



基于误差估算的智能电表轮换策略与实践

常军超¹, 起家琦¹, 卢云菲¹, 杨景旭², 艾渊², 吴明奇²

(1. 云南电网有限责任公司计量中心, 云南 昆明 650051;

2. 南方电网数字电网集团有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 针对目前我国电网对智能电表到期更换和批次抽检轮换等运行维护中存在的不足, 提出一种基于计量自动化系统采集数据的智能电表运行误差估算的轮换策略。首先, 以台区为单位, 建立智能电表运行误差估算模型; 其次, 针对估算模型病态性情况, 采用正则化方法求解; 最后, 根据多个时间窗滚动计算和综合评价机制筛选出轮换的智能电表用于现场校验。通过实际电网算例验证了所提策略的有效性。

关键词: 智能电表; 轮换策略; 误差估算; 正则化

中图分类号: TM711

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025143

Strategy and practice of smart meter rotation based on error estimation

CHANG Junchao¹, QI Jiaqi¹, LU Yunfei¹, YANG Jingxu², AI Yuan², WU Mingqi²

1. Metering Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650051, China

2. Digital Grid Group Co., Ltd. of China Southern Power Grid, Guangzhou 510300, China

Abstract: In response to the deficiencies in the operation and maintenance of China's power grid regarding the replacement of expired smart meters and batch sampling rotation, a rotation strategy for estimating the operation error of smart meters based on data collected by the metering automation system was proposed. Firstly, a smart meter operation error estimation model was established on a per-transformer-area basis. Secondly, a regularization method was adopted to solve the ill-conditioned situation of the estimation model. Finally, based on rolling calculations over multiple time windows and a comprehensive evaluation mechanism, smart meters for rotation were selected for field verification. The effectiveness of the proposed strategy was verified through practical examples in the power grid.

Key words: smart meter, rotation strategy, error estimation, regularization

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2025-05-08

通信作者: 常军超, zhizhe-520@163.com

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (No.050000KC24010006)

Foundation Item: The Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No.050000KC24010006)



0 引言

2024年,国家发展改革委和国家能源局发布了《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》^[1],要求加快设备状态智能监测分析、创新应用数字化技术等。智能电表作为智能电网、电力物联网、智慧城市等的基本设施,截至2022年12月月底,我国有超过6.5亿只在运智能电表,承担着全国全年8万亿千瓦时电量的计量工作^[2],面对如此庞大的电表数量以及用电量统计,需要确保计量水平达到标准精度。我国要求用户智能电表的计量误差在 $\pm 2\%$ 以内,电表是否超出标准规定范围是人们普遍关注的问题^[3],也是12398能源监管热线反馈较多的问题。此外,按国家强制要求8年定期轮换的检定方式,全国年均智能电表更换量约8 000万只,若按要求采取对电表到期即更换新表的轮换策略,将造成巨大的硬件资源浪费,并给电网公司计量中心带来大量检定工作,从而造成人力、物力的浪费^[4]。同时,到期轮换的大批量电表中,大部分电表实际上仍处于良好状态,计量精度仍处在规定范围。相关研究表明,采取状态评估轮换的模式,部分电表的现场服役可超20年^[5],这将极大优化资源的利用,有利于我国“双碳”目标的实现。因此,如何对到期和即将到期的在运智能电表进行状态评估,进而采取相应更换策略,具有重要的研究意义。通常,计量误差超过 $\pm 2\%$ 的失准电表会首先被轮换更新,因此,可利用现计量采集数据来估算智能电表的运行误差,进而确定或推荐需要轮换的电表对象。

目前,针对智能电表运行误差估算和轮换策略方面的主要研究如下。文献[6-19]是以配电网台区为单位基于能量守恒原理开展的方法,它们视台区总表的供入能量等于供出能量。这类方法的基本思路为获取台区总表的计量值,其供出电量应该为其下辖的各用户电表的用电量、台区下

网络损耗,以及智能电表固有损耗三者之和,且通过采集多个周期(如日冻结电量、小时用电量)的数据,列写成线性方程组,然后通过回归算法求解得出各电表的运行误差。文献[7]基于广义能量守恒定律利用台区总表和用户分表信息分析智能电表运行误差,但求解方法步骤烦琐,一旦采集的数据不满足独立性和正交性要求,所提方法将失效,导致不能求解出智能电表的运行误差。文献[8]利用计量自动化系统的数据,推导出了智能电表误差的计算方法,但其适用性存在一定的局限性,其计算结果的准确率受多种因素影响,包括用户的用电量大小、用户电表的数量等。文献[9-10]分别提出了基于递推算法、双参数递归最小二乘法的低压台区智能电表误差的求解方法,但前者运算效率低,且不能对远期误差进行准确估算,后者则因采用聚类算法聚集了相近运行状态的数据作为估算模型的输入,再由双参数递归的最小二乘法求解,提高了计算结果的准确性。文献[11]在文献[9-10]基础上进一步改进,提出通过维度削减和采用递归最小二乘法相结合的方式,共同实现智能电表的误差估计,实现了台区网络损耗和智能电表误差的实时计算。文献[12-13]进一步改进了最小二乘法,提出限定记忆递推的最小二乘算法,用于智能电表运行误差估计,实现了实时估计电表误差的目标。上述文献或假设日线损率为一个常值,或假设其与总供电量成正比,针对这些研究所存在的不足,文献[14-18]考虑了动态线损或改进动态线损模型,此外,在估算智能电表误差时,进一步采用了改进的最小二乘法、奇异值分解方法、约束优化方法等。文献[6]和文献[19]均基于能量守恒智能电表误差模型的病态性问题,分别提出了削减病态性的方法。

总结上述研究,仍存在以下问题。

(1) 部分方法需要配电网台区的拓扑结构参数(包括低压线路连接方式、线路长度、电阻、

电抗等)及运行信息(电压、电流等),这些信息在目前的集中抄表系统中尚不普及。

(2) 针对用户用电数据矩阵病态性问题^[6,19],仍需要研究有效的数据预处理、筛选方法和有效的求解方法,以获得稳定、可靠的电表误差计算结果。

(3) 针对不同数据筛选方法、预处理方式,不同算法的呈现结果不同,尚需要制定策略以准确推荐出需要更换的失准电表。

基于此,本文以配电网台区为单位,建立智能电表运行误差估算模型;针对采集数据量大的问题,采用窗口滚动方法进行多次计算;针对模型病态性情况,采用多种正则化方法求解;综合评价获得多个计算结果,最终得到应轮换的智能电表。

1 基于误差估算的智能电表轮换策略

基于误差估算的智能电表轮换策略如图1所示。首先,电网公司在计量自动化系统中采集台区总表及其所辖分表的日电量数据,并做数据预处理,如删除存在空缺、异常数据的对应日期的所有数据,删除分表读数之和大于总表读数的对应日期的所有数据;其次,根据流入台区能量等于台区所有分表用电量和网络损耗的能量守恒原理,基于采集的数据构建智能电表误差估算模型;接着,对构建模型进行求解,由于估算模型通常存在病态问题,需要进行正则化等处理以获得稳定结果;最后,结合估算结果,制定机制,推荐出需要现场检定和轮换的智能电表清单。

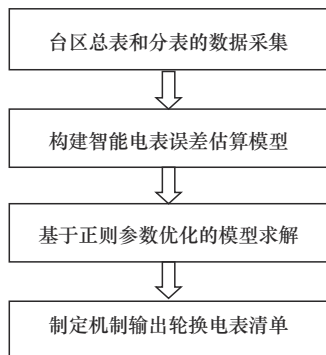


图1 基于误差估算的智能电表轮换策略

1.1 台区总表和分表的数据采集

电网公司常见的低压集中抄表总体方案^[20]如图2所示,其中,智能电表(RS-485分表、载波电能表、无线通信表)将用户的用电信息进行采集并储存,同时响应集中器的指令^[20]。对于单个台区而言,其物理拓扑结构如图3所示,包含1只运行误差可忽略的高精度总表和若干只分表。智能电表采集的数据经过归整后,示例见表1。对采集到的数据需要进行预处理,如表1中的分表1在2023年12月29日的采集值缺失,则应删除表1中该日总表和分表的所有数据;同样,分表100在2023年1月3日存在数据异常情况,也应删除该日的总表和分表的所有数据。

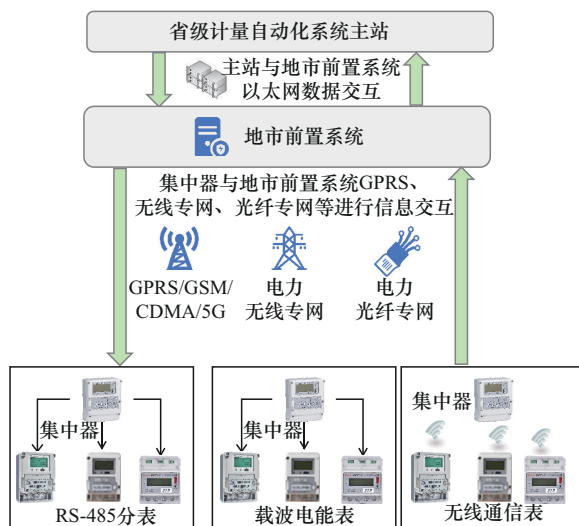


图2 低压集中抄表系统总体方案^[20]

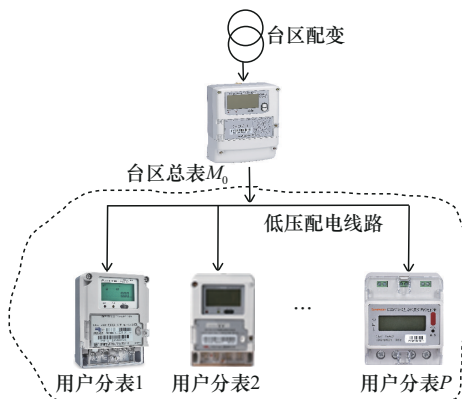


图3 台区物理拓扑结构



表1 智能电表采集的数据示例 单位: kW·h

数据时间	总表	分表1	分表2	分表k	分表100
2023/1/1	149.53	15.89	10.53	...	1.24
2023/1/2	148.70	11.94	6.45	...	1.24
2023/1/3	149.42	15.93	5.98	...	151.22
...	...	...	...	...	...
2023/12/29	150.56		5.66	...	1.21
2023/12/30	150.70	18.37	0.15	...	1.24
2023/12/31	148.73	29.62	0.44	...	1.25

1.2 构建智能电表误差估算模型

图2中基于流入台区的能量与流出的能量应遵循能量守恒定律^[6-8], 即总表电量应为各支路用电量之和, 但考虑实际配电网中存在电表计量误差、低压线路损耗和电表自身固有损耗, 构建的数学模型如下所示。

$$(1-\sigma_0(n))z(n)=\sum_{m=1}^M f_m(n)(1-\delta_m(n))+\delta_0(n)+W(n) \quad (1)$$

其中, $z(n)$ 为计量周期 n 时台区总表供入电量计量值, 单位kW·h; $\sigma_0(n)$ 为总表的计量误差; $f_m(n)$ 为计量周期 n 时台区分表 m 的计量值, 单位kW·h; $\delta_m(n)$ 为分表 m 的估计误差; $\delta_0(n)$ 为智能电表的固有损耗, 单位kW·h; $W(n)$ 为计量周期 n 时台区的真实线损, 单位kW·h, 其与台区拓扑结构及参数、分表用户用电量等因素相关。

为便于分析计算, 本文做了如下假设。

(1) 假设台区的总表精度高, 将其假设为无误差, 即 $\sigma_0(n)=0$ 。

(2) 假设台区分表的固有损耗随时间不变, 即 $\delta_0(n)=\delta_0$ 。

(3) 假设分表的计量误差较为稳定, 在一个时间段内保持不变, 即 $\delta_m(n)=\delta_m$ 。

(4) 假设日线损率与台区的总供电量成正比, 即 $W(n)=\delta_z \times z(n)$, 以此代替线损的估值, 其中 δ_z 表示台区计算线损率, 为待求变量。

此时, 式(1)变为:

$$z(n)=\sum_{m=1}^M f_m(n)(1-\delta_m)+\delta_0+\delta_z \times z(n) \quad (2)$$

根据计量自动化智能电表数据采集系统各采集时刻的各用户分表数据 $f_m(n)$ 和对应台区总表数据 $z(n)$, 求解出未知量 δ_m 、 δ_0 和 δ_z , 从而得到台区各智能电表的估算误差, 即 $\delta_m(m=1, 2, 3, \dots, M)$ 。

当计量自动化智能电表数据采集系统采集 N 天的用电量数据后, 本文将式(2)进行变换, 得到如下形式。

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta z(1)}{z(1)} \\ \frac{\Delta z(2)}{z(2)} \\ \vdots \\ \frac{\Delta z(N)}{z(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z(1)} & -\frac{f_1(1)}{z(1)} & \dots & -\frac{f_M(1)}{z(1)} & 1 \\ \frac{1}{z(2)} & -\frac{f_1(2)}{z(2)} & \dots & -\frac{f_M(2)}{z(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{z(N)} & -\frac{f_1(N)}{z(N)} & \dots & -\frac{f_M(N)}{z(N)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_M \\ \delta_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\Delta z(n)=z(n)-\sum_{m=1}^M f_m(n)$, 该值即计量线损,

与台区的网络真实线损不同。进一步地, 式(3)也可改写为 $Ax=b$ 的矩阵形式, 其中:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{z(1)} & -\frac{f_1(1)}{z(1)} & \dots & -\frac{f_M(1)}{z(1)} & 1 \\ \frac{1}{z(2)} & -\frac{f_1(2)}{z(2)} & \dots & -\frac{f_M(2)}{z(2)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{z(N)} & -\frac{f_1(N)}{z(N)} & \dots & -\frac{f_M(N)}{z(N)} & 1 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} \frac{\Delta z(1)}{z(1)} \\ \frac{\Delta z(2)}{z(2)} \\ \vdots \\ \frac{\Delta z(N)}{z(N)} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_M \\ \delta_z \end{bmatrix}$$

矩阵 A 中的元素均可由计量自动化智能电表数据采集系统采集的总表和分表用电量数据表征, 故将其定义为用电矩阵; b 则由计量线损值和总表计量电量值计算得到, 将其定义为线损系数向量; x 为待求解, 即模型需要计算的量。本文的上述变换使得式(3)所呈现的误差估算数学模型中, 除

未知变量外, 矩阵 $\mathbf{A}$ 中的元素和系数向量 $\mathbf{b}$ 中的元素相较现有文献中的处理方法明显较小, 因此, 在求解该模型时, 能够获得更稳定的解。

1.3 模型的求解

在实际配电网中, 采集的日期数量一般大于台区分表的数量, 即 $N \gg M+2$, 那么式 (3) 所呈现的在数学上称为超定方程, 通常可采用最小二乘法及其改进方法、优化算法等进行求解。最小二乘法的原理是通过求解如式 (4) 所示的值, 从而获得 $\mathbf{x}$ 的估计值:

$$\min \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\| \quad (4)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示欧氏 2 范数。求解得到 $\mathbf{x}$ 的估计值表示为:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (5)$$

实际在求解式 (5) 时, 往往会出现法矩阵 ($\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$) 奇异, 从而造成 $\mathbf{N}^{-1}$ 不存在, 导致无法估算出 $\hat{\mathbf{x}}$, 这种系统也被称为病态系统, 病态系统的解对于小扰动非常敏感。

数学上常通过矩阵条件数的大小来衡量系统病态的严重程度, 矩阵条件数的计算方法为:

$$\kappa(\mathbf{A}) = \frac{\sigma_{\max}(\mathbf{A})}{\sigma_{\min}(\mathbf{A})} \quad (6)$$

其中, $\sigma_{\max}(\mathbf{A})$ 和 $\sigma_{\min}(\mathbf{A})$ 分别为矩阵 $\mathbf{A}$ 的极大和极小奇异值。

条件数大, 则模型病态性严重, 这种情况下模型、方程对用电矩阵 $\mathbf{A}$ 中元素和向量 $\mathbf{b}$ 中系数特别敏感, 会导致计算的结果不可靠。本节举例说明条件数大的线性方程计算结果不稳定。

例如, $\begin{bmatrix} 0.835 & 0.667 \\ 0.333 & 0.266 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.168 \\ 0.067 \end{bmatrix}$ 的解为:

$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ 。若对 $b_2 = 0.067$ 进行轻微的扰动变为 0.066, 那么精确解变为 $\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -666 \\ 834 \end{bmatrix}$, 这说明 $\mathbf{b}$

中系数很小的扰动就会引起很大的结果变化。同理, 在一些病态系统、模型中, 矩阵 $\mathbf{A}$ 中元素的微小扰动也会引起计算结果的极大波动。

因此, 对构建的智能电表误差估算模型, 应先削弱其病态性, 添加正则参数就是常见的方法之一, 如式 (7) 所示为本文采用的吉洪诺夫 (Tikhonov, TIK) 正则化方法, 其原理是在求解时对式 (4) 进行改造:

$$J'(\mathbf{x}) = \min \{ \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\| + \|\mathbf{\Gamma x}\| \} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{\Gamma} = \lambda \times \mathbf{I}$, λ 为正则参数, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

式 (7) 的估算值表达式变为:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (8)$$

实践过程中发现, 不同正则参数 λ 的选取对求解结果仍有较大影响, 那么选择什么样的正则参数最合适, 最能接近真实解, 从而反映实际的电表运行误差, 研究人员提出了一些优选方法, 如基于 L 曲线的正则参数优化方法、基于广义交叉验证 (generalized cross validation, GCV) 的正则参数优化方法。本文采用后者对正则参数进行优化。GCV 的基本原理是根据前述误差估算模型和正则化的解构造一个如式 (9) 所示的广义交叉函数:

$$\min \left\{ G(\lambda) = \frac{\frac{1}{N} \|(I - A(\lambda))\mathbf{b}\|^2}{\left[\frac{1}{N} \text{trace}(I - A(\lambda)) \right]^2} \right\} \quad (9)$$

其中, $G(\lambda)$ 为 GCV 函数, trace 代表用电矩阵 $\mathbf{A}$ 的迹, N 表示矩阵大小。

通过求解式 (9) 的值, 可获得一个最佳正则参数, 将其代入式 (8), 就可得到每只智能电表的估算误差、台区线损率、智能电表固有损耗。

1.4 基于估算误差的智能电表轮换推荐机制

求解估算模型 (3) 时, 不同的数据量 N 下将得到不同的计算结果。因此, 本文采用多个窗口数据输入模式, 以获得多次计算结果, 并结合台区线损率的计算结果, 提出了轮换表的推荐评估机制, 具体如下。

1.4.1 窗口滑动机制

输入数据窗口选择机制如图 4 所示, 台区用户分表数量为 $M+2+\gamma$, 未知量为 $(P+2)$ 个, 实际台区采集的日用电量数据量 $N \gg M$, 因此, 选择其中



$(M+2+\gamma)$ 条数据即可形成式 (3) 所示的估算模型, 并通过式 (8) 求解出一次估算值, $\gamma \geq 0$ 。按照图4所示的模式进行多个窗口的数据选取和计算, 获得多次计算结果, 其中 l_{step} 为向下滑动选取的步长。

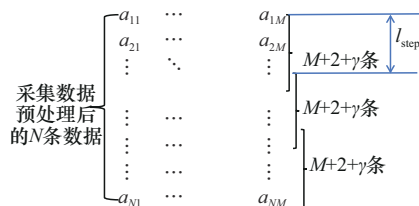


图4 输入数据窗口滑动机制

1.4.2 智能电表误差估算值

通过多个窗口在不同输入数据下滑动, 可得到每只智能电表的多个计算结果 X^{jm} , 即第 m 只智能电表第 j 次计算的误差值。本文将台区所有智能电表每次计算得到的误差值整理成集合形式:

$$X = \begin{Bmatrix} X^{11}, X^{21}, \dots, X^{J1} \\ \vdots \\ X^{1M}, X^{2M}, \dots, X^{JM} \end{Bmatrix}, \text{ 并取每次计算的平}$$

均值作为该智能电表的误差估算值:

$$\delta_m = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J X^{jm} \quad (10)$$

其中, J 由图4所示的滑动窗口计算得到。

1.4.3 轮换推荐机制

根据式 (8) 模型可计算得到每只智能电表的估算误差、台区线损率、智能电表固有损耗。由于实际配电网台区线损率不会很大, 结合实际的工程经验, 本文提出以下推荐策略: 筛选线损率在 10% 的台区数据进行误差计算。如果台区线损率也小于 10%, 推荐智能电表计算误差绝对值排序前 1% 的电表进行现场校验, 对现场校验存在切实问题的智能电表进行更换。

2 算例分析

本文采用实际配电网台区数据对所提策略进行验证。

2.1 台区1

该算例通过输入相同的数据, 评测了不同算法及不同正则参数下的计算结果及其算法效果。台区1有 247 只用户电表, 已知该台区现场校验失准的电表编号为 *****392 和电表编号 *****330。计算发现, 该台区的系数矩阵的最大特征值和最小特征值相差巨大, 矩阵的条件数 $k(A) = 215\,878$, 远大于 1 000, 这表明台区1的系统模型存在严重病态。本文将采集的数据全部作为输入量, 分别采用普通最小二乘法和 TIK 正则化方法人工设定不同的正则参数进行求解, 并选取计算误差绝对值最大的 4 只智能电表进行进一步分析。台区1估算结果见表2。

表2 台区1估算结果

估算方法	分表编号	估算误差
普通最小二乘法	*****399	1 174.70%
	*****347	1 538.50%
	*****333	-1 396.80%
	*****348	-933.70%
TIK 正则化方法 λ 取 1	*****392	-241.30%
	*****348	-438.10%
	*****299	255.30%
	*****204	302.30%
TIK 正则化方法 λ 取 10	*****194	61.40%
	*****392	-229.00%
	*****263	96.60%
	*****330	-122.20%
TIK 正则化方法 λ 取 100	*****194	21.80%
	*****392	-55.90%
	*****330	-22.90%
	*****366	13.40%
TIK 正则化方法 λ 取 200	*****303	9.40%
	*****194	8.40%
	*****392	-21.40%
	*****330	-7.80%

注: *****为脱敏信息。

由表 2 可知, 采用普通最小二乘法的筛选结果中并未包含失准的电表, 而采用 TIK 正则化方法后, 当正则参数 λ 取 1 时, 有 1 只失准电表被检测出, 当正则参数 λ 提高为 10、100、200 时, 2 只失准电表均被检测出。这说明, 当选择合适的正则参数后, 可准确检测出问题表。

2.2 台区 2

该算例分析了 GCV 方法在优化 TIK 正则参数方面的效果。台区 2 有 68 只用户电表, 已知该台区现场校验失准的电表序号为 53。计算得出, 该台区所形成的系数矩阵的条件数 $k(A)=170\ 200$, 远大于 1 000, 这表明台区 2 的系统模型存在严重病态。本文采用 TIK 正则化方法结合 GCV 方法进行优化求解, 台区 2 基于 TIK+GCV 优化结果如图 5 所示。由图 5 (a) 所示的估算结果可看出, 序号 29 和序号 53 的电表估算误差最大, 根据所设定的推荐规则, 失准的电表 (即序号 53) 被准确检出。图 5 (b) 展示了 GCV 迭代过程曲线。

2.3 台区 3

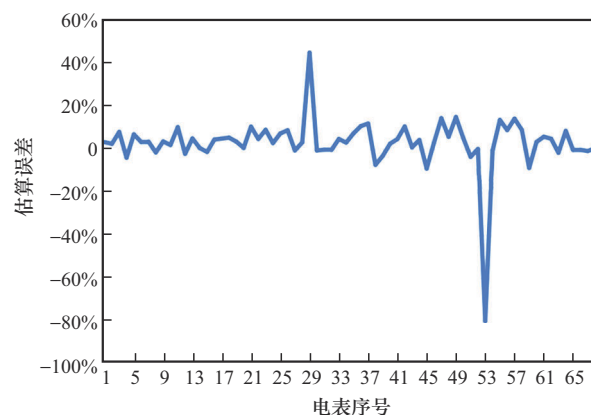
该算例分析了图 4 所示的数据输入多个窗口选择机制下的效果。台区 3 共有 63 只用户电表, 经数据预处理后有效数据共计 166 条。由于电表数量为 63, 则未知量为 $P+2=63+2=65$ 个, 滑动窗口大小取 65, 滑动步长取值为 1, 则共有 102 次计算结果。滑动窗口模式下的计算结果如图 6 所示。

将 102 个时间窗口的数据分别输入模型进行计算, 得出台区 3 下编号 71****30 电表误差最大, 102 次计算的误差值在 $-46\% \sim -30\%$ 。经现场校验, 该编号电表的误差为 -41.95% , 这说明本文方法可有效检测出失准的电表。

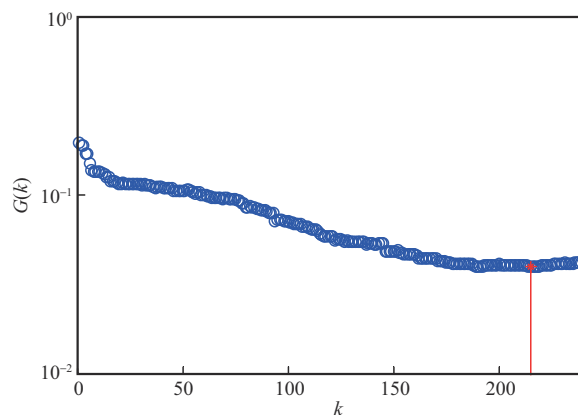
2.4 区域电网智能电表轮换应用

2023 年 5 月 18—20 日, 本文分别针对某地区 3 个供电局共 12 个供电所的台区进行计算, 并对算法推荐的异常电表开展了现场核查工作, 共完

成 30 只异常电表的现场核查。区域电网应用结果见表 3。



(a) TIK+GCV 估算结果



(b) GCV 迭代过程曲线

图 5 台区 2 基于 TIK+GCV 优化结果

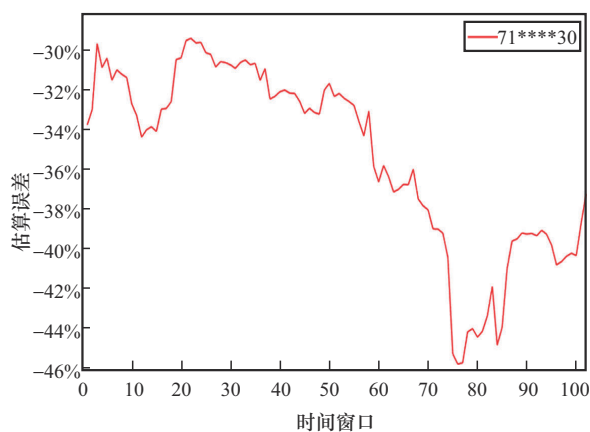


图 6 滑动窗口模式下的计算结果

由表 3 可知, 现场核查确认的异常电表 26 只、正常电表 4 只, 准确率为 86.67% , 这表明能够支撑到智能电表现场轮换工作。



表3 区域电网应用结果

序号	供电所	本文计算误差	现场核查误差	现场核查结果
1	YH	-70.92%	-65.24%	疑似窃电
2	XQ	-51.15%	-46.75%	疑似窃电
3	RD	-57.76%	-59.10%	疑似窃电
4	RD	-51.31%	-45.75%	疑似窃电
5	RD	-83.81%	-79.56%	疑似窃电
6	RD	-65.99%	-69.25%	疑似窃电
7	RD	-65.02%	-0.15%	进出线反接
8	RD	-43.59%	-37.53%	疑似窃电
9	CX	-85.60%	/	疑似窃电
10	YH	-73.53%	0.00%	正常
11	DS	-76.22%	/	正常
12	DS	-59.10%	-72%	疑似窃电
13	DS	-44.51%	-76%	电表故障
14	DS	-48.55%	/	进出线反接
15	HC	-53.57%	-58.54%	疑似窃电
16	CD	-57.54%	-3.75%	表计超差
17	LY	-57.63%	-0.25%	接线不规范
18	LT	-49.47%	-3.28%	表计超差
19	XS	-72.60%	-71.61%	疑似窃电
20	XS	-64.87%	-64.91%	疑似窃电
21	XS	-63.65%	-3.62%	表计超差
22	XS	-63.10%	-0.85%	正常
23	XS	-59.95%	-63.99%	疑似窃电
24	XC	-56.92%	-52.63%	疑似窃电
25	KT	-48.68%	-41.93%	疑似窃电
26	KT	-81.94%	-82.69%	疑似窃电
27	HC	-72.89%	-72.71%	疑似窃电
28	HC	-72.12%	-71.17%	疑似窃电
29	HC	-57.47%	-62.50%	疑似窃电
30	HC	-60.36%	-4.10%	表计超差

注:信息保密原因,供电所名称以字母代替。

3 结束语

我国早期安装的智能电表陆续到期,需要进行轮换。本文针对“一刀切”的到期即更换策略存在资源浪费且缺乏针对性的问题,推荐了一种

基于智能电表运行误差估算的轮换策略。该方法以台区为单位,仅需要计量自动化系统采集的台区总表和分表的日用电量数据,采用滚动计算方式和正则化优化方法,即可得到每只智能电表的运行误差估算值,再根据本文推荐的排序规则,可以确定台区内存在问题的智能电表作为推荐校验对象进行现场校验。该策略为智能电表轮换提供了更为明确和有效的检测与更换对象,显著提高了工作效率,在地区供电局的实际应用中,该策略的查准率达到86.67%,充分验证了其实用性。

后续将开展台区下故障智能电表漏查率研究以及融合智能电表台账数据、计量数据、运行数据的智能电表状态评估方法研究。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于新形势下配电网高质量发展的指导意见[J].大众用电,2024,39(3):8-11.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions on high-quality development of distribution network under the new situation[J]. Popular Utilization of Electricity, 2024, 39(3): 8-11.
- [2] 国家能源局.2022年全社会用电量同比增长3.6%[J].电力勘测设计,2023(1):48.
National Energy Administration. The total electricity consumption by the whole society in 2022 increased by 3.6% year-on-year[J]. Electric Power Survey and Design, 2023(1): 48.
- [3] 庾璟,唐登平,蔡文嘉,等.基于状态参量的智能电表误差状态预测方法[J].仪表技术,2019(3):1-5,41.
TUO J, TANG D P, CAI W J, et al. An error state forecasting method for smart meters based on state parameters[J]. Instrumentation Technology, 2019(3): 1-5, 41.
- [4] 柯航.智能电能表健康度评价指标体系构建方法[D].武汉:华中科技大学,2022.
KE H. Construction method of health evaluation index system for intelligent watt-hour meter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [5] 陈昊南,张垠,肖爽.让电能表多工作50%的时间:上海开启智能电能表状态轮换新模式[J].国家电网,2018(3):36-41.
CHEN H N, ZHANG Y, XIAO S. Let the watt-hour meter work 50% more time: Shanghai opens a new mode of smart watt-hour meter state rotation[J]. State Grid, 2018(3): 36-41.

- [6] 陈丽丹, 马永良, 张哲, 等. 基于广义交叉验证和吉洪诺夫正则化参数的智能电表计量异常识别方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 125-133.
CHEN L D, MA Y L, ZHANG Z, et al. Anomaly detection method of smart meter based on Tikhonov regularization and generalized cross-validation[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 125-133.
- [7] GUO J T, JIN Z G. Autonomous algorithm for relative error of generalized flow meters in tree topology[J]. Measurement, 2011, 44(9): 1592-1597.
- [8] 郭景涛. 面向智能电网 AMI 的网络计量关键技术与用户用电数据挖掘研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
GUO J T. Research on key technologies of network metering and data mining of user electricity consumption for smart grid AMI[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [9] KORHONEN A. Verification of energy meters using automatic meter reading data[D]. Aalto: Aalto University, 2012.
- [10] LI Y, LI G, YANG G, et al. Method for solving electric energy meter error of low-voltage station based on big data[C]//Proceedings of the 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1036-1040.
- [11] KONG X Y, MA Y Y, ZHAO X, et al. A recursive least squares method with double-parameter for online estimation of electric meter errors[J]. Energies, 2019, 12(5): 805.
- [12] KONG X Y, ZHANG X P, LI G, et al. An estimation method of smart meter errors based on DREM and DRLS[J]. Energy, 2020, 204: 117774.
- [13] 孔祥玉, 马玉莹, 李野, 等. 基于限定记忆递推最小二乘算法的智能电表运行误差远程估计[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2143-2151, 2394.
KONG X Y, MA Y Y, LI Y, et al. Remote estimation method for measurement error of smart meter based on limited memory recursive least squares algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2143-2151, 2394.
- [14] 徐焕增, 孔政敏, 王帅, 等. 基于动态线损及 FMRLS 算法的智能电表误差在线评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8349-8358.
XU H Z, KONG Z M, WANG S, et al. Online error evaluation model of smart meter based on dynamic line loss and FMRLS algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8349-8358.
- [15] 杨耿杰, 韦先灿, 高伟. 基于改进动态线损估计法的超差智能电表识别[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3662-3671.
YANG G J, WEI X C, GAO W. Error estimation method for smart meters considering sudden misalignment[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3662-3671.
- [16] 吕玉玲, 彭荟, 刘学文. 基于稀疏优化的智能电表误差估计方法[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 1-7.
LYU Y L, PENG H, LIU X W. Error estimation method for smart meter based on sparse optimization[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2023, 40(3): 1-7.
- [17] 李涛, 吴正田, 刘威. 基于动态线损与奇异值分解的智能电表误差估计[J]. 电工技术, 2024(8): 221-224.
LI T, WU Z T, LIU W. Error estimation of smart meters based on dynamic line-loss and singular value decomposition[J]. Electric Engineering, 2024(8): 221-224.
- [18] 吕玉玲, 陈文礼, 程瑛颖, 等. 基于约束优化模型的智能电表运行误差及日线损率联合估计方法[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 1257-1265.
LYU Y L, CHEN W L, CHENG Y Y, et al. The joint estimation method of smart meter measurement error and daily line loss rate based on constrained optimization model[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 1257-1265.
- [19] 陈昊, 乔亚男, 刘婧, 等. 考虑模型病态性的智能电表运行误差分析方法[J]. 电力建设, 2020, 41(2): 94-100.
CHEN H, QIAO Y N, LIU J, et al. Analysis method for operation error of smart meter considering ill-conditioned model[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 94-100.
- [20] 梁文献. 新型集抄系统中电表故障自动诊断和变更识别算法的研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
LIANG W X. Research and application of automatic fault diagnosis and change identification algorithm for electric meter in new centralized reading system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

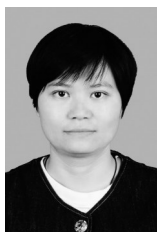
[作者简介]



常军超 (1990-), 男, 云南电网有限责任公司计量中心工程师、计量运维员, 主要研究方向为计量装置管理及运维。



起家琦 (1992-), 男, 云南电网有限责任公司计量中心工程师, 主要研究方向为电能计量。



卢云菲 (1990-), 女, 云南电网有限责任公司计量中心工程师, 主要研究方向为电能计量。



艾渊 (1989-), 男, 南方电网数字电网集团有限公司工程师, 主要研究方向为电网数字化转型、用电与计量。



杨景旭 (1996-), 男, 南方电网数字电网集团有限公司助理研究员, 主要研究方向为用电与计量。



吴明奇 (1990-), 男, 南方电网数字电网集团有限公司助理工程师, 主要研究为用电与计量。