现微弱信号放大与保护；充电及保护电路采用BQ24650芯片，集成防反接、过充、过压、欠压保护；DC/DC模块将锂电池电压转换为5 V、3.3 V供电；通信电路支持RJ45以太网与RS232串口。中央处理器采用GD32F303RX单片机，承担数据计算与系统控制，保障装置的实时性与稳定性。

2.2 软件系统设计

1.硬件配置与界面设计。上位机采用7英寸（1英寸=2.54 cm）工控触摸一体机（1024 × 600），搭载J1900处理器、8 G内存、128 G电子硬盘，配备RS232、RJ45及Wi-Fi接口，满足数据存储与多方式通信需求。软件系统分为测量分析、参数配置与数据管理三大界面，实现全流程可视化操作。测量分析界面实时显示六角图、三相电压电流有效值、各相相位、相序、CT变比分析及接线判断结果；参数配置界面支持主变容量、CT变比、联结组别等参数设置；测试报告生成界面自动汇总结果并支持导出打印，解决传统报告制作烦琐问题。

2.软件流程与算法设计[3]。软件流程遵循“系统初始化—数据采集—数据处理—分析判断—结果输出”逻辑。启动后依次完成I/O口、定时器、UART、RAM、SPI、以太网、电能计量芯片、看门狗、ADC等初始化，并读取各档位修正值。检测中通过看门狗喂狗保障稳定运行，实时采集电压电流信号，计算有效值、有功/无功功率、功率因数及相位角，自动完成档位切换与频率测量。

核心算法基于向量分析原理，根据实测数据绘制六角图，并与对应变压器接线组别的标准向量图比对，智能判断CT变比、接线相位及相序的正确性，生成检测结论。同时，软件支持电池状态采集与通信交互，可实时上传分析结果至后台系统，实现检测数据远程追溯与管理。

3 自动化检测技术实践验证

3.1 试验场景与方案

为验证六角图自动化检测技术的可行性与优越性，选取某220 kV变电站新投运的主变压器作为试验对象，采用智能检测校验装置与传统人工检测方法进行对比试验。试验内容包括CT绕组极性判断、二次接线正确性校验、变比参数验证及相位关系分析，分别记录两种方法的检测时间、误差率、结论一致性及报告生成情况，评估自动化技术的应用效果。

试验前通过参数配置界面输入主变容量376.6 MVA、高压侧CT变比2000、低压侧CT变比5000、高压侧额定电压525 kV、低压侧额定电压159.8 kV、变压器联结组别Y-Y/12等参数，连接高压侧与低压侧CT电流输入航空插头、三相电压输出端子，完成接线与设备初始化。试验过程中，装置自动采集三相电压、高低压侧电流信号，绘制六角图并输出检测结论，同步记录相关数据。

3.2 试验结果与对比分析

试验结果显示，智能检测校验装置成功完成所有检测项

目，六角图绘制清晰准确，CT变比、接线相位、相序判断结果与标准值一致，无误判情况。与传统人工检测方法相比，自动化检测在效率、精度、标准化程度等方面均表现更优，具体对比情况如表1所示。

表1 实验结果对比

检测指标	传统人工检测方法	自动化检测技术	提升效果
单次检测耗时	约90 min	约15 min	效率提升83.3%
相位测量误差	±0.5°～±1.0°	±0.1°以内	误差降低80%以上
结论误判率	约5%～8%（受经验影响）	0%（与标准值完全一致）	彻底消除经验性误判
报告生成时间	约30 min（手动绘制整理）	自动生成，耗时≤1 min	报告效率提升96.7%
数据追溯性	纸质记录，易丢失，追溯困难	数字化存储，支持远程追溯	实现全生命周期数据管理

由表1可知，自动化检测技术大幅缩短了检测周期与报告生成时间，显著提升了测量精度，彻底摆脱了对人工经验的依赖，消除了主观误判风险，同时实现了检测数据的数字化存储与追溯，符合智能电网运维的标准化、信息化需求。现场试验中，装置表现出良好的环境适应性，在电磁干扰、温度波动等复杂工况下仍能稳定运行，采样精度与判断准确性不受影响，满足变电站现场检测的实际需求[4]。

4 技术创新点与应用效益

4.1 核心创新点

该六角图自动化检测技术在现有技术基础上实现三大创新：一是全流程自动化，通过软硬件协同设计，实现从数据采集、向量计算、六角图绘制到结果判断、报告生成的全流程自动化，无须人工干预，彻底解决传统方法效率低下的问题；二是适应性强，支持不同容量、不同接线组别变压器的检测需求，可灵活配置CT变比、额定电压等参数，兼容高压侧与低压侧多场景检测，通用性强；三是智能判断与可视化，采用高精度采样与先进算法，实现接线状态的智能判断与异常报警，搭配触摸显示界面与数字化报告，直观呈现检测结果，便于现场人员操作与数据管理。此外，装置集成电池管理系统与多重保护功能，具备防水防潮、防电磁干扰、过充过压保护等特性，便携性强，可适配变电站户外、室内等多种作业场景，弥补了现有检测产品在工况适配性与可靠性方面的不足。

4.2 应用效益分析

1.直接效益。在效率提升方面，自动化检测将单次检测总耗时从120 min（含报告生成）缩短至16 min以内，大幅降低了工作人员的劳动强度，减少了设备停机检测时间，提高了变电站运维效率。在成本控制方面，通过减少对高技能专业人员的依赖，降低了人力成本；同时，准确的检测结果避免了因接线错误导致的设备故障与返工成本，间接减少了经济损失。在精度保障方面，±0.1°的测量误差精度确保了继电保护装置的可靠投运，降低了因检测误差引发的电网安全风险。

2.间接效益。该技术的推广应用有助于提高电力系统的稳定性与安全性，及时发现并纠正CT接线、极性等问题，避免因差动保护误动或拒动导致的变压器故障、电网停电等事故，保障电力供应的连续性。同时，数字化检测数据与报告为智能电网的大数据分析、状态检修提供了可靠支撑，推动电力系统运维向智能化、精细化转型。此外，技术的创新与应用促进了电力检测领域的技术升级，为同类检测设备的研发提供了参考，具有显著的行业示范意义[5]。

5 结束语

本文研究的电力系统六角图自动化检测技术，通过软硬件协同设计研发智能检测校验装置，有效解决了传统检测效率低、误差大、依赖人工经验、报告生成烦琐等痛点。该技术基于向量分析原理，融合高精度信号处理、嵌入式控制与可视化软件，实现检测全流程自动化、判断智能化、管理数字化。经现场验证，装置在精度、效率、适应性与可靠性方面表现优异，具有显著技术先进性与工程应用价值。

该技术可应用于主变压器负荷试验、电能计量装置校验、继电保护检测等领域。未来可进一步优化算法，提升复杂工况适配能力；融入物联网技术，实现多装置组网与远程监控；结合人工智能算法，实现深度数据分析与故障预警，为电力系统智能运维提供更全面支撑。随着智能电网建设推进，该技术将在电力系统运维中发挥更重要作用，推动电网检测向标准化、智能化、高效化发展。

参考文献

[1]李一雯,董意,张晓,等.一键式变压器六角图实时测试工具的设计与应用研究[J].中国设备工程,2024(17):93-95.

[2]宋金来.一种基于MATLAB的六角图辅助分析工具[J].中国新技术新产品,2015(21):5-6.

[3]胡勇.六角图试验的使用与说明[J].机电信息,2011(21):213-214.

[4]姚小龙,史俊,陈仕骄,等.变压器实时监测与智能故障诊断系统的设计方案研究[J].电力设备管理,2020(10):184-186.

[5]安伟,姜银浩,韩玉梅,等.中、小型变压器高压引线六角形冷压焊改进[J].变压器,2021,58(5):54-57.

（本文编辑 杜宇琪）