

基于电力系统网络通信安全的时间同步 装置监测与评估技术研究

黎亦凡, 陈曦, 杨熙载, 司恒斌, 庞冰瑶, 胡浩瀚
(国网陕西省电力有限公司信息通信公司, 西安 710004)

摘要: 在电力系统中, 时间同步装置的异常运行可能导致监测精度偏差与实际偏差较大, 从而影响整体监测效果。为解决这一问题, 文中提出了基于电力系统网络通信安全的时间同步装置监测与评估技术研究与实现。所提方法通过设计硬件与软件模块, 实现对电力系统时间同步装置的监测和评估。在硬件设计方面, 文中方法设计了系统授权模块、参数管理模块、管理单元模块和主时钟监测硬件模块等关键模块。这些模块协同工作, 提供了对时间同步装置的全面监测和管理能力。同时, 在主时钟监测硬件模块的基础上, 进一步设计了系统软件部分, 定时采集电力系统的时间信息参数, 并通过异常识别软件对装置故障进行及时识别。此外, 根据识别结果, 结合设备自检程序、查询程序、通信接口程序及循环显示程序, 实现了电力二次设备时间同步的监测功能。实验结果表明, 文中方法监测出的精度偏差与实际偏差相差不大于 1 ms, 评估结果与实际结果一致。

关键词: 电力系统时间同步装置; 系统设计; 监测系统评估; 评估函数; 通信安全

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.05.011

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)05-0101-09

Research on monitoring and evaluation technology of time synchronization device based on power system network communication security

LI Yifan, CHEN Xi, YANG Xizai, SI Hengbin, PANG Bingyao, HU Haohan
(Information Communication Company, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710004, China)

Abstract: In the power system, abnormal operation of time synchronization devices may lead to significant deviation between monitoring accuracy and actual situation, thereby affecting the overall monitoring effect. To address this issue, this paper proposes the research and implementation of time synchronization device monitoring and evaluation technology based on power system network communication security. This method achieves monitoring and evaluation of power system time synchronization devices by designing hardware and software modules. In terms of hardware design, this paper proposes key modules such as system authorization module, parameter management module, management unit module, and main clock monitoring hardware module. These modules work together to provide comprehensive monitoring and management capabilities for time synchronization devices. At the same time, based on the main clock monitoring hardware module, the system software part is further designed to collect time information parameters of the power system at regular intervals, and to timely identify device faults through anomaly recognition software. In addition, based on the identification results, combined with the device self check program, query program, communication interface program, and cyclic display program, the monitoring function of time synchronization for power secondary equipment is achieved. The experimental results show that the accuracy deviation monitored by this method does not differ by more than 1 millisecond from the actual deviation, and the evaluation results are consistent with the actual results.

Keywords: power system time synchronization device, system design, monitoring system evaluation, evaluation function, communication security

基金项目: 国网陕西省电力有限公司科技项目 (5226-XT 220003)

0 引言

现如今在我国整体趋势快速发展的情况下, 电

力系统迅速崛起,系统时间同步技术也在不断地更新换代,使电力系统本身也具备了一定的成熟性^[1-2]。随着电力系统的发展和智能化程度的提高,时间同步装置在保证电力系统正常运行和数据准确性方面扮演着至关重要的角色^[3-5]。然而,传统的时间同步装置在运行期间存在异常问题,导致监测精度偏差与实际偏差相差较大,给电力系统带来了一定的影响。时间同步装置在电力系统中主要分成两部分,一种是使时钟与国际标准时间相同步,另一种是令电力系统内部结构保持同步,由此可见系统时间同步装置在电力系统中占据核心地位。随着全球各地电网系统的普遍推广,电力系统对时间同步装置的实时性及稳定性有着新高度的要求^[6-8]。在电力系统应用过程中,时间同步装置异常会严重影响到系统的正常运行,针对这一问题,需要对电力系统时间同步装置监测与评估技术开展研究。

文献[9]提出智能变电站时间同步与时间同步监测集成装置的研制及应用方法,该方法首先在系统内设计了多种功能模块及软件流程,结合设计结果与主站端软件系统,实现时间同步装置监测。文献[10]提出基于统一信息模型的时间同步在线监测技术方法,该方法设定时间同步监测方案,以此构建时间同步监测主子站和电站,并结合监测技术设计系统,实现时间同步在线监测。文献[11]提出基于 iMx6UL 与时钟同步技术的微震监测系统设计方法,首先在系统内设计了一个 ARM 处理器,利用处理器与主控微控制单元(microcontroller unit, MCU)相结合,并将 Linux 作为操作系统,与采集芯片结合后共同对系统内部的网络通信数据信息进行采集,通过打印同步时间戳、网络通信数据传输及网络通信数据定位计算,实现系统监测。但是上述三种方法进行电力系统时间同步装置监测的过程中,不能识别装置在运行期间出现的异常故障,致使监测出的精度偏差与实际偏差相差较大,评估结果与实际结果不一致。

网络通信安全在当今数字化时代的重要性日益突出^[12]。保护个人隐私、防止网络通信数据泄露、阻止网络攻击、保护商业机密和知识产权以及维护国家安全,这些方面都凸显了网络通信安全的不可或缺性^[13]。随着互联网和计算机网络的广泛应用,越来越依赖于网络传输各种敏感信息^[14]。网络通信安全通过加密、认证和其他安全措施,确保

这些信息不受未经授权的访问、窃取或篡改,从而保护个人、企业和政府机构的利益和声誉^[15]。此外,网络通信安全还对于维护国家的安全和稳定至关重要,可以防止敌对势力对国家进行网络攻击、渗透或干扰^[16]。因此,应高度重视网络通信安全,并采取适当的措施来确保网络通信的安全性和可靠性。为了解决上述方法中存在的问题,提出基于电力系统网络通信安全的时间同步装置监测与评估技术研究,通过设计硬件和软件模块,结合设备自检程序、查询程序、通信接口程序和循环显示程序,实现对电力系统时间同步装置的监测和评估。

1 电力系统二次设备时间同步监测系统设计

1.1 硬件设计

时间同步装置在电力系统中主要受到电力系统授时管理,而电力系统也由授时管理人员管理,以此在完整的站点建立系统认证、参数设置、修改查询、时间同步监测等多种功能。从可视化角度出发,实现电力系统硬件的运行操作,完成电力系统时间同步装置监测。

从多功能角度出发,构建电力系统时间同步装置监测系统硬件架构^[17],如图 1 所示。

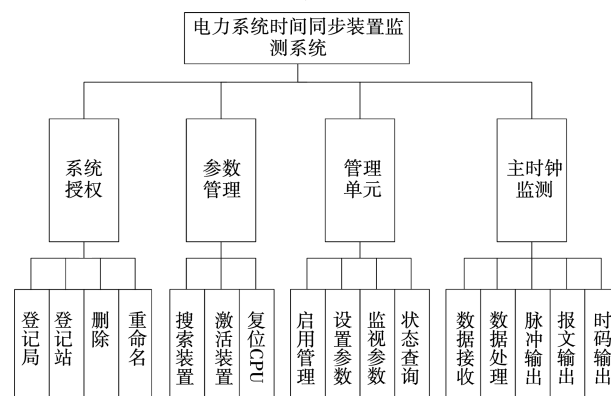


图 1 电力系统时间同步装置系统硬件架构

Fig. 1 Hardware architecture of the time synchronization device in power system

1) 系统授权模块。

在使用本文监测系统前,首先要对管理主时钟的计算机进行确认,确认无误后进入计算机主界面,根据系统设置,进行菜单登记。菜单上会显示登记局、登记站、删除、重命名四种设置,按照自身需求登记新局后,需要再次建立新的站点名称,便于监测和查询。建立完成后即可登记新局站点,点击站点菜单搜索电力系统时间同步装置,选择电机需要连接的装置名称,即可实现时间同步装置监

测,完成电力系统时间同步装置监测授权。

2) 参数管理模块。

电力系统中参数管理单元要与计算机处于同一 IP 地址,模块中系统装置用于时钟装置,通过对输入 IP 地址的查找,将其添加到指定的位置后连接。当系统内部的 ALM 装置熄灭,则说明成功激活该装置,反之则失败。操作完成后初始化设置,接着重新复位中央处理器(central processing unit, CPU),并在复位后初始化密码,实现电力系统参数管理。

3) 管理单元模块。

本文监测系统中的管理单元模块主要用来查看系统内部设定的参数,如初始参数的设置及修改、在线及脱机参数的查看等。通过以上电力系统时间同步装置监测的授权,进入到电力系统时间同步装置在线参数设置界面后,打开管理单元功能,即可发现下方有多种参数查看方式,随机选取自己想要的方式即可实现参数查取。该模块还可以修改网络基本参数、UDP 参数、串口参数等,这些操作都可在参数设置界面中实现,从而实现电力系统时间同步装置状态查询。

4) 主时钟监测硬件模块。

时间同步装置主要由管理单元、主时钟、信号传输通道、设备接口等构建而成,主要安置在主站控制室。主时钟监测硬件模块在时间同步监测系统中发挥着重要作用,负责接收外部时间基准信号,保证信号在输入输出过程中的准确性,还可以监视时钟站点时间信息及时间同步的状况,更加有利于电力系统时间同步装置的监测。

根据以上描述,设计主时钟同步装置监测硬件功能模块及各个模块内部电路板排版,如图 2 所示。

从图 2 中可见,主时钟硬件模块主要由五个子模块构成,且每个子模块都有属于自己的内部电路板。为满足监测网络通信数据输入及输出的需求,各个子模块中都要由相应的功能插板组合而成。背板通常由电源板、微处理器、报文输出模块、信号输出板等构成,这些背板组合后即可实现主时钟信号的接收、网络通信数据处理、脉冲输出、时间报文输出、时码输出等,有效实现电力系统时间同步装置监测。例如主时钟网络通信数据接收子模块接收到时间信息及脉冲信号后,将其输送到网络通信数据处理子模块中的 FPGA 内,在通过 FPGA 对网

络通信数据信息进行读取及编码,并对网络通信数据实施脉冲输出、报文输出、时码输出,即可完成时间信息网络通信数据监测。同时主时钟硬件子模块内部背板可随意搭配,依据实际需求灵活增添删减实现监测信号的输入及输出。

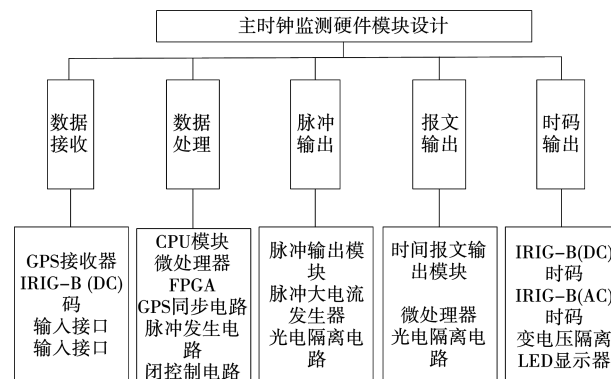


图 2 主时钟监测硬件模块结构图

Fig. 2 Structure diagram of the main clock monitoring hardware module

1.2 软件设计

针对建立的主时钟硬件模块,在该模块内设计软件,从而实现电力系统时间同步装置监测系统整体设计。

1.2.1 网络通信数据定时采集软件设计

结合主时钟监测硬件模块,定时采集电力系统的时间信息参数,便于后续对电力系统时间同步装置的监测,为此在确定任务建立前,设定电力系统采样频率,详细采集任务功能流程如图 3 所示。

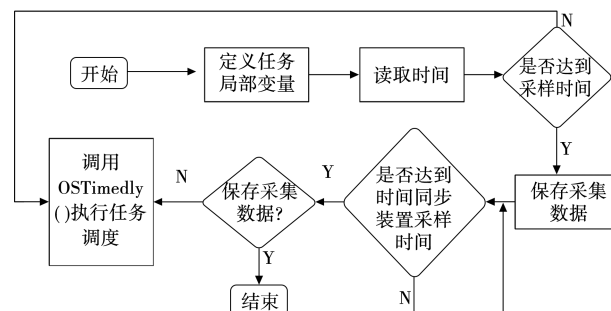


图 3 网络通信数据定时采集流程

Fig. 3 Timed data acquisition process of network communication

1.2.2 异常识别软件设计

为避免检测装置在运行期间出现异常,所以设计了异常识别软件,以便在装置出现异常后,及时对装置故障进行识别,其软件设计流程如图 4 所示。

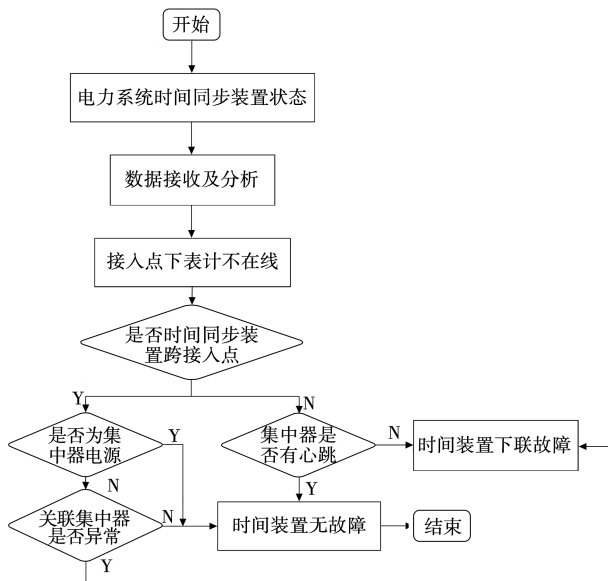


图 4 异常识别流程

Fig. 4 Abnormal identification process

1.2.3 电力系统二次设备时间同步监测软件设计

监测软件由多个程序构成,且各个程序之间所完成的监测任务不同。通过设计设备自检程序、查询程序、通信接口程序、循环显示程序的结合,实现电力二次设备时间同步监测软件的设计,具体监测流程如图 5 所示。

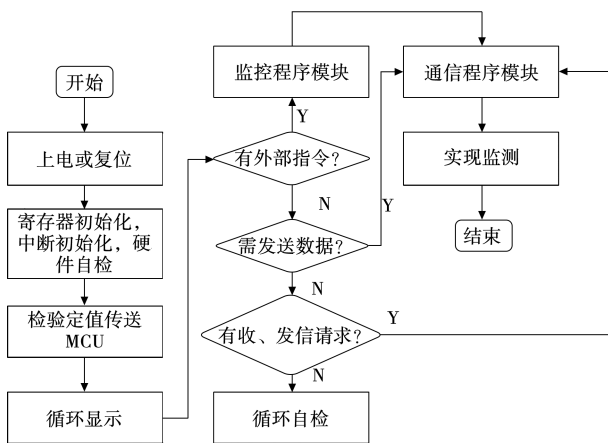


图 5 二次设备时间同步监测流程

Fig. 5 Time synchronization monitoring process of secondary equipment

根据上述设计,实现电力系统二次设备时间同步监测系统整体设计^[18-19]。

2 评估技术

2.1 监测系统硬件评估

基于上述设计的电力系统二次设备时间同步监测系统,提出监测系统评估方案^[20-21],将评估内

容划分成三个部分。由于系统硬件性能可以制约整个系统的监测效果,因此优先利用监测系统评估方案评估系统硬件。

监测系统硬件集合,定义如下:

$$DEV = \{ dev_1, dev_2, \dots, dev_i, \dots, dev_{n1} \} \quad (1)$$

式中: DEV 为硬件集合; dev_{n1} 为系统硬件。

系统影响因子集合定义:

$$INL = \{ inl_1, inl_2, \dots, inl_i, \dots, inl_{m1} \} \quad (2)$$

式中: INL 为影响因子集合; inl_{m1} 为因子数。

设计系统硬件评估函数,定义为:

$$\begin{cases} ase_{dev} = dev_1 \wedge dev_2 \wedge \dots \wedge dev_{n1} \\ ase_{inl} = \sum_{l=1}^{l-m_1} inl_l / m1 \cdot ase_{dev} + \lambda_{dev} + \lambda_{inl} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ase_{dev} 为系统硬件评估函数; ase_{inl} 为影响因子评估函数; λ_{dev} 为硬件权重; λ_{inl} 为影响因素权重; l, m 为常数。

当 $dev_i = 1$ 时表示系统硬件完善, $dev_i = 0$ 时表示系统硬件缺失; $inl_i = 0$ 时说明设计的系统硬件不适合正常运转, $inl_i = 1$ 时说明设计的硬件可正常运转。

进而获取电力系统时间同步装置系统硬件评估结果为

$$ase_1 = \lambda_{dev} \cdot ase_{dev} + ase_{inl} \cdot \lambda_{inl} \quad (4)$$

式中: ase_1 为硬件评估结果。其监测系统硬件评估流程如图 6 所示。

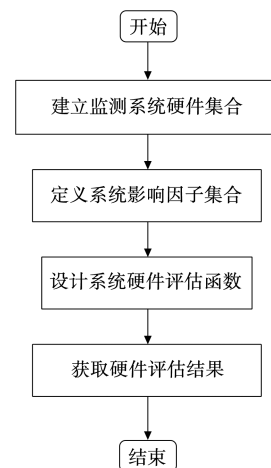


图 6 监测系统硬件评估流程

Fig. 6 Hardware evaluation process of the monitoring system

2.2 电力系统二次设备时间同步监测系统软件评估

$$SYSB = \{ sysb_1, sysb_2, \dots, sysb_i, \dots, sysb_{n2} \} \quad (5)$$

式中: $SYSB$ 为软件功能集合; $sysb_{n2}$ 为软件结构。

与软件系统相对应的性能指标集合定义如下:

$$PERB = \{perb_1, perb_2, \dots, perb_i, \dots, perb_{m2}\} \quad (6)$$

式中: $PERB$ 为指标集合; $perb_{m2}$ 为指标数。

为此建立评估函数, 定义如下:

$$\begin{cases} ase_{sysb} = sysb_1 \wedge sysb_2 \wedge \dots \wedge sysb_{n2} \\ ase_{perb} = \sum_{l=1}^{l-m2} perb_l / m2 \cdot ase_{sysb} + \lambda_{sysb} + \lambda_{perb} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ase_{sysb} 为软件评估; ase_{perb} 为指标评估; λ_{sysb} 为软件权重; λ_{perb} 为指标权重。当 $sysb_1 = 0$ 时, 说明系统软件缺失, $sysb_1 = 1$ 说明系统软件完善; $perb_1 = 1$ 表示指标在技术范围内, $perb_1 = 0$ 表示不在系统技术范围内。

那么系统软件基本功能性能评估就通过式(8)定义:

$$ase_2 = (\lambda_{sysb} \cdot ase_{sysb} + ase_{perb} \cdot \lambda_{perb}) + ase_{dev} \quad (8)$$

式中: ase_2 为软件基本功能评估结果。其具体流程如图 7 所示。

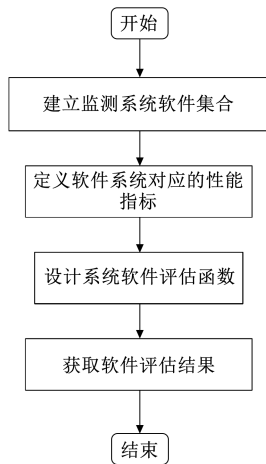


图 7 监测系统软件评估流程

Fig. 7 Software evaluation process of the monitoring system

2.3 电力系统二次设备时间同步监测系统整体评估

结合本文监测系统硬件与软件的评估结果, 进一步评估电力系统时间同步装置监测系统整体系统, 从而正确评价当前系统所处状态及监测性能, 因而系统单次评估函数通过式(9)获取。

$$ase_{wams} = ase_1 + ase_2 \quad (9)$$

式中: ase_{wams} 为总评估结果。

通过对上述监测系统硬件、软件、整体性能的单次评估, 进一步设计连续多次评估方法系统硬件

多次评估函数, 通过式(10)计算。

$$pro_{dev} = \sum_{k=1}^n ase_{1_k} / n \quad (10)$$

式中: pro_{dev} 为监测可用率及监测性能; k 为评估次数。

采用式(11)计算系统软件多次评估函数, 定义为:

$$pro_{sys} = \sum_{k=1}^n ase_{2_k} / n \quad (11)$$

式中: pro_{sys} 为系统软件在某时间段内的可用率及监测性能。

电力系统时间同步装置监测系统整体性能多次评估结果如式(12)所示。

$$ase_{wams} = \sum_{k=1}^n ase_{wams_k} / n \quad (12)$$

式中: ase_{wams} 为监测系统在某时间段的整体功能性能水平。

通过设计系统硬件、软件、整体性能三方面相对应的评估方法和评估函数, 实现了电力系统时间同步装置监测系统在三方面的评估分析, 根据相对应的评估结果, 完成电力系统时间同步装置监测系统的评估。

3 实验与分析

为了验证电力系统时间同步装置监测与评估技术的整体有效性, 需要对该方法开展实验对比测试。

采用电力系统时间同步装置监测与评估技术研究是实现方法(方法1)、智能变电站时间同步与时间同步监测集成装置的研制及应用方法(方法2)和基于统一信息模型的时间同步在线监测技术方法(方法3)开展测试。

1) 为验证监测系统的检测精度, 采用标准时间测试仪进行监测设备授时, 将授时结果与 GPS/北斗进行对比, 通过后台系统得到两种结果间的监测偏差, 具体的测试环境如图 8 所示。

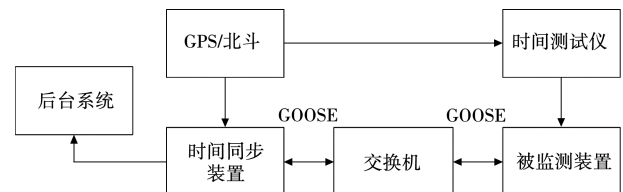


图 8 测试精度环境

Fig. 8 Test accuracy environment

根据设定结果, 采用三种方法对标准时间测试

仪的授时结果与实际 GPS/北斗之间的偏差进行监测,以此验证三种方法的监测效果,具体测试结果如表 1 所示。

表 1 三种方法与实际监测偏差测试

Tab. 1 Three methods and the actual monitoring degree deviation test

实验次数/次	监测偏差测试/ms			实际偏差 /ms
	方法 1	方法 2	方法 3	
1	10.21	11.31	10.97	10
2	10.84	12.64	11.84	10
3	11.64	13.54	12.54	11
4	12.34	14.39	13.54	12
5	12.84	15.24	14.51	12
6	10.14	11.35	12.12	10
7	9.87	10.35	10.54	9
8	9.56	10.98	10.64	9
9	8.12	10.56	9.64	8
10	7.41	9.14	8.31	7

为更加清晰直观的显示出监测精度的偏差效果,将表 1 转换为图 9 ~ 图 11 所示。

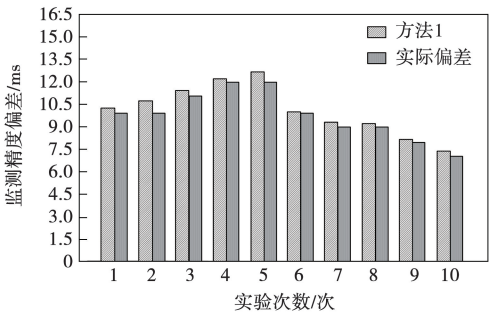


图 9 方法 1 与实际监测偏差

Fig. 9 Method 1 deviates from the actual monitoring

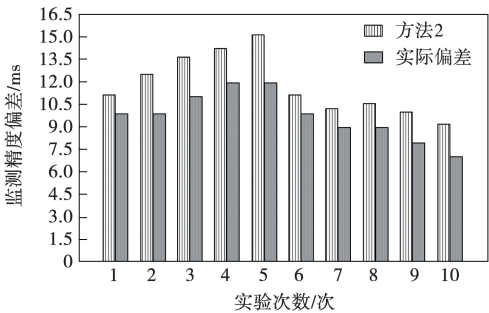


图 10 方法 2 与实际监测偏差

Fig. 10 Method 2 deviates from the actual monitoring

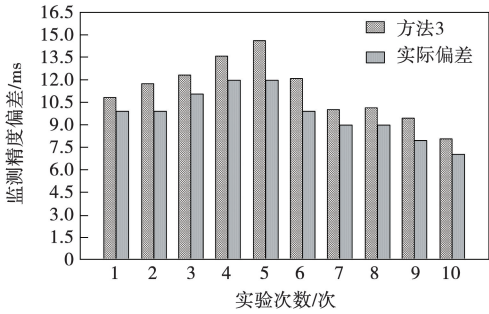


图 11 方法 3 与实际监测偏差

Fig. 11 Method 3 deviates from the actual monitoring

根据上述图表结果可以看出,随着实验次数的增加,三种方法所出现的监测偏差精度均不相同。从整体来看,方法 1 在监测时间信息网络通信数据时,监测出的精度偏差与实际偏差相差较小,均不大于 1 ms,说明方法 1 的监测效果较优;而方法 2 和方法 3 在测试时,与实际结果相差较大,说明两个方法的监测偏差大,表明两种方法的监测效果较差。

2) 为检验电力系统时间同步装置系统的监测性能,需要对该系统开展综合性能评估测试。为此建立综合评价指标,详情如图 12 所示。

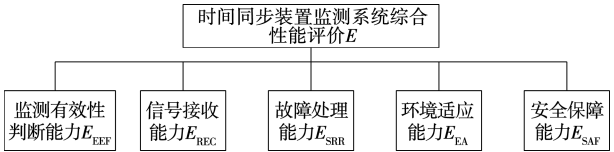


图 12 综合性能评估指标体系

Fig. 12 Comprehensive performance evaluation index system

依据设定的评估指标体系,进一步建立综合性能评估等级,从而有利于对监测系统的综合性能评估进行定量评价,那么实际评价标准主要划分为 4 个等级,分别表示如下:

1) Perfect 优秀:表示系统内部指标值全部处于量级以上,且系统在实际监测期间没有发生任何故障,具备一定的抗干扰性。设定综合评估结果为:0.80 ~ 1.00 之间。

2) Normal 正常:表示系统内部指标满足基本要求,但仍存在普通故障,同时所具备的抗干扰性一般。设定综合评估结果为:0.60 ~ 0.80 之间,且系统需要定时检修。

3) Inferior 较差:表示系统的多数指标满足基本要求,但极个别指标未能达到要求,具备一般性故

障,不能及时抵御干扰。设定综合评估结果为:0.40~0.60 之间。

4)Bad 差:表示系统内指标不满足当前要求,且抗干扰性能差,性能劣化严重。设定综合评估结果为:0~0.40 之间。

根据上述设定结果,采集电力系统时间同步装置监测样本网络通信数据,并从中选取三组历史网络通信数据和一组标准理论值,具体如下:

1)网络通信数据 a:该组样本网络通信数据指标较优,且无故障,最终评定的系统等级为优秀。

2)网络通信数据 b:该组样本网络通信数据仅能满足基本要求,有一般性故障,评定系统等级为正常。

3)网络通信数据 c:该组样本网络通信数据在某些方面未能达到要求,极易出现监测网络通信数据丢失现象,评定系统等级较差。

4)网络通信数据 d:该组样本网络通信数据抗干扰性能低,容易出现重大故障,评定系统等级差。

通过建立的评定指标体系,进一步计算出综合性能指标权重,如表 2 所示。

表 2 综合性能指标权重

指标	E_{EEF}	E_{REC}	E_{SRR}	E_{EA}	E_{SAF}
权重	0.142 1	0.245 1	0.201 4	0.185 4	0.912 3

采用方法 1、方法 2 和方法 3 对电力系统时间同步装置监测系统的综合性能 E 进行评估,并将其与上述四组网络通信数据的最终评定结果对比,从而验证三种方法的评估效果,具体测试结果如图 13 所示。

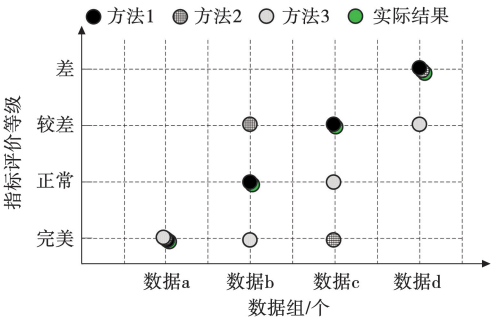


图 13 三种方法的综合性能指标评估

Fig. 13 Comprehensive performance index evaluation of the three methods

将三种方法的评估结果与实际评估系统等级进行对比,发现方法 1 的评估结果与实际结果一致,表明方法 1 的评估效果最佳;方法 2 和方法 3 的评估结果与实际结果有误差,说明两种对比方法的评估效果较差。

综上所述,方法 1 的监测效果及评估效果均优于方法 2、方法 3,这是因为该方法从系统硬件、软件及整体的三方面评估,均确保了系统的监测性能,为此提升了系统综合性能指标评估效果,使其与实际评估结果相同。为了进一步验证本文方法的可靠性,以电力系统时间同步装置监测准确率为指标,分别采用方法 1~方法 3 进行 4 次时间同步检测。具体检测结果如表 3 所示。

表 3 三种方法的检测精度对比结果

Tab. 3 Comparison results of detection accuracy of the three methods

实验次数/次	方法 1/%	方法 2/%	方法 3/%
1	98.9	94.5	93.2
2	99.5	93.2	94.1
3	99.2	94.3	93.5
4	99.4	94.8	93.1

分析表 3 可知,本文方法在进行时间同步检测时的检测精度最高,因此可以得出,本文方法的可靠性较高。为了验证本文方法的可行性,将电力系统时间同步装置的抗干扰性能作为指标,分别采用方法 1~方法 3 进行 4 次时间同步检测。对比其发生故障次数。其对比结果如表 4 所示。

表 4 三种方法的抗干扰性能对比结果

Tab. 4 Anti-interference performance comparison results of the three methods

实验次数/次	方法 1/次	方法 2/次	方法 3/次
1	0	3	1
2	0	5	4
3	0	2	3
4	0	1	6

分析表 4 可知,在运用本文方法进行电力系统时间同步装置进行监测时,装置发生故障的次数为 0。而其他两种方法装置均出现了 1 次以上 6 次以下的故障。因此,可以说明本文方法具有较高的可行性。

4 结论

为避免电力系统时间同步装置监测系统异常,提出电力系统时间同步装置监测与评估技术研究与实现方法,该方法通过对系统硬件及软件的设计,实现电力系统二次设备时间同步监测系统整体设计;根据主站系统评估方案,分别对系统硬件、软件、整体开展三层次评估,依据评估结果实现电力系统时间同步装置监测与评估。该方法在电力系统时间同步装置监测与评估方法中发挥着重要作用,但在系统软件设计方面仍存有缺陷,在接下来的研究中,将对系统软件进行改进,以提高电力系统时间同步装置监测系统的监测性能。

参考文献

- [1] 霍鹏,李锐鹏,张子骁,等.基于脉冲同步的配电网局部放电在线监测及定位方法[J].高压电器,2024,60(8):129-138.
HUO Peng, LI Ruipeng, ZHANG Zixiao, et al. Online monitoring and location method of partial discharge of distribution cable based on pulse synchronization[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 129-138.
- [2] 欧阳金鑫,张澳归,余建峰,等.主动支撑电网的双馈风电场故障功率协调控制方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(10):32-43.
OUYANG Jinxin, ZHANG Aogui, YU Jianfeng, et al. Coordinated fault power control method for doubly-fed wind farms with active grid support[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 32-43.
- [3] 刁卓朋,伍国英,李文祥,等.GPS欺骗信号对变电站时间同步装置的干扰分析与测试[J].南方电网技术,2024,18(4):88-95.
DIAO Zhuopeng, WU Guoying, LI Wenxiang, et al. Analysis and test of the interference of GPS deception signal on time synchronization device in substation[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 88-95.
- [4] 张玉莹,李骥,许雷,等.风储制氢电厂的一次调频控制策略[J].哈尔滨理工大学学报,2024,29(1):78-86.
ZHANG Yuying, LI Ji, XU Lei, et al. Research on primary frequency regulation control strategy of SCESS-DFIG-P2H generating station[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2024, 29(1): 78-86.
- [5] 席云烽,唐超,黄云辉,等.风电接入弱送端柔直系统次同步振荡主导模式及参与因子分析[J].电测与仪表,2024,61(12):125-132.
XI Yunfeng, TANG Chao, HUANG Yunhui, et al. Dominant mode and participation factor analysis of sub-synchronous oscillation of wind power connected to weak transmission end of the flexible HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 125-132.
- [6] 赵晶晶,朱炯达,刘帅,等.基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J].电测与仪表,2024,61(10):57-66.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LIU Shuai, et al. Multi-timescale distributed active and reactive power coordinated optimization method of distributed network based on cluster division[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 57-66.
- [7] 薛展豪,陈力,林志颖,等.基于双向长短期记忆生成对抗网络的电力系统次同步振荡数据生成方法[J].智慧电力,2024,52(5):60-66.
XUE Zhanhao, CHEN Li, LIN Zhiying, et al. Subsynchronous oscillation data generation method of power system based on bidirectional long shortterm memory generative adversarial network[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 60-66.
- [8] 张崇,李博,李笑宇,等.基于虚拟同步机控制参数自适应调节的储能系统调频方法[J].发电技术,2024,45(4):772-780.
ZHANG Chong, LI Bo, LI Xiaoyu, et al. A frequency regulation method of energy storage system based on adaptive adjustment of virtual synchronous generator control parameters[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 772-780.
- [9] 陈志刚,熊慕文,刘东超,等.智能变电站时间同步与时间同步监测集成装置的研制及应用[J].电力自动化设备,2021,41(2):213-217,224.
CHEN Zhigang, XIONG Muwen, LIU Dongchao, et al. Development and application of an integrated device for time synchronization and time synchronization monitoring in intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 213-217, 224.
- [10] 郑明忠,彭志强,卜强生,等.基于统一信息模型的时间同步在线监测技术[J].电力系统保护与控制,2020,48(15):149-155.
ZHENG Mingzhong, PENG Zhiqiang, BU Qiangsheng, et al. Temporal-synchronized online monitoring technology based on a unified information model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 149-155.
- [11] 孙学波,陈发兵,王元杰.基于iMx6UL与时钟同步技术的微震监测系统的设计[J].煤炭工程,2020,52(5):106-110.
SUN Xuebo, CHEN Fabing, WANG Yuanjie. Design of a

- micro-shock monitoring system based on iMx6UL and clock synchronization technology[J]. Coal Engineering, 2020, 52(5): 106-110.
- [12] 朱文, 江伟, 周志烽, 等. 基于电网调度系统的网络安全态势感知方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 21-27.
ZHU Wen, JIANG Wei, ZHOU Zhifeng, et al. Research on network security situational awareness method based on power grid dispatching system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 21-27.
- [13] 林薇, 张昂. 大规模通信网络涉密信息安全动态预警方法研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 370-374.
LIN Wei, ZHANG Ang. Research on dynamic early warning method for security of secret-related information in large-scale communication networks[J]. Computer Simulation, 2023, 40(11): 370-374.
- [14] 吕静贤, 王晨飞, 韩维, 等. 基于QS-KMS的电力业务通信网络安全性评估方法[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(7): 94-97, 109.
LÜ Jingxian, WANG Chenfei, HAN Wei, et al. Electric power communication network security evaluation method based on QS-KMS[J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(7): 94-97, 109.
- [15] 李恒武, 高勇, 李汉宁, 等. 5G环境下网络独立通信层信号安全检测[J]. 计算机仿真, 2022, 39(3): 434-438.
LI Hengwu, GAO Yong, LI Hanning, et al. Network independent communication layer signal security detection in 5G environment[J]. Computer Simulation, 2022, 39(3): 434-438.
- [16] 陈文, 向罗勇. 基于移动网络的电力移动终端安全通信探究[J]. 电视技术, 2022, 46(1): 41-43.
CHEN Wen, XIANG Luoyong. Research on secure communication of power mobile terminal based on mobile network[J]. Video Engineering, 2022, 46(1): 41-43.
- [17] 郭明, 周玉泉, 陈才, 等. 北斗导航授时的移动激光雷达测量系统时间同步装置设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 33-42.
GUO Ming, ZHOU Yuquan, CHEN Cai, et al. Design of the time synchronization device for the mobile lidar measurement system of Beidou navigation and timing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S2): 33-42.
- [18] 崔伟雄. 矿井延时震源同步采集装置设计[J]. 工矿自动化, 2021, 47(1): 107-111.
CUI Weixiong. Design of mine delay source synchronous acquisition device[J]. Industrial and Mining Automation, 2021, 47(1): 107-111.
- [19] 李俊卿, 王祖凡. 同步调相机的状态监测及故障预警系统[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(12): 61-65, 77.
LI Junqing, WANG Zufan. Status monitoring and fault warning system of synchronous control camera[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12): 61-65, 77.
- [20] 杨蕤, 刘洋. 基于模糊评价模型的民用机场无人机监测系统评估方法[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1540-1549.
YANG Rui, LIU Yang. Evaluation method of UAV monitoring system for civil airport based on fuzzy evaluation model[J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1540-1549.
- [21] 江昊, 李德仁, 沈欣, 等. 天基信息实时智能服务系统仿真评估研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 153-160.
JIANG Hao, LI Deren, SHEN Xin, et al. Simulation evaluation of space-based information real-time intelligent service system[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 153-160.

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-12-30

作者简介:

黎亦凡(1992—),男,硕士,工程师,研究方向为物联网技术、软件开发。E-mail: 17755401559@163.com

陈曦(1984—),男,硕士,高级工程师,研究方向为数据分析。

杨熙载(1997—),男,硕士,助理工程师,研究方向为计算机科学、电力物联网。

司恒斌(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为数据分析。

庞冰瑶(1995—),女,硕士,助理工程师,研究方向为电网人工智能技术应用。

胡浩瀚(1978—),男,通信作者,工程师,研究方向为电力行业信息化应用。E-mail: 17755401559@163.com

(编辑 杜景飞)