

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201308

基于5G通信的电气设备监测终端性能在线评估方案

邓科¹, 侯晓松¹, 林湘宁², 李霄¹, 林璠¹, 李煜磊¹, 马书民²

(1. 国网湖北省电力有限公司检修公司, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着在线监测技术在配网一次设备中的大规模应用, 由监测终端本身性能问题引发的误报警事件时有发生, 造成了极大的人力物资损耗。因此, 亟需寻找一种针对电气设备监测终端性能的在线评估方法, 能及时对处于异常状态的二次监测设备进行预警和消缺。为此, 提出了一种基于5G通信的电气设备监测终端性能在线评估方案。首先, 利用5G通信技术实现区域内全部监测终端的数据收集。然后, 引入平均偏离程度等三种指标, 通过比对收集数据与历史数据的差异实现监测终端的在线评估, 最终完成误报警事件的辨识。实例分析证明, 该方法能准确判别监测终端的运行状态, 避免误漏报事件带来的不良影响, 具有可行性。

关键词: 在线监测装置; 5G; 配电网; 误报警; 自动校对方法

Online evaluation scheme for the performance of an electrical equipment monitoring terminal based on 5G communication

DENG Ke¹, HOU Xiaosong¹, LIN Xiangning², LI Xiao¹, LIN Jin¹, LI Yulei¹, MA Shumin²

(1. Maintenance Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. State Key

Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of

Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the large-scale application of online monitoring technology in the primary equipment of the distribution network, false alarms caused by the performance of the monitoring terminal have occurred from time to time, resulting in great losses. Therefore, it is urgent to find an online evaluation method for monitoring terminals, one which can promptly warn about and eliminate the equipment in abnormal state in a timely manner. To this end, this paper proposes an online evaluation program for the performance of electrical equipment monitoring terminals based on 5G communications. First, 5G communication technology is used to collect data from all monitoring terminals in the area. Secondly, three indicators such as the average deviation degree are introduced, and online evaluation of the monitoring terminal is realized by comparing the difference between the collected data and the historical data. Finally, the identification of false alarm events is completed. The analysis of examples proves that the method can accurately determine the operating status of the monitoring terminal and avoid the adverse effects caused by false and omission reports. Thus it is a feasible method.

This work is supported by the Science and Technology of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5500-202022072A-0-0-00).

Key words: online monitoring device; 5G; distribution network; false alarm; automatic checking method

0 引言

配电网作为电力系统与分散用户直接相连的重要组成部分, 在维护电网正常运行中承担着重要作

用, 也是成功构建能源互联网的重要基础^[1-4]。一方面, 配网侧设备量多面广, 具有极大的运维工作量, 另一方面, 其又与用户密切相关, 需要对设备进行及时维护, 保证其良好的运行状态。对于中高压配电设备, 若能将状态监测数据全面收集并及时传输至供电服务指挥系统, 由该系统分析终端运行状态或定位故障位置, 最后由现场工作人员实现精准检

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (5500-202022072A-0-0-00)

修的运维模式将极大地提高检修效率, 可望实现由“被动抢修”向“主动运维”的智能转变。

上述运维模式是以设备的全面状态感知为基础, 需要较为完善的设备状态监测方案, 因此数据全面获取与准确及时传输显得至关重要。目前, 在高压输变电设备中, 在线状态监控已实现了全面应用, 而在对供电可靠性要求较高的地区, 如浙江、上海、广东等省份, 中高压配电网中设备运行状态的实时监控也已经开始得到示范应用。事实上, 一次设备的状态评价都是以监测终端的正常工作为基础, 然而, 在实际工程中, 由于传感装置、通信网络等环节的误差或故障, 监测数据可能出现较大偏差甚至缺失, 进而导致大量针对监控装置的漏报和误报警事件, 严重影响了电气设备状态评价与状态检修的效果, 是限制“状态检修”全面实施的一个重要技术瓶颈。尤其是绝大部分不适合架设光纤通信网络或通信网络架设成本过高的配电系统, 对于在线监测设备的校核检定, 仍只能采用人工逐台巡检并校核的方法。国家电网公司规定, 每年需进行 2 次在线监测数据准确性校对工作(夏季及冬季), 以此判定在线监测装置性能是否符合要求。然而, 随着配网侧智能化的推进, 其终端数量急速上升, 且分布较广, 因此传统方法将产生极大的人工成本, 令专家陷入大量低水平重复劳动中。

为解决上述问题, 国内外许多学者开展了大量研究工作。文献[5]设计了一种基于 3G/4G 网络的配网主设备监测平台, 该平台利用 3G/4G 网络将终端数据上传至云端服务器, 方便工作人员随时随地对配网设备进行在线监控。然而, 该平台没有对终端的可靠性进行验证, 特别是, 随着终端数量的急剧增多, 传统的 3G/4G 网络已无法满足传输速率与传输容量的需求; 文献[6]提出了一种无线自组网络与电力线载波通信混合组网的终端信息采集方式, 以支撑终端信息采集在复杂环境下的全方位覆盖。然而, 该方式易受到信道衰减的制约使得通信不具备可靠性。此外, 该方式还容易受到噪声的干扰, 出现通信中断等问题。因此, 亟需寻找一种低成本、高可靠性的终端设备评估方案。

5G 通信作为新兴技术, 具有速率快、容量大、可靠性高的特点, 是解决当前电力设备状态监测数据采集传输过程中所存在相关问题的有效方法之一^[7-9]。事实上, 目前电力系统已经在多个领域引入了 5G 通信技术^[10], 为 5G 的推广应用提供了实际经验与工程基础。基于此, 本文提出了一种基于 5G 网络传输、后台集中处理辨识的电气设备监测终端性能在线评估方案, 该方案能有效应对配网侧终端

量多面广、检定校核工作量大, 以及终端装置本身的误报警问题, 为配网设备在线监测数据的整合汇总、以及在线监测设备本身的性能评估提供了新的思路。

1 基于 5G 实现状态监测数据采集与传输的可行性分析

1.1 传统数据采集与传输方式介绍

传统配电网监控网络架构可以根据用途分为 3 个层次, 分别为设备层、站内通信层以及监控层, 如图 1 所示。

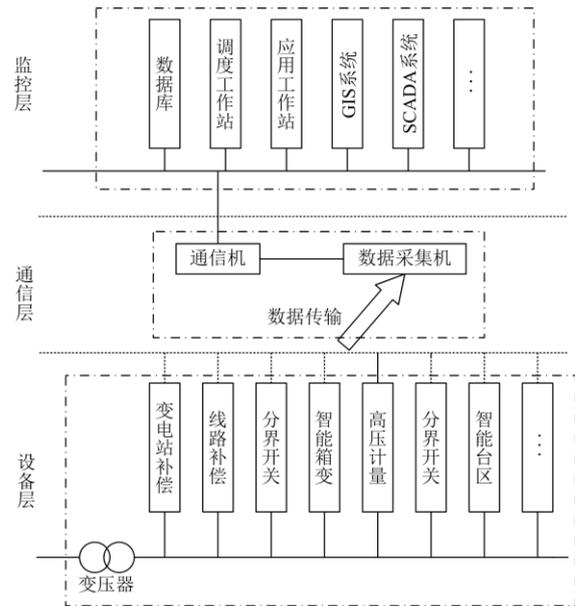


图 1 传统配电网监控系统网络架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of network architecture of monitoring system in traditional distribution network

其中, 设备层主要由各箱式变压器、分界开关等一次设备组成, 即需要监测的设备。通信层的作用是将设备层的信息收集并上传给监控层, 目前主要分为有线传输方式和无线传输方式。监控层则利用通信层上传的数据对设备层的装置进行状态评估并记录, 其中包括 SCADA 系统、数据库系统等等。

目前, 数据传输的方式主要分为两种^[11-14], 一种是有线方式进行传输, 以电力载波通信、光纤通信、RS-485 通信等为代表; 另一种是以无线方式进行传输, 以 GPRS 通信技术(General packet radio service, 通用无线分组业务)、CDMA 通信技术(Code Division Multiple Access, 码分多址)等为代表。以电力载波通信为例, 该方法满足配电网双向通信的需求, 且该方法不用额外的铺设通信线路, 极大地降低了投资成本^[15]。然而, 该方法设备兼容性差, 传输过程中易发生数据出错或丢失; 此外, 该方法

传输容量有限, 随着终端数据量的急速扩大, 该方法已难以满足当前电网需求。光纤通信拥有抗干扰能力强、安全性高、容量大等诸多优点, 但该通信方式不够灵活, 且建设成本高, 因此无法在配电网中得到广泛的应用^[16-17]。除上述有线通信外, 无线通信也成为配电网信息传输的主要手段。以 GPRS/CDMA 通信技术为例, 该技术具有覆盖面积广、成熟度高等优点^[18-19], 但该技术连通率低、网络延时大、安全可靠得不到保障, 因此无法满足配电网信息传输的基本要求。

1.2 5G 技术在配网设备状态监测中应用可行性分析

与高压输变电主设备不同, 配电网设备具有量多面广的特点, 且单台设备的监测量远不及高压输变电主设备。因此, 配电网设备的状态监测并不适宜针对单台设备进行监测控制, 而更适于与配电自动化系统结合, 按区域集中进行状态数据采集、设备状态监测与评估^[20]。综合考虑经济性与可靠性, 传统的有线通信与无线通信方式都无法完全满足数据采集与传输需求, 而 5G 传输技术的出现为解决上述问题提供了新思路, 其具体分析如下。

1) 配电网对数据安全可靠传输的要求

网络安全问题往往是数据传输中不容忽视的重要问题, 随着电力网络的智能化, 其与通信网络的联系越来越密切, 因此可能受到的攻击种类也越来越多^[21]。文献^[22]指出, 针对信息传输的攻击可能导致电力网络中出现严重的安全事故。

5G 传输技术采用了新的网络框架体系, 从物理层安全、轻量级加密以及网络切片安全三重角度出发, 确保了 5G 数据传输的安全性^[23-24]。除此之外, 《5G 移动通信网安全技术要求》对 5G 通信的安全性进行了有效定义, 为 5G 传输的安全可靠提供了依据。

2) 配电网对流量密度、连接数密度的要求

随着配网的智能化建设的逐步加深, 配网侧智能终端个数与监控数据量均急剧增大, 传统的通信传输方式已不能满足实际需求^[25]。在此背景下, 5G 通信技术支持一定局部区域的超高数据传输, 网络架构能支持每平方公里能提供数十 Tbps 的流量, 且能满足大规模的设备终端同时接入, 具有流量密度大、连接数密度高的特点。具体而言, 5G 传输技术的理论流量密度高达 10 Tbps/km², 连接数密度为 100 万/km², 而 4G 传输技术的理论流量密度参考值为 0.1 Tbps/km², 连接数密度为 10 万/km², 具有显著差异^[26-27]。

3) 配电网传输对经济效益的要求

除上述因素外, 还必须考虑所选择方案的经济效益。事实上, 作为我国的重点基建项目, 5G 基站的数量已突破 60 万个, 基本覆盖全国主要城市, 并向有条件的重点县镇延伸, 预计未来数年内能实现 5G 通信的大规模商用化。在此基础上, 配网侧终端能借助现有的 5G 基站实现数据的传输, 并不需要建设额外的基础设施, 极大地降低了投资成本。此外, 5G 通信技术的流量单价约为当前流量单价的一半, 其显著低于当前的流量单价, 因此使用 5G 通信还能降低实际使用成本。综上, 5G 通信在配网终端的数据传输中具有优良的经济效益。

基于上述可行性, 得到基于 5G 技术的配电网监控系统网络示意图, 如图 2 所示。其中, 以部分监测主体为例, 展示了如何利用监测终端实现信息收集、利用 5G 基站实现区域内信息传递以及利用中心基站实现区域间信息汇总等步骤。值得注意的是, 图中 5G 基站与中心基站的具体数量与安装位置应结合现场情况决定。

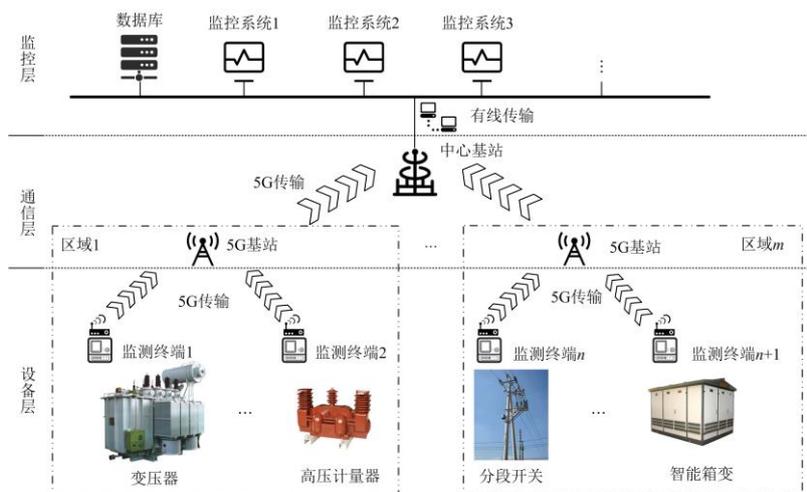


图 2 基于 5G 技术的配电网监控系统网络

Fig. 2 Distribution network monitoring system based on 5G technology

2 在线监测终端性能的在线评估方法

第 1 节分析论证了 5G 通信技术能作为监测终端数据的有效回传方法,有效解决了点多面广的配网在线监测数据回传汇总的问题。在此基础上,还可以利用上述数据对监测终端本身的性能实现在线评估。事实上,造成监测终端性能异常的主要原因有两种主要原因^[28],一是监测终端产品质量不合格,自身监控性能达不到标准;二是由于长时间运行导致的自身性能劣化。在对电气设备进行状态评估之前,必须对这类“坏数据”进行清洗与辨识,否则将导致误报警事件。事实上,监测终端的校核一直是电网公司日常运维工作的重点与难点。目前工程上还是采用人工比对方式,这种流程简单、机械重复的工作,带来了很高的人工成本,同时挤占了专业技术人员处理复杂问题的时间。为此,河南电科院、浙江电科院等单位在其 PMS 系统中初步尝试了数据自动比对模块,然而,该模块的实际应用效果仍较差,缺乏实用性强的理论技术支撑。

2.1 校对评估指标

为解决上述问题,本节研究提出了一种监测终端性能在线评估方法。

首先是校对指标的确定。根据对在线监测装置离线试验数据及在线实时数据的分析,本文筛选了能够从整体上体现数据特征与精度的三项评估指标,其分别是数据的平均偏离程度、数据的平均离散程度以及数据的平均背离程度。

1) 平均偏离程度 E_x

平均偏离程度 E_x 定义为同一时间戳下在线测量所得到的实时数据与离线状态下推测得到的试验数据之间的期望差值,计算过程如式(1)所示。该指标表征了在线监测装置所获取的数据的精度。

$$\Delta E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (1)$$

式中: x_i 表示通过实验所推测得到的数据期望值; y_i 表示监测装置在线测量所得到的实时数据; n 表示测量数据个数。值得注意的是,上述数据必须具有相同的时间戳,即同一时刻下的数据一一对应。

2) 平均离散程度 V_x

平均离散程度 V_x 表示同一时间戳下在线测量所得到的实时数据与离线状态下推测得到的试验数据之差的平方和,该数据能够有效体现两种试验数据之间的离散度,其计算式如式(2)所示。

$$V_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \quad (2)$$

式中, x_i 、 y_i 和 n 表示的含义同式(1),在此不赘述。

3) 平均背离程度 R_x

平均背离程度 R_x 体现了相邻时刻间数据平均离散程度的变化情况,表征了上述在线监测数据与离线试验数据两种数据之间不同运行方向的程度,其计算式如式(3)所示。

$$R_x = \Delta V = V_{i+1} - V_i \quad (3)$$

式中, V_i 的含义同式(2),在此不赘述。

2.2 校对步骤

电气设备在线监测终端性能自动校核的步骤如下:

1) 收集 5G 技术所传输的在线监测终端数据并进行整合,记录数据所对应的时间标签;

2) 根据在线监测数据的时间标签,读取离线试验数据库中对应时间标签的数据,然后根据所构造的性能标定指标,分别计算在线实时数据和离线试验数据的期望偏离度、在线实时数据与离线试验数据之间的方差及方差变化率;

3) 将三个指标的数值与预先设定的阈值值进行比较(阈值值可以根据有限的离线人工校核结果进行整定),并以图表的形式将三个指标的数值直观地展现,以便于运维人员进行决策。

校对步骤的具体流程如图 3 所示。

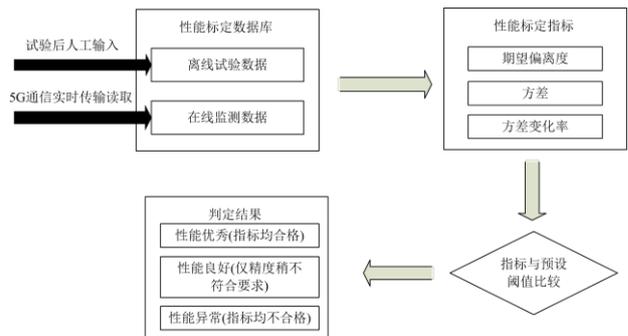


图 3 基于 5G 技术的监测终端性能自动校核流程

Fig. 3 Flow chart of automatic checking of monitoring terminal performance based on 5G technology

2.3 在线监测系统误报警事件辨识流程

完成在线监测终端的校核后,还需进一步对在线监测系统误报警事件进行辨识。事实上,目前在线监测系统的大部分报警事件为误报(据统计,部分省市的误报率达到 80% 以上)。每一次误报警事件,都将极大地增加现场运维人员与专家的工作量,浪费大量人力物力资源。

目前针对在线监测装置误报警事件,实际工程中并没有有效的方法进行甄别。为此,部分省市电

网公司尝试了技术改进工作。举例而言, 浙江省电力公司 PMS 系统内就误报警事件制定了工作处理流程, 以进行分步监管, 其流程如图 4 所示。

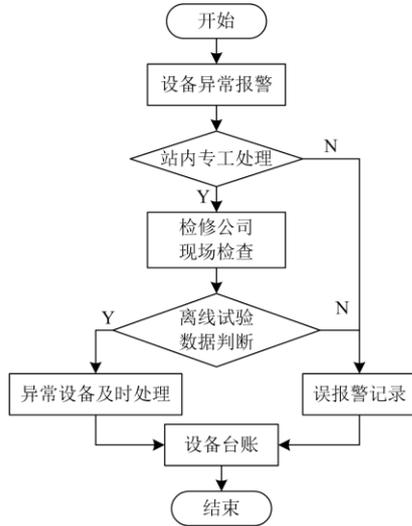


图 4 浙江电网报警事件处理流程图

Fig. 4 Flow chart of Zhejiang power grid alarm event processing

然而, 上述方法仍过度依赖人工现场排查的方式, 只是在管理方式上进行了优化, 没有实现误报警事件的在线真伪判定。因此, 为了减少由于误报警事件所带来的不良影响, 本节研究提出了一种实用化的在线监测装置误报警事件甄别方法, 具体如图 5 所示, 其原理为: 异常状态或故障带来的影响不会仅仅体现在单一变量上, 与其附从的有关变量也会受到影响, 通过判断相关变量的整体变化情况, 可以合理推断出是否发生误报警事件。

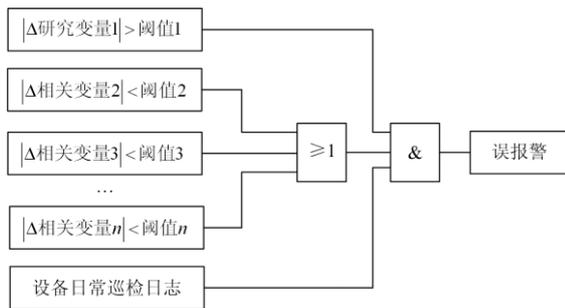


图 5 误报警事件甄别逻辑图

Fig. 5 Logic diagram for identifying false alarm events

图中, 研究变量即为监测终端测量的信息量, 相关变量则是与研究变量有关的若干个其余变量。这些相关变量往往与研究变量有直接关系, 如研究变量的副产物, 或两者满足一定的物理定律等等。举例而言, 若研究充油设备中 C_2H_4 气体的含量, 则可以选择同一空间内 H_2 、 C_2H_6 和 CH_4 等气体的含

量作为相关变量; 若选取一条线路上的电流大小为研究变量, 则可以选取周边相邻线路的所有电流为相关变量。

值得注意的是, 用于判断的阈值需综合考虑现有标准及实际数据进行整定。通过收集相关监测装置的误报警事件记录, 结合实际工程离线校核结果数据, 即可建立误报警事件甄别逻辑, 实现误报警事件的有效判断。

3 案例分析

3.1 准确性校对

1) 案例 1

以某变电站油色谱在线监测系统为例, 收集到相同时间区间内的离线试验数据 20 组作为性能标定的参照组, 查找对应时间点的在线数据 10 组组成测试组, 如表 1 所示。其中期望偏离度阈值设置为 0.3, 方差阈值设置为 0.15, 方差变化率阈值为 0.3。

根据表 1 及图 6 所示的对比结果, 三项指标均未超过阈值, 可以判断在线监测系统性能处于优秀状态。

表 1 在线监测系统准确性校对表格 I

Table 1 Online monitoring system accuracy proofreading form I

编号	在线数据	离线数据	期望偏离度	方差	方差变化率
1	4.661	4.5	0.036	0.026	0.020 0
2	4.783	4.6	0.037	0.029	0.003 4
3	6.247	6.3	0.02	0.020	-0.009 1
4	6.191	6.3	0.009	0.018	-0.001 9
5	6.201	6	0.015	0.022	0.004 4
6	7.048	7	0.012	0.019	-0.003 5
7	9.811	10	0.005	0.022	0.003 0
8	9.249	9.4	0.002	0.022	0.000 5
9	9.647	9.5	0.003	0.022	-0.000 3
10	9.853	9.9	0.002	0.020	-0.002 0

2) 案例 2

以另一变电站某油色谱在线监测系统为例, 收集到相同时间区间内的离线试验数据 7 组作为性能标定的参照组, 查找对应时间点的在线数据 7 组组成测试组, 如表 2 所示。

根据表 2 及图 7 所示的对比结果, 从第二个采样点开始期望偏离度与方差均超过阈值, 判定为失效状态。此时应当立即组织人员进行修理, 避免因在线监测系统性能下降或失效导致的误报漏报事件发生。

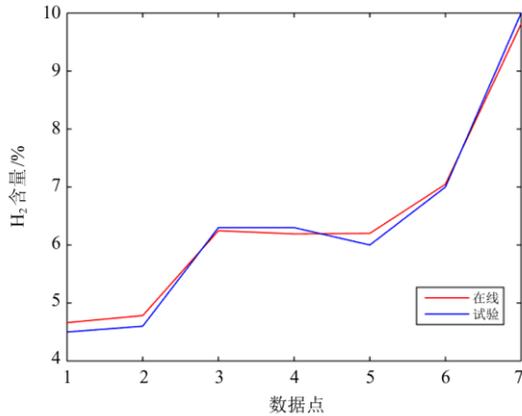


图 6 校对结果图 I

Fig. 6 Proofreading result graph I

表 2 在线监测系统准确性校对表格 II

Table 2 Online monitoring system accuracy proofreading form II

编号	在线数据	离线数据	期望偏离度	方差	方差变化率
1	9.125	10.89	0.194	0.186	0.021 5
2	8.993	11.42	0.327	0.235	0.033 6
3	9.427	12.51	0.381	0.269	0.034 3
4	9.612	13.28	0.454	0.301	0.031 9
5	9.893	14.38	0.462	0.337	0.036 1
6	10.134	14.82	0.595	0.361	0.023 8
7	9.624	15.35	0.327	0.403	0.041 8

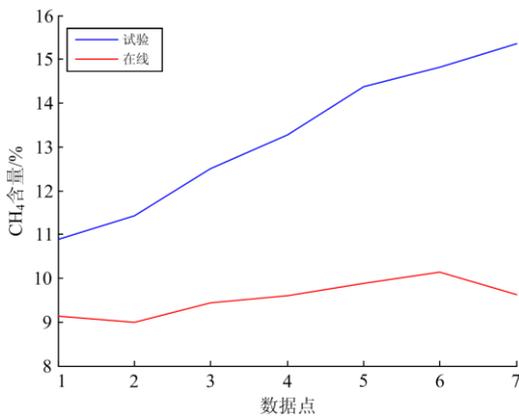


图 7 校对结果图 II

Fig. 7 Proofreading result graph II

3.2 误报事件识别

1) 案例 1

表 3、表 4 分别是某国网省级电力检修公司获取的部分在线监测装置误报警事件记录。

通过构造图 5 所示的误报警事件甄别逻辑图，对表 3 和表 4 所示的误报警事件中气体含量变化情

表 3 #2 主变 C 相乙炔误报警

Table 3 #2 False alarm of phase C acetylene of main transformer

时间	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	识别
10:00	0	0	0	7.9	0	正常
09:00	0	0	0	7.9	0	正常
08:00	0	1.25	0	0	13.3	误报
07:00	0	1.25	0	0	13.3	误报
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20:00	0	1.25	0	0	13.3	误报
19:00	0	1.04	10.35	1.48	0	正常
18:00	0	1.04	10.35	1.48	0	正常

表 4 #1 主变 B 相乙炔误报警

Table 4 #1 False alarm of main transformer B phase acetylene

时间	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	识别
1/8 06:00	8.18	20.28	1.15	3.5	0	正常
1/7 06:00	9.36	22.48	1.29	3.6	0	正常
1/6 06:00	10.89	23.49	1.24	3.69	0	正常
1/5 06:00	13.94	21.58	0.87	2.67	0	正常
1/4 06:00	10.52	20.9	0.79	2.58	0	正常
1/3 06:00	11.16	22.43	1.01	2.76	0	正常
1/2 13:00	10.62	17.92	0.87	2.16	0	正常
1/2 11:18	13.6	13.86	0	3.6	0	正常
1/1 13:38	13.6	22.33	0.96	2.58	0	正常
1/1 06:00	0	1.49	0	1.26	1.35	误报
12/31 06:00	14.11	23.29	1.05	2.85	0	正常
12/30 06:00	0	6.41	1.15	2.94	0	正常
12/29 06:00	12.36	22.83	1.01	2.67	0	正常
12/28 06:00	13.03	23.7	0.79	2.76	0	正常
12/27 06:00	13.03	24.58	0.92	2.85	0	正常
12/26 06:00	13.77	24.22	0.87	2.85	0	正常
12/25 06:00	15.03	23.49	0.87	2.85	0	正常

况进行分析，可以得知：目前已有记录的误报警事件均是由于乙炔含量超标所导致，同时也发现误报警事件记录中，其余气体的含量并无明显增长，甚至出现了直接衰减为 0 的情况。

此外，根据调研所收集的变压器故障发生前后油色谱数据变化情况可知，一旦设备发生故障，其油色谱数据均出现了一定程度的增长，且不会出现大量气体含量陡降的现象。可以看出，当乙炔含量超标，且其余气体含量出现了陡降现象，结合设备日常巡检日志的调取与分析，则判定此次报警事件为误报警。

综上，对各个时刻的变压器运维状态进行了误报警识别，发现识别结果与现场的实际判定结果一

致,证明了所提方法的有效性。

2) 案例 2

另以现场收集到的某高抗 A 相乙炔异常油色谱在线监测系统报警事件为例,如表 5 所示,设备日常巡检日志无异常。其中气体的注意值参考规程进行设定,变化率阈值分别为:10%(氢气)、10%(甲烷)、-15%(乙烷)、-15%(乙烯)、10%(乙炔),设定的依据为已有的误报事件的统计规律,可通过现场工作人员经验对阈值进行修正。

表 5 在线监测系统报警事件数据

Table 5 Online monitoring system alarm event data

时间	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂
02/09	3.74	31.14	1.81	11.75	0.00
02/10	3.75	31.1	1.79	11.51	0.00
02/11	3.76	33.93	0.00	5.68	1.68
02/12	3.71	34.28	0.00	5.91	1.75
02/13	3.76	31.49	1.77	12.26	0.00

首先判断是否有气体超过阈值,由表 5 可知,乙炔值含量超过阈值,启动误报警判断逻辑。结合本文所提出的误报警判断方法可知,2月11日和2月12日两个时间点所对应的氢气含量在阈值范围之内,且设备日常巡检日志没有发现异常,因此综合考虑后认为此次数据异常为误报警事件,其可能是由于在线监测系统性能出现波动所导致的误报,不需要进行现场排查。事实上,2月13日油色谱数据恢复了正常数值,证明了判断的可靠性。

3.3 方案可行性分析

5G 通信技术能有效降低单位字节的传输成本和功耗,因此 5G 通信技术的最大优势是在低成本的前提下应对海量的带宽增长。事实上,目前 5G 通信流量的单价是要显著低于 4G 流量的。在此基础上,本节对 5G 的经济成本进行量化计算,探究 5G 技术的实际可行性。

结合当前配网侧实际情况进行分析,配网侧网络呈现辐射形分布,配电设备沿网络分散配置,因此需要区域内的多台 5G 基站同时配合。与此同时,考虑到配电侧终端具有数量大,每个终端采集量少的特点(实际中进行周期性采集),为简化计算,本文在保证合理性的前提下做出了以下假设:

- 1) 假设 5G 技术已发展成熟,即整个区域实现了 5G 基站的全覆盖;
- 2) 假设区域内的监测终端数量 $N = 10\,000$ 台;
- 3) 假设区域内的监测终端的采样周期为 1 天 1 次,且每次所有终端的发送数据量一致,具体大小

设置为上限值 $q = 10\text{ Mb}$,因此一年发送的数据总流量为 $Q = 3\,650\text{ Mb}$;

4) 由于目前 5G 技术处于发展阶段,当前资费普遍较高,但随着 5G 技术的大规模商用,其价格会发生显著下降。为此,综合考虑后,本文拟定其资费为 $P = 3\text{ 元/Gb}$,值得注意的是该数值会随着 5G 技术的发展逐渐变化。

综上,计算利用 5G 技术传输的年费用 W ,即

$$W = N \cdot Q \cdot P \quad (4)$$

将上述变量代入,计算得到总年费用成本为 106 933 元。显然,对于传统方式,其对设备的数据收集周期更长,在线监测设备反映的问题无法及时得到解决,如果需要缩短数据收集周期,例如,对标如本文方案考虑每天收集,则仅考虑到现场收集数据产生人工费用就远远超过 10 万元,这还没设计及因装置误报警临时产生的现场消缺等额外费用。因此该评估方法在实际应用中具有更高的可行性。

4 结论

针对配网侧在线监测终端的就地数据无法实现及时回传以及监测终端性能无法实现低成本地校核的现状,本文提出了一种基于 5G 通信的电气设备监测终端性能在线评估方法,并结合实际案例进行了分析,形成如下结论:

- 1) 相比于传统的终端数据收集方式,本文所采用的 5G 通信技术,不仅能适应日益增长的智能终端数量与庞大的信息数据量,还具有显著的经济效益优势,具有很好的可行性;
- 2) 在提出平均偏离程度、平均离散程度以及平均背离程度三种指标的基础上,提出了一种监测终端性能在线评估方法,通过对在线监测终端性能的动态标定,实现了针对装置异常状态的及时处理;
- 3) 基于工程经验与历史运行数据,提出了一种应对误报警事件的组合逻辑甄别新原理,该原理适用性广,能实现误报警事件的有效判断。

参考文献

- [1] 孟雨田,严正,徐潇源,等.配电网状态估计的全局灵敏度分析及应用[J].电力系统自动化,2020,44(2):114-126.
MENG Yutian, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, et al. Global sensitivity analysis and application of distribution network state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 114-126.
- [2] 费思源.大数据技术在配电网中的应用综述[J].中国电机工程学报,2018,38(1):85-96,345.

- FEI Siyuan. Overview of application of big data technology in power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 85-96, 345.
- [3] KUMAR D S, SAVIER J S, BIJU S S. Micro-synchrophasor based special-protection scheme for distribution system automation in a smart city[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 97-110. DOI: 10.1186/s41601-020-0153-1.
- [4] 白浩, 袁智勇, 梁朔, 等. 基于大数据处理的配网运行效率关联性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 61-67.
- BAI Hao, YUAN Zhiyong, LIANG Shuo, et al. Correlation analysis of distribution network operation efficiency based on big data processing[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 61-67.
- [5] 张林康. 基于 3G/4G 网络的配网主设备监测平台设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- ZHANG Linkang. Design of monitoring platform for master equipment of network distribution based on 3G/4G network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [6] 李珊, 周凤珍, 宋宁希. 物联网技术在配网设备监测中的应用[J]. 智能电网, 2015, 3(1): 60-66.
- LI Shan, ZHOU Fengzhen, SONG Ningxi. Application of internet of things technology in distribution network equipment monitoring[J]. Smart Grid, 2015, 3(1): 60-66.
- [7] 刘向超, 董维. 浅谈 5G 技术在智慧城市建设中的应用[J]. 计算机产品与流通, 2020(11): 46-47.
- LIU Xiangchao, DONG Wei. Application of 5g technology in the construction of smart city[J]. Computer Products and Circulation, 2020(11): 46-47.
- [8] TZANAKAKI A, ANASTASOPOULOS M P, SIMEONIDOU D. Converged optical, wireless, and data center network infrastructures for 5G services[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(2): 111-122.
- [9] CHETTRI L, BERA R. A comprehensive survey on internet of things (IoT) toward 5G wireless systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 16-32.
- [10] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.
- ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for ubiquitous power internet of things: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [11] 肖振锋, 辛培哲, 刘志刚, 等. 泛在电力物联网形势下的主动配电网规划技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 43-48.
- XIAO Zhenfeng, XIN Peizhe, LIU Zhigang, et al. An overview of planning technology for active distribution network under the situation of ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 43-48.
- [12] VARUNKUMAR S. Power line communication-a smart approach for efficient data transmission[C] // 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), 2018, Chennai, India: 124-127.
- [13] 王新刚, 赵舫. 计及通信资源优化的电力线载波通信路由算法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(22): 79-83.
- WANG Xingang, ZHAO Fang. Research on power line carrier communication routing algorithm considering communication resource optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 79-83.
- [14] 李岩, 齐磊杰, 刘云鹏. 具有公共屏蔽层的三芯中压电缆通信信道分析[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 101-106, 113.
- LI Yan, QI Leijie, LIU Yunpeng. Analysis of three-core medium voltage cable communication channel with public shield[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 101-106, 113.
- [15] 杨军胜, 王森, 王承民, 等. 多频带自适应技术在电力载波方面的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 137-143.
- YANG Junsheng, WANG Sen, WANG Chengmin, et al. Research on multi-band adaptive technology in power carrier[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 137-143.
- [16] 韩天博, 朱凯. 基于光纤通信的中低压馈电线路区域保护设计[J]. 电气自动化, 2020, 42(4): 31-33.
- HAN Tianbo, ZHU Kai. Design of regional protection for medium and low-voltage feeder lines based on optical fiber communication[J]. Power System & Automation, 2020, 42(4): 31-33.
- [17] TANG B, ZHOU Z. The design of communication network optical fiber cable condition monitoring system based on distributed optical fiber sensor[C] // 2018 International Conference on Electronics Technology (ICET), 2018, Chengdu, China: 97-101.
- [18] 陈尔奎, 贾萌, 韩清春. 基于云服务的干式变压器远程监控终端设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 97-102.
- CHEN Erkui, JIA Meng, HAN Qingchun. Design of remote monitoring terminal for dry-type transformer based on cloud service[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 97-102.
- [19] 李永亮, 冯杰波, 郑晓庆, 等. 基于 1.8 GHz TD-LTE

- 无线专网的负荷控制终端接入技术[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 128-132.
- LI Yongliang, FENG Jiebo, ZHENG Xiaoqing, et al. Load control terminal access technology based on 1.8 GHz TD-LTE wireless private network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 128-132.
- [20] 张立静, 盛戈峰, 江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应用分析与研究展望[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 1-10.
- ZHANG Lijing, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen. Application analysis and research prospect of ubiquitous power Internet of Things in substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 1-10.
- [21] 汪泉, 周玮, 王昊, 等. 面向电力测试装置远程校准的网络服务质量可靠性建模与分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 111-116.
- WANG Quan, ZHOU Wei, WANG Hao, et al. Modeling and analysis of network quality of service reliability for remote calibration of power test equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 111-116.
- [22] 曾婧. 智能电网数据完整性攻击的防御方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZENG Jing. Research on defense method of data integrity attack in smart grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [23] SATTAR D, MATRAWY A. Optimal slice allocation in 5G core networks[J]. IEEE Networking Letters, 2019, 1(2): 48-51.
- [24] KOTULSKI Z, NOWAK T, SEPCZUK M, et al. Towards constructive approach to end-to-end slice isolation in 5G networks[J]. EURASIP Journal on Information Security 2018, 2.
- [25] ZHONG Chuan. Characteristics of big data of power transmission and transformation in smart grid[C] // Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2014, Shenyang, China: 3154-3158.
- [26] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
- CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [27] ZHU X, ZHANG J, CUI T, et al. A miniaturized dielectric-resonator phased antenna array with 3D-coverage for 5G mobile terminals[C] // 2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), 2018, Silicon Valley, CA, China: 343-346.
- [28] 徐铭, 李正天, 程建, 等. 油浸绝缘电气主设备状态量发展趋势预测模型研究[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(3): 26-30.
- XU Ge, LI Zhengtian, CHENG Jian, et al. Research on the development trend prediction model of oil-immersed insulation electrical main equipment status[J]. Mechanical and Electrical Technology of Hydropower Stations, 2018, 41(3): 26-30.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-02-06

作者简介:

邓科(1971—), 男, 工程师, 长期从事电网运维检修管理工作; E-mail: wqdk0708@sina.com

侯晓松(1986—), 男, 高级工程师, 长期从事电网运维检修管理工作; E-mail: 274361217@qq.com

林湘宁(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、新能源发电等。

(编辑 周金梅)