

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181620

基于大数据的继电保护智能运行管控体系探索

盛海华¹, 王德林², 马伟³, 罗少杰³, 吴靖³

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031;
3. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310009)

摘要: 为推进继电保护运维专业管控体系化和全过程各个环节管控智能化, 探索构建了基于大数据的智能运行管控体系。以继电保护数据中心为基础, 构建了现场运维全过程关键环节的四大场景应用, 包括现场可视化运维与防误预警、远程运维、工厂化检修、移动电子化作业。实现了继电保护运维专业技术管控的六大高级应用, 包括工况评估及趋势预测、电网故障辨识、动作行为智能诊断、准实时在线监视、SCD智能管控和整定计算。该体系有助于解决变电站运行、维护、检修各个环节和继电保护专业技术管理存在的系列问题, 提高了继电保护设备安全运行管控水平。

关键词: 大数据; 智能运行管控; 场景应用; 高级应用; 智能诊断

Exploration of intelligent operation management system of relay protection based on big data

SHENG Haihua¹, WANG Delin², MA Wei³, LUO Shaojie³, WU Jing³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power CO., LTD., Hangzhou 310000, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: In order to promote the systematization and the intelligent control of all key links in the whole process of professional of management and control of relay protection operation, an intelligent operation and control system based on large data is explored and constructed. On the basis of relay protection data center, four scenario applications of key links in the whole process of field operation and maintenance are constructed, including site visual operation and error prevention early warning, remote operation and maintenance, factory maintenance and mobile electronic operation. Six advanced applications for technical control of relay protection operation are realized, including working condition evaluation and trend prediction, grid fault analysis, intelligent diagnosis of action and behavior, near-real-time online monitoring, SCD intelligent control and setting calculation. The system is helpful for solving a series of problems in all key links in the operation, maintenance and overhaul of substation and problems in relay protection professional technical management, which improves the level of safety operation management and control of relay protection equipment.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 521104170012) and Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5211JX1400LB and No.5211WZ15013Q).

Key words: large data; intelligent operation management and control; scenario applications; advanced applications; intelligent diagnosis

0 引言

2015年, 国网公司印发了《信息通信新技术推

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(521104170012); 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(5211JX1400LB, 5211WZ15013Q);

动智能电网和“一强三优”现代公司创新发展行动计划》, 明确指出将大数据、云计算、物联网、移动互联等新技术作为电网和企业创新发展的技术手段^[1-2], 重点推进在输变电智能化、智能配用电、源网荷协调优化、智能调度控制、企业经营管理和信息通信支撑等六大领域^[3-4]的应用。

面对智能变电站大量投运、无人值守及远方操

作的推广应用, 以及设备规模增长与专业人员数量不匹配的新形势^[5-6], 借助“大云物移”信息技术, 如何改进继电保护的运行管理、技术管理模式, 推进工作标准化、流程化、规范化、智能化, 是继电保护专业面临的迫切问题^[7]。同时, 电网数据具有多源异构、高维先验的特点, 且蕴含大量因果关系, 如何从大数据中挖掘出不同应用场景的隐含关系^[8-10], 对继电保护专业管理具有重要意义。

依托国网信通新技术行动3年计划, 通过总结继电保护运行、检修、维护全过程各个关键环节存在的普遍问题, 以及运行管控、专业技术管理存在的系统性问题, 历经数年的探索与实践, 国网浙江省公司探索构建了基于大数据的继电保护智能运行管控体系, 实现了现场运维全过程关键环节的四大场景应用和继电保护运行专业技术管控的六大高级应用。

1 继电保护运行管控存在的问题

1) 运行、检修、维护各关键环节

(1) 改扩建、消缺反措调试问题

目前, 智能变电站改/扩建、设备反措/消缺更换硬件或软件时, 必须在现场完成配置文件更改、定值输入、功能调试、二次回路联调等一系列工作, 环节多、耗时长、效率低、风险高, 一次设备配合停电次数及时间明显增加^[11]。因此, 亟需开展工厂化调试支撑技术研究, 实现现场二次设备“即插即用”, 为不停电检修、不停电扩建提供有效技术支撑。

(2) 变电站现场运维问题

智能变电站二次回路“看不见、摸不着”, 常规变电站运维技术无法适用^[12-13]。由于缺乏对二次设备、SCD文件、软压板、虚回路等有效管控的技术手段, “误操作、误接线、误整定”屡有发生。同时, 存在保护设备及其回路发生缺陷时无法快速定位诊断等系列问题, 严重威胁电网安全运行。因此, 开展面向智能变电站二次设备的现场运维支撑技术研究具有重要意义。

(3) 变电站远程运维问题

变电站无人值守及远方操作后, 运行人员面临“距离远、手段少、监控难、响应慢”的问题, 检修人员为分析、定位、处理缺陷需要多次往返变电站现场^[14]。因此, 亟需开展远程运维技术研究, 加强继电保护远程全方位管控, 实现故障快速定位与隔离。

(4) 现场作业管控水平程度问题

继电保护现场检修作业过程中, 面临的问题:

(a) 自动化程度不高, 检修需要携带大量资料和作业指导书; (b) 针对每项具体工作均需人工编制作业方

案(安全措施、试验项目等), 严重依赖工作人员的技术水平和责任心, 存在作业内容不统一、不规范的情况^[15]; (c) 缺乏行之有效的技术管控手段, 可能存在安措实施顺序错乱^[16], 试验项目漏项等风险; (d) 保护设备管理主要依赖非自动化、非实时的系统来记录, 存在效率低下、账实不符等问题^[17]。因此, 迫切需要研究变电站现场作业支撑技术, 实现智能化、无纸化检修, 提高现场作业效率和管控水平。

2) 继电保护运行及管理应用

继电保护设备数量繁多、种类庞杂、逻辑严密、信息海量, 其技术和专业管理是一个复杂而庞大的系统工程。目前, 由于缺乏有效、规范的业务支撑平台来完成对继电保护业务、数据和应用的总体规划, 造成设备管理、运行维护、定值整定、动作分析、状态评价等应用相对独立, 数据维护工作量大。同时, 缺乏规范的继电保护专业应用数据模型, 各应用场景、数据管理模式、数据交互模式存在差异, 导致数据无法互联互通, 难以关联分析, 阻碍了高级应用功能的落地投运。

随着大数据技术的快速发展, 为继电保护专业数据的挖掘与应用提供了良好的技术手段与条件, 构建基于大数据的继电保护业务支撑平台成为必然趋势。

2 继电保护智能运行管控体系

为推进继电保护运维专业管控全方位体系化和全过程各个关键环节管控智能化, 建立了面向继电保护的数据中心, 通过唯一识别码^[18]和各大应用数据标准化模型实现多源数据共享及自动关联, 探索构建基于大数据的智能运行管控体系, 如图1所示。

该体系实现了工厂化检修、现场可视化运维与防误预警、远程运维、移动电子化作业的四大场景应用, 工况评估及趋势预测、电网故障研判、动作行为智能诊断、准实时在线监视、SCD智能管控和整定计算的六大高级应用。继电保护物理设备通过变电站在线监视装置、II区调度数据网、电子标签唯一识别码及无线4G电力专网广泛接入数据中心, 实现了设备运行状态全景可视感知。其中, 工厂化检修应用布置在变电检修部门; 现场可视化运维与防误预警应用布置在变电站现场; 远程运维应用布置在变电运维和变电检修部门; 移动电子化作业应用在移动终端实现, 由运维、检修、调控等专业人员随身携带; 数据中心和六大高级应用布置在调控中心。

数据中心既作为运维数据(在线/离线)的汇聚中心, 也为各大应用提供数据模型、SCD文件、整定

单、现场作业模板等，并将分析诊断结果、预警及辅助决策报告通过无线 4G 电力专网实时推送至移动终端。

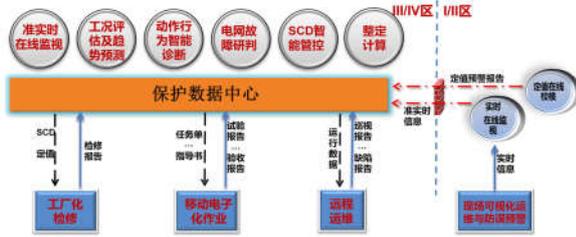


图 1 继电保护智能运行管控体系

Fig. 1 Intelligent operation management system of protection

3 面向继电保护的数据中心

结合电网的实际情况，构建面向继电保护的数据中心，如图 2 所示。系统架构由数据源层、数据采集层、数据存储层、数据服务层、业务应用层构成。其中，数据源层为历史、实时数据提供接口，数据采集层负责采集和加工，数据存储层负责存储优化，数据服务层提供分布式计算服务，业务应用层实现高级功能模块接入。数据中心按照多层、松耦合架构设计，各子系统采用集群方式部署，以满足电力大数据高可用、实时性要求。

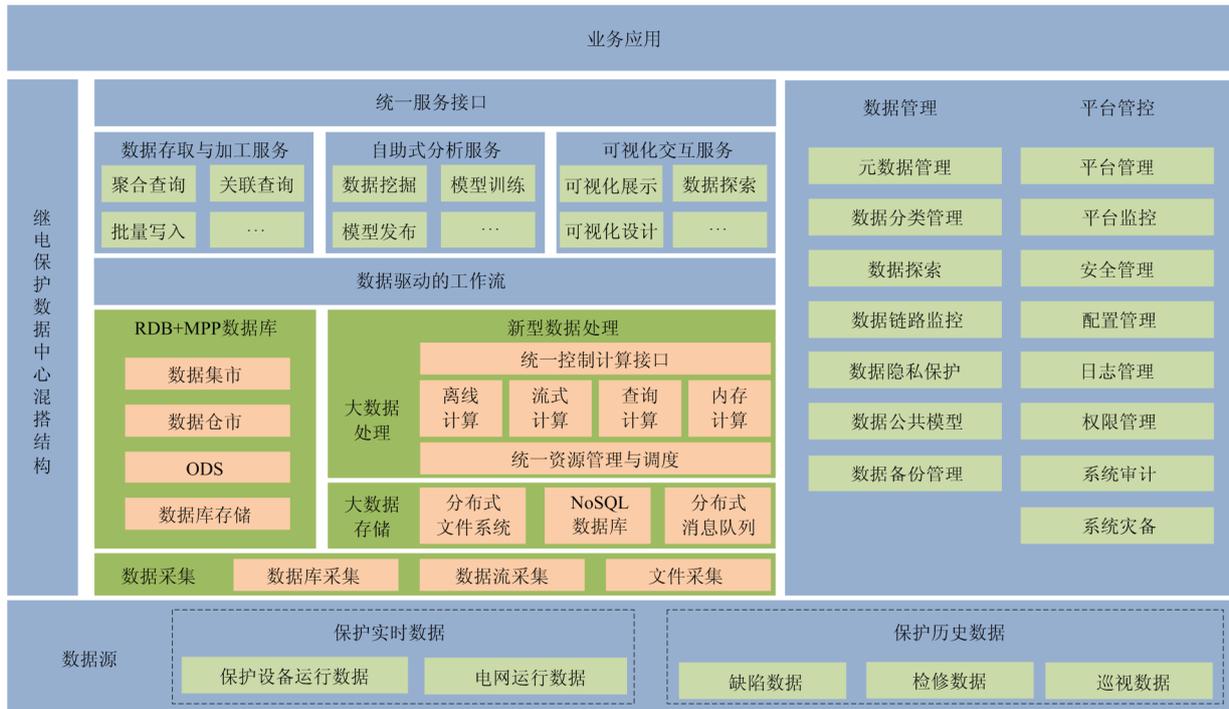


图 2 继电保护数据中心架构

Fig. 2 Architecture of relay protection data center

继电保护数据中心的的核心功能包括多源异构数据采集与存储、海量数据加工、数据分析挖掘、数据服务与可视化，实现了数据从采集入库到可视化展示的一体化。算法库主要包括系统算法和自定义算法，其中，系统算法提供单机版和分布式版，分别基于 R、Weka 和 Mahout、MLlib、TensorFlow 等进行封装实现。算法库包括统计分析、预处理、聚类分析、分类、回归、关联规则、时序模型、文本挖掘、深度学习、智能推荐等。

数据中心的建立，对开展继电保护大数据挖掘与分析、高级功能设计与开发、专业技术分析与决策奠定了数据基础。同时，有助于促进业务、数据

及应用的整合与规范，使专业人员能够以全景视角分析继电保护系统的整体运行情况，多角度多维度地分析设备运行工况、动作行为等。

4 四大场景应用

4.1 工厂化检修技术

智能变电站工厂化调试平台由保护定值“一键式”下装系统、保护功能测试系统、设备运行外回路测试系统、虚拟变电站后台监控系统四部分组成，如图 3 所示。其中，保护定值“一键式”下装系统从数据中心获取定值，完成定值下装。保护功能测试系统通过对功能软压板的有序投退，实现保护功

能校验, 并自动生成试验报告。基于虚拟机的保护设备仿真技术, 设备运行外回路测试系统完成待测设备与运行设备的二次回路联调试验。虚拟变电站

后台监控系统实现对设备的状态监视、读取遥信遥测量等。

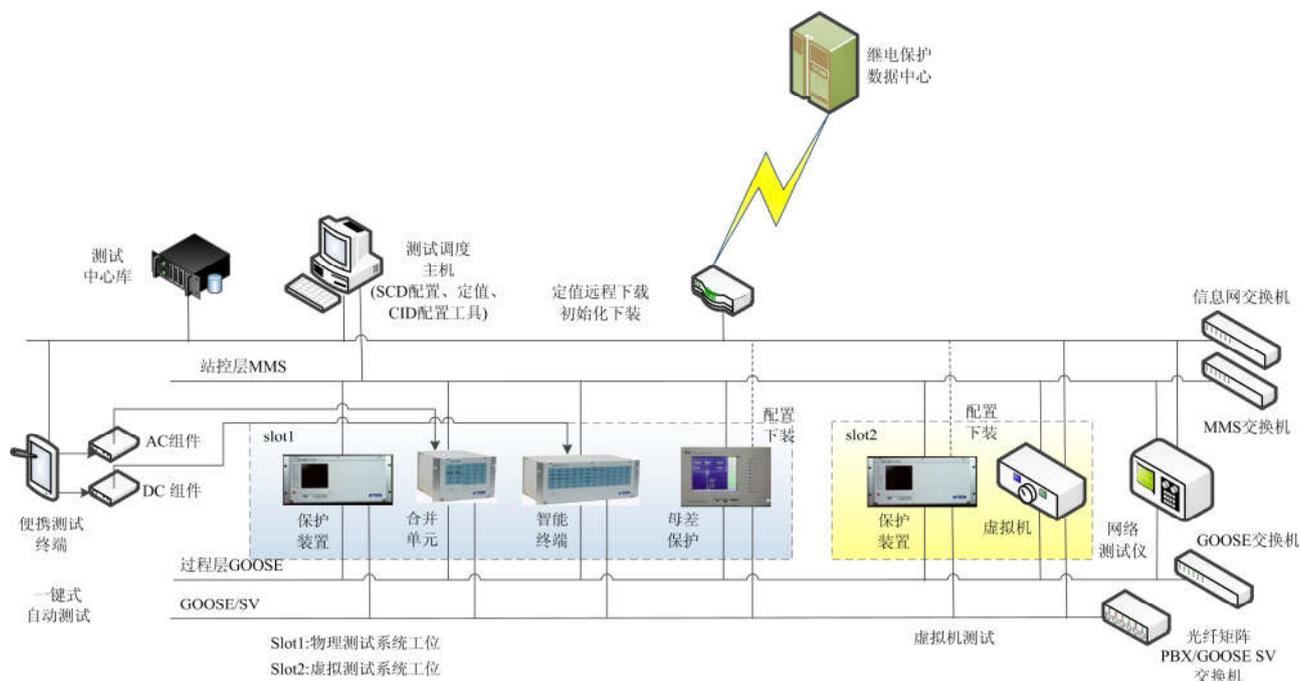


图 3 工厂化检修平台架构

Fig. 3 Technical architecture of factory maintenance

该平台通过模拟被测二次设备在变电站的真实运行环境, 重现其所关联的所有智能电子设备间回路、网络连接关系等外部特性, 在变电检修部门内完成定值下装、保护本体功能测试、二次虚回路测试工作。实现了现场检修向工厂化检修的无缝转化, 二次设备在现场“即插即用”, 故障消缺时间由原来的 1~2 天缩短至 2 h, 大幅提高现场检修效率, 极大地降低现场作业风险。同时, 在配置单套保护的智能变电站改/扩建工程中(如 220 kV 变电站中新扩 110 kV 间隔), 无需运行间隔轮停, 有效减少了电网停电时间。

4.2 现场可视化运维与防误预警技术

针对智能变电站二次回路虚拟化、运维检修安全措施复杂、运维难度大^[19]的问题, 研发集全站二次设备运行工况全景展示、二次回路可视化、设备运行工况远程监控、设备状态对应关系自动比对、运行操作防误预警等功能于一体的现场可视化运维与防误预警平台^[20]。其系统架构包括 4 层: 第一层为整站监视, 包含一次主接线图、二次设备物理连接、网络拓扑图、全站保护监测日志等功能; 第二层为间隔回路层, 包括间隔虚回路、虚端子图监视等功能; 第三层为保护设备可视化, 包括运行状态监视、

设备缺陷智能诊断、保护动作分析等; 第四层为检修安全策略层, 为运行检修安全措施设置提供校核手段。

该平台通过物理光纤网络建模自动与保护信息回路关联, 对实时监测信息进行大数据挖掘分类梳理和诊断知识库推理, 系统性实现全站二次设备、回路分层可视化和运行工况远程虚拟再现。通过光纤物理链路二次虚回路信息自动对应, 实现装置链路缺陷的快速定位、高效处置。同时, 建立了运维检修典型操作安全措施知识库, 借助安全措施隔离动态状态与安全措施知识库实时校核手段, 实现了运行检修操作过程中的二次回路防误预警。

现场可视化运维与防误预警技术实现了智能变电站与常规变电站继电保护设备的无差异化运维, 大大降低了对运维检修人员的技术要求。

4.3 远程运维技术

根据变电站无人值守运维模式的实际需要, 利用多状态贝叶斯决策树算法和多源数据比对技术, 实现保护设备智能巡视、缺陷智能诊断、安全隔离辅助决策、定值智能管理等功能于一体的智能变电站远程运维平台。

在变电运维部门实现二次设备远方全景可视化展示, 包括装置远程巡视软压板和告警灯、远方操

作、二次回路可视化展示、远程调阅、自动核对保护定值等功能。在变电检修部门,实现智能缺陷诊断技术,包括远程诊断、状态检修,准确推断故障设备、故障类型,实现面向插件级的装置故障定位和可视化展示^[14]。

远程运维平台实现了二次设备从“定期检修”到“状态检修”、“就地运维”到“远程诊断”、“被动检修”到“主动抢修”。降低了运行人员现场巡视次数,大幅提高了运行检修人员快速判断处理设备缺陷与电网事故的能力及效率。

4.4 移动电子化作业技术

基于移动互联技术研发现场电子化作业管控平台,实现设备台账、定值、图档资料、状态检修、设备检验、设备验收、设备缺陷等数据的电子化存储。同时,提供基础数据资料存储、运行、维护、缺陷信息的统计分析、历史信息查询等功能,解决了保护设备管理存在的效率低下、账实不符等问题。

编制各个电压等级的智能站/常规站的典型作业模板库,涵盖巡视、验收、校验、消缺等现场作业。在此基础上,以设备唯一识别码为关键信息,移动作业终端根据工作任务在线自动生成作业指导书、安全措施卡,解决了潜在的安全措施实施顺序错乱,试验项目漏项等情况。实现了现场智能化、无纸化、标准化检修,有效提高了检修工作效率和现场作业管控水平。

5 六大高级应用

5.1 运行工况在线评估及趋势预测技术

考虑到设备运行工况不仅与当前信息有关,也与历史数据相关,因此,综合继电保护设备在线运行信息、历史动作信息、缺陷信息、巡检信息等全业务数据,建立基于混合数据的设备运行工况评价模型,包括在线模型与离线模型。其中,在线模型计及模拟量信息偏离正常值的程度和不同权重逻辑量的告警情况(逻辑量分为直接采集的开关量和经过合成计算的伪开关量);离线模型利用存储于数据中心的设备历史缺陷数据、家族性资料及历史工况数据,通过加权计分的方法建立。运行工况在线评估的技术路线如图4所示。

为对设备工况的发展趋势做出预判,通过同型号设备的历史监测总体数据样本进行处理,采用可靠估计概率分布的算法,计算一定时间内该型号设备的正常工况聚类中心和带有置信度的正常工况参考边界。以聚类中心和参考边界为基础,将设备近期的连续监测数据进行距离评估并结合时间维度进行分析,得到设备健康值的时序趋势线,用于预测

未来时间段内设备的工况走向。



图4 运行工况在线评估技术路线

Fig. 4 Technical route of on-line evaluation of operating conditions

综合二次设备实时运行监测信息和数据中心离线信息等对健康状态进行评价,避免了传统仅利用离线数据的打分模式带来的人为主观性,为在线检修策略的制定提供了依据。同时,可及时发现状态监测数据表面处于“正常”的阶段,但实际处于劣化趋势中的隐患设备,弥补了当前二次设备检修中无法正确掌握设备健康状态的不足。

5.2 电网故障原因在线辨识技术

结合线路故障相关的外部环境信息(覆冰信息、雷电信息、气象信息等),以及反映故障内在特征的录波信息,洞察隐藏于融合信息中确定性的规律,建立输电线路故障原因辨识模型。当电网中再次发生故障时,在线识别山火、凝冰、鸟害、外力破坏、异物、雷击或树木放电引起的电网故障,其平台架构如图5所示。

基于支持向量机的辨识方案,收集历史故障录波数据及其对应的故障原因确认信息,借助小波分析方法提取时域、频域的录波特征,建立小波特性与故障原因存在的隐含关系。在此基础上,通过机器学习训练得到故障原因辨识模型。支持向量机算法属于浅层学习模型^[21-22],在小样本情况下性能表现较优,因此适用于数据中心建立初期样本少的情况。

基于神经网络的辨识方案,从历史数据中分析故障发生时的气象、环境及电气量特征,分析、挖掘与故障原因密切相关的故障特征,建立故障原因和故障特征量的关联。在此基础上,利用神经网络算法进行机器学习,针对不同故障原因建立不同的辨识模型。神经网络算法属于深度学习模型,在多样本情况下性能表现较优,因此适用于数据中心建立中后期样本多的情况。

电网故障原因在线辨识技术为调控人员事故处理提供有效的辅助决策。同时,对加快输电线路供电恢复、指导巡线具有积极意义。

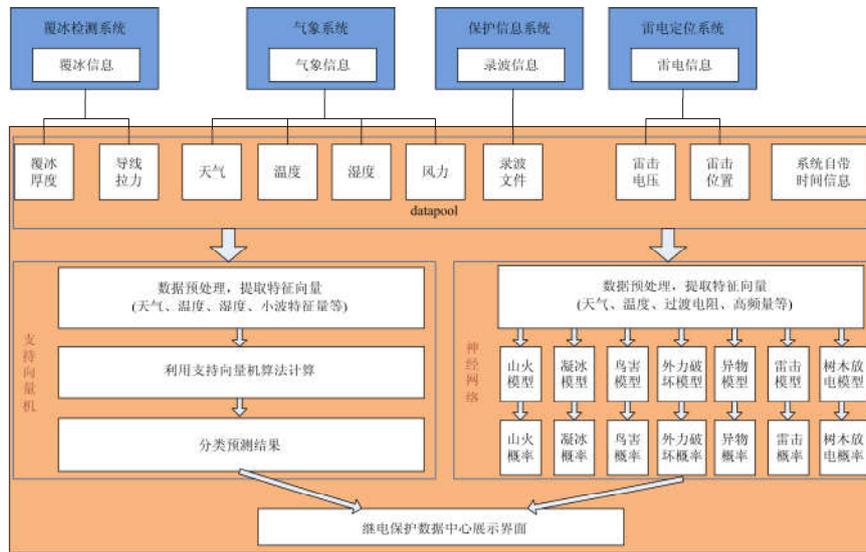


图 5 电网故障原因在线辨识技术路线

Fig. 5 Technical route of on-line identification of power network fault causes

5.3 保护动作行为在线智能诊断技术

目前, 继电保护动作行为分析依赖专业人员来完成, 耗时长、自动化水平低。鉴于此, 结合历史动作数据, 建立专家知识库和随机森林的保护动作行为诊断模型。当电网中保护装置再次动作后, 在线推理保护动作行为, 并与保护装置上送的动作事件、录波数据进行匹配对比, 在线分析保护动作结果是否正确, 其技术路线如图 6 所示。

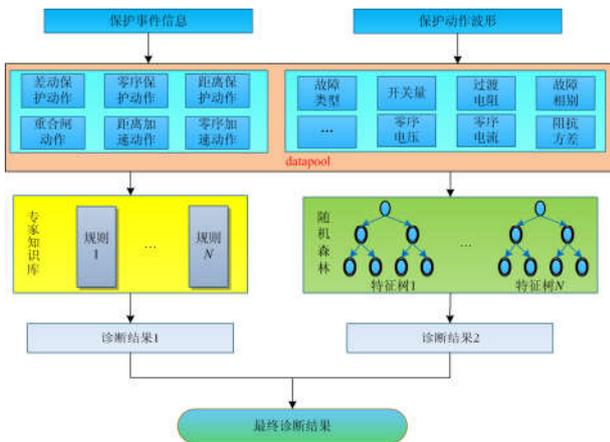


图 6 动作行为智能诊断技术路线

Fig. 6 Technical route of intelligent diagnosis of action and behavior

基于专家知识库的诊断方案, 依据继电保护专业人员经验, 即故障类型、保护配置、动作时序之间关系建立保护动作专家库。当电网发生故障时, 通过上传的故障录波数据判断出故障类型, 并结合保护动作专家知识库推理出相应保护、断路器动作

结果, 适用于解决常见故障。

基于随机森林算法的诊断方案, 借助大数据技术综合分析电网历史故障, 分别提取故障切除前、重合前、重合后三个阶段的过渡电阻^[23]、阻抗方差、序分量等特征量。采用随机森林算法分别建立各阶段的保护动作分析模型, 故障后各个阶段依次使用对应的分析模型决策出保护动作序列。主要解决复杂故障, 如发展性故障、高阻故障等。

保护动作行为在线智能诊断技术提高了电网故障的处置效率, 提升了自动化程度。

5.4 准实时在线监视

为解决 II 区信息受限于数据网的安全性要求, 仅能在特定场所浏览, 无法在办公电脑或移动终端实时监视的问题。同时, 考虑到数据量及实际应用需求, 采用 II 区至 III 区分钟级的数据传输策略(10 或 15 min), 实现 III 区准实时在线监视应用。变电站现场保护信号、录波文件通过 II 区数据网到达省调主站端, 主站端通过横向隔离装置将数据穿透到数据中心。实现 III 区办公电脑 web 或 4G 无线电力专网的移动终端浏览, 准实时在线监视具备对电网运行状态、厂站运行状态、继电保护装置运行状态的监视功能。

5.5 SCD 智能管控

该应用主要实现智能变电站配置文件全方位立体化管控, 以供各场景应用通过数据中心下载。

5.6 整定计算

该应用与调度整定系统采用单向通信, 获取并

存储经调度专业部门批准的整定单,以供各场景应用,高级应用通过数据中心获取。

6 结论

探索构建了基于大数据的继电保护智能运行管控体系,继电保护数据中心、四大场景应用、六大高级应用均已在浙江电网建成投运。该体系具有以下特点。

1) 解决了继电保护运行、维护、检修各个环节和专业技术管理存在的普遍问题。

2) 提高了继电保护设备安全运行及维护管控水平,提升了专业人员准确研判、处理继电保护设备缺陷和电网故障的效率。

需注意的是,随着科学技术的发展以及继电保护专业面临的新需求,基于大数据的场景应用和高级应用仍会进一步完善并丰富。

参考文献

- [1] 张东霞,苗新,刘丽平,等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [2] HOSSAIN E, KHAN I, UN-NOOR F, et al. Application of big data and machine learning in smart grid, and associated security concerns: a review[J]. IEEE Access, 2019, 7: 13960-13988.
- [3] HE X, AI Q, QIU R C, et al. A big data architecture design for smart grids based on random matrix theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 674-686.
- [4] 樊增权,樊晋元,王林. 基于大数据分析的动力煤煤质特性对炉内换热量影响规律的研究[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 38-24.
FAN Zengquan, FAN Jinyuan, WANG Lin. Influence rules of steam coal quality characteristics on heat transfer in furnace: based on big data analysis[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 38-24.
- [5] 陈国平,王德林,裘愉涛,等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-11, 26.
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 1-11, 26.
- [6] 王益,陈珉,王涛,等. 智能变电站仿真三维可视化组件装配技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 118-126.
WANG Yi, CHEN Min, WANG Tao, et al. Research on 3D visual component assembly technology of smart substation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 118-126.
- [7] 王继业,王德林,杨国生,等. 大数据技术在继电保护领域的研究与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(12): 1-8.
WANG Jiye, WANG Delin, YANG Guosheng, et al. Research and application of big data technology in relay protection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(12): 1-8.
- [8] 卢建昌,樊围国. 大数据时代下数据挖掘技术在电力企业中的应用[J]. 广东电力, 2014, 27(9): 88-94.
LU Jianchang, FAN Weiguo. Application of data mining technology in electric power enterprises in era of big data[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(9): 88-94.
- [9] 李黎,华奎,姜昀芃,等. 输电线路多源异构数据处理关键技术研究综述[J]. 广东电力, 2018, 31(8): 124-133.
LI Li, HUA Kui, JIANG Yunfan, et al. Research review on key technology for multi-source heterogeneous data processing for transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 124-133.
- [10] 冷喜武,陈国平,白静洁,等. 智能电网监控运行大数据分析系统总体设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 160-166.
LENG Xiwu, CHEN Guoping, BAI Jingjie, et al. General design of smart grid monitoring operation big data analysis system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 160-166.
- [11] HUANG Q, JING S, LI J, et al. Smart substation: state of the art and future development[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1098-1105.
- [12] 秦红霞,武芳瑛,彭世宽,等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [13] YANG Y, SONG L L, CAO H O, et al. Smart substation secondary system visualization and intelligent diagnosis based on improved SCD model[C]// International Conference on Renewable Power Generation (RPG),

- 2015: 1-5.
- [14] 裘愉涛, 周震宇, 杨剑友, 等. 继电保护远程运维技术研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 17-24.
QIU Yutao, ZHOU Zhenyu, YANG Jianyou, et al. Research and application of remote operation and maintenance technology of relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 17-24.
- [15] 陈泾生, 陈久林, 郑海雁, 等. 继电保护检验标准化作业专家系统的研发和应用实践[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 108-111.
CHEN Jingsheng, CHEN Jiulin, ZHENG Haiyan, et al. Development and application of a relay protection inspection standardized operation expert system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 108-111.
- [16] 耿少博, 赵春雷, 高翔, 等. 基于形式化描述机制的检修策略研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 178-186.
GENG Shaobo, ZHAO Chunlei, GAO Xiang, et al. Research and application of the strategy for repair security measures based on formalized description mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 178-186.
- [17] 谷凯凯, 胡文山, 赵坤, 等. 基于移动网络的手持式电力数据采集分析装置的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 110-116.
GU Kaikai, HU Wenshan, ZHAO Kun, et al. Design and implementation of a hand-held device for power data acquisition and analysis based on mobile network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 110-116.
- [18] 裘愉涛, 胡雪平, 凌光, 等. 国网公司智能变电站继电保护标准体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 7-13.
QIU Yutao, HU Xueping, LING Guang, et al. Research on State Grid's technical specification system of relay protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 7-13.
- [19] 许家焰, 宋福海, 陆榛. 智能站二次检修安措可视化及一键式操作系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 45(16): 136-144.
XU Jiayan, SONG Fuhai, LU Zhen, et al. Design and realization of the secondary maintenance safety measures visualization and one-touch operation system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 45(16): 136-144.
- [20] 智能变电站继电保护在线监视与智能诊断技术导则: DL/T 1663—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [21] 北京四方继保自动化股份有限公司. 一种基于 SVM 分类技术的电网故障原因诊断方法: 中国, 201610279840.5[P]. 2016-09-28.
- [22] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [23] 赵志仁, 马伟, 丁冬, 等. 基于电压相量平面的单相高阻接地保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 131-136.
ZHAO Zhiren, MA Wei, DING Dong, et al. Vector diagram of voltage based single-phase high-resistance grounding fault protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 131-136.

收稿日期: 2018-12-31; 修回日期: 2019-03-06

作者简介:

盛海华(1966—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与管理;

王德林(1972—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护运行与管理;

马伟(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: jnyz-mawei@163.com

(编辑 许威)