

基于 AMI 数据及电能表计量点误差远程诊断的 低压失准模型求解方法

蒋群¹, 徐永进¹, 李先志², 廖绍成¹, 谢烽¹

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310012; 2. 北京志翔科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对低压电网的失准模型, 提出了一种基于 AMI (advanced metering infrastructure) 数据和电能表计量点误差的求解方法。该方法通过分析低压电网线损模型的能量守恒方程组, 基于线阻系数的物理含义, 将受限岭回归方法引入线损模型, 在理论上证明了低压失准模型求解等价于有约束条件的最优化问题。为验证所提出方法的有效性, 在实验室仿真数据和现场真实数据上进行了盲测, 结果表明该方法在小超差计量点的检测上具有较高的命中率和检出率, 显示出良好的工程实用性和经济价值。

关键词: AMI; 智能电能表; 误差检测; 低压线损模型

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.020

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)03-0193-08

Solution of low-voltage loss model based on AMI data and remote error detection for smart electricity meter measurement

JIANG Qun¹, XU Yongjin¹, LI Xianzhi², LIAO Shaocheng¹, XIE Feng¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310012, China.

2. Beijing Zhixiang Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In response to the inaccuracy model of low-voltage power grid, a solution method based on AMI (advanced metering infrastructure) data and metering point errors of electricity meters is proposed. This method analyzes the energy conservation equation set of the low-voltage power grid line loss model, introduces the constrained ridge regression method into the line loss model based on the physical meaning of the line resistance coefficient, and theoretically proves that the solution of the low-voltage inaccuracy model is equivalent to an optimization problem with constrained conditions. To validate the effectiveness of the proposed method, blind tests are conducted on both laboratory simulation data and real-world data, and the results indicate that the method has a high hit rate and detection rate for small out-of-tolerance metering points, demonstrating good engineering practicality and economic value.

Keywords: AMI, smart electricity meter, error detection, low-voltage line loss model

0 引言

目前,国内正在大力发展智能电网,电能计量的准确度直接关系到智能电网的稳定运行与供用电双方的切身利益,准确评价电能表的运行状态是衡量电力公司运营管理水平的重要标准。在智能电网稳定运行方面,依赖于大量的数据信息,其中电能计量是基础和核心的部分。通过准确、实时的电能计量,能及时获取电网运行状态的反馈信息,从而及时做出调度和调整,保证智能电网的稳定运行。在市场经济需求方面,电力作为一种商品,其

交易需要公平、公正、公开。电能计量是电力市场的交易依据,其准确性直接影响到电力公司和用户之间的利益分配,影响电力市场的正常运行。在用电公平效率方面,对电网公司而言,准确的电能计量有助于实现用电的公平,避免用电纠纷。同时,准确的电能计量也有助于电网公司对电力网络进行高效的监控和管理,提高运营效率。在节约用电和节能减排方面,准确的电能计量有助于电网公司和用户更准确的了解用电情况,为进一步节约用电、节能减排提供数据支持。电能计量的准确性不仅关系到电网公司的运营管理水平,也关系到整个社会的经济发展和环境保护。为了保障电能计量

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211YF200053)

的准确性,应不断提升电能表的检测技术,加强其运行状态的检测与评价。

以智能电能表为代表的高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI),作为电能计量的核心装置,可以定时或即时获取用户的实时/准实时电能使用数据,为更精准深入的智能电网大数据分析提供了基础^[1-3]。经过多年推广,国网已经在大部分地区基本实现智能电能表全覆盖与全采集,可以支撑数据驱动的智能电能表状态评价与远程监控^[4-5]。随着智能电能表数据的积累以及大数据分析技术的不断进步,基于远程在线监测与大数据分析技术已实现对电能表运行状态的远程分析,成为一种新的电能表运行质量评价与监测手段。

在实时监测方面,远程在线监测技术可以实时收集电能表的运行数据,如电压、电流、功率因数等,并能对异常数据进行实时报警,有助于及时发现和解决潜在问题。在数据完整性方面,智能电能表的全覆盖和全采集使得数据来源更加完整,可以全方位的反应电能表的运行状态。在大数据分析方面,通过对大量数据的分析,可以挖掘出电能表运行中的潜在规律和趋势,预测可能出现的问题,为预防性维护提供决策支持。在评价准确性方面,基于数据的评价方式更加客观,能更准确的反映电能表的真实性能,减少人工误判的可能性。在远程化管理方面,远程在线监测技术实现了电能表的远程化管理,降低了现场巡检的人力成本和时间成本,提高了管理效率^[6-8]。

文献[9]针对目前智能电能表现场检定存在人工成本高、效率低、同步延时率高、监测覆盖率低等问题,提出了一种基于动态线损和渐消记忆递推最小二乘法的智能电能表在线估计算法。首先通过分析供电量和台区线损间的关系,改进传统模式,实现误差估计更接近实际值,然后利用 FMRLS 算法求解动态线损误差模型,获得智能电能表运行误差;最后,结合电网公司数据进行验证。文献[10-11]针对智能电能表现场计量精度问题,利用现场运行数据分析温度、电流、功率因数对电能表计量误差及其一致性的影响。依据研究结果可以补偿电能表计量误差,提高计量结果准确性,同时对进一步优化电能表运维方案,改进设计也具有参考价值。文献[12]借助故障发生的背景信息,提出了基于失效物理的电能表故障定位、故障复现试验方法,通过一些实际评价案例,说明了该方法的实施过程和应用效果,为电能表的验收评价、现场故障分析和批

量管理提供了一种有效的技术手段。

文献[13-14]从低压台区的能量守恒角度,提出了一种基于 AMI 数据进行计量点异常远程诊断的方法。文献[9]所提供的技术方案已经在国网各个网省建立起智能电能表状态评价与更换工作体系,可以对所有在运电能表的运行误差值进行自动检测和评估。但现有方法通常利用较低频的 AMI 计量数据,对误差的评测存在天然滞后性,文献[10]根据基尔霍夫定律,从复数域推导出线路损耗的表达式,结合 AMI 高频数据建立起台区下的能量守恒方程组。但在使用真实的海量高频数据时,此方程组的求解主要有如下问题:

- 1) 数据量增大导致方程中的线阻系数类未知量过多,问题复杂度显著提升;
- 2) 真实场景中用户用电行为一般呈现较高相关性,在矩阵求逆时受限于计算精度容易出现近似零值,此时最小二乘法求解不稳定^[15-16]。

针对这些问题,本文提出了采用受限岭回归方法的二次规划模型求解算法。通过在试点台区的实验室仿真数据和现场真实数据上盲测共同验证,此求解方法对小超差计量点有较高的命中率及检出率,未来可依此对实际业务形成指导方案。

1 智能电能表误差估计信息获取与预处理

1.1 智能电能表误差估计思路

本文所提智能电能表误差估计思路主要包含 4 个步骤:

- 1) 获取估计所需信息:台区类别、台区编号、用户编号、电能表编号、采集日期、综合倍率、电能表日电量计量值;
- 2) 量测数据预处理,包括对原始数据中异常值的剔除和缺失值的补充等;
- 3) 基于台区网络拓扑结构和量测数据建立约束优化模型,并设计算法求解;
- 4) 基于一定的精度指标,对智能电能表误差估计模型的实际效果进行检验。

具体实施步骤如图 1 所示。

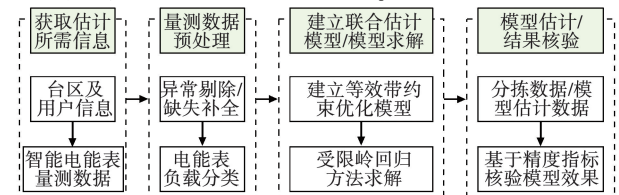


图 1 智能电能表误差估计流程图

Fig. 1 Work flow of error estimation of smart electricity meter

1.2 量测数据预处理

由于多种因素影响导致实际数据存在许多的不确定性,从电力部门直接获取的电能表故障数据中存在一些缺失、重复、异常的无效数据,如台区档案信息缺失、数据采集不完整、数据重复等,若直接使用这类数据将使系数矩阵病态性严重,这些问题都会对模型造成影响,无法精准估计智能电能表的真实误差,影响算法求解精度。同时,智能电能表在轻负载或空负载条件下产生的脉冲无规律,存在潜动现象。因此轻载会影响智能电能表计量的精准度,为保证所求解的相同精度等级的智能电表误差估计值在同一个基本误差限内,计算时不考虑轻载智能电能表。因此在误差估计前,需要对智能电能表采集的原始量测数据进行有针对性的预处理,具体步骤如下:

1) 对于重复数据,根据采集数据日期剔除重复数据;

2) 对于数据异常和缺失问题,剔除异常数据,对缺失数据进行补全,缺失数据采用向前查询进行自动补抄,用距离最近的前一次有效数据填充当前数据的缺失项;

3) 将台区内所有智能电能表按日均用电量进行分类:大负载(日平均用电量高于 30 度,标记为 1)、一般负载(标记为 2)、轻载(日平均用电量低于 1 度,标记为 3)。

2 智能电表运行误差分析模型

2.1 智能电表运行拓扑

结合理论和现场实际,常见的配电台区包括一个总表和多个分表。其中,总表的作用是计量配电台区内的总电量,分表的作用是计量每个用户的用电量,配电台区线路拓扑结构为图 2 所示的树形拓扑。

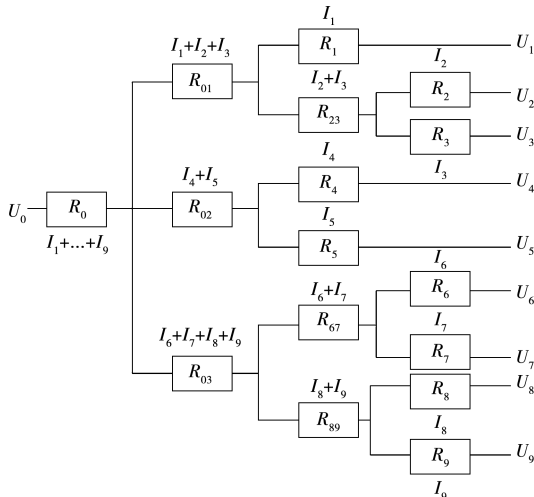


图 2 台区线路拓扑结构示意图

Fig. 2 Topological structure of grid in a station area

图 2 中, R 为线路上的等效电阻, U 与 I 分别为线路上的电势与电流。

2.2 约束优化模型

在实际中,配电台区的用电量不仅有用电量,还有损耗电量,设置一个配电台区,包含一个总 Y 和 K 个分表,根据能量守恒定律和图 1 的配电台区线路拓扑结构图,可知:配电台区总供电量 = 配电台区单个用户用电量之和 + 损耗电量。其中,损耗电量主要包括固定损耗和线路损耗两部分。

定义: ε_k 为分表的近似相对误差, x_{ji} 为在计量周期内流经分表 k 的实际消耗的电能, ϕ_k 为计量周期内分表 k 的计量值增量。

因此,在基础上,利用数学归纳法给出了基于 AMI 数据及电能表计量点误差远程诊断的低压失准模型的整体形式(忽略不同末端分支的电压相位差)如下:

$$y = \sum_{k=1}^p \phi_k (1 - \varepsilon_k) + LL + \varepsilon_0 \quad (1)$$

式中: y 表示台区总表的供电量; ϕ_k 表示台区第 k 个计量点的用电量计量值; ε_k 表示台区第 k 个计量点的相对误差; LL 表示台区的线路损耗; ε_0 表示台区的固定损耗。

由于实际环境中台区总表的计量精度远高于分表,可认为台区总表的误差无限接近于零。因此,虽然无法获得 y 的真实值,但可以用台区总表计量值增量来近似 y 。式(1)所示的模型包括 $P+2$ 个未知参数,得到 k 组计量数据后,且满足 k 大于等于 $P+2$ 时,方程组是可解的。求解方程组即可得到分表的估计相对误差、台区线损率和固定损耗。

计量周期 T 内的线路损耗 LL 有如式(2)所示:

$$LL \approx \sum_{k=1}^p \beta_{kk} F_{kk} \frac{E_k^P E_k^P + E_k^Q E_k^Q}{\bar{U}_k^2 T} + \sum_{k,l=1, k < l}^p 2\beta_{kl} F_{kl} \frac{E_k^P E_l^P + E_k^Q E_l^Q}{\bar{U}_k \bar{U}_l T} \quad (2)$$

式中: β_{kk} 表示末端分支 k 到总表之间的线阻; β_{kl} 表示交叉的两个末端分支 k 和 l 之间从共享分支开始到总表之间的线阻; F_{kl} 表示末端分支 k 和 l 的交叉线损调节系数(line loss adjustment factor, LLAF),定义为采集间隔内的实际线损量与电流恒定时所产生线损量(基量)之间的比值,可以表征末端分支的用电模式(负荷变化模式); E_k^P, E_k^Q, \bar{U}_k 分别表示末端分支 k 的有功电能、无功电能与电压。求解过程中,每个末端分支的用电模式即负荷变化特征可以分解成波动范围较小的有限个数进行搜索,比如

假定为 M 个搜索区间,则两个不同末端分支可能的交叉线损调节系数有 C_M^2 个^[17]。

可以看出,式(1)中的未知量包括: p 个误差 ε , 1 个固损 ε_0 和 $p + C_p^2$ 个线阻系数 β ,比如对于有 100 个用户的低压台区,其对应方程共有 5 050 个线阻系数,传统方法求解复杂度较高。本文提出一种针对求解这一含较多未知量的方程组的新方法。

2.2.1 线阻系数 β 的性质

首先,位于总表不同相位的两个末端分支之间没有公共线路分支部分,那么其对应的线阻系数为零,即:若末端分支 k 和 l 分别接在总表的不同相位上,则 $\beta_{kl} = 0$ 。其次,由于 β_{kl} 表示从台区总表到末端分支 k 和 l 的线路公共部分的线阻系数, β_{kk} 表示总表到末端分支 k 的所有线路的电阻之和,则有如下关系:

$$\beta_{kl} \geq 0, \quad \forall k, l = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

与:

$$\beta_{kl} < \min\{\beta_{kk}, \beta_{ll}\}, \quad \forall k \neq l \quad (4)$$

在如图 1 中,有: $0 \leq R_0 + R_{02} = \beta_{45} < \beta_{44} = R_0 + R_{02} + R_4$ 等。

2.2.2 模型简化-表箱或末端分支合并

根据台区拓扑结构,可以将式(2)中线阻系数相等的交叉项进行合并。如在图 1 中,有: $\beta_{12} = \beta_{13} = R_0 + R_{01}$; $\beta_{14} = \beta_{15} = \dots = \beta_{19} = R_0$; \dots ; $\beta_{68} = \beta_{69} = R_0 + R_{03}$ 。

若一个台区下的末端分支数目为 K ,一级分支将 K 个末端分支分为两组,末端分支个数分别为 K_1 和 K_2 ($K_1 + K_2 = K$),则这一级分支可以合并的交叉项数目为: $C_K^2 - C_{K_1}^2 - C_{K_2}^2 = K_1 K_2$ 。

另外,如果台区具有表箱结构(如城市台区),则可以假定表箱内同一相位的各个计量点其表箱前电阻近似相等,即其对应的线阻系数近似相等。若台区所有计量点分布在 K 个表箱内,则线阻系数的个数可以简化为 $p + C_K^2$ 个。根据大部分城市居民台区的二级星形拓扑特点,线阻系数可以进一步缩减到 $p + K$ 个参数。综上,根据拓扑关系,线路损耗式(2)可以大幅简化,同时,合并后的线阻系数仍满足式(3)和式(4)中的关系。

2.3 模型求解-受限岭回归方法

2.3.1 模型的矩阵表达式

将线损表达式式(2)代入失准模型方程式(1),并做简单的变形如下:

$$y - \underbrace{\sum_{k=1}^p \phi_k}_{dY} = \sum_{k=1}^p -\phi_k \varepsilon_k + \sum_{k=1}^p \beta_{kk} F_{kk} \underbrace{\frac{E_k^p E_k^p + E_k^Q E_k^Q}{\bar{U}_k \bar{U}_k T}}_s + \varepsilon_0 \quad (5)$$

$$\sum_{k,l=1, k < l}^p 2\beta_{kl} F_{kl} \frac{E_k^p E_l^p + E_k^Q E_l^Q}{\bar{U}_k \bar{U}_l T} + \varepsilon_0 \quad (5)$$

当积累 n 个计量周期的数据后,可以构建基于方程式(5)的线性方程组,将这个线性方程组用分块矩阵形式表示如下:

$$dY = [\Phi \quad S \quad 2C \quad \mathbf{1}] \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \beta_s \\ \beta_c \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

各分块的意义如式(5)中记号所示。 $\Phi \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 表示电量对应系数列; ε 表示各个计量点的相对误差构成的列向量; $S \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 表示线损平方项对应系数列; $C \in \mathbb{R}^{n \times C_p^2}$ 表示线损交叉项对应系数列; $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 表示 n 维全 1 列向量。

通过 1.1 节的分析可知,这里的线阻系数有着具体的物理含义支撑,其取值范围并不是任意的,即方程组的解的可行域并不是全空间;另一方面,若末端分支的用电行为类似,则数据的共线性程度较高,此时模型的求解也会受到影响^[18-19]。为解决上述两个问题,引入约束条件式(3)和式(4),采用受限岭回归方法进行模型求解。

2.3.2 受限岭回归方法

首先注意到,求解岭回归因子为 λ 的线性方程组 $Xw = b$ 等价于求解如下的方程组: $\begin{bmatrix} X \\ \sqrt{\lambda} I \end{bmatrix} w = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}$,其最小二乘解,其中 I 为单位矩阵,其阶数等于系数矩阵 X 的列数。

在低压台区失准模型式(6)的求解中,引入受限岭回归方法对计量点误差项 ε 进行惩罚(岭回归正则化),对线阻系数项 β 基于物理含义进行线性限制(受限),即所有的线阻系数不小于 0(根据限制条件式(3)),交叉项系数小于相对应的平方项系数(根据限制条件式(4)),那么对失准模型式(6)中的未知量 ε 进行正则化等价于求解如下方程组:

$$\begin{bmatrix} \Phi & S & 2C & \mathbf{1} \\ \sqrt{\lambda} I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \beta_s \\ \beta_c \\ \varepsilon_0 \end{bmatrix} = dY \quad (7)$$

这里的三个矩阵分别对应 X, w 和 b 。在约束条件为式(3)和式(4)下求解方程式(7)可采用常用的二次规划方法。

3 模型验证

为了验证模型对小超差计量点的检出能力,在现场选取 3 个运行台区作为试点台区,获取试点台区在用电信息采集系统生产环境中的数据。分别在仿真数据和真实数据条件下对平均负荷大于等于 $0.1I_b$ 的计量点做调整用电量正负 5% 的盲测验证(盲测:增大或减小某个计量点的用电量以模拟超差^[20-21]),结果见表 1。

表 1 盲测验证结果

Tab. 1 Experimental results on blind tests

台区编号	仿真数据			真实数据		
	正/负/正/负/双	命中率/%	检出率/%	正/负/正/负/双	命中率/%	检出率/%
666	52/50/52/50	100.0	96.2	38/31/42/27	100.0	65.1
793	55/55/55/55	100.0	100.0	38/44/50/32	100.0	74.6
969	30/30/30/30	100.0	100.0	24/20/29/15	42.31	73.3

表 1 中第 2 列表示正向调整命中个数/负向调整命中个数/正向或负向调整命中个数/正负向均命中个数。可以看出,在仿真数据上的盲测基本能达到全命中及全检出;在真实台区的数据上的模型效果因受到时钟对齐程度、现场用电环境等因素的影响,其命中检出不及仿真数据,但仍能达到 75% 以上,模型已具备工程实用性^[22-24]。

3.1 仿真数据验证

图 3 为模型在某一试点 793 台区(总表倍率 300)大约 10 个月的 96 点高频仿真数据上对计量点 10 进行电量增大 5% 的盲测结果,其中,图 3(a)表示 96 点滑动平均后的统计线损(总表供电量减去分表用电量之和),(b)表示原始每 15 分钟的统计线损(可以看到原始高频数据的量化噪声比较大),(c)表示模型的拟合残差,(d)表示每个计量点的误差估计值。可以看出,盲测表 10 的误差估计值约为 5%,且模型无误检。

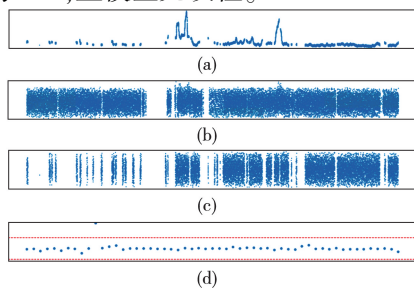


图 3 仿真数据盲测结果
Fig. 3 Results of blind tests on simulated data

3.2 仿真数据验证

图 4 为模型在试点 793 台区大约 10 个月的 96 点高频真实数据上对计量点 10 进行电量增大 5% 的盲测结果,其中每个子图的表示含义与图 3 类似。可以看到,盲测表 10 的误差估计值约为 5%,且模型无误检,但计量点 34 的误差估计值在超差边界上,易被模型误检,说明真实数据受噪声、现场用电环境等因素的影响,效果比仿真数据略差^[25-26]。

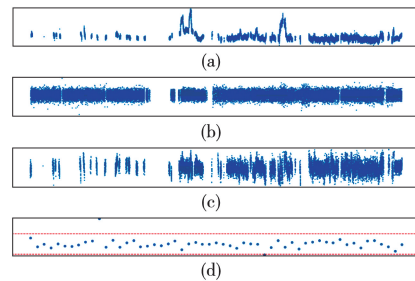


图 4 真实数据盲测结果
Fig. 4 Results of blind tests on real-world data

为说明受限岭回归方法引入的合理性,下面基于 793 试点台区的真实数据,仿真生成不同线损率及总表不同时钟偏差的仿真数据。对台区下平均负荷大于等于 $0.1I_b$ 的用电表做调整用电量正负 5% 的盲测验证。对比利用不同方法(岭回归与受限岭回归)求解模型式(6)在命中率及检出率上的差异:岭回归方法即直接求解方程组式(7),受限岭回归方法即在约束条件式(3)和式(4)下求解方程组式(7)。结果见表 2。

随着时钟偏移增大,两种算法的检出率都有一定程序的下降,受限岭回归方法在偏移 3 min 内的检出效果相较岭回归方法更为理想,并且在不同时间偏移的条件下,受限岭回归方法都比岭回归方法的检出率要高出 10% ~ 20%。

这个结果表明在比较接近实际台区的噪声因素下,受限岭回归算法的抗噪声能力更强:

1) 受限岭回归时钟偏移 3 min 的结果优于岭回归偏移 1 分钟的结果;

2) 大噪声条件下,偏移 3 min,受限岭回归比岭回归多检出约 20% (相对值);偏移 5 min,多检出 50%;偏移 15 min,则多检出一倍。非随机噪声越大,受限岭回归算法表现越显著。

表2 不同算法盲测效果比较
Tab. 2 Experimental results on blind tests
with different algorithms

算法	线损率/ %	后移1分钟		后移3分钟	
		命中率/ %	检出率/ %	命中率/ %	检出率/ %
岭回归	0	100.0	67.3	100.0	70.9
	2	100.0	76.4	100.0	69.1
	4	100.0	74.6	100.0	69.1
	6	100.0	83.6	100.0	70.9
	10	100.0	84.6	100.0	68.2
受限岭回归	0	100.0	95.5	100.0	85.5
	2	100.0	92.7	100.0	83.6
	4	100.0	95.5	100.0	84.6
	6	100.0	93.6	100.0	82.7
	10	100.0	93.6	100.0	81.8
算法	线损率/ %	后移5分钟		后移15分钟	
		命中率/ %	检出率/ %	命中率/ %	检出率/ %
岭回归	0	100.0	60.0	100.0	16.4
	2	100.0	54.6	100.0	14.6
	4	100.0	52.7	100.0	13.6
	6	100.0	50.0	100.0	11.8
	10	100.0	50.9	100.0	10.9
受限岭回归	0	100.0	74.6	100.0	36.4
	2	100.0	75.5	100.0	27.3
	4	100.0	74.6	100.0	25.5
	6	100.0	72.7	100.0	23.6
	10	100.0	72.7	100.0	25.5

4 结 论

提出了针对低压线损模型的求解方法,与之前研究工作的主要创新之处在于,本文综合分析了线阻系数的性质,用合并末端分支或表箱的方法减少未知量个数,大幅降低问题复杂度。同时,从线阻系数本身的物理含义出发,提出了模型的受限条件,并基于岭回归方法解决模型的共线性问题。将上述因素综合起来利用二次规划求解受限岭回归模型。此求解方法不仅综合考虑了模型未知量的物理含义,挖掘了未知量之间的限制关系,同时对未知量进行正则,使得模型的求解稳定可靠。仿真结果表明本文介绍的模型可以准确定位到小超差电能表。在现场试点验证中,由于现场用电环境及用电情况多变,对模型的分析结果造成了一定干扰,但模型仍保持了较高命中率及检出率。本文提

出的模型计算方法对台区线路损耗研究及计量点远程诊断具有实际的应用指导意义。本文的未来工作重点关注使用了较多近似方法的模型处理更大规模网络时的鲁棒性,以及在非低压台区场景下的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 马永超, 赵伟, 黄松岭. 提高智能电能表可靠性技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 1-7.
MA Yongchao, ZHAO Wei, HUANG Songling. Review on techniques for improving the reliability of smart meters [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 1-7.
- [2] 童潇宁, 王月强, 仇张权, 等. 基于数据驱动多面体集合的交直流混合配电网鲁棒调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 38-50.
TONG Xiaoning, WANG Yueqiang, QIU Zhangquan, et al. Robust scheduling method for AC/DC hybrid distribution networks based on a data-driven polyhedral set [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 38-50.
- [3] 曹文忠, 彭皓月. 智能电表大数据管理、分析和可视化方法研究[J]. 电子器件, 2023, 46(2): 567-572.
CAO Wenzhong, PENG Haoyue. Research on big data management, analysis and visualization of smart meter [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(2): 567-572.
- [4] 刘翌, 孙庆凯, 许泽凯, 等. 能源互联网中的数字孪生技术体系、应用与挑战[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 230-243.
LIU Zhao, SUN Qingkai, XU Zekai, et al. System, Applications and challenges of digital twin technology in energy internet [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 230-243.
- [5] 杨挺, 韩旭涛, 姜含, 等. 电力系统科学计算在云数据中心的优化任务调配算法研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4336-4345.
YANG Ting, HAN Xutao, JIANG Han, et al. Task scheduling algorithm of power system scientific calculations in data center [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4336-4345.
- [6] 田启东, 林志贤, 郑炜楠, 等. 基于多源异构数据与深度神经网络的电量预测系统[J]. 电子器件, 2022, 45(4): 970-975.
TIAN Qidong, LIN Zhixian, ZHENG Weinan, et al. Power consumption prediction system based on multi-source heterogeneous data and deep neural networks [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(4): 970-975.

- [7] 陈磊, 吴诚威, 李澳, 等. 基于电流监测和动态电阻分析的电容器组 SF6 断路器电寿命评估系统[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 55-62.
CHEN Lei, WU Chengwei, LI Ao, et al. Electrical endurance assessment system of sf6circuit breaker for switching capacitor bank based on current monitoring and dynamic resistance analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 55-62.
- [8] 李仕林, 方程, 赵明, 等. 基于动态风险评估的输电线路巡检计划优化研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 119-124.
LI Shilin, FANG Cheng, ZHAO Ming, et al. Research on optimization of transmission line patrol plan based on dynamic risk assessment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 119-124.
- [9] 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): 8349-8357.
XU Huanzeng, KONG Zhengmin, WANG Shuai, 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): 8349-8357.
- [10] 陈琳, 李哲, 孙永全. 现场运行环境与电应力对电能表计量误差影响研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 180-188.
CHEN Lin, LI Zhe, SUN Yongquan. Metering error evolution of electricity meters in field operation under environmental and electrical stresses[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 180-188.
- [11] 孙睿晨, 董坤, 赵剑锋, 等. 基于递进式模型结构和时间信息嵌入的非侵入式负荷分解[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 55-62, 70.
SUN Ruichen, DONG Kun, ZHAO Jianfeng, et al. Non-intrusive load decomposition based on progressive model structure and temporal information embedding[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 55-62, 70.
- [12] 陈亮, 黄友朋, 路韬, 等. 基于失效物理的电能表故障定位与复现方法研究[J]. 电子器件, 2021, 44(4): 946-952.
CHEN Liang, HUANG Youpeng, LU Tao, et al. Research on fault location and recurrence method of smart electricity energy meters fault excitation based on failure physics[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2021, 44(4): 946-952.
- [13] 蔡慧, 乔适苏, 袁健, 等. 基于信息融合的低压智能电能表动态评价模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 206-214.
CAI Hui, QIAO Shisu, YUAN Jian, et al. Information fusion based dynamic evaluation model of low-voltage smart electricity meter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 206-214.
- [14] 刘科研, 盛万兴, 詹惠瑜, 等. 考虑多台区互联的中低压交直流混合配电网双层协同优化调度方法[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 33-44.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHAN Huiyu, et al. Bi-level optimization scheduling of mid-low-voltage AC/DC hybrid distribution network considering interconnection between networks[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 33-44.
- [15] 肖庆追, 李捷, 陈鹤峰, 等. 基于组合模型的电力用户用电行为分层分类方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 82-88.
XIAO Qingzhui, LI Jie, CHEN Hefeng, et al. Hierarchical classification method for power consumption behavior of power users based on combination model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 82-88.
- [16] 徐宏伟, 丛中笑, 阳晓路, 等. 基于整体退火遗传小波网络的计量终端可靠性预测[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 179-184.
XU Hongwei, CONG Zhongxiao, YANG Xiaolu, et al. Reliability prediction of metering terminal based on whole annealing genetic algorithm wavelet neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 179-184.
- [17] 李莉莉, 靳士樞, 周楷贺. 基于岭回归模型大数据最优子抽样算法研究[J]. 系统科学与数学, 2022, 42(1): 50-63.
LI Lili, JIN Shilei, ZHOU Kaihe. optimal subsampling algorithm for big data ridge regression[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2022, 42(1): 50-63.
- [18] 吴炜明, 王延新. 基于 L 曲线方法的 Lasso 正则化参数选择[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2022, 47(1): 36-42.
WU Weiming, WANG Yanxin. Regularization parameter selection of lasso based on L-curve[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2022, 47(1): 36-42.
- [19] 童潇宁, 王月强, 仇张权, 等. 基于数据驱动多面体集成的交直流混合配电网鲁棒调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 38-50.
TONG Xiaoning, WANG Yueqiang, QIU Zhangquan, et al. Robust scheduling method for AC/DC hybrid distribution networks based on a data-driven polyhedral set[J].

- Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 38-50.
- [20] KONG X Y, ZHANG X P, LU N, et al. Online smart meter measurement error estimation based on EKF and LM-RLS method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4269-4279.
- [21] 刘达, 何万强, 李金孟, 等. 考虑用户碳配额的售电公司新能源电力购售策略研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 14-22.
LIU Da, HE Wanqiang, LI Jinmeng, et al. Renewable energy electricity purchasing and selling strategy for power selling company considering carbon allowance for users [J]. Smart Power, 2024, 52(1): 14-22.
- [22] 郑波坤, 魏韡, 于骏, 等. 基于参数规划的电网侧储能容量价值评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 21-31.
ZHENG Boshen, WEI Wei, YU Jun, et al. Evaluation method for energy storage capacity value based on the multi-parametric programming[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 21-31.
- [23] 戴璐平, 沈嘉怡, 张飞飞. 基于时间序列算法的能源电力需求自动预测模型[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1): 49-51, 65.
DAI Luping, SHEN Jiayi, ZHANG Feifei. Automatic forecasting model of energy and power demand based on time series algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2024, 43(1): 49-51, 65.
- [24] 任相霖, 张粒子, 黄弦超. 计及预测误差时变相关特性的新型电力系统爬坡容量需求分析方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 49-57.
REN Xianglin, ZHANG Lizi, HUANG Xianchao. Analysis method for ramp capacity demand of new power system considering time-variant correlation characteristics of forecast errors[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 49-57.
- [25] 王华佳, 张岩, 尹书林, 等. 分布式光伏并网系统电压越限风险及谐波影响[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 128-138, 146.
WANG Huajia, ZHANG Yan, YIN Shulin, et al. Voltage instability and harmonic risk for the distributed photovoltaic grid-connected system[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 128-138, 146.
- [26] 谢辉, 杜卫华, 唐胜飞, 等. 基于熵值度量数据混淆加密度的智能电力计量系统设计与开发[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 114-122.
XIE Hui, DU Weihua, TANG Shengfei, et al. Design and Development of intelligent power metering system based on cross entropy to measure data confusion encryption degree [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 114-122.
-
- 收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-04-10
- 作者简介:
蒋群(1989—),女,通信作者,硕士,工程师,研究方向为电力计量技术。E-mail:jiangq_zjsg@outlook.com
徐永进(1970—),男,高级工程师,研究方向为电力计量技术。
李先志(1973—),男,硕士,高级工程师,研究方向为高性能机器学习框架构建、数据系统建模、AI大数据仿真分析、海量数据行业。
廖绍成(1972—),男,高级工程师,研究方向为电力营销技术、业扩用检、电能计量和采集以及电力新技术的实际工作。
谢烽(1969—),男,高级工程师,研究方向为电能计量、用电信息采集。
- (编辑 杜景飞)