电气调试过程中的常见问题及优化策略研究

王 珑 任伟平 段亚飞
河南平芝高压开关有限公司 河南 平顶山 467013

摘 要：电气系统调试是电力工程、工业机电工程竣工投运前的核心技术工序，是验证一次设备绝缘性能、二次保护测控逻辑、变频传动系统、工业通信总线协同性的关键技术手段。现代工业电气系统呈现高集成、智能化、变频化、总线化特征，传统经验式调试模式已无法适配高精度、高可靠性的系统运行要求。工程调试中，二次回路极性匹配偏差、变频系统共模干扰、继电保护定值匹配性不足、总线报文异常、接地系统暂态失效等技术性故障频发，区别于常规施工质量问题，具有隐蔽性、间歇性、工况依赖性强的特点。本文基于GB 50150-2016电气交接试验标准及电力系统继电保护整定技术规范，结合工业现场高压配电、变频传动、PLC总线控制的调试工程实践，从电气设备绝缘劣化机理、电磁干扰耦合机制、保护逻辑运算缺陷、动态负载适配偏差四个技术维度，深度剖析调试核心故障成因，针对性提出分级绝缘测试、抗干扰屏蔽标准化布设、动态定值整定、分步式联动调试等精细化技术优化策略。研究成果可有效解决智能化电气系统调试疑难故障，提升电气系统暂态稳定性与长期运行可靠性，为工业电气调试标准化、技术化作业提供实操依据。

关键词：电气调试；二次回路；电磁干扰；继电保护；变频系统；动态整定

引言:随着智能制造、智慧工厂及电力基建工程的升级迭代，电气控制系统由传统的继电器硬接线控制，全面升级为高压开关柜+智能保护装置+变频调速系统+工业以太网/485总线的集成化架构。系统设备的电气耦合性、信号关联性、动态响应性大幅提升，对调试工作的技术精度、流程规范性、参数匹配度提出严苛要求。

当前行业内普遍存在重施工、轻调试、重通电、轻校验的技术误区，多数调试工作仅完成设备启停、通电自检等基础作业，忽略绝缘分层测试、暂态工况校验、保护精度校核、总线报文分析等核心技术环节。常规施工瑕疵可通过外观检查整改，而技术性调试缺陷会导致系统暂态响应失效、谐波超标、保护拒动误动、信号采样畸变等深层问题，在空载调试阶段难以暴露，带载、冲击工况下集中爆发，极易引发设备击穿、系统越级跳闸、生产停机等安全事故。因此，摒弃经验化调试模式，从电气技术原理层面剖析故障机理，建立标准化、精细化、数据化的调试技术体系，是提升现代电气工程调试质量、保障系统稳定运行的核心关键[1]。

1 现代电气调试核心技术体系

现代智能化电气调试不再是简单的设备通电测试，而是涵盖静态电气性能校验、动态逻辑功能验证、电磁环境适配、负载工况匹配、系统联动容错的系统性技术工作，核心技术模块分为三类。一是一次设备静态性能调试，核心为绝缘特性、接地特性、电气参数测试，包含高低压电缆、变压器、电机绕组的绝缘电阻、吸收比、极化指数检测，重点考核设备介质耐电强度与防潮性能，是杜绝设备击穿、漏电故障的基础。二是二次保护与控制调试，核心为CT/PT采样精度校验、保护定值核算录入、传动试验、回路极性校核，直接决定电力系统故障切除的准确性与快速性，是电气系统的安全防护核心。三是智能化系统动态调试，包含变频器参数自学习、PID动态适配、工业总线通信报文校验、模拟量信号抗干扰调试，适配现代电气系统动态负载、复杂电磁环境的运行特性。整套调试体系具备静态校验保基础、动态调试保运行、联动试验保协同的技术逻辑，任一环节技术参数不达标，都会形成系统性运行隐患。

2 电气调试高频技术性故障及机理分析

2.1 绝缘系统非线性劣化故障

绝缘性能不达标是高压电气设备调试的核心隐性故障，区别于常规的外皮破损问题，工程中高发绝缘受潮、介质老化、沿面放电三类技术性缺陷。高压电缆、电机绕组在敷设、安装过程中，密闭设备腔体易进入水汽，低温环境下形成凝露，导致设备吸收比、极化指数不达标。常规兆欧表仅测试瞬时绝缘电阻，无法识别隐性受潮问题，设备空载调试正常，带高压工况后介质损耗角增大，出现局部放电，长期运行会引发绝缘击穿。同时，电缆桥架锐角磨损、穿墙处挤压变形，会造成电缆绝缘层微观破损，形成非线性绝缘缺陷，电压波动时破损位置发生电晕放电，导致绝缘电阻间歇性跳变，故障排查难度极大[2]。

2.2 二次回路采样与逻辑技术性缺陷

二次回路是继电保护、测控装置的信号核心，调试故障多源于技术参数匹配错误而非接线失误。CT极性反接、PT相序错乱是典型技术性问题，会导致装置采集的电流、电压相位偏移180°，功率因数、有功功率计算失真，引发差动保护误动作、计量数据偏差。同时，二次回路负载阻抗不匹配问题高发，保护装置、测控终端的输入阻抗与二次线缆阻抗不匹配，会造成信号衰减、采样精度偏移，轻载工况无异常，短路故障时采样数据滞后，造成保护拒动。此外，部分工程二次回路未做回路耐压试验，控制线间、线地间绝缘不足，带电运行后出现回路串电、信号干扰，导致继电器误励磁、联锁逻辑错乱。

2.3 变频系统电磁耦合干扰故障

变频调速系统是现代电气调试的重难点，其IGBT高频斩波工作模式会产生大量共模电压、高频谐波、传导干扰，是系统信号异常的核心诱因。变频器输出的高频脉冲电压会在电机电缆、设备外壳产生耦合电容电流，若接地系统暂态响应不足，会导致电机轴承产生轴电压、轴电流，造成电机异响、温升超标。同时，动力电缆与模拟量信号电缆平行敷设时，高频电磁辐射会引发差分信号畸变，出现PLC模拟量数据漂移、跳变。常规调试仅排查接线与参数，忽略dv/dt浪涌抑制、共模干扰屏蔽、谐波滤波技术校验，导致设备长期处于电磁超标环境运行，模块烧毁、通信中断故障频发[3]。

2.4 工业总线通信技术性故障

工业485总线、Profinet以太网通信故障，核心并非线路断开，而是时序参数、报文协议、站点地址匹配技术缺陷。调试中常出现总线丢包、设备离线、数据同步滞后等问题，主要成因：总线终端电阻未规范配置，导致信号反射、波形畸变；波特率、校验位、停止位参数不统一，造成报文解析失败；多站点总线系统存在地址冲突、设备轮询时序错乱，轻载工况通信正常，多设备同时启停时总线拥堵，数据传输中断，引发系统联动失效。

2.5 继电保护动态定值适配缺陷

保护故障分为硬件故障与参数适配故障，工程中90%的保护误动、拒动源于静态定值与动态工况不匹配。多数项目直接套用标准定值模板，未结合现场变压器容量、电缆阻抗、系统短路电流进行精准核算。固定定值无法适配电机启动冲击、负载突变等暂态工况，电机星三角启动、变频软启动过程中，冲击电流大于保护定值引发误跳闸；而系统轻微短路、接地故障时，定值阈值过高，保护无法及时动作，导致故障扩大。同时，保护装置版本固件不兼容、差动保护平衡系数未校准，也是高端智能保护装置调试的典型技术难题。

2.6 接地系统暂态失效技术问题

传统调试仅测试稳态接地电阻，忽略暂态接地性能校验。普通接地电阻达标，但接地扁钢搭接面氧化、接地线径不足、单点接地失效，会导致高频干扰、雷击浪涌、系统短路时，暂态电流无法快速泄放，设备外壳产生过电压，烧毁弱电模块、干扰信号系统，是智能化设备隐性故障的核心诱因。

3 高精度电气调试技术

优化策略针对上述技术性故障，基于电气原理与工程规范，从静态校验、动态调试、抗干扰设计、参数整定、系统管控五个维度，提出专业化、可落地的技术优化方案。

3.1 分层分级绝缘精细化测试技术

摒弃单一绝缘电阻测试方法，建立静态电阻+吸收比+极化指数+介质损耗四维测试体系。对于10kV及以上高压设备、大型电机，禁止仅用普通摇表测试，必须采用高压绝缘测试仪，测试设备15s、60s、600s绝缘电阻，计算吸收比、极化指数，严格执行极化指数≥1.5的行业标准，彻底排查设备隐性受潮、绝缘老化问题。针对电缆绝缘微观破损问题，采用分段测试法，将长距离电缆分段隔离测试，精准定位绝缘缺陷点位。设备安装后、通电前开展24小时除湿静置处理，潮湿环境加装热风干燥设备，杜绝凝露导致的绝缘劣化问题，从源头规避高压击穿故障[4]。

3.2 二次回路标准化校核与阻抗匹配技术

建立二次回路“先耐压、后接线、再传动”的标准化调试流程。二次控制线敷设完成后，先进行1000V回路耐压试验，排查线间、线地绝缘缺陷；全员落实CT/PT极性、相序专项校核，采用相位表精准校验采样相位，杜绝功率计算偏差。针对二次阻抗不匹配问题，根据保护装置输入参数，匹配二次线缆线径，超长距离二次回路增设信号中继模块，消除信号衰减。所有二次系统必须完成无一次高压模拟传动试验，逐点校验联锁、保护、告警逻辑，确保硬接线逻辑、软件程序、设计图纸三者完全一致。

3.3 变频系统谐波抑制与抗干扰技术

针对变频系统高频干扰问题，采用硬件滤波+工艺优化的双重技术方案。变频器输出侧配套安装dv/dt滤波器、共模电抗器，抑制高频浪涌电压与轴电流；严格规范强弱电布线工艺，动力电缆与信号电缆垂直交叉敷设，平行间距大于30cm，屏蔽电缆严格执行单端接地标

准，杜绝环流干扰。优化变频器调试参数，根据电机铭牌参数完成高精度自学习，精准匹配电机定子电阻、转子电阻、漏感参数；合理优化加减速时间，规避负载突变引发的电流冲击，开启变频器谐波抑制功能，降低系统THD谐波畸变率，保障变频系统动态运行稳定性。

3.4 工业总线通信精准化调试技术

建立总线系统参数标准化调试体系，统一全网设备波特率、校验位、通信协议，杜绝参数不兼容问题。总线两端规范加装终端匹配电阻，消除信号反射畸变；逐设备核对站点地址、设备ID，建立总线设备地址台账，杜绝地址冲突。调试阶段新增满负载总线压力测试，模拟多设备同步启停、信号高频传输工况，检测总线丢包率、延时参数，针对总线拥堵问题优化轮询时序，升级设备固件版本，彻底解决动态工况下的通信失效故障。

3.5 继电保护动态定值精准整定技术

摒弃模板化定值套用模式，实行现场工况定制化定值核算。根据系统短路容量、设备额定参数、线缆阻抗，精准计算过流、过载、差动、接地保护定值，区分静态运行、电机启动、负载冲击等不同工况，设置阶梯式保护阈值。完成定值录入后实行双人复核制度，通过继电保护测试仪模拟单相接地、三相短路、过载冲击等各类故障，校验保护动作时间、跳闸精度、告警信号、远传数据的准确性，确保保护装置不误动、不拒动。针对差动保护系统，精准校准平衡系数，消除设备参数偏差带来的保护误差。

3.6 暂态接地系统优化调试工艺

优化接地调试标准，在稳态接地电阻测试达标基础上，新增暂态接地性能校验。严格把控接地扁钢焊接质量，去除搭接面氧化层，采用双面满焊工艺，确保接地体导通性能稳定；智能化弱电系统、变频设备单独设置专用接地干线，与强电接地网分离敷设，避免暂态电流串扰。确保高频干扰、短路故障时，暂态电流可快速泄放，全面提升系统抗干扰、抗过压能力。

4 工程技术应用实例

某110kV GIS变电站设备调试项目，系统包含GIS组合电器、断路器、隔离开关、二次测控及通信控制系统。调试过程出现三类技术难题：GIS设备局部发热异常、二次测控信号间歇性跳变、保护装置出现误告警。经排查，故障原因为设备接触装配不到位、二次线缆屏蔽接地不规范、互感器采样相位偏差，保护定值与现场工况不匹配。通过检修设备连接部位、整改二次布线接地、校核互感器极性、优化保护定值，调试后设备运行稳定，完成72小时满负荷试运行，验证优化方案具备良好实用性。

结束语

现代智能化电气调试的核心痛点，已从传统的施工接线问题，转变为电气参数匹配、电磁兼容、动态工况适配、系统协同逻辑等技术性问题。绝缘非线性劣化、变频高频干扰、总线报文异常、保护定值适配偏差、暂态接地失效等隐蔽性技术故障，是影响电气系统稳定运行的核心因素。本文从电气专业技术原理出发，深度剖析各类故障的内在机理，摒弃传统经验式整改方法，建立了涵盖静态性能校验、动态参数整定、电磁干扰抑制、总线系统优化、保护精准配置的全流程精细化调试技术体系。通过标准化、数据化、专业化的调试工艺，可从源头解决智能化电气系统的疑难调试故障，大幅提升电气系统的暂态稳定性、抗干扰能力与长期运行可靠性，可为各类工业、电力电气工程的高精度调试作业提供专业技术参考。

参考文献

[1] GB 50150-2016,电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].北京:中国计划出版社,2016.

[2] 张健.工业电气变频系统电磁干扰机理及调试优化技术[J].电工技术,2025(20):89-91.

[3] 陈峰.电力二次回路保护调试故障机理与精准整定策略[J].电力设备管理,2025(08):156-158.

[4] 刘博文.智能化电气系统总线通信调试关键技术研究[J].工程技术研究,2025(12):98-100.