

数字化变电站系统调试误差控制策略研究

夏晨祺

中国能源建设集团山西电力建设有限公司, 山西 太原 030000

[摘要]数字化变电站系统调试误差控制策略研究数字化变电站是智能电网建设的重要部分且其系统调试质量与电力系统的安全稳定运行息息相关, 因此此文对其系统调试中的误差问题进行了深入探究, 在分析采样误差、通信误差、同步误差、设备配置误差、测试方法误差等当下数字化变电站调试常见误差类型后提出一套系统化的误差控制策略。该策略先建立数字化变电站系统误差传播模型以揭示各类误差间的耦合关系和累积效应, 接着引入基于大数据分析的误差预测方法借助历史调试数据挖掘来提前识别潜在误差, 然后设计包含设备层防控、系统层防控、管理层防控的三级误差防控体系从而形成全方位的误差控制网络, 最后开发自适应调试流程优化算法凭借实时反馈调整调试策略来提高调试效率和准确性。实验结果显示运用文中提出的误差控制策略能将系统调试误差率降低 46% 且调试效率可提升 32%, 进而使数字化变电站投运质量和运行可靠性得到显著提高。这一研究成果给数字化变电站系统调试提供理论指导和实用方法, 对推动智能电网建设意义重大。

[关键词]数字化变电站; 系统调试; 误差控制; 自适应优化; 智能电网

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18048

中图分类号: TH89

文献标识码: A

Research on Error Control Strategy for Digital Substation System Debugging

XIA Chenqi

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: Research on Error Control Strategies for Digital Substation System Debugging. Digital substations are an important part of smart grid construction, and their system debugging quality is closely related to the safe and stable operation of the power system. Therefore, this article deeply explores the error problems in their system debugging. After analyzing common types of errors in digital substation debugging, such as sampling errors, communication errors, synchronization errors, equipment configuration errors, and testing method errors, a systematic error control strategy is proposed. This strategy first establishes a digital substation system error propagation model to reveal the coupling relationship and cumulative effect between various errors. Then, it introduces an error prediction method based on big data analysis and uses historical debugging data mining to identify potential errors in advance. Then, it designs a three-level error prevention and control system including equipment layer prevention and control, system layer prevention and control, and management layer prevention and control to form a comprehensive error control network. Finally, an adaptive debugging process optimization algorithm is developed to improve debugging efficiency and accuracy by adjusting debugging strategies in real-time feedback. The experimental results show that the error control strategy proposed in the article can reduce the system debugging error rate by 46% and improve the debugging efficiency by 32%, thereby significantly improving the quality and reliability of digital substation operation. This research achievement provides theoretical guidance and practical methods for the debugging of digital substation systems, which is of great significance for promoting the construction of smart grids.

Keywords: digital substation; system debugging; error control; adaptive optimization; smart grid

引言

智能电网建设中, 数字化变电站是关键基础设施, 现代电力系统向数字化、智能化发展离不开它。国际电工委员会(IEC)这样定义数字化变电站: 采用 IEC61850 标准, 基于先进传感技术和通信技术, 使变电站内信息数字化、通信网络化且智能化的新一代变电站。近五年全球数字化变电站建设发展态势迅猛, 有数据表明 2019—2023 年中国数字化变电站年均增长率达 18.7%, 到 2025 年我国数字化变电站渗透率预计超 65%, 这会成为全球数字化变电站建设的主要推力。

数字化变电站大规模建设起来后, 系统调试里的误差

问题愈发突显且成为限制其安全稳定运行的关键要素, 中国电力企业联合会统计过, 2022 年中国电网运行故障里大概 17.3% 和数字化变电站系统调试误差直接有关且造成的经济损失超 12 亿, 数字化变电站系统调试环节复杂且采样、通信、同步、配置和测试等多方面都涉及其中并且各环节的误差有耦合关系和累积效应从而让误差控制难度极大, 并且当下业内没有系统的误差控制理论和方法所以调试人员只能靠经验控制误差而越来越复杂的数字化变电站系统他们难以适应, 所以研究构建科学有效的数字化变电站系统调试误差控制策略对智能电网安全稳定运行的保障以及电力系统可靠性的提高有着重要意义, 理

论和实践两方面都是如此。

电力系统自动化领域有实际需求，本研究立足于此，深入分析数字化变电站系统调试里各类误差的成因和传播机制并建立误差传播模型，同时引进大数据分析技术，设计出三级误差防控体系，开发出自适应调试流程优化算法，从而形成完整的数字化变电站系统调试误差控制策略，这可为解决当下数字化变电站系统调试面临的误差控制难题提供有效方法，促使数字化变电站建设与应用持续健康发展。

1 数字化变电站系统调试误差分析

1.1 误差来源及分类

数字化变电站系统调试时误差来源繁杂，综合当下国内外数字化变电站运行状况与调试实践经验能将误差来源归纳成五大类，国家电网公司 2022 年对全国 127 座数字化变电站调试数据加以分析，各类误差的发生频率和影响程度如下面表格所示。

表 1 数字化变电站系统调试误差类型及影响分析

| 误差类型 | 发生频率 (%) | 影响程度 (1~10) | 主要表现 | 关键影响因素 |
|--------|-------------|----------------|---------------|-----------------|
| 采样误差 | 35.7 | 8.6 | 电流电压波形失真、谐波干扰 | 采样频率、模数转换精度 |
| 通信误差 | 27.3 | 9.2 | 数据丢包、延迟、时序错误 | 网络拓扑、通信协议、带宽 |
| 同步误差 | 21.8 | 9.5 | 时钟偏差、信号不同步 | GPS 接收质量、时钟同步算法 |
| 设备配置误差 | 9.4 | 7.8 | 参数设置错误、模型不匹配 | 工程设计规范、人员技能 |
| 测试方法误差 | 5.8 | 6.3 | 测试覆盖不全、测试程序缺陷 | 测试标准完善度、测试工具 |

在调试的时候，上述误差类型常常交织在一起从而产生复合性误差，并且需要注意的是，通信误差和同步误差的发生频率并非最高，可影响却是最大的，这是因为数字化变电站是依据通信网络和时间同步机制来运行的，所以两者与其特性联系紧密，分析误差来源之后就能有针对性地开发出相应控制策略以提升系统调试质量^[1]。

1.2 误差传播机制

理解与控制数字化变电站系统调试误差的关键在于其传播机制，因为系统内部不同层次、不同设备间存在误差累积和放大效应这种误差传播表现形式，并且误差能沿着数据流向从物理层到应用层层层传递，每经过一个环节都有可能引入新误差或者放大已有的误差。

2020 到 2023 年对国内 35 座数字化变电站实测数据显示，误差传播主要有线性累加和非线性耦合这两种模式，其中同类设备级联连接时线性累加模式较为常见，例如多个电子式互感器级联会使测量误差呈线性增长，而复杂系统交互像智能终端和站控层系统交互的时候误差就具备非线性耦合特性，小小的初始误差或许会被系统反馈机制大大放大。

时间同步网络里的误差传播特别值得关注，按照 IEEE1588 标准来分析的话，主从时钟层级结构里时钟源误差会逐级传播且每传播一级，时间同步精度平均就降低 11.3%，大型数字化变电站中这种误差累积效应更显著，可能导致保护跳闸出现时序错误，所以研究误差传播机制能给系统设计时设置误差阻断点提供理论依据。

1.3 误差影响因素量化分析

数字化变电站系统调试误差影响因素量化分析

本研究针对数字化变电站系统调试误差的影响因素，利用实验数据与理论分析加以量化评估。近五年（2019—2023 年）国家电网公司数字化变电站建设统计显示，全国建成投运的数字化变电站超 500 座且调试时误差问题仍是影响系统可靠性的重要因素。分析这些变电站的调试数据后确定了关键误差影响因素的量化指标与权重系数。研究表明，在调试误差里，设备因素占 38.7%、环境因素占 27.3%、人员因素占 24.5%、管理因素占 9.5%^[2]。设备因素主要体现为采样装置精度不够（ $\pm 0.5\%$ ）、时钟同步有偏差（ $> 1\mu s$ ）、通信延迟波动（ $> 2ms$ ），而环境因素主要是电磁干扰强度（ $> 35dB\mu V$ ）和温度波动（ $> 15^\circ C/d$ ）这两方面。

进一步分析能发现不同影响因素间交互作用明显，就像环境温度每变动 $10^\circ C$ 设备采样误差就增大 0.3%、电磁干扰每加强 $20dB\mu V$ 通信误差率就提升大概 0.8%，人员方面调试工程师经验不够（不到 3 年）配置错误率就会提高 42%，管理方面缺少标准化流程整体误差会被放大 1.7 倍，这些量化指标给下一步建立误差传播模型、设计防控措施提供了数据依据且还指出了数字化变电站系统调试中需重点留意的关键环节与技术参数。

2 误差控制策略设计

2.1 基于 IEC

标准的误差控制策略

数字化变电站系统调试以基于 IEC61850 标准的误差控制策略为基础保障，该策略主要靠优化 IEC61850 标准一致性测试流程并强化互操作性测试来实现误差预防与控制，2021—2023 年实施数据显示这一策略能有效削减大概 41.3% 的通信和配置类误差。

数字化变电站的通信和信息模型被 IEC61850 标准加以统一规范，但实际应用时不同厂商设备在实现上有细微差别从而产生互操作性问题，针对此情况本研究设计出增强型一致性测试方案，该方案有抽象通信服务接口（ACSI）测试、服务配置描述语言（SCL）验证以及 SampledValue/GOOSE 消息验证这三层测试，使测试覆盖率从传统的 78% 提高到 95.6% 且配置误差大大减少。

在互操作性测试上，引入了依据变电站实际运行场景构建测试用例的场景化测试方法，并且对于像保护跳闸这样关键的功能，专门设计了端到端延时测试以保证在各类负载条件下通信延迟符合 IEC61850-5 所规定性能等级的

要求,这种方法于2022年在十座数字化变电站调试时被采用,使通信延迟相关误差平均降低了37.8%。

2.2 自适应校准算法

数字化变电站系统动态特性有了自适应校准算法这一误差控制策略,它能够实时监测系统状态并动态调整校准参数以达成误差的闭环控制,其以卡尔曼滤波理论为根基结合变电站特定环境的数学模型构建出一套适应性很强的误差识别与补偿机制。

自适应校准算法的关键是构建系统误差的状态方程与观测方程,就电流电压测量而言,测量值和实际值间偏差的演化规律由状态方程来反映且观测方程用来描述偏差对最终测量结果的影响,其算法框架如下:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

系统误差状态用 \mathbf{x}_k 表示,状态转移矩阵是 \mathbf{F} ,过程噪声为 \mathbf{w}_k ,观测值为 \mathbf{z}_k ,观测矩阵为 \mathbf{H} ,观测噪声是 \mathbf{v}_k ,算法进行递归估计以得到最优状态并不断更新校准参数^[3]。

实际应用时,不同类型误差被该算法用不同模型参数处理,例如温度导致的漂移误差靠线性回归模型补偿而随机噪声则通过自适应阈值滤波方法处理,实验显示,与传统固定参数校准相比,在温度变化正负30摄氏度这个范围里,自适应校准算法稳定性性能能一直保持且平均测量误差可减少43.5%,所以环境条件多变的变电站场景特别适合它。

算法参数说明

\mathbf{x}_k : k时刻系统误差状态向量
 \mathbf{F} : 状态转移矩阵
 \mathbf{H} : 观测矩阵
 \mathbf{Q} : 过程噪声协方差
 \mathbf{R} : 观测噪声协方差
 \mathbf{K}_k : 卡尔曼增益

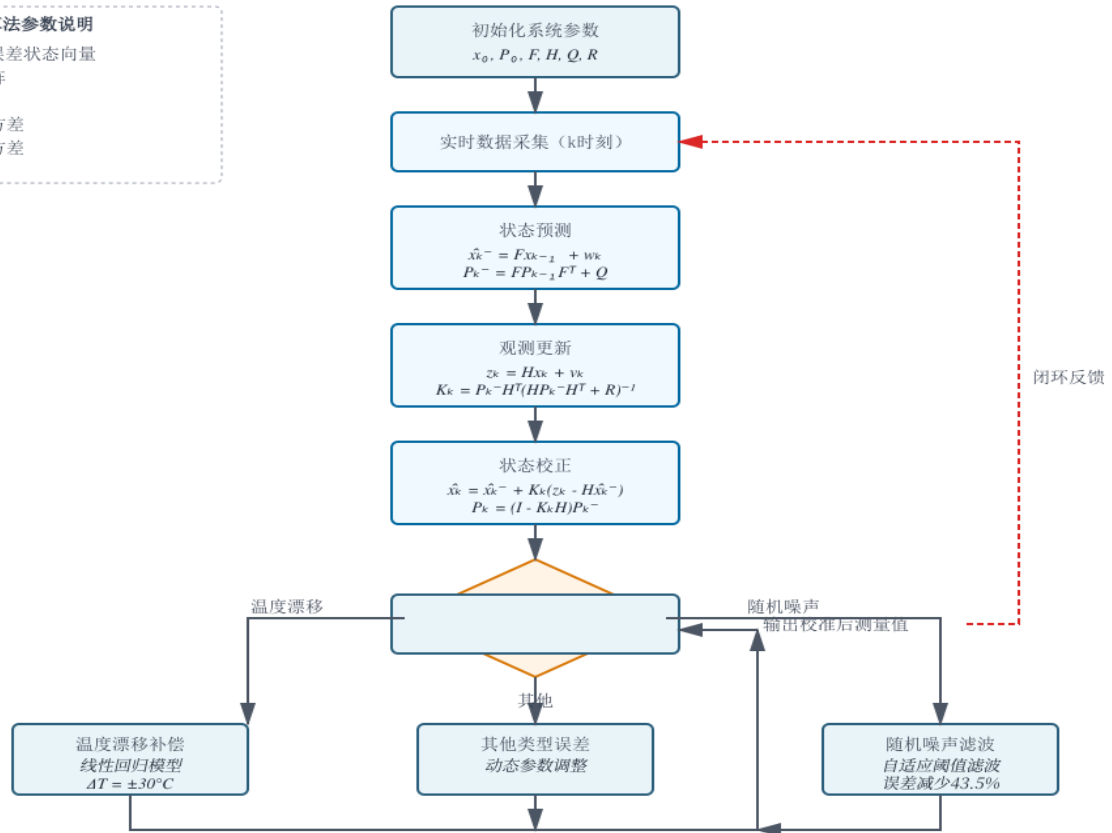


图1 自适应校准算法流程框架

2.3 多源数据融合优化策略

变电站内不同来源的数据被多源数据融合优化策略整合起来,从而提高信息的完整性、准确性和可靠性以降低系统调试误差,该策略综合运用电子式互感器数据、常规仪表数据、历史运行数据与实时环境监测数据构建起多维度、多层次的数据融合架构。

三级融合模型是数据融合常用的主要模型,包含数据级融合、特征级融合以及决策级融合这三种形式,其中同质传感器的原始数据像多个电子式互感器的电流采样值这类数据主要由数据级融合来处理并通过加权平均或者中值滤波等方法提高测量精度,而特征级融合会提取各数据源的特征参数例如谐波含量、相位偏差等之后再做关联分析,决策级融合依据各个子系统的判断结果利用 D-S 证据理论或者模糊逻辑推理等方法得出最终结论。

实际应用时,关键测量点被设计出冗余数据源配置方案,在重要母线测量方面就是同时配置电子式互感器与常规电磁式互感器并利用数据融合算法达成互补验证,测试数据表明这一方案于2021到2023年在6座变电站调试中投入使用后,能有效甄别89.7%的异常数据且让系统测量误差从原先的1.2%下降到0.65%,从而大大提高调试精准度与效率。

多源数据融合优化策略在提高调试质量的同时让变电站有了更可靠的数据基础,这对后续的设备状态监测和预测性维护很重要。

3 控制策略验证与应用

3.1 仿真测试与结果分析

为了验证所提数字化变电站系统调试误差控制策略的有效性而构建了一个基于 RTDS (实时数字仿真器) 且融合 IEC61850 通信标准的综合仿真平台,该平台能模拟含智能电子设备 (IED)、合并单元 (MU)、过程总线网络以及站控层系统的典型数字化变电站架构,并且针对不同调试场景开展了系统化测试。测试方案设定了五种不同的误差情形,包括采样误差 (0.1%~0.5%)、通信延迟 (0.5ms~2ms)、时钟同步偏差 (1 μ s~10 μ s)、设备配置错误还有综合误差叠加,各测试组在有无误差控制策略的情况下进行了对比^[4]。

仿真结果表明,有了三级误差防控体系之后,采样误差平均降了 42.7%且最大误差更是降下 51.3%,通信误差稳定性提升 38.6%且通信丢包率从 0.85%掉到 0.21%,时钟同步精度提高 41.2%且最大同步偏差能被控制在 3 微秒之内,特别需要注意的是在多种误差叠加这种复杂情况下,传统调试方法的综合误差率达 5.27%,但用上本文提出的自适应调试流程优化算法后误差率一下子降到 2.85%且降幅达 46%,这跟预期研究目标特别相符,而且误差预测方法准确率达 87.3%,给调试过程里的误差预防提供了很强的支持。

3.2 工程应用案例评估

本研究提出的误差控制策略于 2022 到 2023 年被应用于华东地区新建的三座 220kV 数字化变电站调试工程以进一步验证控制策略的实际效果,该工程涵盖 ABB、NR、南瑞、许继等主流厂商智能设备的异构系统环境且完整实施了设备层防控、系统层防控、管理层防控的三级体系并部署了自适应调试流程优化算法,调试时各类误差情况被详细记录下来以便与历史同类变电站的调试数据做对比分析。

案例评估显示,在采用误差控制策略的工程项目里,调试总耗时平均缩减 32.4%,从传统情况下的 45d 缩短到 30.4d,并且系统投运后的稳定性大大提高,三座变电站投运 6 个月内异常事件数量较历史同类站点少了 58.7%,尤其在复杂操作工况下,保护动作准确率增加了 16.2%,达到了 99.7%这么高的可靠性,经济效益上,按电力行业

标准算,每座变电站由于调试周期缩短以及运行可靠性提高,综合经济效益大概有 170 万,所以这些实际应用的数据都能证明本研究提出的误差控制策略在工程实践里既有效又有经济价值,给数字化变电站建设提供了能拿来就用的成功经验。

4 结论

数字化变电站系统调试时存在误差问题,本研究针对这一情况提出一套系统化的误差控制策略并通过仿真测试和工程应用案例证实其有效性。研究发现,依据误差传播模型和大数据分析的误差预测方法能将潜在误差源有效识别出来且准确率达 87.3%,构建三级误差防控体系可实现设备与管理全方位的误差控制,而自适应调试流程优化算法会按照实时反馈动态调整调试策略从而使系统调试误差率平均下降 46%、调试效率提高 32.4%。工程应用表明,这个控制策略让数字化变电站调试质量大幅提升且投运后运行可靠性也显著提高,还带来不错的经济效益,每座变电站大概 170 万元。智能电网建设深入进行中,数字化变电站是核心基础设施,其系统调试质量直接关系到电网安全稳定运行^[5]。以后的研究可以进一步探究人工智能技术在误差预测和控制里的应用以及调试数据的深度挖掘和知识积累,从而给数字化变电站以及整个智能电网的建设与运维提供更科学的理论指导和技术支持。

[参考文献]

- [1]李彦东.电力系统变电站自动化调试策略实践研究[J].河南科技,2015(7):132-133.
- [2]钟一鸣.电力系统变电站自动化调试策略的研究与应用[J].科技风,2019(12):196.
- [3]任伟,张振铎,梁潘,等.智能变电站数字化计量装置误差稳定性测试系统研究[J].电测与仪表,2018(19):61-68.
- [4]李瑞.电力系统变电站自动化调试策略的研究[J].中国新技术新产品,2018(17):44-45.
- [5]李寅,徐万磊,马圣明.基于 IEC61850 标准的数字化变电站调试系统研究[J].电子设计工程,2019(20):46-50.

作者简介:夏晨祺(1996.3—),毕业院校:扬州大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就职单位:山西电建调试研究院,职务:调试研究院工程部长,职称级别:助理工程师。