DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190366

一种智能变电站监控信息自动验收系统的研究

陈月卿[1]，陈建洪[2]，邱建斌[1]，刘必晶[3]，杜 鹏[3]

(1. 国网福建省电力有限公司检修分公司，福建 福州 350003；2. 国网福建省电力有限公司，福建 福州 350003；3. 南京南瑞集团(北京)，北京 100192)

摘要：随着电力技术的发展，调度监控系统需要在智能变电站中采集大量的设备运行状态信息，导致信息接入验收的工作量非常大。现有的智能变电站监控信息自动验收系统只实现了从终端到主站的信号验收，无法实现整个信号的闭环实时传递。同时，变电站监控中频谱泄漏和栅栏效应会对采集的结果产生较大的影响。对此，基于IEC61850和多机多网并行校核理论，研究并开发了一套智能变电站监控信息的自动闭环验收系统，同时提出了一种基于全相位频谱矫正技术的高效变电站数据监测方法。依托某省电力公司的实际工程项目对提出的理论和方法进行了相关仿真和实验分析，验证了所提出方法的有效性和可行性。

关键词：智能变电站；监控系统；自动验收系统；频谱泄漏

Research on automatic acceptance system of monitoring information in a smart substation

CHEN Yueqing[1], CHEN Jianhong[2], QIU Jianbin[1], LIU Bijing[3], DU Peng[3]

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch, Fuzhou 350003, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 3. Nanjing NARI Group (Beijing), Beijing 100192, China)

Abstract: In power technology, the dispatching and monitoring system needs to collect a large number of equipment operational status information from the smart substation. This results in a large amount of work for information access and acceptance. The existing smart substation monitoring information automatic acceptance system only realizes the signal acceptance from the terminal to the main station, and cannot realize the closed-loop real-time transmission of the whole signal. At the same time, spectrum leakage and fence effects in substation monitoring will have a large impact on the results of the acquisition. Based on the IEC 61850 and multi-machine multi-network parallel checking theory, this paper researches an automatic closed-loop acceptance system for the monitoring information of intelligent substations, and at the same time proposes an efficient substation data monitoring method based on full-phase spectrum correction technology. Based on an actual engineering project in the power industry, a relevant simulation and experimental analysis are carried out on the proposed theory and method, and the effectiveness and feasibility of the proposed method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977039) and Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. (No. 52130A16C07).

Key words: smart substation; monitoring system; automatic acceptance system; spectrum leakage

0 引言

随着国家电网公司对智能变电站的推广，目前新建以及改扩建站基本上全部采用智能变电站方案。随着电力技术的发展，调度监控系统需要在智能变电站中采集大量的设备运行状态信息，包括一次设备状态数据、二次设备状态数据和辅助设备数据，导致信息接入验收的工作量非常大[1-2]。在工程调试阶段，由于技术手段和调试工具的缺失，远动信息对点工作主要依赖人工在主站端与厂站端之间通过实时通信方式进行。这样的调试模式需要逐个校验，主站、厂站工作人员需要时刻保持通信，不仅耗费大量的人力和时间，而且依赖现场保护、测

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51977039)；国网福建省电力有限公司科技项目资助(52130A16C07)

控等装置发送实际信号，往往会与厂站端的其他调试工作产生冲突，影响校验结果[3-4]。同时，目前远动对点工作需要在站内其他调试工作基本完成后开展，往往安排在工程调试末期，调试周期十分紧张，调试人员极易出现遗漏的情况[5]。因此，如何根据智能变电站的技术特点以及工程调试过程中遇到的技术、管理上的缺陷，研究出一套切实可行的信号验收系统，提高信号验收工作的效率，对加快智能变电站的建设具有重要意义。

现阶段关于智能变电站监控信息自动验收系统的研究和开发主要集中在两个方面[6-7]。一方面部分文献对基于 IEC61850 规约的数据源模拟自动定位与生成方面进行了相关研究[8-10]，或基于 IEC61580 对相关的检测方法进行了研究[11-12]；另一方面则对智能变电站监控信息自动验收系统进行了相关研究，但只实现了从终端到主站的信号验收，无法实现整个信号的闭环实时传递[13-15]。对于电力监控中的非同步采样带来的频谱泄露等现象，文献[16]考虑了信号的动态参数变化模型，采用泰勒级数展开得到时变条件下的频谱计算结果，虽然修正精度得到了提高，但增加了较大计算量。文献[17]对采样数据加窗处理后，通过最大谱线和次最大谱线比值建立了谱线与频率偏移率的等式。而文献[18]在此基础上进行拓展，得到了四谱线等插值方法，但计算复杂度和计算量也相应增加。

为了较好地实现监控信号的自动验收，本文基于 IEC61850 开发了一套智能变电站监控信息的自动验收系统，并研究了一种变电站监控的全相位频谱矫正技术。通过仿真和某电网公司的现场实验应用，验证了所提出的智能变电站监控信息自动验收系统的可行性和有效性。

1　系统体系结构和技术框架

智能变电站监控信息自动验收系统涉及调控主站、变电站及调度数据网传输等环节，变电站端功能遵循变电站一体化监控系统功能规范，信息交互遵循 DL/T860、DL/T634.5104 及 DL/T476 标准，体系结构如图 1 所示。如图中所示，设计的系统提供统一的通信接口，实现数据通信网关机的远动信息自动验证和数据通信网关机的转出数据自动触发。

调控主站端功能主要基于智能电网调度控制系统基础平台的模型管理、数据采集与交换、人机界面、权限管理等，并实现前置信息自动验证和监控画面自动验证[19-20]。其中的前置信息验证功能模块和监控画面信息验证功能模块集成于智能电网调度控制系统。

按照上述的软件功能需求规格，自动验收软件系统一共设计 8 个功能模块：用户权限管理、SCD 导入、转发表导入、扩展 104 通信、IEC61850 服务器模拟、自动验收管理功能、验收报告管理、人机界面。

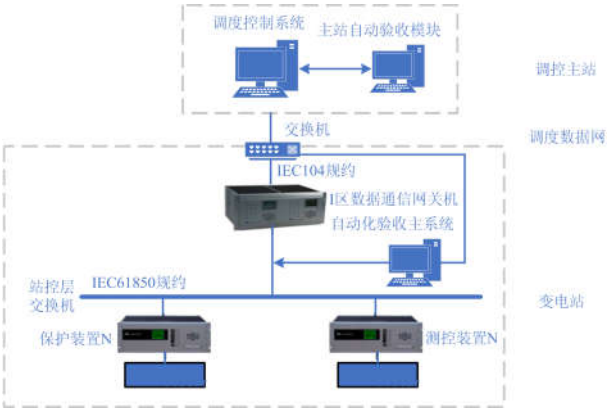


图 1 自动验收系统结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of automatic acceptance system

对上面提出的各个功能模块实现的功能具体分析，各个模块的作用如下。

(1) 用户权限管理。完成用户权限管理和认证，管理员可以编辑其他用户权限信息；用户权限验证通过后才可以进行对应的操作。

(2) SCD 导入。完成 SCD 模型导入和解析工作，导入之后进行校核并解析需要的相关数据。解析结果主要包括各个 IED 装置的 IP 地址、报告服务数据、遥控操作信息、定值服务数据。校核结果和解析的相关数据，由自动验收功能模块进行处理。

(3) 转发表导入。转发表导入模块完成转发表数据导入和数据匹配。转发表导入需要在 SCD 导入之后进行(由自动验收功能模块进行控制)，数据导入之后，进行数据匹配；数据匹配包括转发表遥测遥信信号与 SCD 数据的匹配、遥控信号与 SCD 控制信号的匹配、遥控信号与遥测遥信信号的匹配(控制对应测点)。相关数据由自动验收功能模块调用和处理。

(4) 扩展 104 通信模块。与调度主站和监控系统进行通信，将操作控制请求发送给对应的调度主站，接收调度主站返回的操作控制结果；接收各调度主站和监控系统回送的遥测、遥信信息。由自动验收功能模块调用和处理。

(5) IEC61850 服务器模拟。按照 SCD 解析的数据模拟装置通信，设置数据对应接口，由自动验收功能模块进行管理和置数。模拟全站全部 IED 装置。

(6) 验收功能模块。是整个验收功能的核心管理处理模块。完成自动验收相关配置管理、流程发起和管理、数据产生和审核校验；验收结果生成对应的验收报告，基于验收报告可二次发起相关验收流程。

(7) 验收报告。验收功能模块数据生成对应的验收报告，历史报告的导入导出和查询。

(8) HMI 人机界面。信息展示，信息内容和交互，只与验收功能模块和验收报告两者进行。

2　变电站监控数据全相位频谱矫正技术

对于电力系统的监控而言，数据主要分为历史和实时数据两类。而对于其中非常重要的实时数据，如何准确地对其进行测量就显得非常重要[21-23]。基于此，本文对变电站监控数据的全相位频谱矫正技术进行了深入研究。离散傅立叶变换 DFT 起源于傅立叶变换(Fourier Transform)，是数字信号处理中最常用的信号处理方式。傅立叶变换的特点是将时域和频域联系起来从不同角度对信号进行分析。

$$X(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x[n]*R(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n}=\sum_{n=0}^{N-1}x[n]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega n} \tag{1}$$

时域截取后信号 DTFT 的频谱仍是连续的，需要离散化才能被计算机处理。频域离散化对应时域的周期延拓，其计算公式为

$$X(k)=X(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})\Big|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k}=\sum_{n=0}^{N-1}x[n]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}nk}\quad n,k\in[0,N-1] \tag{2}$$

电力系统中的频率不是固定的，而是在额定值附近波动。当频率不再是额定频率时，由于数据窗周期长度仍然为 N，所以在数据窗周期内不再恰好包含一个完整的信号周期，此时变电站监控单元对采样序列进行周期性延拓时就会造成非同步采样情况的发生，如图 2 所示。

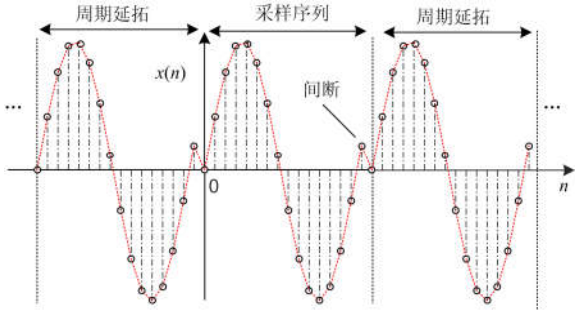


图 2 时域离散序列非同步采样周期延拓波形

Fig. 2 Time domain discrete sequence asynchronous sampling period extension waveform

非同步采样会给 DFT 的计算带来很大的影响，会产生频谱泄漏和栅栏效应，从而影响智能变电站监控数据的准确性和精度[23]。而且泄漏的程度与非同步采样下信号边界处波形的间断程度相关；间断程度越大，谱泄漏也越严重。

根据非同步采用时误差计算可以推导改进 DFT 模式下幅值的矫正公式为

$$\hat{X}_{\mathrm{pd}}=X_2'\Bigg/\left|\frac{\sin(\pi r)}{\sin(\frac{\pi r}{N})}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{\pi\hat{r}_{\mathrm{pd}}(N-1)}{N}}\left\{1+\frac{\sin(\pi\hat{r}_{\mathrm{pd}}/N)}{\sin[\pi(2+\hat{r}_{\mathrm{pd}})/N]}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\frac{2\pi}{N}-2\varphi_2')}\right\}\right| \tag{3}$$

为了增强谱间泄漏抑制能力，考虑采用汉宁窗进行处理，汉宁窗的频谱表达式为

$$W_{\mathrm{H}}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})=0.5W_{\mathrm{R}}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega})-0.25[W_{\mathrm{R}}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega-\frac{2\pi}{N-1})})+W_{\mathrm{R}}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega+\frac{2\pi}{N-1})})]=W_{\mathrm{H}}(\omega)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(N-1)\omega/2)} \tag{4}$$

式中：$W_{\mathrm{R}}(*)$ 为矩形窗的频谱函数；$W_{\mathrm{H}}(\omega)$ 为汉宁窗的幅度谱的表达式。加汉宁窗后非同步采样时的 DFT 下的计算公式为

$$\boldsymbol{X}\approx\frac{\sqrt{2}}{4}X\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\frac{\sin(\pi r)(1-1/N)}{\sin(\pi r/N)(1-r^2)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{N-1}{N}\pi r} \tag{5}$$

则全相位 DFT 谱的计算公式为

$$\boldsymbol{X}\approx\frac{\sqrt{2}}{4}X\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\left|\frac{\sin(\pi r)(1-1/N)}{\sin(\pi r/N)(1-r^2)}\right|^2 \tag{6}$$

根据 GB/T 26862-2011 检测规范，在无谐波分量的情况下要求频率测量误差不大于 0.002 Hz，幅值测量误差应不大于 0.2%。论文根据相位差 DFT 算法(pd)和全相位 DFT 算法(ap)做了相关仿真，图 3 为利用 pd 算法和 ap 算法在频率为 49.5 Hz 时的频率跟踪结果曲线图，图 4 为利用 pd 算法和 ap 算法在频率为 50.5 Hz 时的频率跟踪结果。由图可知，两种

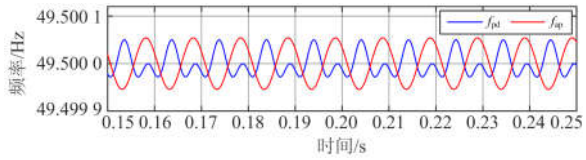


图 3 频率为 49.5 Hz 时频率跟踪曲线图

Fig. 3 Frequency tracking curve at frequency 49.5 Hz

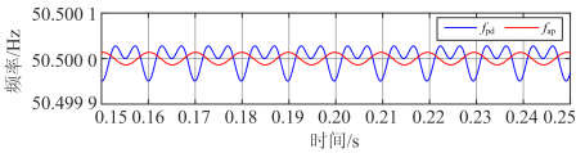


图 4 频率为 50.5 Hz 时频率跟踪曲线图

Fig. 4 Frequency tracking curve at frequency 50.5 Hz

算法在0.5 Hz偏移时频率跟踪误差都小于0.000 5 Hz，能满足国家技术规范的要求。

对于频率跳变，考虑最糟糕的情况，设置信号频率在 t=1 s 时由 49.5 Hz 跳变至 50.5 Hz，得到了如图 5 所示结果。在 t=1 s 附近，两种算法都能检测到频率的跳变，通过对比发现 pd 算法的频率跟踪更及时，实时性能更好。这是因为 DFT 计算时 ap 算法需要的序列长度为 $2N$–1，在频率稳定时 ap 算法的跟踪精度更高，可以控制在 0.003 Hz 以内。

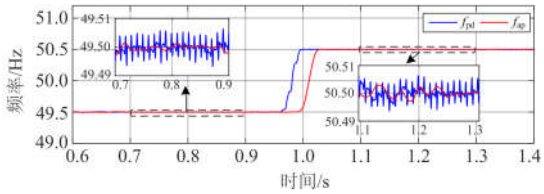


图 5 频率跳变时频率跟踪结果

Fig. 5 Frequency tracking result during frequency hopping

利用实际的测试单元对福建电网的数据进行测试，结果如图 6 所示。测试结果表明，本文提出的方法在输入频率发生变化时变电站监控装置也能保证较高的测量精度。

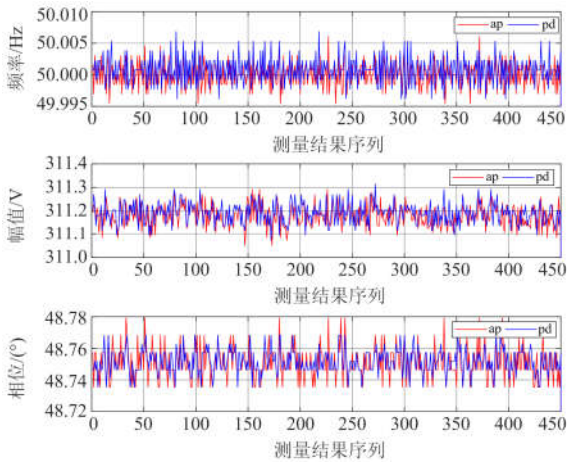


图 6 实际测试验证结果

Fig. 6 Actual test verification results

3　基于 IEC61850 规约的验收系统设计

随着智能化变电站的推广和发展，关于智能变电站调试技术的研究也越来越多。目前有关信号自动对点方面的文献，主要有两种方案。一种是采用闭环方案，用自动验收系统进行 IEC 61850 信号模拟，并保存发送的信号记录，调度收到信号后保存接收的信号记录，待信号全部发送完成后再离线将信号接收记录文件发送给自动验收系统，自动验收系统最后将两张记录表进行比对，输出报告。另外一种如图 7 所示，信号仿真系统按全信号表模拟发送信号，并保存记录；后台、模拟主站在收到信号后均进行保存，生成相应的记录文件；待完成信号模拟后，将仿真工具记录文件、监控后台记录文件、模拟主站记录文件以及调控信息表同时导入多数据源离线处理工具，进行比对。

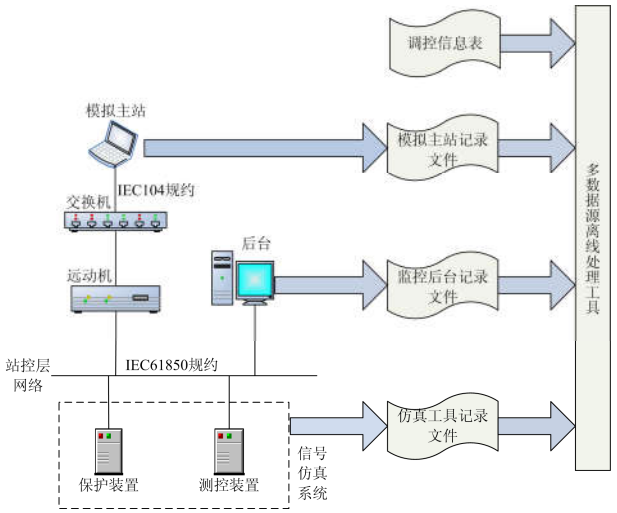


图 7 非闭环自动验收系统

Fig. 7 Non-closed loop automatic acceptance system

图 7 中的自动验收系统方案未形成闭环，但该方案中的调控信息表是一张存放调度信号与监控后台信号对应关系的表，只有国网少数地区存在，只能在具备条件的地区开展。因此该项目在制定方案时，充分考虑到现有方案的优缺点，最终选择了实时全闭环的实施方案。为此，需增加一路 104 通道，用于主站自动验收模块与变电站侧的自动验收系统之间扩展 104 规约的传输，如图 8 所示。自动验收系统在收到主站自动验收模块发送的三遥信号仿真命令后，按调度点表顺序触发仿真信号，这些信号通过远动机上送到调度控制系统，主站自动验收模块再将接收到的信号通过扩展 104 通道回传给自动验收系统，自动验收系统将发送的信号与接收的信号进行比对，得到比对结果，再将结果传送给主站自动验收模块。

采用这种方案的好处可以实现信号从源点到终点最后再回到源点的闭环过程，同时信号验收是逐个完成的，完全模拟实际信号对点的过程，因此该方案具有较好的创新性。为实现调度主站与变电站综自系统上、下行数据自动闭环联调功能，主站自动验收模块与变电站侧自动验收系统信息交互在不改变 IEC104 协议的帧结构和通信流程的前提下，

对现有 IEC104 规约进行扩展，选定扩展 IEC104 ASDU 156 用于自动闭环联调功能，以满足自动闭环联调过程中的上行信号自动复核功能和下行信号自动校核功能。

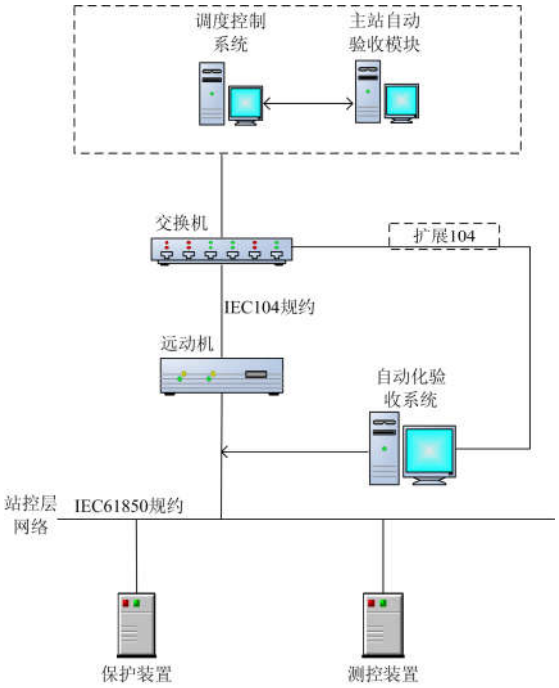


图 8 提出的闭环自动验收系统研发方案

Fig. 8 Proposed closed-loop automatic acceptance system

扩展监控信息核对自动闭环联调请求报文，用于调度主站与变电站综自系统间自动闭环联调功能的建立与终止。自动闭环联调请求报文的扩展字段主要包括：

(1) 类型标识：选定扩展类型 156(0x9C)用于标识监控信息核对自动闭环联调报文。

(2) 自动闭环联调限定词：扩展自动闭环联调限定词字段，用于区分自动闭环联调报文类型。类型 100(0x64)用于表示自动闭环请求报文。

(3) 主站地址：扩展主站地址字段，用于设定监控信息核对过程中调度主站用于联调的服务器地址。

(4) 厂站地址：扩展厂站地址字段，用于设定监控信息核对过程中变电站用于联调的服务器地址。

(5) 联调密码：扩展联调密码字段，用于对监控信息核对过程进行防误操作监控，验证密码正确后才能进行联调。自动闭环联调请求报文详细帧格式如表 1 所示。

扩展监控信息核对自动闭环联调数据报文，用于调度主站与变电站综自系统间自动闭环联调遥测、遥信、遥控、遥调数据报文的传输。自动闭环联调数据报文的扩展字段主要包括：

(1) 类型标识：选定扩展类型 156(0x9C)用于标识监控信息核对自动闭环联调报文。

(2) 自动闭环联调限定词：扩展自动闭环联调限定词字段，用于区分自动闭环联调报文类型。

(3) 信息体描述：扩展信息体描述字段，用于传输满足五级命名的测点中文描述信息。

(4) 校核结果：扩展校核结果字段，用于传递当前监控信息核对自动闭环联调数据是否成功。

自动闭环联调数据报文详细帧格式如表 2 所示。

表 1 自动闭环请求报文格式

Table 1 Automatic closed loop request message format

报文内容	说明
应用规约控制单元	六个字节
类型标识	156(0x9C)：自动闭环联调帧
可变结构限定词	一个字节
传输原因	6(0x06)：激活
	7(0x07)：激活确认
	10(0x0a)：激活结束
公共地址	两个字节
自动闭环联调限定词	100(0x64)：自动闭环联调请求
信息体地址	三个字节
信息体值	一个字节
主站地址	ip，四个字节
厂站地址	ip，四个字节
联调密码	防误操作密码，十六个字节

表 2 自动闭环联调数据报文格式

Table 2 Automatic closed loop joint tuning data message format

报文内容	说明
应用规约控制单元	六个字节
类型标识	156(0x9C)：自动闭环联调帧
可变结构限定词	一个字节
传输原因	20(0x14)：响应总召
公共地址	两个字节
自动闭环联调限定词	1(0x01)：遥信校核
	3(0x03)：遥信校核
	9(0x09)：遥测校核
	13(0x0d)：遥测校核
	46(0x2e)：遥控/遥调校核
信息体地址	三个字节
信息体值	对应类型数据值
信息体描述	满足五级命名的中文描述信息
校核结果	0：数据上送
	1：校核成功
	2：校核失败

自动验收系统中信号流程分上行信号及下行信号，上行信号指遥测遥信，下行信号指遥控。上行信号的流程如图 9，图中调控主站未来态即主站自

动验收模块，站端自动联调平台即为变电站侧自动验收系统，上行信号自动联调流程详细描述如下：

(1) 站端自动联调平台发起联调请求；

(2) 调控主站未来态收到请求并确认，联调开始；

(3) 站端自动联调平台的数据源模拟与定位模块按照调度点表顺序模拟发送第一个点；

(4) 信号经过远动机送到调控主站，调控主站再转发给调控主站未来态，该过程中主要传递的是信号在点表中的点号以及值；

(5) 调控主站未来态收到点号后，在调度点表中查找该点对应的信号名称，然后再通过扩展 104 规约中定义的方式将信号名称与值传给站端自动联调平台；

(6) 站端自动联调平台收到信号名称和值后，将其与(3)中发送的信号名称与值进行校核比对，得出校核结果，并将校核结果传给调控主站未来态；

(7) 站端自动联调平台开始发送第二个点，重复(3)至(6)中的过程，直到最后一个点校核完成；

(8) 联调结束。

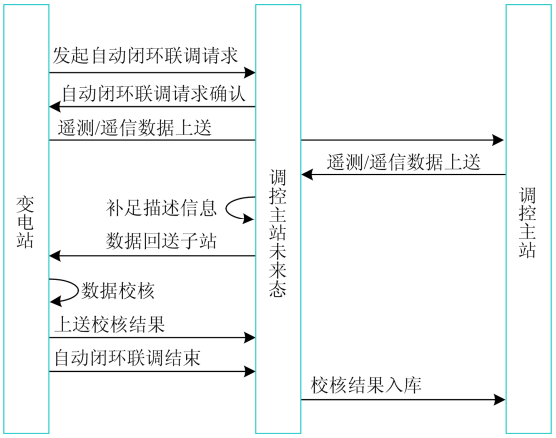


图 9　上行信号的流程图

Fig. 9 Flow chart of upstream signal

下行信号自动联调流程和上行信号自动联调流程相似，具体如图 10 所示。

在实际对点过程中，主站与站端的工作人员主要是通过实时通信的方式进行工作，对于站端发送的信号与主站接收的信号是否一致，则是通过信号名称来识别。由于主站信号名称与站端信号名称通常不可能严格一致，例如站端的信号名称为“301 开关位置”，主站对应的名称为“301 断路器位置”，这种字符上虽然存在差异，但表达的是一个意思，由于人的理解能力，不会产生歧义。但是自动验收系统中，这种信号名称的差异，通过机器来识别就存在很大的问题。

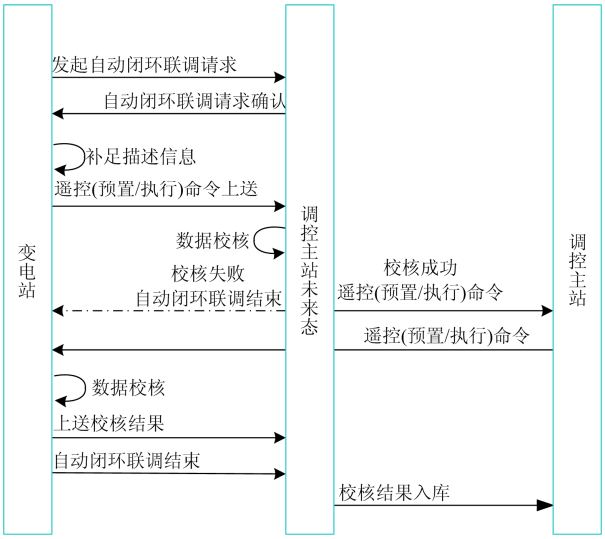


图 10　下行信号的流程图

Fig. 10 Flow chart of downstream signal

在目前存在的自动验收系统中，有的通过点号来匹配站端发送的信号与主站接收的信号，这种做法不能验收远动机配置信息的正确性；有的是先将调度点表与远动机的转发表先通过人工比对的方式，但增加了工作的复杂度。经过多次测试，本论文最终确定了更改 SCD 信号名称使其与调度点表名称保持完全一致的方案，在实验室测试及后续的工程应用中，这种方案均通过了考验，并取得了较好的效果。

同时，采用了如图 11 所示的方案来提高精度和准确性，即调度主站与变电站综自系统多机多网的并行纵向核对和横向对比。其功能支持多端口、多

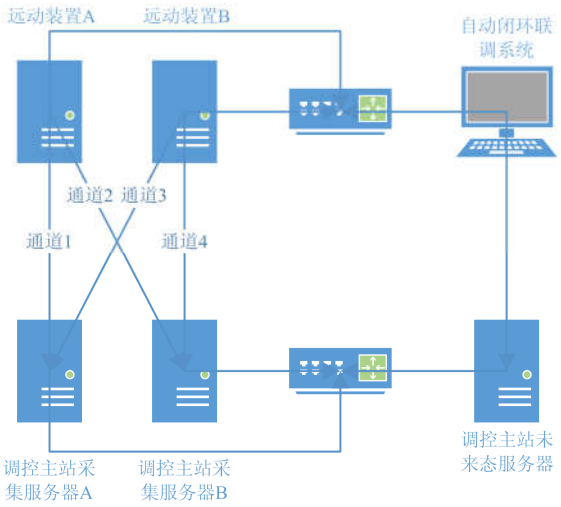


图 11　多机多网的并行核对和比较

Fig. 11 Parallel comparison of multiple machines and multiple networks

通道的数据和文本信息交互，通道 1、通道 2、通道 3、通道 4 的远动机与调控主站采集服务器对应关系，依次向调控主站未来态发送自动闭环联调请求报文。调控主站未来态确认各条通道的运行情况后依次返回自动闭环联调请求确认报文至变电站综自系统，联调建立成功。

依据本文方案设计的智能变电站监控信息自动验收系统已在某电业局所辖的多个智能化变电站得到应用，经验收各项技术指标和经济指标都达到了目标：使用该系统对调度点表信号进行自动核对，在很短的时间内完成了核对工作，能够节约调试时间 60%以上。一座 110 kV 智能化变电站信号验收工作即可节约成本 5 000 多元，而且信号核对结果的正确率达到 100%，取得了较为满意的效果。

4　结论

新建及改扩建智能变电站信号对点工作量大、耗时长、周期紧张且容易出纰漏。针对这一长期困扰变电站调试工作的难题，本文进行了深入的研究并开发了一套智能变电站监控信息自动验收系统。相比现有的验收系统，其优势主要在于：

(1) 为了保证信号自动核对工作的准确性和及时性，本文采用了全闭环的方案，信号实现了从站端自动验收系统到远动机到主站，最后回到站端自动验收系统的全闭环传输。

(2) 针对变电站监控单元中的非同步采样现象，提出了基于传统 DFT 和全相位 DFT 的双模改进算法并进行仿真和实验研究，验证了提出方法的有效性。

(3) 通过导入全站的 SCD 文件，自动读取各间隔层设备的装置参数、“四遥”信息，然后模拟间隔层设备与站控层设备、远动机进行 IEC61850 通信，研发了基于 IEC61850 规约的数据源模拟自动定位与生成技术。

参考文献

[1] 许铁峰, 徐习东. 高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 121-125.
XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.

[2] 李志勇, 孙发恩, 瞿晓宏. 智能变电站综合测试仪的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 149-154.
LI Zhiyong, SUN Fa’en, QU Xiaohong. Research and implementation of integrated tester for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 149-154.

[3] 林孝斌, 江浩侠, 胡金磊, 等. 面向变电站安全监控的视频智能终端布点优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 146-152.
LIN Xiaobin, JIANG Haoxia, HU Jinlei, et al. Layout optimization of video intelligent terminal for substation safety monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 146-152.

[4] 高峰. 变电站监控信息接入自动验收方法研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(21): 151-155.
GAO Feng. Research on automatic acceptance method for substation monitoring information access[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(21): 151-155.

[5] 邹俊雄, 黄成巧, 张延旭, 等. 智能变电站通信网络虚拟局域网建模与优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 137-142.
ZOU Junxiong, HUANG Chengqiao, ZHANG Yanxu, et al. Modelling and optimization of VLAN for smart substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 137-142.

[6] 彭志强, 张琦兵. 电网调度自动化系统信息品质分析新方法及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 150-157.
PENG Zhiqiang, ZHANG Qibing. A new method of information quality analysis of power grid dispatching automation system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 150-157.

[7] 王丽华, 张青山, 张马龙, 等. IEC 61850 建模工具的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 73-76.
WANG Lihua, ZHANG Qingshan, ZHANG Malong, et al. Design and implementation of IEC 61850 modeling tool[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 73-76.

[8] 唐喜, 任雁铭, 孟岩. 基于 IEC 61850 的数字化变电站服务器端模拟系统及实现[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 46-49, 111.
TANG Xi, REN Yanming, MENG Yan. A server-side simulation system for digital substation based on IEC 61850 and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 46-49, 111.

[9] 张青青, 韦良, 苏文博. 基于 IEC61850 报文模拟及分析技术的智能开关调测[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 91-95, 101.

ZHANG Qingqing, WEI Liang, SU Wenbo. Intelligent switch tuning based on IEC61850 message simulation and analysis technology[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 91-95, 101.

[10] 邵清华. 基于IEC61850的智能配电终端的研究和应用[D]. 济南: 山东大学, 2013.
SHAO Qinghua. Research and application of intelligent distribution terminal based on IEC61850[D]. Jinan: Shandong University, 2013.

[11] 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.

[12] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 121-135. DOI: 10.1186/s41601-019-0123-7.

[13] 陆路, 杜积贵, 全思平, 等. 变电站遥信功能自动校验系统[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 40-43.
LU Lu, DU Jigui, QUAN Siping, et al. Automatic verification system of telecommunication function in substations[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2): 40-43.

[14] 刘宏君, 高旭, 杜丽艳, 等. 智能变电站 SCD 文件管控系统模块化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 154-159.
LIU Hongjun, GAO Xu, DU Liyan, et al. Modular design of intelligent substation SCD file management and control system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):154-159.

[15] 王志平, 王博. 变电站计算机监控系统性能指标检测应用分析[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 2): 325-328.
WANG Zhiping, W ANG Bo. Application and analysis of performance indicators of substation computer monitoring system[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 325-328.

[16] MAI R K, HE Z Y, FU L, et al. A dynamic synchrophasor estimation algorithm for online application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 570-578.

[17] PELEKIS M, KRISHNAN K. Enhanced interpolated-DFT for synchrophasor estimation in FPGAs: theory, implementation, and validation of a PMU prototype[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(12): 2824-2836.

[18] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-71.
LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-71.

[19] 林俊, 胡华威. 智能变电站中基于 CAD 的图形化模型设计软件开发方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 142-148.
LIN Jun, HU Huawei. A CAD-based graphical model design software development scheme for intelligent substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 142-148.

[20] 韩小军, 蔡东升, 黄琦, 等. 基于 IEC104 远动规约的智能变电站辅助平台测试系统设计与实现[J]. 电测与仪表, 2014, 51(14): 104-109.
HAN Xiaojun, CAI Dongsheng, HUANG Qi, et al. Design and implementation of intelligent substation auxiliary platform test system based on IEC104 telecontrol protocol[J]. Electrical Measurement& Instrumentation, 2014, 51(14): 104-109.

[21] JIN Tao, LIU Siyi, FLESCH R C C, et al. A method for the identification of low frequency oscillation modes in power systems subjected to noise[J]. Applied Energy, 2017, 206: 1379-1392.

[22] MALLIKARJUNA B, SHANMUKESH P, ANMOL D, et al. PMU based adaptive zone settings of distance relays for protection of multi-terminal transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 126-140. DOI: 10.1186/s41601-018-0087-z.

[23] SU Taixin, YANG Mingfa, JIN Tao, et al. A novel power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 12: 953-961.

收稿日期：2019-06-02； 修回日期：2019-10-01

作者简介：

陈月卿(1973—)，女，高级工程师/高级技师，长期从事超高压电网继电保护及自动化专业技术管理，主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 姜新丽)