

数字化跨间隔电能计量系统的 现场多维测试技术

丁建顺¹, 张 炜², 周 胜³, 任 民¹, 胡吕龙¹, 汤汉松²

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061; 2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009;
3. 国网湖北省电力有限公司技术培训中心, 湖北 武汉 430079)

摘 要:为解决智能变电站电量计量不平衡问题, 针对数字化跨间隔电能计量系统涉及环节较多、实验室测试存在盲区、现场检测手段匮乏等特点, 提出一种用于变电站现场实施的跨间隔电能计量多维测试技术。分析数字化跨间隔计量异常的主要原因, 提出基于无线传输的间隔化注入测试方法及其实现方案, 对分布式终端同步、被动采样的精确触发及采样曲线拟合等关键技术进行描述。由实验结果可知, 该测试方法在保持被测系统架构完整性的前提下, 实现跨间隔电能误差定位及相关性能检测, 有助于提升数字化计量专业的现场调试检修能力。

关 键 词:智能变电站; 数字化计量; 跨间隔; 现场测试; 多维

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.022 中图分类号: TM933 文章编号: 1673-9140(2021)03-0180-08

Multidimensional field test technology for digital multiple bay electric energy metering system

DING Jianshun¹, ZHANG Wei², ZHOU Sheng³, REN Min¹, HU Lvlong¹, TANG Hansong²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Hefei 230061, China; 2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China; 3. State Grid Hubei Power Co., Ltd., Technical Training Center, Wuhan 430079, China)

Abstract: For the purpose of solving the unbalanced problem of power metering in the smart substation, a multidimensional field test technology is proposed for multiple bay electric energy metering in substation in view of the characteristics of digital multiple bay electric energy metering system is considered such as many links involved, blind areas in laboratory testing and lack of field test means. Firstly, the main reason of abnormal measurement is analyzed for the digital multiple bay. Then, a bay injection test is proposed on the basis of the wireless transmission and the implementation scheme and the key issues is described such as the distributed terminal synchronization, precise trigger of passive sampling and sampling curve fitting. Finally, the proposed scheme is verified by experiments. It is shown that the method could realize the error location and performance test of multiple bay electric energy under the condition of maintaining the integrity of the system and the field test ability of digital metrology specialty is improved.

Key words: smart substation; digital metering; multiple bay; field test; multidimensional

智能变电站电能计量系统由互感器、合并单元、采样值传输网络和电能表等部分组成,数字化的采样值传输模式提升了系统的信息共享性与架构集成度,具有广阔的应用前景^[1]。在实际工程中,由于数字化电能计量不断暴露出采样误码、通讯异常、计量偏差较大等问题,从而导致计量不平衡现象,严重影响变电站的计量稳定性,阻碍了数字化计量工作的发展^[2]。特别是由内桥接线、一个半开关接线等组成的跨间隔计量系统,其涉及的采样环节较多,不同间隔的采样信号无法参照传统方式物理合并,现场分散获取的数字化计量信号也不易校验。这些不利条件都增加了跨间隔计量的系统测试难度,给现场运维工作带来严峻的挑战^[3-5]。

由于缺乏标准支撑与完善的测试手段,导致数字化跨间隔计量体系研究发展缓慢。国外对数字化计量的应用较少,基本采用将数字量转换为模拟量传递的方式,没有发挥数字化计量的特点;国内现阶段对数字化计量的研究主要集中在单间隔计量、数字化计量溯源以及可靠性研究等领域,国家电网最新编写的数字化计量企标中虽然已将跨间隔计量纳入讨论,但尚未对相关问题进行深入的研究。

电能计量作为变电站运行的重要功能组成部分,其准确性直接关系到电量考核指标和未来贸易结算的公正。数字化跨间隔电能计量的系统组成复杂,计量特性尚未明确,实验室测试无法复现实际运行工况,现场检测手段也比较匮乏。因此,研究数字化跨间隔电能计量的异常原因,提出适合的现场测试技术解决方案,降低变电站投运后的电量不平衡风险,对数字化计量体系的发展具有重要意义。

1 电能计量异常分析

与常规变电站计量不同,数字化的跨间隔电能计量主要通过采样值组网架构实现。以一个半开关接线方式为例,如图1所示,各采样间隔互感器传变一次电气信号,经间隔内由全站时钟源同步的合并单元输出至网络交换机。数字化电能表订阅交互机内线路电压、中开关电流及边开关电流的采样信息,使用采样计数器同步采样值并合并分支电流,最后计算跨间隔传输电量。

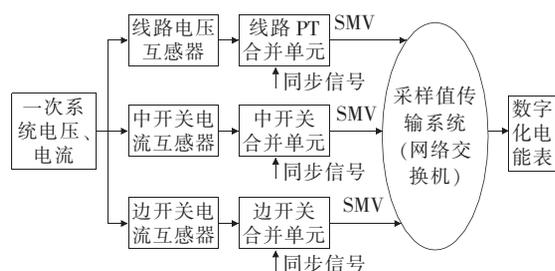


图1 数字化跨间隔电能计量方案

Figure 1 Scheme of multiple bay electric energy measurement

依赖于组网传输的数字化采样系统,采样值的同步性及传输稳定性均会影响其可靠性^[6-7]。数字化跨间隔电能计量异常的影响因素如下。

1) 装置计量精度。

互感器计量精度与实现原理有关,传统互感器性能相对稳定,电子式互感器的采集单元易受现场环境干扰,其内部积分环节在直流分量影响下可能导致采样异常。合并单元的变换器传变精度、AD采样率、AD采样精度以及滤波回路特性等对其计量精度均有影响。数字化电能表的计量精度主要与电能计量算法有关,通过提高前端采样率或使用高阶插值算法,可进一步降低其计量误差^[8]。

2) 采样同步性。

虽然相关技术规范要求合并单元具备短时的同步守时能力^[9],但 $4\ \mu\text{s}$ 的守时精度与 $10\ \text{min}$ 的守时时间无法满足计量领域的准确度需求。在守时结束后,合并单元输出的采样可能会出现较大相差。

合并单元的同步插值算法对计量精度也有影响。以点斜式插值法为例,同步插值公式:

$$S = \frac{S_n - S_{n-1}}{T_n - T_{n-1}} \times (t + T_1 - T_{n-1}) + S_{n-1} \quad (1)$$

式中 S 为插值后采样; S_n 为原始采样第 n 点; T_n 为原始采样第 n 点接收时刻; t 为插值采样时刻; T_1 为原始采样延时。

由上式可知,同步精度与原始采样精度、采样输入时刻及采样延时相关。模拟量合并单元的同步误差主要由采样精度产生。数字量合并单元的同步误差由采样输入时标及前级采样(电子式互感器或级联合并单元)的延时配置准确性决定。

3) 采样传输稳定性。

数字化电能的瞬时值点积算法对采样异常的抗扰度较低,采样异常较多时会导致电能计量缺失。对于依赖采样计数器组网同步的跨间隔计量系统,采样网络风暴对计量影响严重,采样值传输抖动只会影响数字量合并单元的计量精度。

2 现场多维测试技术

引起数字化跨间隔电能计量异常的原因较多,常规测试只能保证装置单体的性能,无法验证在变电站建设过程中引入的定值设置不准确、信号链路异常、逻辑配合不合理等问题,也不易在变电站投运前校验计量体系的整体准确性。为解决工程中出现的这个问题,可设计一种适合在变电站现场实施的计量测试方案,在不改动被测系统原始架构的前提下,覆盖其内部所有环节,在变电站调试检修阶段考核系统的总体计量误差及局部指标,有效防范可能存在

的异常风险点,提升系统的稳定性。

2.1 总体方案

数字化跨间隔计量测试系统由控制主机和若干试验终端组成,如图 2 所示。试验终端就地放置在合并单元间隔或电能表屏柜处,采用 GPS 卫星定时,基于无线通信技术与主机交互数据。试验终端模拟互感器向被测合并单元输出模拟量及同步信号,同时接收合并单元输出的数字化采样,接收电能表输出的电能脉冲。现场测试时,首先在变电站相关间隔内就地布置试验终端,由终端向被测合并单元提供同步脉冲,模拟数字化跨间隔计量的采样同步方式;然后由远端主机下发试验配置,并同步触发所有终端输出测试信号,模拟不同间隔的采样源;最后试验开始后,终端持续采集测试反馈信号和输出模拟量,标记采样时间后上送至主机,远端主机汇总所有就地终端上送的试验数据,从误差分布、误差原因等多维角度检测分析被测系统的性能。

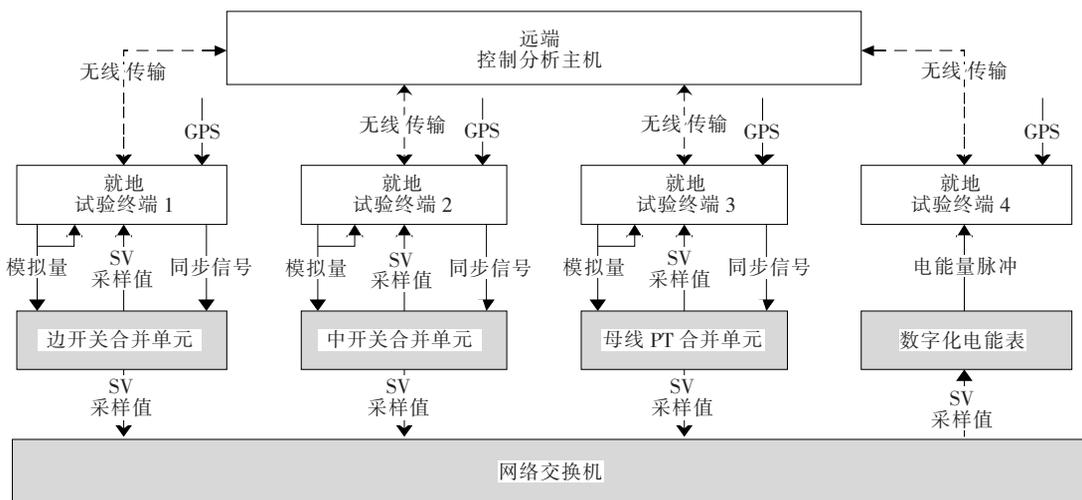


图 2 跨间隔计量现场测试系统

Figure 2 Field test system of multiple bay metering

2.2 多维电量计量分析

主机汇总所有终端上送数据后,计算被测系统各环节的电参量与电度量,如图 3 所示,从不同角度比对误差,实现多维的电量计量分析功能。

1) 误差环节检测。

主机回采各间隔终端的输出模拟量,计算标准电量 E_s ,与被测跨间隔计量系统电能表输出的电能脉冲电量 E_{ME} 比对,获取被测系统的电量计量总误差 δ_T ;接收各间隔合并单元输出的数字化采样,合

并计算等效电量 E_{MU} ,与 E_s 比对获取合并单元的等效电量计量误差 δ_{MU} ;接收交换机输出的数字化

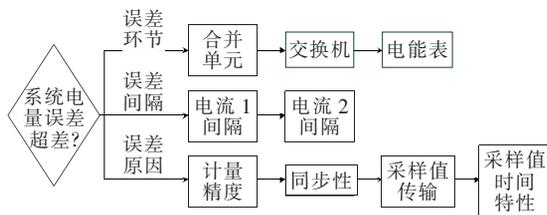


图 3 多维计量误差分析

Figure 3 Multidimensional error analysis of metering

采样,合并计算等效电量 E_{SW} ,与 E_{MU} 比对获取交换机的等效电量计量误差 δ_{SW} ;对比 E_{ME} 与 E_{SW} ,获取电能表的电量计量误差 δ_{ME} ,可评估被测系统电量计量误差的主要产生环节。

2) 误差间隔定位。

通过电流 1 间隔与电压间隔的数字化采样值,计算电流 1 间隔的等效电量 E_{T1} ,与由电流 1 回采模拟量计算的标准电量 E_{S1} 比对,获取间隔 1 的电量误差 δ_1 ;同理获取间隔 2 的电量误差 δ_2 。在变电站现场对跨间隔计量系统性能进行测试时,可直观地定位出计量异常的采样间隔。

3) 误差原因分析。

测试终端接收合并单元输出的数字化采样值,同时回采合并单元的输入模拟量,计算合并单元的比差、相差等计量传变精度。通过比较不同间隔数字化采样的相位关系,可判断间隔采样的同步性是否满足要求;通过监测数字化采样值传输,判断是否发生瞬时值跳变、采样丢点等异常;通过持续统计采样值报文,可获取采样报文的传输延迟与传输抖动等时间特性参数。

2.3 装置研制

按上述需求试制了跨间隔计量测试系统,如图 4 所示,测试系统的主机与终端均采用 FPGA 与 ARM 双处理器架构。FPGA 使用 Xilinx 的 Spartan-6 系列产品,基于 45 nm 低功耗工艺,具备高实时性的信号并发处理能力。测试系统通过 FPGA 驱动模拟量与数字量收发,获取 GPS 对时信号,同时与 ARM 交互数据。ARM 使用 NXP 的 i.MX 6 系列,基于 Cortex-A9 内核架构,接口丰富且容易操控。ARM 负责数据无线传输、测试流程控制、试验数据分析及人机交互。

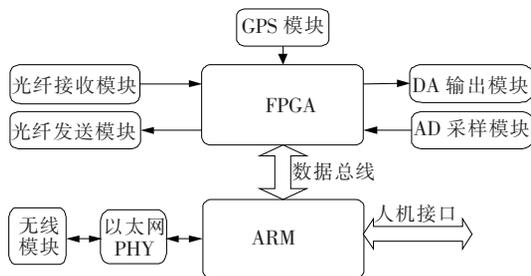


图 4 测试系统硬件架构

Figure 4 Hardware architecture of test system

测试系统可配置测试标准源、被测系统及电能表参数,实时监测装置运行与采样值传输状态,显示各间隔装置计量精度,分析被测系统的总体与局部电能计量误差。

3 关键技术研究

现场实施的分布式跨间隔电量测试,试验终端在被测采样间隔内就地放置,与主控设备相距较远,且终端需持续上传瞬时采样值及电量脉冲,通信流量较大,因此需基于无线局域网传输技术,采用 2.4 GHz 通信频段以获取较远的通信距离和良好的障碍穿透性^[10-11]。同时通过修正试验终端的内部时钟、精确控制信号的被动采样时刻以及采用后端高阶曲线拟合算法,最大程度提升测试结果的准确性。

3.1 分布时域的同步及锁定

终端监测 GPS 模块输出的 GPZDA 时钟报文,如图 5 所示。当接收到完整报头信息后,标记并补偿报文起始时间,计算报文接收间隔,微调系统时钟频率并对齐时钟相位;在数据帧接收完毕且校验正确后,预更新下帧对时报文的绝对时间。通过关联终端系统时钟与 GPS 卫星时钟,实现所有终端的就地高精度无线同步。

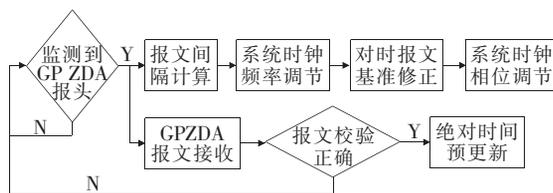


图 5 终端同步流程

Figure 5 Process of terminal synchronization

系统时钟的频率调节公式:

$$N_p = [T'_p + (T_{hr} - T'_{hr})] \times f_{clk} \quad (2)$$

式中 N_p 为系统频率计数器; T'_p 为前次系统时钟周期; T_{hr} 为该次对时报文头接收时刻(相对时间); T'_{hr} 为前次对时报文头接收时刻; f_{clk} 为系统晶振频率。

系统时钟的相位调节公式:

$$T_{adj} = \frac{N_p}{f_{clk}} + \left(T_{hr} - N_b \times \frac{1}{T_{br}} \right) \quad (3)$$

式中 T_{adj} 为相位对齐调节时间; T_p 为系统时钟周

期; T_{br} 为该次对时报文头接收时刻(相对时间); N_b 为对时报文头传输位数; T_{br} 为对时报文的传输波特率。

为防止 GPS 信号不稳定导致的终端时钟抖动, 终端内部需具备时钟锁定机制, 如图 6 所示, 当终端持续接收到有效的时钟报文后, 进入时钟同步状态; 在时钟同步状态下积累足够的时钟样本后, 若时钟信号消失, 则进入时钟锁定状态, 模拟外部时钟的频率继续保持软件时钟节拍。时钟同步状态与时钟锁定状态间插入时钟锁定预调状态, 在预调状态下, 将调节前时钟与调节后时钟的相位差平均分布, 并在若干周期内缓慢补偿, 可避免外部时钟与软件锁定时钟切换时出现时钟边沿跳变。

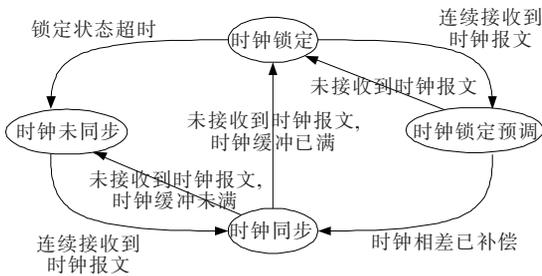


图 6 时钟锁定流程

Figure 6 Process of clock lock

时钟报文接收正常的判据:

$$\begin{cases} (P_b - P_o) < P_i < (P_b + P_o) \\ |P_i - 2P_{i-1} + P_{i-2}| < P_j \end{cases} \quad (4)$$

式中 P_i 为第 i 次时钟报文接收的间隔周期; P_b 为时钟报文的基准间隔周期; P_o 为每个间隔周期的晶振偏移补偿值; P_j 为时钟抖动阈值。

3.2 被动式采样的精确触发

基于闭环比对实现的计量校验技术, 对信号的回采精度要求较高。影响采样精度的主要因素包括: 采样时刻准确性、采样芯片(模块)指标和采样回路抗干扰设计。分布式测试系统需要同时控制多个终端采样, 各终端按照外部对时信号给定的节拍被动采集输入信号, 在终端装置的硬件方案确定后, 如何通过软件准确地触发信号的采样, 是提升系统测试精度的关键点。

信号采样时刻由 FPGA 控制。对于模拟量信号, FPGA 使用内部晶振对外部同步时钟的周期计

数, 并按采样率平均后获取每个采样周期的计数器。由于 FPGA 不易实现浮点运算, 为提高采样周期计数器的平滑度, 降低采样时刻波动对精度的影响, 设置计数器补偿值 N_{OF} , 即

$$\begin{cases} N_{OF-i} = 1, i \leq N_{rem} \\ N_{OF-i} = 0, N_{rem} < i \leq N_s \\ N_{rem} = N_p \% N_s \end{cases} \quad (5)$$

式中 N_{OF-i} 为第 i 个采样周期计数器补偿值; N_{rem} 为计数器均分余数; N_p 为同步时钟周期计数器; N_s 为每个同步周期内的采样点数。

每点的实际采样周期为

$$T_{S-i} = (N_p/N_s + N_{OF-i}) \times T_{clk} \quad (6)$$

式中 T_{S-i} 为第 i 点的采样周期; T_{clk} 为 FPGA 的时钟周期。

如图 7 所示, FPGA 控制采样触发时, 前 m 个采样周期内 N_{OF} 值为 1, 后续采样周期 N_{OF} 值为 0, 可实现跟随统一外部时钟节拍的同时, 各终端内部的采样时刻一致, 且相邻采样周期的间隔时间波动最小(最大波动 1 个 T_{clk})。

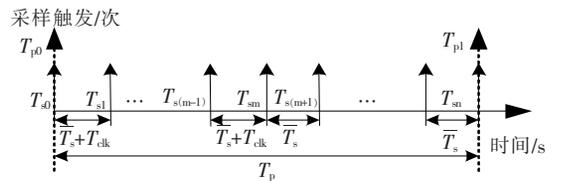


图 7 采样中断同步均分

Figure 7 Sample interrupt synchronization and equalization

模拟量采样时刻确定后, 以其为基准标定数字量信号的到达时刻, 并补偿数字化报文的起始符确认时间, 数字量实际采样时刻为

$$T_{rx} = T_{ad} + T_{dly} - N_{UM-st}/B_{D-rx} \quad (7)$$

式中 T_{rx} 为数字量采样时刻; T_{ad} 为模拟量采样的触发时间; T_{dly} 为数字量的相对到达时间; N_{UM-st} 为数字量报文的起始符位数; B_{D-rx} 为数字量报文的传输波特率。

3.3 采样值曲线拟合

就地终端的模拟量采样频率可达百 K 级, 但接入的合并单元数字量采样频率大部分只有 4 K。为提高系统校验精度, 准确获取数字信号的传输抖动、

延迟、跳变等性能误差,当测试数据上送主机后,由配套上位机采用高阶曲线拟合算法对数字信号重采样,将数字采样同步追溯至模拟采样时刻。

采用连续 4 点的分段 3 次样条拟合,如图 8 所示,由连续采样值 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 构建多个曲线区间,每段曲线由三次函数 F_m 描述,通过函数特征及边界条件,拟合采样值函数。

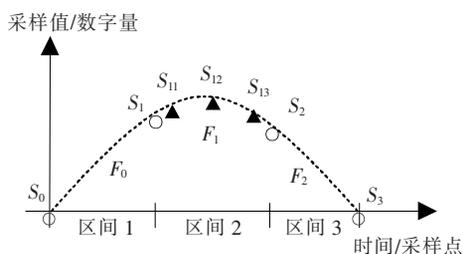


图 8 分段 3 次样条拟合

Figure 8 Subsection cubic spline fitting

每段采样值函数应满足条件:

$$\begin{cases} F_m(t_n) = S_n \\ F'_m(t_n) = F'_{m+1}(t_n) \\ F''_m(t_n) = F''_{m+1}(t_n) \end{cases} \quad (8)$$

式中 F_m 为三次函数表达式, $0 < m < 2$; t_n 为数字量采样时刻, $0 < n < 3$; S_n 为 t_n 时刻采样值。

曲线的端点处采用自由边界限定方式:

$$\begin{cases} F''_0(t_0) = 0 \\ F''_2(t_3) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

联立式(8)~(9)求解,获取拟合曲线 F_m ,可精确计算其上任意时刻的采样值。

4 实验室验证

用合并单元、交换机与电能表在实验室内搭建跨间隔电能计量体系,模拟变电站运行环境,对研制的测试系统功能进行验证,如图 9 所示,4 个试验终端分别接入合并单元及电能表,将主机与试验终端放置相距约 50 m。测试系统按照 MATLAB 仿真结果输出虚拟的采样数据,同时回采输出模拟量、合并单元数字量及电能脉冲量,分析被测系统的电能误差。合并单元与交换机之间还串接了报文控制器,可模拟采样报文异常或网络流量变化。

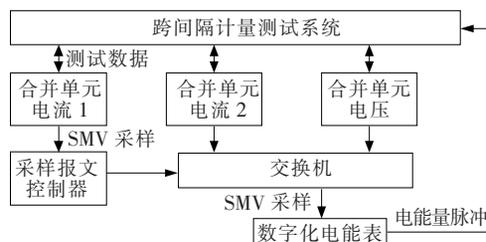


图 9 试验系统接线

Figure 9 Wiring of test system

1)装置计量精度试验。

向单体合并单元施加指定比例的二次工频模拟量,测试合并单元的计量准确度。输入电流比例由 0.01~1.2 In,统计合并单元(电流 1)各测点误差如表 1 所示。

表 1 合并单元准确度

Table 1 Accuracy of merging units

电流比例/In	比差平均值/%	角差平均值/(')	复合误差/%
0.01	-0.378 5	18.20	9.231 6
0.10	-0.052 8	1.55	1.782 2
1.00	-0.078 2	2.38	1.650 0
1.20	-0.063 3	2.30	1.348 7

向所有合并单元输出同步脉冲信号与测量采样值(电流或电压),检测跨间隔计量系统内部各环节(合并单元、电能表、整体)的等效电能误差。标准源采样的功率因数为 1,电能表有功脉冲常数为 20 imp/(MW·h),电流比例由 0.01 In 变化至 1.2 In,系统的正向有功电量误差如表 2 所示。

表 2 正向有功电量误差(cos φ=1.0)

Table 2 Error of forward active power(cos φ=1.0)

电流比例/In	总体误差/%	合并单元误差/%	电能表误差/%
0.01	+0.580	+0.565	-0.180
0.10	+0.195	+0.273	-0.133
1.00	-0.137	-0.071	-0.080
1.20	-0.104	-0.082	-0.087

2)跨间隔采样同步性试验。

断开测试系统向合并单元发送的同步脉冲信号,模拟跨间隔采样同步异常,测试其对电能表计量的影响。统计正向有功电量,电能表有功脉冲常数为 20 imp/(MW·h),试验数据如表 3 所示。

表 3 采样同步异常($\cos \varphi=1.0$)Table 3 Sampling synchronization anomaly($\cos \varphi=1.0$)

同步状态	电能表输出脉冲/个	总体误差/%
同步正常	100	+0.040
电流 1 间隔同步守时	100	-0.100
电流 1 间隔失步(15 min)	100	-1.636
所有间隔同步守时	100	+0.120
所有间隔失步(15 min)	100	-3.456

3) 采样稳定性试验。

通过报文控制器改变 SMV 采样报文传输的通道数据,模拟电流 1 合并单元输出采样的异常状况,测试其对跨间隔计量系统的影响。统计正向有功电量,电能表有功脉冲常数为 $20 \text{ imp}/(\text{MW} \cdot \text{h})$,试验数据如表 4 所示。

表 4 采样值异常($\cos \varphi=1.0$)Table 4 Sampling value anomaly ($\cos \varphi=1.0$)

采样异常状态	电能表输出脉冲/个	总体误差/%
饱和值(每周波 1 点)	100	+0.033
饱和值(每周波连续 5 点)	100	+0.116
丢点(每周波 1 点)	100	-0.009
丢点(每周波连续 5 点)	100	-0.065

通过报文控制器向交换机注入无效采样报文,调节网络负荷由 10% 变化至 90%,测试网络风暴对跨间隔电能计量的影响,统计正向有功电量误差变化曲线如图 10 所示。

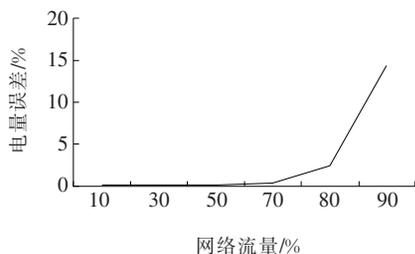


图 10 采样值网络流量测试

Figure 10 Network traffic test of sample value

由上述试验可知,基于无线同步控制的跨间隔电能多维测试平台具备分布式的模拟量输出与电能计量采集功能,结合标准源就地回采,可在变电站内进行高精度的跨间隔计量试验。平台具备模拟与数字、电参与电度、系统与局部等数据参量的比对功能,在不改变现场被测系统架构的前提下,可评估数字化电能计量系统的内部计量精度、采样同步性、采

样传输抗扰度、电量误差环节分布等指标,实现对跨间隔电能传输体系的综合性能测试。

5 结语

智能变电站跨间隔电能计量采用数字化采样及网络传输方式,传统测试手段无法满足变电站调试检修工作的需求,制约了数字化计量技术的发展。该文提出一种基于无线数据传输与同步的间隔化测试方法,有效解决了现场跨间隔电能测试的系统性与可实施性,为数字化计量测试技术提供了新思路。

数字化跨间隔电能计量的现有方案对合并单元同步及网络交换机的依赖度较高,实际工程中因此出现的问题较多。在提升测试技术的同时,可研究跨间隔数字化电能的精确计量方案,以期从源头上解决目前存在的问题。

参考文献:

- [1] 钱斌,蔡梓文,肖勇,等. 基于边缘计算的电表计量系统数据协同检测方案[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 145-152.
QIAN Bin, CAI Ziwen, XIAO Yong, et al. Data Collaborative detection scheme of electric metering system based on edge computing[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 145-152.
- [2] 周文斌,李红斌,蒋紫娟,等. 基于标准电能表高频脉冲的数字化电能表快速校验方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 125-131.
ZHOU Wenbin, LI Hongbin, JIANG Zijuan, et al. A fast calibration method of digital energy meter based on high frequency pulse of standard meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 125-131.
- [3] 叶远波,陈晓东,项忠华,等. 基于间隔 CRC 校验码的智能变电站改扩建配置文件定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 173-179.
YE Yuanbo, CHEN Xiaodong, XIANG Zhonghua, et al. Research on configuration file location of smart substation reconstruction and extension based on bay CRC code[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 173-179.
- [4] 于春平,白静芬,周建波,等. 基于 IEC 61850 的数字化电能计量二次设备远程校验技术[J]. 电测与仪表,

- 2019,56(4):135-141.
- YU Chunping, BAI Jingfen, ZHOU Jianbo, et al. Remote on-line calibration technology for digital metering secondary equipment based on IEC 61850[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4):135-141.
- [5] 李宝潭,赵丹,李宝伟,等.智能变电站在线防误系统关键技术的研究[J].智慧电力,2020,48(6):73-78+111.
- LI Baotan, ZHAO Dan, LI Baowei, et al. Key technologies of online error prevention system in smart substation[J]. Smart Power, 2020, 48(6):73-78+111.
- [6] 李泽文,杨京渝,彭曙蓉,等.智能电网高精度时间同步方法[J].电力科学与技术学报,2011,26(3):35-39.
- LI Zewen, YANG Jingyu, PENG Shurong, et al. High precision time synchronization method for smart grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(3):35-39.
- [7] 刘红军,管萸,朱玉锦,等.智能变电站间隔集群测控模式下的运维体系研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):159-165.
- LIU Hongjun, GUAN Ti, ZHU Yujin, et al. Research on operation-maintenance system of cluster measurement and control device for bay level in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7):159-165.
- [8] 魏伟,唐登平,李帆,等.数字化电能表较电子式电能表计量及检测差异性研究[J].电测与仪表,2020,57(23):126-134.
- WEI Wei, TANG Dengping, LI Fan, et al. Research on measurement and detection difference of digital input electricity meter compared with electronic watt-hour meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23):126-134.
- [9] 吕佳倍,孙伟卿,韩冬,等.基于GDP-电能消费耦合关系的中长期电量预测[J].电网与清洁能源,2019,35(1):1-7+15.
- LV Jiabei, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Medium and long term electricity forecasting based on gdp-electricity consumption coupling relationship[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1):1-7+15.
- [10] 任伟,徐子立,宋晓林,等.基于数据挖掘的配网数字化计量系统运行特性监测和评价方法研究[J].高压电器,2020,56(8):183-191.
- REN Wei, XU Zili, SONG Xiaolin, et al. On-site monitoring and evaluation method of operation characteristics of MV distribution digital metering system based on data mining technique[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):183-191.
- [11] 王红星,刘军成,李军,等.配电网电能质量监测数据简约方法探讨[J].电网与清洁能源,2020,36(6):8-12.
- WANG Hongxing, LIU Juncheng, LI Jun, et al. Discussion of power quality data aggregation method used in distribution power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(6):8-12.