

姜慧竹, 李蕊, 史鹏博, 等. 容错冗余技术监控抽水蓄能电站电能计量误差[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 96-103.  
XIAN Huizhu, LI Rui, SHI Pengbo, et al. Fault-tolerant and redundant technique-based monitoring of electric energy measurement error of pumped storage hydropower station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 96-103.

# 容错冗余技术监控抽水蓄能电站电能计量误差

姜慧竹, 李蕊, 史鹏博, 武赫

(国网北京电力科学研究院, 北京 100162)

**摘要:** 针对当前电能计量误差监控存在准确性差的问题, 采用容错冗余技术监控水电站电能计量误差。引入双机容错冗余转换逻辑监控系统, 系统主机选择2台工业控制机, 通过检测与切换逻辑部件实现主机间切换。当主机CPU控制机总线的各个模板运行正常时, 则工作主机CPU利用并行串口将正常信息传输至备用机。若工作主机出现故障, 则切换逻辑电路控制工作主机退出系统工作, 此时备用机替代工作主机运行; 以此实现容错冗余技术, 保证电能计量准确性。系统的运行基于现场信息数据采集, 利用接入模拟电能表脉冲信号, 计算被测电表误差。试验结果表明, 应用容错冗余技术的水电站电能计量误差监控方法可使数据丢包率控制在2%以下, 正常接收数据的概率在98%以上, 有效提高了监控的准确率, 可靠性高, 并给出相关电能计量问题对策。

**关键词:** 容错冗余技术; 抽水蓄能水电站; 电能; 计量误差监控; 影响因素; 试验

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.10.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)10-0096-08



## Fault-tolerant and redundant technique-based monitoring of electric energy measurement error of pumped storage hydropower station

XIAN Huizhu, LI Rui, SHI Pengbo, WU He

(State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100162, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor accuracy of the monitoring of the electric energy measurement error at present, the fault-tolerant redundancy technique is adopted for the monitoring of the electric energy measurement error of hydropower station. By means of introducing a dual-machine fault-tolerant redundant conversion logic monitoring system, two industrial control machines are selected for the system host to realize the switching between the hosts through the detecting and switching logic components. When all the templates of the host CPU controller bus normally operate, the normal information is to be transmitted from the working host to the standby machine through the parallel serial port. If fault occurs on the working host, the working host is to be controlled by the switching logic circuit to log off from the operation of the system, meanwhile, the working host is replaced by the standby machine for the operation; and hereby, the fault-tolerant and redundant technique is realized to ensure the accuracy of energy measurement. The system operates based on the data collection of the in situ information, while the error of the measured watt-hour meter is calculated through accessing to the pulse signal of analog watt-hour meter. The experiment result shows that the application of the method for the monitoring of the error from the energy measurement of the hydropower station with the fault-tolerant and redundant technique can make the data packet loss rate be controlled below 2% with the normal data reception probability above 98%, thus the monitoring accuracy rate is effectively enhanced with a high reliability, while the relevant countermeas-

收稿日期: 2020-06-13

基金项目: 国网北京市电力公司科技项目(52022319004A)

作者简介: 姜慧竹(1989—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事电能计量、用电信息采集研究。E-mail: xianhuizhuuu@163.com

ure for the problem from the energy measurement is given out as well.

**Keywords:** fault-tolerant and redundant technique; pumped storage hydropower station; electric energy; measurement error monitoring; influencing factor; experiment

## 0 引言

抽水蓄能电站利用电网中负荷低谷时的电力,由下水库抽水到上水库蓄能,待电网高峰负荷时,放水回到下水库发电,其要求电能计量监控系统的可靠性高。未采用容错技术的水电站电能计量监控系统,其中某个位置存在故障便可能导致部分或整体系统瘫痪<sup>[1]</sup>。为提升系统可靠性与稳定性,通常引入容错冗余技术,即允许系统存在一定程度的故障,并采用冗余方法使系统在有故障的环境下正常工作。冗余技术的主要特征是当系统发生故障时依旧维持系统正常或者准正常工作<sup>[2-3]</sup>。将该技术引入水电站电能计量误差监控中,能满足电力系统和大众用电需求。在电力系统相关技术不断发展的环境下,电能计量误差监控引起了该领域研究人员的关注。

近年来已有相关学者对水电站电能计量误差监控做出了研究,并取得了相应成果。张乐平等<sup>[4]</sup>依据融合模型构建了多维环境下现场校验器计量误差模型。搭建多维条件测试平台,平台可控制条件包含电流、电压、温湿度和功率因数。根据随机森林法构建原始变量与交叉变量,作为输入过程中基础作用及耦合作用的2个模型。同时基于改进 Stacking 法对上述模型进行相互融合,获取能够反映多维条件下针对现场校验仪器计量误差产生影响的融合模型,为计量误差监控提供支撑。曲朝阳等<sup>[5]</sup>指出大数据可视化能实现大规模电力系统在线监测信息数据中各种属性及运行状态等特征信息图形与图像的可视化显示,为设备工作状态实时高效监控分析奠定基础。并将 Spark 引入至电力电能数据监测中,以迅速提取大数据条件下电力设备信息数据误差。在 Spark 大数据分析平台上,设计并构建了设备状态评估的指标体系和模糊 C 均值聚类算法提取电力设备状态监测信息。沈鑫等<sup>[6]</sup>指出区域与省级电网对电能计量测试性能控制与管理的要求越来越高,电能计量的精确性也越来越重要。对于当前国内电网各个级别的计量中心还未实现电能表装置精准性与工作状态实时掌控等一系列问题,分别利用在线监测、远端集控,对电能计量进行实时远程监控。郭志忠等<sup>[7]</sup>提出抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略及电能计量误差监控技

术,以电网储纳运行机制为基础,构建抽水蓄能电能调度的数学模型,分别计算调峰备用及不确定性备用的电能预测误差,得出电能调度策略,并设定稳定性评价指标对电能进行监控。PEGORARO 等<sup>[8]</sup>提出基于相量测量单元的分布式测量系统元件中存在的系统误差估计和补偿技术。相量测量单元可以提供同步的电压和电流测量,参考一个共同的时间基准。这一特性以及 PMU 的高精度和报告率,可以用于精确的网络监控。同时,电网的智能化可以使测量系统能够自我检测其弱点并提高其性能。模型中包含了由测量系统元件(主要是互感器和 PMU)引起的不确定度,以及影响网络线路参数值的不确定度。LI 等<sup>[9]</sup>提出基于 Pockels 效应的畸变工频电场测量技术。研究了传感器的输入输出特性、频率响应和温度特性。数据表明,该传感器的线性测量范围为 100 V/m~27 kV/m,3 db 带宽为 20 Hz~10 mHz,具有良好的温度稳定性。该传感器用于测量畸变电场,计算其测量值与有限元模拟值之间的相对误差。结果表明,集成光学传感器在不同位置的相对误差在 12% 以内。然而, Narda-NBM-550 传感器在屏障边缘的性能较差,误差为 22%。

上述方法均能够在一定程度上实现电能计量误差监控,但是在监控误差的准确性方面还有待提升,为了更好地实现抽水蓄能电站电能计量误差监控,确保在发生故障时监控程序也可正常运行,满足现实需求,提出应用容错冗余技术监控水电站电能计量误差。分析水电站电能计量误差的形成原因及影响因素,引入容错冗余技术,分别设计两套主机当作为备用,通过采用 CPU 自主式检测 STD 总线运行情况,运行情况正常则信息正常传输至主机;如果工作主机出现故障,则切换逻辑电路,控制工作主机退出系统工作,将信息传输至备用机。最后设计了异常事件转发及自主式补两种监控方式,实现电能计量误差监控单元的设计。

## 1 水电站电能计量误差监控

### 1.1 水电站电能计量误差成因分析

针对水电站电能计量误差监控,首先对电能计量系统运行原理进行分析,再基于运行原理对计量误差

模型进行构建。当前, 水电站普遍通过电压和电流合并单元针对电压与电流回路进行直接采样。合并单元根据统一 IRIG-B 码确保时间具有同步性。因不同采样通道时延存在差异性, 电压和电流合并单元将针对接收的采样信号数据实行插值操作, 使各自采样值在时间上保持同步。然后根据电压合并单元把经过处理的数据利用级联回路传输至电流的合并单元, 因电压传输与不同装置存在的性质导致时延, 需要电流合并单元针对接收的电压信号数据实行二次插值操作, 以此保障电压采样与电流采样结果时间同步。基于电能计算基本原理, 得到系统电能计算表达式及水电站电能计量误差表达式, 得出电能计量误差主要分为电压和电流幅值误差以及相角误差。最后根据电流合并单元通过组帧方式传输给电表进行相应计算<sup>[9]</sup>。

电能计量运行流程如图 1 所示。

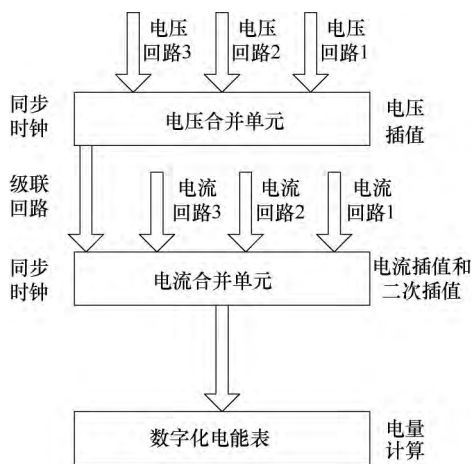


图 1 水电站电能计量运行流程

如图 1 所示, 当电压和电流合并单元各自检测合格时, 能够针对水电站电能计量系统计量误差的构成进行相应分析。因电能表电量计算时出现误差机率小, 仅可能在浮点数计算过程中出现有效位误差, 由此产生的误差值一般小于万分之一, 即实际中可能出现一定误差<sup>[10]</sup>。

针对合并单元的检测, 需合并单元幅值误差值控制在  $-0.2\% \sim 0.2\%$ , 相位误差值控制在  $-10^\circ \sim 10^\circ$  的合理范围内。单个合并单元导致的相位误差值与幅值误差值也是电能计量误差主要组成部分。当电压和电流合并单元进行级联后, 电压采样信号在电流合并单元当场测试过程中, 因延时补偿值存在偏差导致相位误差, 同为构成计量误差的一部分<sup>[11-12]</sup>。为此将电能计量误差构成分为以下部分: 电压及电流合并单元本身有幅值误差; 电压及电流合并单元间相位差有误差; 电能表计算产生的误差。

在上述组成部分中, 导致电压与电流合并单元采样结果间存在误差的主要原因是: 电压和电流合并单元采样互感器有相位误差, 电压采样结果在电流合并单元实行二次插值操作, 电压和电流合并单元延时补偿值和实际延时间有一定偏差。在不考量电表计量误差前提下, 基于电能计算基本原理, 系统电能计算表达式为

$$E = P \times t = UI \cos \varphi \quad (1)$$

水电站电能计量误差表达式为

$$\Delta E = \frac{E_i - E_p}{E_p} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $E_i$  为电能实际测量结果;  $E_p$  为电能标准值。

基于上述分析的电能计量误差主要构成部分, 合并单元导致的误差主要为来自于电压和电流幅值误差以及相角误差。将式(1)代入式(2)中, 并综合考量到电压和电流测量结果的幅值误差与相位误差值, 得到

$$\Delta E = \frac{U_i I_i t \cos \varphi_i - UI t \cos \varphi}{UI t \cos \varphi} \times 100\% = \frac{U(1+r_u)I(1+r_i)t \cos(\varphi + \varphi') - UI t \cos \varphi}{UI t \cos \varphi} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $r_u$  为电压幅值实测值和标准值之间存在的差值;  $r_i$  为电流幅值实测值和标准值之间存在的差值;  $\varphi'$  为电压和电流间相角差实测值、标准值之间存在的差值。

### 1.2 装置影响因素

除上述电能计量误差构成部分外, 电能计量装置影响因素对计量误差存在一定程度的影响<sup>[13-14]</sup>。谐波对于电能计量装置影响较大, 经相关测试可知, 该影响和谐波大小方向及电能表存在相关性。谐波导致的误差表达式为

$$e = V_n I_n \cos(\theta + \Delta\theta) - V_n I_n \sin(\theta + \Delta\theta) \quad (4)$$

式中,  $V_n$  为谐波电压值;  $I_n$  为谐波电流值。

谐波频率处于 2 kHz 以下时, 水电站电能电压互感器电压值下降到 5% 以下, 相角滞后  $10^\circ$ , 而电流互感器电流值下降到 5% 以下, 但相角超前  $10^\circ$ 。在谐波频率非常高时, 系统电压互感器谐波电压可能超过实际值的 2 倍, 且相角滞后  $180^\circ$ , 同时电流互感器也存在较大误差, 对于电能计量有较大影响。

针对优化谐波对水电站电能计量装置产生的影响建议: 较大谐波源周围的电能计量表应尽可能只对基波电能进行计量; 对电子式电能表电压或电流回路实行滤波处理。

### 1.3 双机容错冗余转换逻辑

在上述分析计算基础上，引入双机容错冗余技术实现电能计量误差监控。设置系统双主机，并仅存在一组继电器运行，继电器与系统主机是一一对应的关系，通过双机连锁切换的逻辑实现系统最优状态运行，保证系统稳定工作。水电站电能计量误差监控系统包含继电保护和测量监视以及操作控制等基本功能，系统电路主要为输出继电器和切换逻辑电路等<sup>[15-16]</sup>。水电站中全部模拟量与开关量根据工控机 CPU 进行集中采集与处理，当水电站系统出现事故时，CPU 传输出的继电保护将利用跳闸命令通过开关量输出板，实现中间继电器驱动，采用中间继电器对断路器跳闸线圈进行控制<sup>[17]</sup>。

监控系统主机选择 STD 工业控制机，系统将 2 套主机当作互为备用的机器，通过检测与切换逻辑部件实现切换。系统工作主机的 CPU 自主式检测 STD 总线各个模板运行正常，则工作主机的 CPU 利用并行串口将正常信息传输；如果工作主机出现故障，那么根据切换逻辑电路控制工作主机退出系统工作，并让备用机替代工作主机接着运行。

关于系统关键技术有如下设计与分析。

#### 1.3.1 功能需求

系统的 CPU A 和 B 可相互夺权，当双主机均正常，依据先入为主要的理念判断双机主备情况。任何时候仅存在一组继电器运行。在继电器组 A 运行时，CPU A 得到系统控制权；在继电器组 B 运行时，CPU B 得到系统控制权。图 2 为双机连锁切换的逻辑。

如图 2 所示，AA 代表 A 机夺权和非门输出结果，A 代表 A 继电器进线逻辑情况，BB 代表 B 机夺权和非门输出结果，B 代表 B 继电器进线逻辑情况。

#### 1.3.2 初始状态设置

A 机和 B 机初始状态均出于备用状态。

#### 1.3.3 先入为主理念判断主机状态

当双机通电并正常运行后，先复位的为主机。

#### 1.3.4 主动让权

如果主机在自检后发现 A/D 或者 I/O，亦或是时钟板存在故障，那么应自动让权；A 继电器不运行，并行通信口将接权的下发到 B 机，B 继电器运行，接管系统控制权。

#### 1.3.5 夺权

处于主机位置的 CPU A 状态为失效，并行通信则不能进行，由于备机对主机运行进行持续性监督，如果在规定采样周期内接不到主机传输的信息，则能

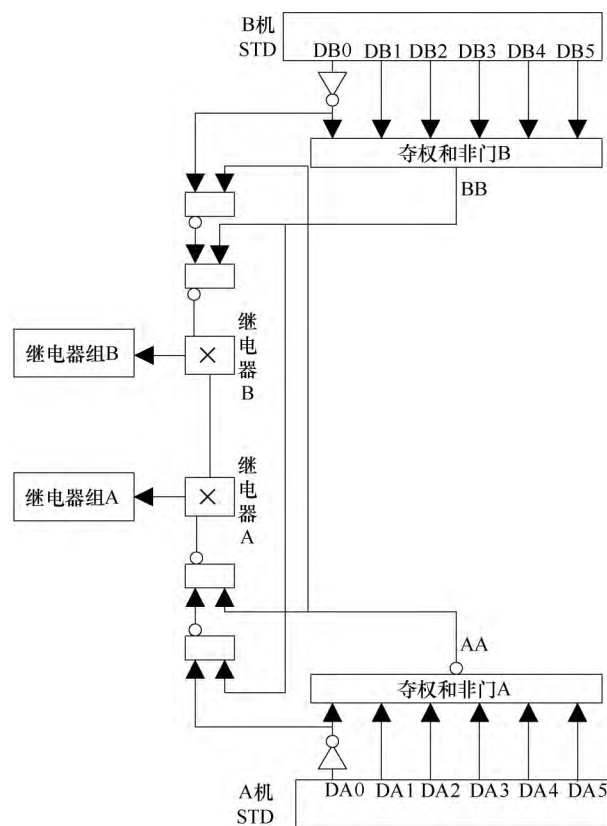


图 2 双机连锁切换的逻辑示意

判断主机已经失效，此时备机 B 行使夺权的性能，继电器 B 运行并封锁继电器 A。当 B 机得到了系统控制权，则发出报警信息，相关人员及时对 A 机进行针对性修复。

#### 1.3.6 可能出现的组合情况

监控系统整体状态和 A 机、B 机以及并行口通信情况存在相关性，同时有如表 1 所列的组合情况。

表 1 系统可能出现的组合情况

A 机状态	A 和 B 并行通信情况	B 机状态	系统状态	备注
备机	无通信	备机	刚通电	系统还未启动
主机	正常	备机	运行	最优状态
备机	同上	主机	运行	最优状态
受权	同上	让权	运行	报警
让权	同上	受权	运行	报警
不定	误码	不定	运行	报警且主从不发生变化
夺权	失效	失效	运行	报警
失效	同上	夺权	运行	报警
夺权	同上	夺权	失效	报警
让权	正常	让权	失效	报警
失效	失效	失效	失效	报警

从表 1 可知，一共有 11 种组合情况，其中 1 至 8 均可保障系统正常运行；2 至 3 为最优状态；4 至 8

中有 1 台机存在故障或者并行通信过程存在故障, 报警通知相关人员进行修理或者更换, 方便恢复到系统最优状态; 9 中尽管双机均正常运行, 但并行通信为失效状态, 此时需要人工切除其中任意一台机使系统正常运行; 10 和 11 为系统的失效状态。

#### 1.4 监控功能单元

水电站电能计量误差监控系统中, 较重要的功能单元包括现场信息数据采集、光信号采集、通信传输、数据管理、界面显示、键盘输入等。组网为光纤与无线 2 种形式。

现场信息数据采集功能单元主要分为模拟采样和数据处理 2 部分, 可针对实时输入模拟电信号实行采样操作, 利用接入模拟电能表中脉冲信号对被测的电表误差进行计算, 同时对电能质量进行分析, 将结果实时显示。当发生异常时, 发出警报。现场数字信息数据采集单元主要根据光纤、光路由、光电子单元以及数据处理功能单元等部分构成, 针对输入的数据进行解析, 利用得到被测表脉冲信号对误差进行计算, 并利用计算波形对电能质量进行分析, 将误差信息数据和分析结果显示给监控人员。监控通信信号传输单元根据无线通信模块构成, 针对当前采集的实时模拟或数字信号、电能质量分析的最终结果及被测电表实时误差情况, 利用无线通信方式开展近程或远程传输。监控系统相关人员可利用远程观看对现场情况进行监测和分析。信息数据管理单元由存储设备和上位机管理等部分构成, 可存储采集得到的模拟与数字信号及电能质量的分析结果。监控系统相关人员能随时读取存储内容, 并对之前存储的数据进行电能质量监测和分析<sup>[18-19]</sup>。系统上位机软件也可同时针对远程传输的信息数据进行实时监测与分析。系统界面显示单元主要负责显示出计算的结果。键盘输入功能单元主要负责界面切换和系统参数设置等。综合上述分析, 关于数字量和模拟量采集及电能质量分析计算的软件部分如图 3、图 4 所示。

针对数字量采集, 其涉及光信号采集、数字协议解析及数字量波形检测提取, 并包含上述部分整合内容, 对于光纤信号采集单元使用符合 IEC 61850 标准的光口单元采集光信号, 同时利用软件解码将网络协议分离, 计算获取的数字内容。模拟量采集中, 主要针对获取的模拟量进行相应处理, 同时计算完整波形信息数据, 计算采集的数据, 获取相应电能, 并对其误差进行计算。对电能质量进行计算的是利用数字与模拟的波形实行高速计算, 获取所需电能质量相关信息。包含数据波形的还原

修正及有关电能质量的计算。图 3 和图 4 为数字部分和模拟部分运行流程。

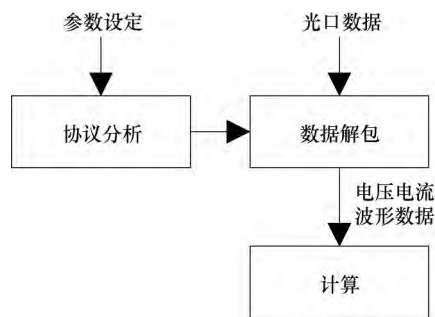


图 3 数字部分运行流程示意

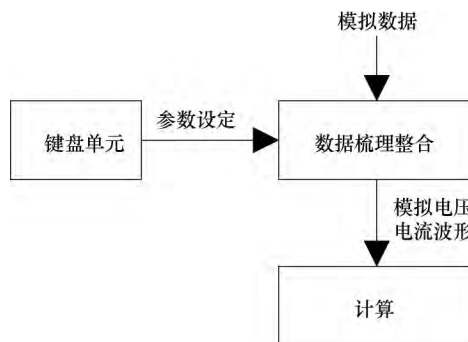


图 4 模拟部分运行流程示意

除上述主要部分, 为使监控更具可靠性, 设计异常事件转发与自主式补抄表的功能单元。在水电站电能计量误差监控系统运行的主程序有专门应用在自主式补抄表和异常事件转发的定时装置, 定时装置触发的间隔为 1 min。由于转发与自主式补抄表使用的是同一个串口, 因后台操作无法对两者不复用串口导致的程序出错进行控制。上述可能导致的问题即为自主式补抄时的 1 min, 会使异常事件无法正常转发至相关维护人员。主要解决方式是在异常事件位置添加一个已经转发与否的字段, 详细如下。

(1) 异常事件转发。当电能计量误差监控系统运行时, 终端位置出现异常事件后需实时将异常信息传输给终端的维护人员。通过异常事件转发功能为系统运行提供支撑。当异常事件发生后, 终端将利用短信的方式将异常信息传输至上位机, 主站位置对信息进行解析, 将事件传输至异常事件数据库, 数据库中描述了事件基本字段, 并包含标志位字段。当异常事件刚传输至数据库时, 该标志位显示 0。当定时装置进到应该转发事件时, 会基于下列步骤进行相应转发操作, 假设没有说明, 则一下每个步骤条件不符, 则均会在该过程中跳出, 并在下一分钟再跳进。对事件发生表进行查询, 在该时刻的前 10 min 发生异常事件

与否。

当有事件发生，对事件类型需进行异常事件转发与否进行查询；假设需要进行异常事件转发，则对其标志位进行查看，查看转发过与否，并获得需要进行异常事件转发的终端编码；对维护人员的信息库进行查询，获取负责相应终端的人员联系方式；整合组织数据，并开始进行传送。

(2) 自主式补抄。在系统运行中，自主式补抄表的时间间隔为 1 h，当抄表发起之后，会先对部分条件进行相应检测，假设符合条件，则发起自主式补抄表指令；反之仅进行正常巡检。在发起自主式补抄表后一个小时内，对数据完整性进行检测，如发生有缺情况，则在未符合自主式补抄表条件时再发起一次补抄表指令<sup>[20-21]</sup>。自主式补抄表需要基于一定依据才能够进行补抄，即在终端和表计参数精准传输之后，需要将本地补抄条件填写完整，此为自主式补抄表准备条件。

## 2 试验结果与分析

为验证基于容错冗余技术的抽水蓄能电站电能计量误差监控方法有效性，进行相关性测试。对容错冗余监控系统可靠率进行估算。试验系统组成部分为计算机、通信线路、控制器以及电能计量监控等。

选择的电能表为 DTSD51 多功能的电表，电能计量监控利用电力线通信模式和集中控制器通信，电能表和集中控制器利用标准 485 通信模式通信，控制器和计算机利用 RS232 进行通信，并应用至模拟台区范围内控制器和管理中心之间远程通信中。

以文献 [7]、文献 [8] 方法作为试验对比方法，选取 10 个测点，采用不同方法测试电能计量误差监控准确率和系统是否可以给出相应报警信息，如表 2—表 4 所列。

表 2 本文方法水电站电能计量误差监控准确率与报警情况

测点序号	监控信息丢包率/%	是否报警
1	1.2	是
2	1.1	是
3	2.1	是
4	2.4	是
5	2.2	是
6	1.5	是
7	1.3	是
8	1.9	是
9	1.8	是
10	1.1	是

表 3 文献 [7] 方法水电站电能计量误差

监控准确率与报警情况		
测点序号	监控信息丢包率/%	是否报警
1	2.9	是
2	5.5	是
3	5.3	是
4	2.6	否
5	4.6	是
6	2.3	否
7	2.8	否
8	4.9	是
9	4.5	是
10	4.7	是

表 4 文献 [8] 方法水电站电能计量误差监控

准确率与报警情况		
测点序号	监控信息丢包率/%	是否报警
1	7.8	是
2	3.2	否
3	6.5	是
4	7.1	是
5	8.6	是
6	3.9	否
7	8.2	是
8	7.3	是
9	7.5	是
10	4.1	否

从表 2 可知，基于容错冗余技术的水电站电能计量误差监控方法数据丢包率控制在 2.5% 以下，平均值为 1.7%，有效提高了监控的正确率。该方法通过双机容错冗余转换逻辑增强了监控系统的冗余容错性能，在单个主机发生故障情况下，有备用主机替补运行，可以高效接收监控数据，减少了监控信息数据丢包率，利用异常事件转发和自主式抄表等功能模块为监控系统运行提供了支撑，使监控效果和报警效果得到了优化。而从表 3、表 4 来看，文献 [7] 方法的水电站电能计量误差监控数据丢包率平均值为 4.0%，文献 [8] 方法的水电站电能计量误差监控数据丢包率平均值为 6.4%，均低于所提系统，且报警效果较差。

## 3 水电站电能计量问题对策

水电站电能计量指的是电网经营过程中利用相对应的计量装置对电能进行计算。基于计量结果能够制定出电能生产方案，并也可为经济核算和计收电量等方面提供可靠依据。电能计量为电力生产和销售及电网安全工作的关键环节。大众日常生活工作与电能存在密切联系，由此电能量不仅与电力企业经济效益

及安全运行存在关系,而且与经济和社会效益存在较大关系。准确高效地对电能进行计量,不仅可以辅助控制耗电量,提升电能整体利用效率,还能使用户利用制定出的电能消耗定额方案节约电力能源。

(1) 由源头抓起,提升设备质量。基于相关技术开展设备选型,使其精确性满足计量的要求。

(2) 选择计量组别多变比形式的电流互感器。因考量到保护装置需求,并保障继电保护动作具有精确性,电流互感器的耐受短路电流性能要适当提升,电流互感器变比精准性也要增强,进而保证最大电流流经过程中,变比误差不超过 10%,因此电流互感器变比配置相对较大,基于用户报装负荷选择适当计量的 CT 变比。

(3) 提高工程人员相关业务培训力度。依据国网公司相关要求提高工程人员相关业务培训和安全知识培训力度,提升工程人员素质和安装质量,防止由于人员安装发生错误导致的计量误差。

(4) 降低二次回路压降产生的影响。针对二次回路压降,需提升二次电缆线径,进而降低二次回路压降产生的影响。

(5) 降低谐波对电能计量产生的影响。在降低谐波对电能计量产生的影响措施中,主要包含以下方面:一是针对电能计量表实行技术更新,针对感应式的电能计量表,利用交流滤波器实行相应滤波;二是针对电子式的电能计量表,利用低通滤波器实行相应滤波。此方法不仅在操作上简单,在计量方式上也较为科学。

(6) 提升电能计量装置选取精度。当前电能计量装置精度是 $\pm 0.5\%$ ,假设将精度提升至 $\pm 0.2\%$ ,则用电量能得到很大程度的控制。现阶段,使用电子式的互感器和数字化的计量装置,能高效解决以往计量装置精度比较低等问题。互感器主要依据电磁和光电转换的基本原理,其中包含传感器和传感系统与二次转换设备,可以满足大电流和高压工作环境的需求。使用数字化计量装置利用光学与电子学原理实现电能计量,同时具备独立电源,防止因存取电导致的计量误差,数字化计量装置包含通信数据分析等性能。针对因通信传输不利导致的遗漏信息数据问题,能以容错性功能进行处理,以此提高电能计量精确性以及稳定性。

在我国电力系统不断改革及经济水平日益提升的背景下,对电能计量相关工作有更高的要求,针对当前水电站电能计量中存在的问题,提出上述优化建议,能够对水电站电能计量提供可靠性支撑,在一定

程度上满足大众日益增长的电能需求。

## 4 结 论

电能计量不仅是电网经济核算过程中的依据,还是大众日常工作与生活中的重要部分。当前国内正处在经济社会迅猛发展的阶段,由此需提升能源利用率,并节约能源,对电能计量也提出了更严格的要求。引入容错冗余技术对水电站电能计量误差进行监控,在电能计量系统运行原理和误差形成等方面分析的基础上,通过数据采集、计算、显示等功能实现计量误差监控。通过试验验证得出以下结论:

(1) 应用容错冗余技术监控抽水蓄能电站电能计量误差,能够在单个主机发生故障情况下,有备用主机替补运行,监控信息的完整性得以保障。

(2) 应用所提方法得到的水电站电能计量误差监控准确率较好,并能及时报警,保障水电站运行安全。

上述结论表明,该方法能高精度监控电能计量误差,是可靠性较强的电网电能监控方法。在电网覆盖面不断扩大的环境下,下一步将重点研究监控系统的调制解调功能,为远程监控系统数据的灵活传输提供依据。

此外,在降低谐波对电能计量产生影响方面,可采取的方式主要为区分基波和谐波潮流方向之后计量谐波与基波功率。此种方法对于成本的要求较高,且技术方面难度较大,在接下来的研究中要进一步分析。

## 参考文献:

- [1] 臧辉,张国栋,滕伟,等. 安装在水电站尾水平台上的变压器振动特性监测分析[J]. 变压器,2018(7): 65-69.
- [2] 易华,韩笑,王恺仑,等. 物联网技术在大型水电站安全监测自动化系统中的应用[J]. 长江科学院院报,2019,36(6): 166-170.
- [3] 李蕊,韩柳,杨宝琳,等. 智能电能表计量故障原因分析及预防措施[J]. 科技通报,2017,33(9): 113-117.
- [4] 张乐平,肖勇,陆煜铨,等. 基于模型融合的多维条件下现场校验仪计量误差建模研究[J]. 仪表技术与传感器,2018,430(11): 162-166.
- [5] 曲朝阳,熊泽宇,颜佳,等. 基于 Spark 的电力设备在线监测数据可视化方法[J]. 电工电能新技术,2016,35(11): 72-80.
- [6] 沈鑫,曹敏,李仕林,等. 区域和省级计量中心电能表标准装置准确性远方检测及状态监测技术研究[J]. 电子器件,2016,39(4): 968-977.
- [7] 郭志忠,叶瑞丽,刘瑞叶,等. 含抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(03): 7-15.
- [8] PEGORARO P A, BRADY K, CASTELLO P, et al. Compensation of

- systematic measurement errors in a PMU-based monitoring system for electric distribution grids [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3871-3882.
- [9] LI Z, YUAN H, CUI Y, et al. Measurement of distorted power-frequency electric field with integrated optical sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 1132-1139.
- [10] 孙立辉, 王海. 基于单片机的宿舍多功能用电监控系统的设计 [J]. 现代电子技术, 2016, 39(4): 135-138.
- [11] 陈纓, 岳长喜, 杨勇波, 等. 配网高压电能计量装置整体校准技术研究 [J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 35-39.
- [12] STANCIC I, JUKIC J, MUSIC J. Prototype of the energy efficient device for measurement and analysis of impacts during small parcel shipping [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(2): 1259-1270.
- [13] 宋晓林, 任伟, 张振铎, 等. 数字化变电站合并单元插值误差对于电能计量的影响 [J]. 电测与仪表, 2017, 54(11): 57-65.
- [14] 白静芬, 林繁涛, 徐英辉, 等. 新一代智能变电站数字化计量系统 [J]. 电测与仪表, 2017, 54(17): 40-45.
- [15] 田海霖, 洪良, 王艺翔, 王晓华. 基于量子遗传算法优化粗糙-Petri 网的电网故障诊断 [J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(6): 678-684.
- [16] SI D, WANG J, WEI G, et al. Method and experimental study of voltage measurement based on electric field integral with Gauss-Legendre Algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2771-2778.
- [17] 谢宏伟, 王化民, 张玉峰, 等. 基于 IEC 61850 的电能计量装置远程校验 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(8): 190-194.
- [18] 金阳忻. 基于模糊神经网络的电能表误差超差风险预测模型 [J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1962-1968.
- [19] LIANG Y, CHEN H. Circuit-based flux linkage measurement method with the automated resistance correction for SRM sensorless position control [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(9): 1396-1406.
- [20] 徐莘, 解绍锋. 负序条件下基于正序有功功率的电能计量方案 [J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1613-1619.
- [21] 张兆杰, 卢静雅, 刘浩宇, 等. 谐波背景下非线性供电系统电能计量数据远传技术研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 93-99.

(责任编辑 王海锋)