

基于无功损耗的线路两端 PMU 相角差时变偏差修正方法

徐飞阳¹, 孔 贺¹, 蒋正威², 顾 雷¹, 卢 敏², 薛安成¹

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网浙江省电力有限公司电力调度控制中心, 浙江 杭州 310007)

摘 要:相量测量单元(PMU)的优势之一是提供同步的相角数据。然而,因时间同步异常、装置故障等因素,部分实测 PMU 相角数据存在异常,影响 PMU 应用。提出一种基于无功损耗的线路两端 PMU 相角差时变偏差修正方法。首先,基于线路无功损耗量测值与估计值构造单时刻相角差偏差估计模型;然后,针对单时刻估计模型受噪声影响大的问题,基于相角差和线路参数间关系,将利用单时刻数据的时变偏差估计模型转化为利用多时刻数据的恒定线路参数估计模型;最后,通过黄金分割算法估计获取线路参数后,结合 PMU 幅值、功率数据反推出 PMU 相角差偏差,实现 PMU 时变相角差偏差的估计与修正。仿真和某省实测 PMU 数据测试结果表明:该方法可准确估计相角差偏差,抗噪能力强;与现有方法相比,该方法仅需单工况数据即可实现估计与修正,适用于不同时变类型偏差的修正。

关 键 词:时变偏差;相角误差;相量测量单元;数据修正;输电线路

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.021 中图分类号:TM74 文章编号:1673-9140(2023)01-0178-13

Time-varying deviation correction method of PMU phase difference at both ends of the line based on reactive power loss

XU Feiyang¹, KONG He¹, JIANG Zhengwei², GU Lei¹, LU Min², XUE Ancheng¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Power Dispatching and Control Center, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: One of the advantages of the phasor measurement unit (PMU) is to provide synchronous phase angle data. However, due to factors such as abnormal time synchronization, device failures and other factors, some of the measured PMU phase angle data are abnormal, which could affect the PMU application. This paper proposes a method for correcting the time-varying deviation of PMU phase angle difference (PAD) at both ends of the line based on line reactive power loss. Firstly, based on the measured value and estimated value of the line reactive power loss, a single-time PAD deviation estimation model is constructed; Secondly, aiming at the problem that the single-time estimation model is greatly affected by noise, based on the relationship between the voltage PAD and the line parameter, the time-varying deviation estimation model by single-snapshot data is transformed into a constant line parameter estimation model by multi-snapshots data; after estimating the line parameters through the golden section search algorithm, the PAD deviation can be calculated by the

收稿日期:2022-01-27;修回日期:2022-04-13

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5108-202019027A-0-0-00);国家自然科学基金(51627811)

通信作者:薛安成(1979—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事模型和数据驱动的电力系统稳定性分析和控制研究;E-mail: acxue@ncepu.edu.cn

PMU amplitude and power data, the estimation and correction of the time-varying PAD deviation at multiple times are realized. The test results of simulated and measured PMU data from a province show that the method could accurately estimate the PAD deviation and has strong anti-noise ability. Compared with the existing methods, this method only needs data under single power flow condition to realize the estimation and correction, and is suitable for the correction of different types of time-varying deviation.

Key words: time-varying deviation; phase angle error; phasor measurement unit; data correction; transmission line

同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)数据是现代电力系统态势感知、调度控制、预警的重要数据来源^[1-6]。基于PMU数据已开发诸多高级应用,如状态估计、广域阻尼控制、发电机状态监测、静态电压稳定评估等。准确的PMU数据是高级应用的前提。然而,伴随着PMU的推广运行,因互感器误差、时间同步异常、装置故障、通信系统中断等因素,部分实测PMU数据出现质量问题^[7-13]。同步相角数据是PMU数据的重要特性之一。然而,目前已有文献观测到多种PMU相角或PMU间相角差(phase angle difference, PAD)异常现象^[14-19],如相角差恒定偏差^[14]、相角线性拉偏^[15-16]、相角差随机跳变^[17]、相角先拉偏后跳变^[18]等异常现象。同时,现有研究表明,利用卫星信号欺骗装置可对PMU实施时间同步攻击^[20-21],所引入的时间同步偏差 Δt 将导致PMU电压和电流相角量测同时产生 $2\pi f_0 \Delta t$ 的偏差^[22-23]。此外,甚至还有文献指出,虚假数据注入攻击能够随意篡改PMU相角数据^[24]。PMU相角数据异常将严重影响其高级应用,如线路参数辨识中,线路轻载状态下PMU相角偏差将导致线路参数无法准确辨识^[25];基于PMU的状态估计中,相角偏差不仅恶化该节点状态估计结果,且会污染系统各节点的状态估计结果^[26]。因此,修正PMU相角异常数据具有重要意义。

目前,PMU相角数据修正方法主要可分为PMU校准器校准^[27]和在线数据修正^[14-16,28-35]两类。相比于利用校准器校准PMU,在线数据修正方法大多基于线路模型约束对PMU数据进行远程在线修正,因其经济性和便捷性而受到广泛关注。具体的,初期文献大多基于PMU相角和幅值对目标开展进行修正,主要关注互感器导致的量测误差问题。如文献[28-30]基于线路正序或三相 π 型模型,分别提出不同的PMU数据修正方法。但这些方法均假设PMU幅值和相角误差恒定,需使用多工况

数据求解,不适用于时变相角误差的修正。进一步,文献[31]基于线路正序 π 型模型,构建单时刻PMU修正方程,但因求解参数过多(线路两端电压、电流互感器幅值与相角校正因子),存在误差污染问题,且结果精度受噪声影响较大;文献[32]在文献[29]基础上进行扩展,提出时变偏差修正方法,但仅适用于线性拉偏情形。

鉴于实测PMU存在相角异常而幅值量测正常情形,部分文献聚焦于单独修正相角数据,文献[16]针对观测到的相角差每秒跳变1次现象,构建卡尔曼滤波模型修正相角差。文献[14]利用短期线路参数不变的特性,提出无需已知线路参数的PMU相角差偏差修正方法,但需2个工况数据联合求解,仅可修正恒定相角差偏差。进一步,文献[33]分别在文献[14]基础上进行扩展,提出时变偏差的修正方法,但仅适用于相角线性拉偏情形,无法修正相角跳变等复杂异常情形。以上方法均对相角差异常类型有着较为严格的要求,无法适用于形态各异的时变偏差修正。

此外,部分文献^[34-35]基于PMU状态估计修正PMU相角偏差,相比于上述基于线路两端PMU量测方法,该类方法需提前掌握系统拓扑及参数配置,在运行中需跟随系统拓扑变化及时进行调整。同时状态估计类方法中模型参数误差与量测噪声会降低系统中关联节点的估计精度,造成误差影响范围的扩大。在多台PMU量测异常时,残差污染和残差淹没问题会导致状态估计辨识异常。

鉴于此,针对PMU相角差偏差时变的问题,本文提出一种基于线路无功损耗的PMU相角差时变偏差修正方法,以线路为研究对象进行PMU相角差修正。该方法基于线路 π 型等值模型,构建单时刻相角差偏差估计模型;并利用电压相角差和线路参数的关系将对时变偏差的估计转化为对恒定线路参数的估计,可使用多时刻数据降低噪声影响,

最后给出改进多时刻时变相角差估计方法,解决单时刻估计模型受噪声影响大的问题,大大提升方法抗噪性能。

相比于现有基于线路两端PMU数据的修正方法,该方法无需多工况数据,仅使用单工况数据即可实现时变相角差偏差的修正,抗噪能力强,克服了现有方法需使用多工况数据求解及对相角差偏差类型有着严格要求的问题。该方法适用于PMU存在时间同步偏差、卫星授时信号受到干扰、攻击等情况造成的线路两端PMU电压、电流相角差偏差相同的情形。仿真算例表明本文方法的有效性、抗噪性和先进性,某省实测PMU异常数据修正算例表明了本文方法的工程实用性。

1 基于无功损耗的时变相角差偏差估计方法

本文给出基于线路无功损耗的线路两端PMU相角差偏差估计方法。具体的,首先推导基于单时刻量测的相角差偏差估计模型;其次,为降低噪声影响,给出基于多时刻量测的改进估计方法,并结合求解算法实现相角差偏差的估计。

1.1 单时刻相角差偏差估计模型

高压交流输电线路可用正序集总参数 π 型等值模型表示,如图1所示。其中 $Z=R+jX=1/(g+jb)$ 为线路阻抗, $Y=G+jB$ 为线路导纳(对地电导 G 一般为0)。 $\dot{U}_m=U_m\angle\theta_{U_m}$, $\dot{U}_n=U_n\angle\theta_{U_n}$, $\dot{I}_m=I_m\angle\theta_{I_m}$, $\dot{I}_n=I_n\angle\theta_{I_n}$ 分别为线路两端的正序电压、电流相量; \dot{I}'_m 为流过线路阻抗的等效电流相量,方向为线路 m 端流向 n 端; \dot{I}_{m0} 、 \dot{I}_{n0} 分别为流过线路对地导纳的等效电流相量; P_m 、 Q_m 、 P_n 、 Q_n 分别为线路两端传输的有功功率和无功功率。

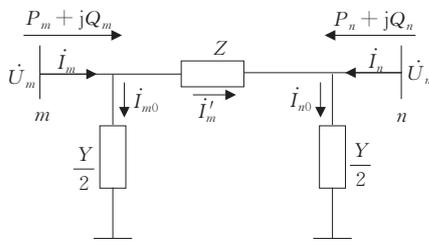


图1 集总参数 π 型等值模型

Figure 1 π type equivalent model with lumped parameter

对于一条输电线路,其两端的电压、电流相量满足如下关系:

$$\dot{I}_m = \dot{I}'_m + \dot{I}_{m0} = \frac{(\dot{U}_m - \dot{U}_n)}{Z} + \dot{U}_m \frac{Y}{2} \quad (1)$$

$$\dot{I}_n = -\dot{I}'_m + \dot{I}_{n0} = \frac{(\dot{U}_n - \dot{U}_m)}{Z} + \dot{U}_n \frac{Y}{2} \quad (2)$$

线路的无功功率损耗为

$$\begin{aligned} Q_{\text{loss}} &= Q_m + Q_n = \\ & -|\dot{I}_{m0}|^2 / (B/2) - |\dot{I}_{n0}|^2 / (B/2) + |\dot{I}'_m|^2 X = \\ & Q_B + Q_{X,m} = -(U_m^2 + U_n^2)B/2 + \\ & |\dot{I}_m - j\dot{U}_m B/2|^2 X = Q_B + Q_{X,n} = \\ & -(U_m^2 + U_n^2)B/2 + |\dot{I}_n - j\dot{U}_n B/2|^2 X \end{aligned} \quad (3)$$

其中, Q_B 为线路对地电纳消耗的感性无功(为负数), $Q_{X,m}$ 、 $Q_{X,n}$ 分别为由线路 m 和 n 端量测估计的线路电抗消耗的感性无功。

式(3)表明,利用PMU幅值测量,线路参数和一端的电压、电流相量量测,即可以计算线路的无功损耗,与线路两端相角差无关。

对于 m 、 n 两端均装设了PMU的输电线路。假设其中 n 端PMU正常, m 端PMU因各种原因(如时间同步异常)造成相角量测偏差 δ ,进而导致线路两端的电压、电流相角量测存在相同偏差 δ 。对 m 端PMU电压、电流相角量测补偿 $-\delta$,可得量测量和实际量满足如下关系(假设量测不存在噪声):

$$\begin{cases} \dot{U}_m = \dot{U}_{mM} e^{-j\delta} \\ \dot{I}_m = \dot{I}_{mM} e^{-j\delta} \\ Q_m = Q_{mM} \\ Q_n = Q_{nM} \end{cases} \quad (4)$$

其无功功率损耗的估计依然满足式(3),即

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{\text{loss}} &= \\ & -(U_{mM}^2 + U_{nM}^2)B/2 + |\dot{I}_{mM} e^{-j\delta} - j\dot{U}_{mM} e^{-j\delta} B/2|^2 X = \\ & \underbrace{-(U_{mM}^2 + U_{nM}^2)B/2}_{\hat{Q}_B} + \underbrace{|\dot{I}_{mM} - j\dot{U}_{mM} B/2|^2 X}_{\hat{Q}_{X,m}} = \\ & \underbrace{-(U_{mM}^2 + U_{nM}^2)B/2}_{\hat{Q}_B} + \underbrace{|\dot{I}_{nM} - j\dot{U}_{nM} B/2|^2 X}_{\hat{Q}_{X,n}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中,下标 M 代表PMU量测量。

由时间同步异常对PMU量测影响(时间同步偏差 Δt_{se} 导致PMU相角量测产生 $2\pi f_0 \Delta t_{se}$ 的偏差,对幅值和功率量测影响较小^[22-23])可知,无功损耗量测值 $Q_{\text{loss}M} = Q_{mM} + Q_{nM}$ 不受相角差偏差 δ 影响。

式(5)中无功损耗估计值计算需使用PMU量测与线路参数。对于线路参数,可考虑如下3种情况。

1) 线路参数全部使用参考值或PMU数据估计值,该情况下无功损耗估计值将不受相角差偏差 δ 影响。基于补偿后PMU量测的电抗与电纳估计公式分别为

$$\hat{X}(\delta) = \text{imag} \left(\frac{\dot{U}_{mM}^2 e^{-j2\delta} - \dot{U}_{nM}^2}{\dot{I}_{mM} \dot{U}_{nM} e^{-j\delta} - \dot{I}_{nM} \dot{U}_{mM} e^{-j\delta}} \right) \quad (6)$$

$$\hat{B}(\delta) = \text{imag} \left(\frac{\dot{I}_{mM} e^{-j\delta} + \dot{I}_{nM}}{\dot{U}_{mM} e^{-j\delta} + \dot{U}_{nM}} \right) \quad (7)$$

2) 电抗参数采用参考值,电纳采用PMU量测估计值,即

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{\text{loss}} = & -(U_{mM}^2 + U_{nM}^2) \hat{B}(\delta) / 2 + \\ & \left| \dot{I}_{mM} - j \dot{U}_{mM} \hat{B}(\delta) / 2 \right|^2 X_{\text{ref}} = \\ & -(U_{mM}^2 + U_{nM}^2) \hat{B}(\delta) / 2 + \\ & \left| \dot{I}_{nM} - j \dot{U}_{nM} \hat{B}(\delta) / 2 \right|^2 X_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, X_{ref} 为电抗参考值,可从能量管理系统(energy management system, EMS)获取或使用在线辨识方法获得(如不受相角问题影响的PMU辨识方法^[36]或基于SCADA数据辨识方法^[37])。

3) 电纳参数采用参考值,电抗采用PMU量测估计值。在线路轻载时,电纳产生的无功损耗 Q_b 起主导作用。此情况下,若电纳参考值存在误差将极大影响后续方法估计精度。

因此,本文中电抗参数采用参考值,电纳采用PMU量测估计值(情况2)。对于无功损耗估计式(8),其与相角差偏差 δ 相关,且仅包含一个未知数:相角差偏差 δ 。当相角差偏差 δ 为真实值时,无功损耗估计值与量测值相等,即

$$\begin{aligned} f_m(\delta) = & Q_{\text{loss}M} - \hat{Q}_{\text{loss}} = Q_{\text{loss}M} - (\hat{Q}_B + \hat{Q}_{X,m}) = \\ & Q_{mM} + Q_{nM} + (U_{mM}^2 + U_{nM}^2) \hat{B}(\delta) / 2 - \\ & \left| \dot{I}_{mM} - j \dot{U}_{mM} \hat{B}(\delta) / 2 \right|^2 X_{\text{ref}} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中无功损耗估计值使用 $\hat{Q}_{X,m}$ 计算。同理,考虑无功损耗估计值使用 $\hat{Q}_{X,n}$ 计算,可得:

$$\begin{aligned} f_n(\delta) = & Q_{\text{loss}M} - \hat{Q}_{\text{loss}} = Q_{\text{loss}M} - (\hat{Q}_B + \hat{Q}_{X,n}) = \\ & Q_{mM} + Q_{nM} + (U_{mM}^2 + U_{nM}^2) \hat{B}(\delta) / 2 - \\ & \left| \dot{I}_{nM} - j \dot{U}_{nM} \hat{B}(\delta) / 2 \right|^2 X_{\text{ref}} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

考量量测存在噪声,对于时刻 i 的PMU量测,取 f_m 与 f_n 平方和作为目标函数,则 δ_i 的单时刻估计

模型为

$$\hat{\delta}_i = \arg \min_{\delta \in (-\pi, \pi)} \vec{J}_i(\delta_i) = \vec{f}_{m,i}^2(\delta_i) + \vec{f}_{n,i}^2(\delta_i) \quad (11)$$

其中,上标“-”表示该变量已考量量测噪声。

对于相角差偏差,直接通过单时刻估计模型式(11)求解,将受测量噪声的严重影响。同时,相角差偏差可能为时变偏差,式(11)存在无法使用多时间断面PMU数据减小量测噪声的影响的问题。针对上述问题,下文给出改进的多时刻相角差偏差估计方法。式(4)补偿方式的前提是系统未发生大扰动,如并联电容或高抗投切等。此时,系统状态量(电压、电流、功率)基本不变,当存在时间同步偏差 Δt_{se} 时,只需补偿相角量测。当存在系统扰动时,线路2台PMU可能记录不同的系统状态,如图2所示。此时,相角和幅值以及功率量测均需补偿,式(4)将不适用。

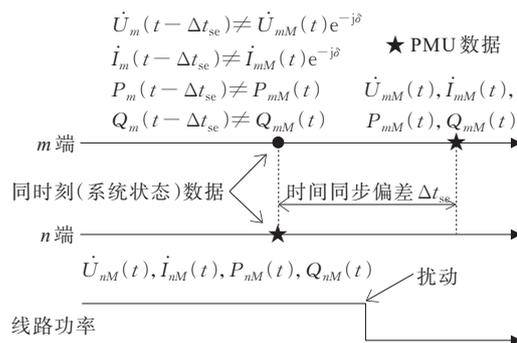


图2 扰动下受时间同步偏差影响的量测

Figure 2 Schematic diagram of measurements affected by time synchronization deviation under disturbance

1.2 改进多时刻相角差偏差估计方法

本文基于电压相角差与线路参数间的简化关系,提出一种改进的多时刻相角差偏差估计方法。该方法分为2步。第1步:将多时间断面不同的时变相角偏差待求量转化为单一的线路参数恒定待求量,给出了恒定线路参数估计模型。第2步:基于求解算法获取恒定线路参数估计值后,通过线路参数和相角差间关系获得各时间断面相角差偏差。具体如下。

对于一条高压输电线路,线路 m 端的有功功率 P_m 可表示为

$$P_m = (U_m^2 - U_m U_n \cos \Delta\theta_U) g - U_m U_n b \sin \Delta\theta_U \quad (12)$$

其中,电压相角差 $\Delta\theta_U = \theta_{U_m} - \theta_{U_n}$ 。

由于高压输电线路电阻远小于电抗($R \ll X$), 线路运行时, 两端拉开的电压相角差较小, 首末两端电压幅值基本相同, 可做如下简化假设: $g = R/(R^2 + X^2) \approx 0$, $\cos \Delta\theta_U \approx 1$, $U_m \approx U_n$, 因此 $(U_m^2 - U_m U_n \cos \Delta\theta_U)g \approx 0$, 可得:

$$P_m \approx -U_m U_n b \sin \Delta\theta_U \quad (13)$$

相角差可估计为

$$\Delta\hat{\theta}_U(b) \approx \arcsin [-P_m / (U_m U_n b)] \quad (14)$$

进而, 对于时刻 i , 相角差偏差 δ_i 估计为

$$\delta_i(b) = \Delta\theta_{UM,i} - \Delta\hat{\theta}_{U,i}(b) = \Delta\theta_{UM,i} - \arcsin [-P_{mM,i} / (U_{mM,i} U_{nM,i} b)] \quad (15)$$

将式(15)代入式(9)~(11), 并考虑量测噪声, k 个时间断面下可获得多时刻线路参数估计优化模型为

$$\hat{b} = \arg \min_b T(b) = \sum_{i=1}^k \vec{J}_i(\delta_i(b)) \quad (16)$$

获取串连电纳估计值 \hat{b} 后, 可按式(15)获得 k 个时间断面的相角差偏差。优化模型式(16)将单时刻估计模型式(11)中对时相角差的估计转化为对线路串连电纳 b 的估计, 在获取估计值 \hat{b} 后可获得各时间断面的相角差偏差估计值 $\hat{\delta}_i$ 。相比于单时刻相角差偏差估计模型, 改进多时刻相角差偏差估计方法存在以下优点。

1) 未知数减少。在对 k 个时间断面的相角差偏差估计时, 单时刻估计模型的未知数为 k 个相角差偏差。而多时刻估计模型的未知数数量为 1 个, 仅估计线路串连电纳 b 。

2) 抗噪性增强。多时刻估计模型可使用多时间断面量测, 利用平均效应有效降低量测噪声对估计结果的影响。

1.3 求解方法

优化模型式(16)的目标函数 $T(b)$ 为平方和形式, 且只有一个未知数 b 。在真值附近, 目标函数 $T(b)$ 为凸函数, 具有最小值。黄金分割搜索算法具有计算量小、搜索速度快的特点。因此, 本文采用黄金分割搜索算法在 $[b_{\min}, b_{\max}]$ 区间内搜索最优解 b 。因 $b = -X/(R^2 + X^2) \approx -1/X$, 搜索范围可设置为

$$\begin{cases} b_{\min} = -3/X_{\text{ref}} \\ b_{\max} = -1/(10X_{\text{ref}}) \end{cases} \quad (17)$$

将多时刻估计模型与求解方法相结合, 构成了所提的相角差偏差估计的方法。相应的方案流程如图3所示。

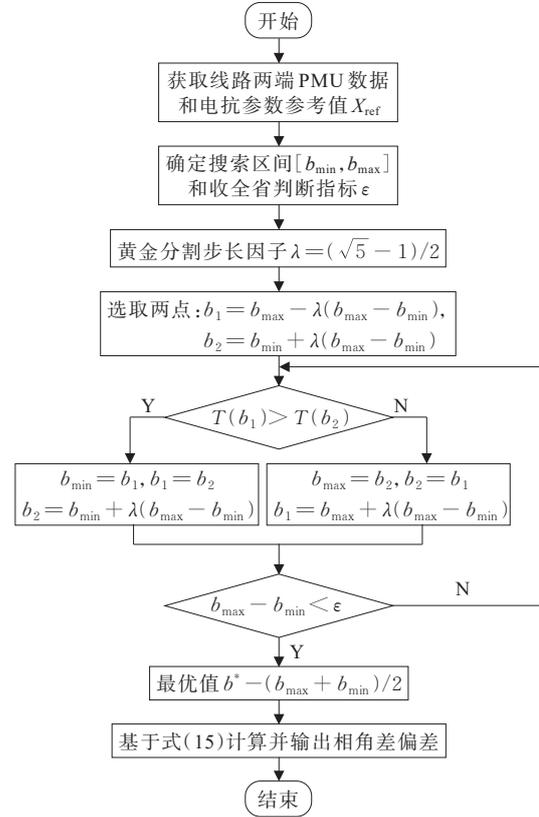


图3 相角差偏差估计方法流程

Figure 3 Flowchart for estimating PAD deviation

2 仿真算例

2.1 数据获取

在PSCAD中搭建了500 kV单回输电线路(长度100 km, 电阻1.780 Ω , 电抗31.390 Ω , 电纳 3.6557×10^{-4} S), PMU数据上传频率设置为50 Hz。通过仿真可获取多时刻的线路两端稳态PMU量测数据。为模拟实际情况, 部分算例中添加了不同强度噪声。其中, 0.1%强度噪声指线路两端电压、电流幅值和功率量测加入均值为0, 标准差为测量值幅值0.1%的高斯噪声; 线路两端电压、电流相量相角量测加入均值为0, 标准差为0.05°的高斯噪声; 0.2%和0.3%强度噪声均值同样为0, 标准差分别是0.1%强度噪声的2倍和3倍。

2.2 方法有效性验证及抗噪性能分析

为验证方法的有效性并分析方法抗噪性能, 本文设置了相角差阶跃和相角差拉偏算例, 考虑了无噪声与添加不同强度噪声情形。线路两端有功、无功及线路无功损耗如表1所示。本文使用了3 000组PMU量测数据, 即 $k=3 000$, 数据对应时长为60 s。

表 1 线路两端有功、无功和线路无功损耗

Table 1 Active, reactive power and reactive power loss of both ends of the line

| P_m /MW | P_n /MW | Q_m /MVar | Q_n /MVar | Q_{loss} /MVar |
|-----------|-----------|-------------|-------------|------------------|
| 300.49 | -300.35 | -143.60 | -60.06 | -203.66 |

1) 相角差阶跃算例。本算例在线路 m 端第 20~40 s 的 PMU 电压、电流相角中添加 2° 相角偏差,用来模拟相角差出现阶跃偏差现象。在无噪声和不同强度噪声情况下对方法进行测试。各情形下,相角差偏差估计结果的平均绝对误差(mean absolute error, Mean AE),均方根误差(root mean squared error, RMSE)和最大绝对误差(maximum absolute error, Max AE)如表 2 所示,无噪声和 0.1% 噪声强度情形下的相角差偏差估计结果如图 4 所示。

表 2 相角差阶跃偏差下估计结果误差

Table 2 Estimation error under PAD step deviation

| 情形 | Mean AE/($^\circ$) | RMSE/($^\circ$) | Max AE/($^\circ$) |
|-----------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 无噪声 | 0.005 2 | 0.005 2 | 0.005 2 |
| 0.1% 强度噪声 | 0.007 5 | 0.009 0 | 0.027 2 |
| 0.2% 强度噪声 | 0.011 7 | 0.014 5 | 0.051 8 |
| 0.3% 强度噪声 | 0.016 1 | 0.020 2 | 0.080 6 |

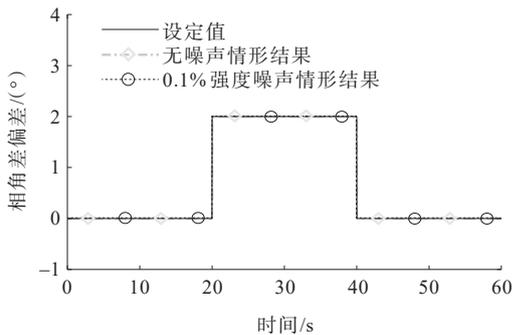


图 4 相角差阶跃偏差下估计结果

Figure 4 Estimation result under PAD step deviation

由表 2、图 4 可知,相角差阶跃时,在无噪声情况下,本文方法的相角差偏差估计误差极小,与设定值基本一致,验证了所提方法的有效性。在添加噪声时,随着噪声强度的增加,本文方法估计误差逐渐增大。但在 0.3% 噪声强度下最大误差仍小于 0.09° ,具有较好的抗噪性能。

2) 相角差拉偏算例。本算例在线路 m 端第 10~60 s 的 PMU 电压、电流相角中添加相角偏差,大小由 0° 线性增长至 2° ,以模拟相角差线性拉偏现象。无噪声和不同强度噪声情形的相角差偏差估计误差如表 3 所示,其中,无噪声和 0.1% 噪声强度情形下的相角差偏差估计结果如图 5 所示。

表 3 相角差拉偏偏差下估计结果误差

Table 3 Estimation error under PAD ramp deviation

| 情形 | Mean AE/($^\circ$) | RMSE/($^\circ$) | Max AE/($^\circ$) |
|-----------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 无噪声 | 0.005 2 | 0.005 2 | 0.005 2 |
| 0.1% 强度噪声 | 0.006 9 | 0.008 5 | 0.031 7 |
| 0.2% 强度噪声 | 0.010 8 | 0.013 5 | 0.051 0 |
| 0.3% 强度噪声 | 0.014 8 | 0.018 5 | 0.069 6 |

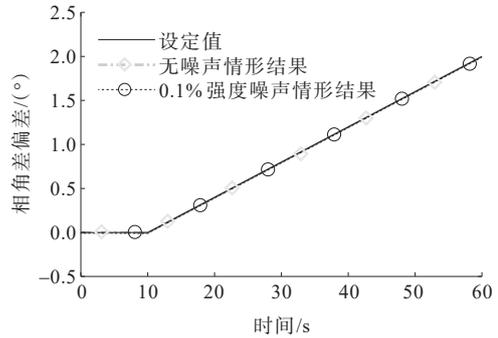


图 5 相角差拉偏偏差下估计结果

Figure 5 Estimation result under PAD ramp deviation

由表 3、图 5 可知,在相角差拉偏时,无噪声情况下,本文方法的相角差偏差估计误差极小,与设定值基本一致,验证了所提方法的有效性。在含噪声情况下,与算例 1 相似,本文方法估计结果误差随噪声强度增加而增大,但最大误差仍小于 0.07° ,保持了较高的估计精度,具有较好的抗噪性能。

2.3 多时刻估计方法改进效果分析

本文将分析所提方法相比于单时刻估计模型方法的改进效果,具体如下。

在添加 0.1% 强度噪声情况下,对比多时刻估计方法和单时刻估计方法时,变相角差偏差的估计结果(所用数据和偏差设置同文 2.2 相角拉偏算例)。2 种方法估计结果如图 6 所示,误差平均值与最大值对比如表 4 所示。

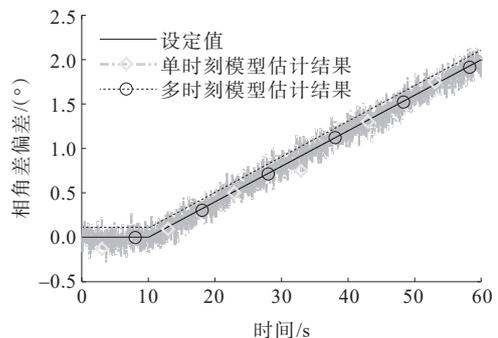


图 6 多时刻估计与单时刻估计方法估计结果

Figure 6 Estimation results of multi time estimation and single time estimation

表4 多时刻估计与单时刻估计方法估计误差

Table 4 Estimation error of multi time estimation and single time estimation

| 估计方法 | Mean AE/(°) | RMSE/(°) | Max AE/(°) |
|------|-------------|----------|------------|
| 单时刻 | 0.068 3 | 0.086 5 | 0.289 2 |
| 多时刻 | 0.006 9 | 0.008 5 | 0.031 7 |

由图6可知,多时刻估计和单时刻估计结果均围绕设定值上下波动,但单时刻估计模型结果受噪声影响显著,最大偏离值达 $0.289 2^\circ$ (见表4)。同时,由表4可知,多时刻估计结果较单时刻估计结果在精度上提升约10倍。相比于单时刻估计,改进多时刻估计方法在抗噪性能大幅提升。

2.4 电抗参数参考值偏差影响分析

受电抗参数随运行环境变化而变化等因素影响,线路参数参考值可能存在偏差。本节将测试线路参数参考值误差对本文方法的影响。

设线路电抗参考值 X_{ref} 存在1%的偏差。在无噪声情况下,计算不同线路潮流(50~1 000 MW)下,参考值偏差对本文方法相角差偏差估计的影响。相角差偏差设定值为 1° ,PMU数据量为3 000组,相角差偏差估计误差如图7所示。

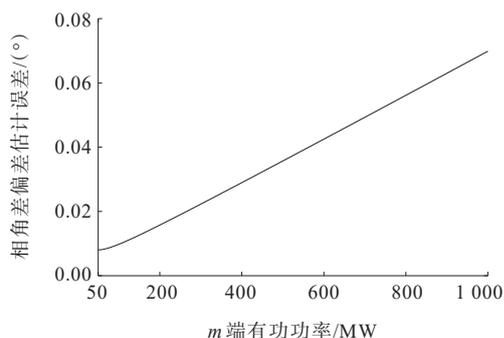
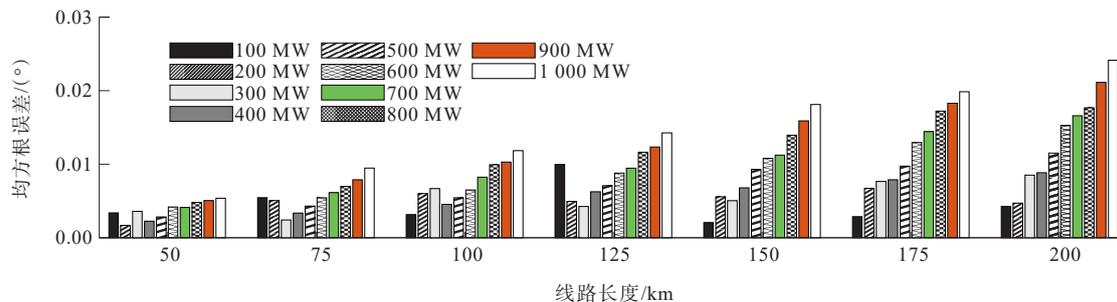
图7 X_{ref} 存在1%误差下的相角差偏差估计误差Figure 7 Estimation error of PAD deviation under 1% error of X_{ref} 

图8 不同线路长度与输送功率下估计误差(500 kV线路)

Figure 8 Estimation error under different line length and transmission power (500 kV line)

由图7可知,在电抗参考值存在1%误差情况下,随着线路传输功率的增加,相角差偏差估计误差随之增长。当线路传输功率为1 000 MW时,相角差偏差估计误差为 $0.069 89^\circ$ 。该现象是由于输送功率增大,流过线路阻抗的电流增大,从而电抗消耗的无功功率增大导致。因此,在线路重负荷大电流下,电抗参考值的误差影响会增大。

2.5 线路参数与运行工况影响分析

以上测试均基于特定线路某一工况数据开展。本文将分析不同线路及运行工况下所提方法的有效性。本文分别建立了6条不同长度的500 kV和1 000 kV线路,其中500 kV线路单位长度参数与文2.1线路相同,1 000 kV线路电阻、电抗、电纳单位长度参数分别为 $0.007 4 \Omega/\text{km}$ 、 $0.265 1 \Omega/\text{km}$ 、 $2.277 6 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。在线路传输不同功率(功率因数为0.99)情形下,获取3 000个时间断面的仿真PMU数据,并添加相角差拉偏偏差(设置与文2.2相同),在0.1%强度噪声下,使用所提方法估计相角差偏差,估计结果均方根误差分别如图8、9所示。

图8、9中,在不同线路长度与输送功率情形下,所提方法最大均方根误差为 $0.024 2^\circ$,表明所提方法对不同线路参数及输送功率仍具有较高的修正精度,适用于不同输电线路两端PMU相角差数据的修正。同时,在相同线路长度与潮流情况下,1 000 kV线路修正精度较500 kV线路更高。

另外,由图8、9可知,所提方法估计误差随线路长度和功率的增加呈现上升趋势,其原因在于式(14)的误差在该情况下会缓慢增大。

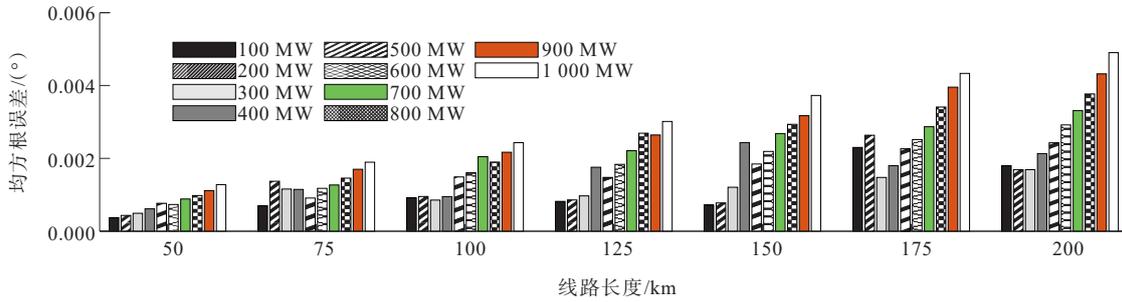


图9 不同线路长度与传输功率下估计误差(1 000 kV 线路)

Figure 9 Estimation error under different line length and transmission power (1 000 kV line)

2.6 数据量大小影响分析

本文将测试不同大小 PMU 数据量对所提方法估计结果的影响,并给出推荐使用的数据量。使用不同数量的 PMU 数据估计相角差偏差。具体的,PMU 数据量设置为 20 到 2 000 组,以 20 组为单位递增。在 0.2% 噪声强度情形下,在线路 m 端 PMU 电压、电流相角添加 2° 偏差,用来模拟相角差出现阶跃偏差后的现象。每种数据量下进行 1 000 次蒙特卡罗模拟。相应的平均绝对误差和均方根误差平均值如图 10 所示。

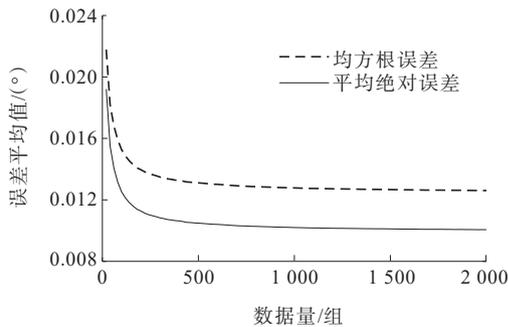


图 10 不同数据量下 1 000 次模拟估计误差平均值

Figure 10 Average of estimation errors for 1 000 simulations with different amounts of data

由图 10 可知,随着使用数据量的增大,所提方法估计误差先急剧减小后趋于平稳。以上现象表明,增大使用数据量有助于降低噪声对估计结果的影响。当数据量大于等于 1 500 组时,相角差偏差估计误差基本稳定,且估计结果具有较高精度。

因此,本文方法在实际应用时,建议使用 1 500 组及以上 PMU 数据。

2.7 时间同步攻击数据修正及方法对比

本文模拟典型拉偏时间同步攻击,并与文献[33]提出的时间同步攻击下数据修正方法进行了对比。

1) 典型拉偏攻击情形下的方法对比。本算例

使用了 6 000 组(120 s)PMU 量测数据,0~120 s 时,在线路 m 端 PMU 相角加入偏差,偏差大小由 0° 线性增长至 2° ,以模拟拉偏攻击(0 s 开始,120 s 结束)。0.1% 强度噪声下,本文方法和对比方法的估计结果如图 11 所示,本文方法和对比方法线性拟合结果误差如表 5 所示。文献[33]方法首先计算各时间窗(窗长为 10 s)的相角差偏差值,根据多时间窗相角差偏差样本统计特性识别攻击类型。如识别为拉偏攻击,对相角差偏差结果进行线性拟合修正。

图 11 中,文献[33]方法线性拟合结果和本文方法结果均在设定值附近,但本文方法相比于文献[33]方法结果精度更高。本文方法与文献[33]方法线性拟合结果误差如表 5 所示。由表 5 可知,本文方法平均误差远小于对比方法,精度高于对比方法。

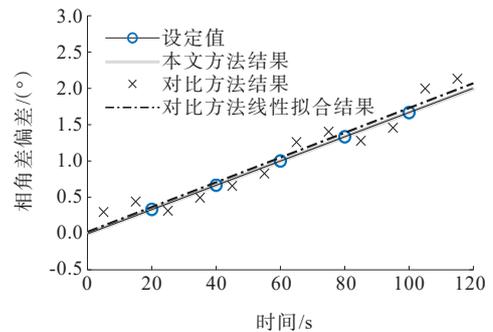


图 11 本文方法与文献[33]方法估计结果

Figure 11 Estimation results of the proposed method and the method in [33]

表 5 本文方法与文献[33]方法线性拟合结果误差

Table 5 Estimation error of the proposed method and the method in [33]

| 方法 | Mean AE/($^\circ$) | RMSE/($^\circ$) | Max AE/($^\circ$) |
|--------|----------------------|-------------------|---------------------|
| 本文 | 0.007 7 | 0.009 5 | 0.019 8 |
| 文献[33] | 0.047 2 | 0.049 1 | 0.070 7 |

2) 组合拉偏攻击情形下的方法对比。

本算例使用了3 000组(60 s)PMU数据,每个拉偏攻击持续10 s,相角差偏差大小由0°线性增长至1°。在上一拉偏攻击结束后,立刻发动进行下一次拉偏攻击。本文方法和对比方法的估计结果如图12所示。

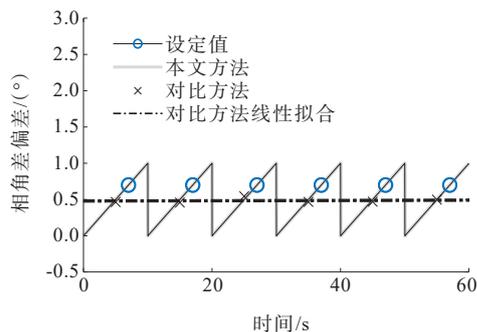


图12 本文方法与文献[33]方法估计结果(组合拉偏攻击)

Figure 12 Estimation results of the proposed method and the method in [33] (combined ramp attack)

由图12可知,对比方法将拉偏攻击误识别为阶跃攻击,修正结果大大偏离了设定值。而本文方法可以准确估计时变相角差偏差,与设定值基本一致。

2.8 系统低频振荡下的修正算例

PMU数据核心应用之一为监测系统低频振荡,因此,本节将验证系统低频振荡下方法的有效性,具体如下。

基于中国某省电网BPA数据模拟了系统低频振荡。其中,某500 kV线路*m*端电压幅值 U_m 、功率 P_m 、线路两端电压相角差 $\Delta\theta_U$ 如图13所示,振荡频率约为1.3 Hz。

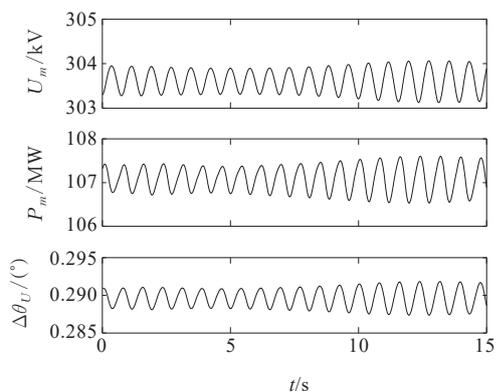


图13 低频振荡下的线路两端部分PMU数据

Figure 13 PMU data of both ends of the line under low frequency oscillation

5~10 s时在该线路*m*端PMU电压、电流相角中添加阶跃相角偏差,大小为0.25°,用来模拟相角差出现阶跃偏差现象。无噪声情况下,利用本方法修正前后的电压相角差对比如图14所示。无噪声和0.1%强度噪声情形的相角差偏差估计误差如表6所示。

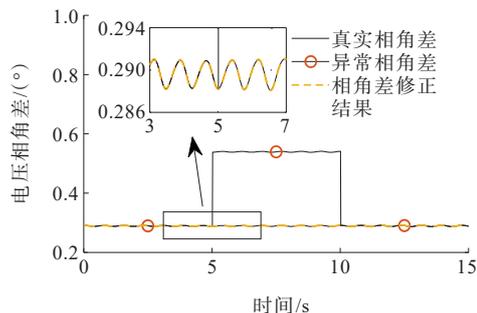


图14 低频振荡下电压相角差修正结果

Figure 14 Correction result of voltage PAD under low frequency oscillation

表6 低频振荡下相角差偏差估计结果误差

Table 6 Estimation error of PAD under low frequency oscillation

| 情形 | Mean AE/(°) | RMSE/(°) | Max AE/(°) |
|----------|-------------|-------------|------------|
| 无噪声 | 0.000 037 7 | 0.000 043 8 | 0.000 128 |
| 0.1%强度噪声 | 0.001 500 0 | 0.001 600 0 | 0.003 200 |

由表6、图14可知,在系统低频振荡情况下,本文方法仍可准确估计并修正相角差。其原因在于本文方法是基于线路 π 型等值模型开展,在系统振荡情形下,该线路模型依然成立。因此,系统低频振荡对本文方法无影响。

3 实测PMU相角异常数据修正

本节采用中国某省实测PMU异常数据测试所提方法的实用性。

3.1 实测PMU数据分析

本节使用3条线路两端PMU数据测试本文方法,相关线路信息及PMU相角异常类型如表7所示。各线路PMU相角差与线路*m*端(功率输送端)有功功率对比如图15~17所示,通过对比图可初步判断PMU相角差数据异常,具体分析如下。

一般的,线路运行时,其电压相角差 $\Delta\theta_U < 15^\circ$,可做如下假设 $\sin\Delta\theta_U \approx \Delta\theta_U$ 。因此,式(13)可进一步简化为

$$P_m \approx -U_m U_n b \Delta\theta_U \quad (17)$$

式(17)中, $b = -X/(R^2 + X^2) < 0$, 其在线路运行时基本恒定。进一步, 当线路两端电压幅值波动较小时, 式(17)表明, 线路电压相角差与有功功率基本

表 7 线路信息及实测 PMU 相角差异常类型

Table 7 Line information and abnormal type of measured PMU PAD

| 线路 | 电压等级/ kV | 线路长度/ km | 线路电抗 参考值/ Ω | 相角差 异常类型 |
|----|-------------|-------------|-----------------------|-------------|
| 1 | 220 | 11.40 | 3.435 | 随机跳变 |
| 2 | 220 | 40.36 | 12.289 | 基本恒定偏差 |
| 3 | 500 | 13.70 | 3.550 | 连续时变偏差 |

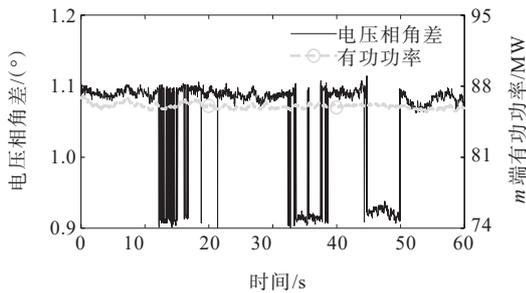


图 15 实测电压相角差与功率量测对比(线路 1)
Figure 15 Comparison of measured voltage PAD and power measurement(line 1)

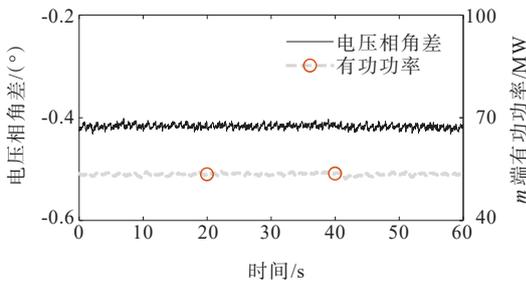


图 16 实测电压相角差与功率量测对比(线路 2)
Figure 16 Comparison of measured voltage PAD and power measurement(line 2)

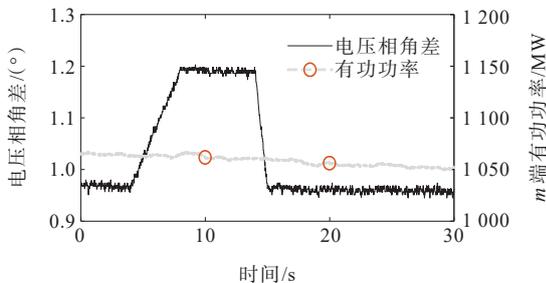


图 17 实测电压相角差与功率量测对比(线路 3)
Figure 17 Comparison of measured voltage PAD and power measurement(line 3)

成正比。基于该结论, 对线路 1~3 进行分析。

图 15 中, 线路 1 有功功率波动平稳, 而电压相角差出现跳变, 两者波动特征不匹配。同时, 电流相角差存在相同跳变, 表明线路 1 两端 PMU 相角差量测可能存在跳变偏差。

图 16 中, 线路 2 电压相角差和有功功率虽均基本恒定, 但电压相角差数值为负, 与有功反向, 表明电压相角差可能存在恒定相角差偏差。同时, 考虑到两端功率符合正常的功率损耗, 即线路两端 PMU 本地电压与电流相角量测正常。因此, 表明线路 2 两端 PMU 相角差量测可能存在恒定偏差。

图 17 中, 线路 3 有功功率波动平稳而电压相角差出现先增大, 再保持恒定, 最后减小的波形, 两者波动特征不匹配。同时, 电流相角差存在相同波动, 表明线路 3 两端相角差量测可能存在连续时变偏差。

3.2 实测相角差随机跳变修正算例

利用本文方法对线路 1 两端 PMU 相角差随机跳变异常进行修正。线路 1 两端 PMU 电压相角差量测与利用本文方法的修正值对比如图 18 所示。

由图 18 可知, 线路 1 的电压相角差存在随机跳变现象, 跳变幅度约 0.20° 。经本文方法修正后, 电压相角差随机跳变现象消失, 且 0~10 s 本文方法修正值与 PMU 量测值一致, 表明了本文方法的有效性与实用性。

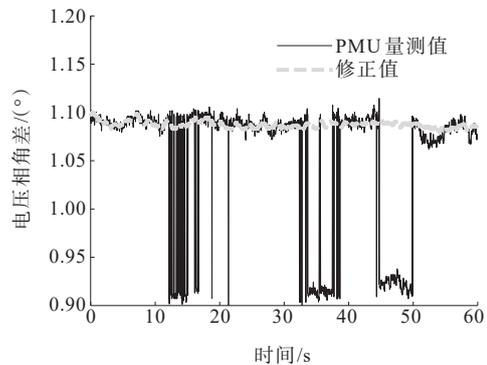


图 18 实测相角差随机跳变修正结果(线路 1)
Figure 18 Correction of measured PAD random jump (line 1)

3.3 实测相角差恒定偏差修正算例

利用本文方法对线路 2 两端恒定相角差偏差数据进行修正。线路 2 两端 PMU 电压相角差量测与本文方法估计电压相角差对比如图 19 所示。

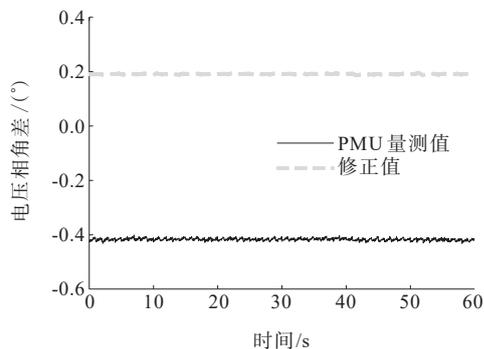


图19 含恒定偏差的实测相角差修正结果(线路2)

Figure 19 Correction of measured PAD with constant deviation (line 2)

由图19可知,修正前线路2 PMU电压相角差量测值为负值(与有功方向相反),修正后恢复为正值,且量测值与修正值间偏差基本恒定约为 0.59° ,表明线路1两端PMU电压相角差存在基本恒定的偏差。此外,本文修正值结果与文献[14]对该PMU数据的修正结果(0.595°)基本相同,表明了本文方法的有效性与实用性。

3.4 实测相角差偏差连续时变修正算例

利用本文方法对线路3两端PMU相角差偏差连续时变异常进行修正。线路3两端PMU电压相角差量测与利用本文方法的修正值对比如图20所示。

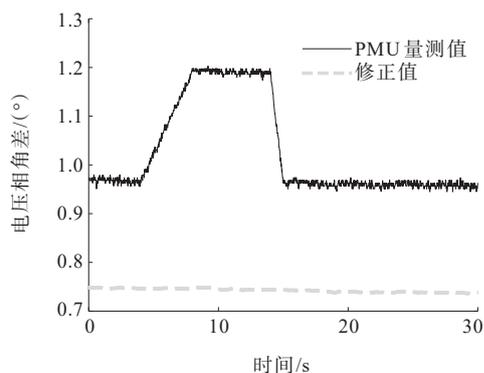


图20 含连续时变偏差的实测相角差修正结果(线路3)

Figure 20 Correction of measured PAD with continuous time varying deviation (line 3)

由图20可知,线路3的电压相角差存在连续时变现象,0~4 s时PMU量测相角差偏差约为 0.22° ;4~8 s时偏差线性增长;8~14 s时偏差约为 0.44° ;14~15.1 s时偏差线性减小;15.1~30 s时偏差约为 0.22° 。

以上实测数据算例表明,本文方法具有较高的工程实用性。

4 结语

针对部分线路两端实测PMU相角差数据存在时变偏差的问题,本文提出一种基于无功损耗的线路两端PMU相角差时变偏差修正方法。该方法根据电压相角差和线路参数的关系,将利用单时刻数据的时变偏差估计模型转化为利用多时刻数据的恒定线路参数估计模型,结合黄金搜索算法求解线路参数后,反推出PMU相角差偏差,从而实现时变相角差偏差的估计和修正,有效提升了方法抗噪性能。与现有基于线路两端量测的PMU相角差修正方法相比,该方法无需多工况数据,在保证方法抗噪性的前提下,仅使用单一工况数据,即可修正各种类型的时变相角差偏差。当系统中多台PMU存在问题时,本文方法以分布式处理的方式逐条线路地修正PMU相角差,可克服状态估计类方法异常辨识困难的问题。

仿真测试表明:所提方法可在噪声情形下准确估计相角差阶跃偏差、拉偏偏差及复杂时变偏差,相比于单时刻估计方法抗噪性能大幅提升。适用于不同线路长度及工况下的PMU数据修正,且在系统低频振荡情形下仍可正常工作。同时,该方法可应用于卫星时间同步攻击下的数据修正,且精度与复杂时变攻击适应性优于对比方法。实测PMU数据算例表明:所提方法可修正不同类型的实测PMU相角差异常,具有较高的工程实用性。

值得注意的是,本文方法假设了PMU幅值量测正常,本地电压、电流测量完全同步,对于实际中存在的幅值与相角同时存在异常情形和极少存在的互感器等因素导致的本地电压、电流不同步情形,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] HADKE A G, BI T. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 619-629.
 - [2] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 73-80.
- DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al.

- Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(1):73-80.
- [3] 陆超,谢小荣,吴小辰,等.基于广域测量系统的电力系统稳定控制[J].电力科学与技术学报,2009,24(2):20-27.
LU Chao,XIE Xiaorong,WU Xiaochen,et al.Power system stability control based on wide area measurement system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009,24(2):20-27.
- [4] 曹鹏,刘敏,杭鲁庆.基于改进磷虾群算法的配电网PMU优化配置研究[J].电网与清洁能源,2022,38(4):61-67.
CAO Peng, LIU Min, HANG Luqing. Research on PMU optimal configuration of distribution networks based on improved krill herd algorithm[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(4):61-67.
- [5] 李登峰,杨旻才,刘育明,等.基于SVR数据驱动的发电机进相极限最优化求解方法[J].中国电力,2021,54(8):136-143+153.
LI Dengfeng, YANG Mincai, LIU Yuming, et al. SVR data-driven optimization of generator leading phase operation limit[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 136-143+153.
- [6] 晏光辉,刘颂凯,张磊,等.基于迁移学习的智能静态电压稳定评估方案[J].电测与仪表,2022,59(2):92-99.
YAN Guanghui,LIU Songkai,ZHANG Lei,et al.Intelligent static voltage stability assessment scheme based on transfer learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(2):92-99.
- [7] 刘灏,毕天姝,周星,等.电力互感器对同步相量测量的影响[J].电网技术,2011,35(6):176-182.
LIU Hao, BI Tianshu, ZHOU Xing, et al. Impact of instrument transformers on synchronous phasor measurement[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 176-182.
- [8] SUNDARARAJAN A, KHAN T, MOGHADASI A, et al. Survey on synchrophasor data quality and cybersecurity challenges, and evaluation of their interdependencies[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2019, 7(3):449-467.
- [9] 陈亦平,陈伟彪,姚伟,等.WAMS错误数据的快速辨识及恢复方法[J].电力自动化设备,2016,36(12):95-101.
CHEN Yiping, CHEN Weibiao, YAO Wei, et al. Rapid identification and recovery of wrong WAMS data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 95-101.
- [10] 徐飞阳,薛安成,常乃超,等.电力系统同步相量异常数据检测与修复研究现状与展望[J].中国电机工程学报,2021,41(20):6869-6885.
XU Feiyang, XUE Ancheng, CHANG Naichao, et al. Research status and prospects of detection, correction and recovery for abnormal synchrophasor data in power system [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(20):6869-6885.
- [11] 徐静,丁一阳,崔新强,等.环境温度对特高压线路计量的影响分析[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):165-170.
XU Jing, DING Yiyang, CUI Xinqiang, et al. The influence analysis of ambient temperature on measurement of UHV transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):165-170.
- [12] 谢施君,雷汉坤,王乃会,等.基于BP神经网络的CVT暂态电压传递特性补偿技术[J].高压电器,2022,58(2):149-157.
XIE Shijun, LEI Hankun, WANG Naihui, et al. Compensation technology on transient voltage transfer characteristics of CVT based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(2):149-157.
- [13] 张赢,魏文震,李江,等.基于北斗授时的 μ PMU测量误差综合分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):83-91.
ZHANG Ying, WEI Wenzhen, LI Jiang, et al. Comprehensive measurement error analysis of μ PMU based on Beidou time service[J]. Power System Protection and Control,2021,49(8):83-91.
- [14] 薛安成,徐劲松,徐飞阳,等.参数未知情形下线路两端PMU相角差校准方法[J].电力系统自动化,2019,43(12):129-136.
XUE Ancheng, XU Jingsong, XU Feiyang, et al. A calibration method for the angle difference data of field PMU data of transmission line with unknown parameters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 129-136.
- [15] YAO W, LIU Y, ZHOU D, et al. Impact of GPS signal loss and its mitigation in power system synchronized measurement devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(2):1141-1149.
- [16] ZHANG Q, VITTAL V, HEYDT G, et al. The time skew problem in PMU measurements[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, San Diego, USA: IEEE, 2012.
- [17] XUE A, LENG S, LI Y, et al. A novel method for screening the PMU phase angle difference data based on hyperplane clustering[J]. IEEE Access,2019,7:97177-97186.

- [18] VANFRETTI L, CHOW J H, SARAWGI S, et al. A phasor-data-based state estimator incorporating phase bias correction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011,26(1):111-119.
- [19] XUE A, XU F, CHOW J H, et al. Data-driven detection for GPS spoofing attack using phasor measurements in smart grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021,129:106883.
- [20] SHEPARD D, HUMPHREYS H, FANSLER A. Evaluation of the vulnerability of phasor measurement units to GPS spoofing attacks[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2012,5(1):134-147.
- [21] 钱斌,蔡梓文,肖勇,等. 电力系统时间同步攻击研究综述[J]. 电网技术, 2020,44(10):4035-4045.
QIAN Bin, CAI Ziwen, XIAO Yong, et al. Review on time synchronization attack in power system[J]. Power System Technology, 2020,44(10):4035-4045.
- [22] 刘洋,张道农,于跃海,等. 时间同步误差对电力自动化系统影响的定量分析[J]. 电力科学与技术学报, 2011,26(3):15-19+24.
LIU Yang, ZHANG Daonong, YU Yuehai, et al. Quantitative analysis of time synchronization disturbance for electric power automation systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011,26(3):15-19+24.
- [23] 徐凯,毕天姝,郭津瑞,等. 卫星同步授时偏差对PMU量测的影响[J]. 电网技术, 2015,39(5):1323-1328.
XU Kai, BI Tianshu, GUO Jinrui, et al. Impact of time service synchronization deviation on PMU measurement [J]. Power System Technology, 2015,39(5):1323-1328.
- [24] 王竞才,李琰,徐天奇. 基于扩展卡尔曼滤波的智能电网虚假数据检测[J]. 智慧电力, 2022,50(3):50-56.
WANG Jingcai, LI Yan, XU Tianqi. Detection of false data in smart grid based on extended Kalman filter[J]. Smart Power, 2022,50(3):50-56.
- [25] XUE A, XU F, MARTIN K, et al. Linear approximations for the influence of phasor angle difference errors on line parameter calculation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(5):3455-3464.
- [26] FAN X, DU L, DUAN D. Synchrophasor data correction under gps spoofing attack: a state estimation-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(5): 4538-4546.
- [27] 许苏迪,刘灏,毕天姝,等. 适用于PMU现场测试校准的参考值测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(11): 3452-3462.
XU Sudi, LIU Hao, BI Tianshu, et al. Reference value measurement algorithms for PMU field test and calibration [J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(11):3452-3462.
- [28] SHI D, TYLAVSKY D J, LOGIC N. An adaptive method for detection and correction of errors in PMU measurements [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1575-1583.
- [29] WANG X, SHI D, WANG Z, et al. Online calibration of phasor measurement unit using density-based spatial clustering[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3):1081-1090.
- [30] WU Z, THOMAS K, SUN R, et al. Three-phase instrument transformer calibration with synchronized phasor measurements[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, USA: IEEE, 2012.
- [31] ZHANG Q, VITTAL V, HEYDT G T, et al. The integrated calibration of synchronized phasor measurement data in power transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011,26(4):2573-2581.
- [32] WANG X, SHI D, WANG J, et al. Online identification and data recovery for PMU data manipulation attack[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(6):5889-5898.
- [33] XUE A, XU F, XU J, et al. Online pattern recognition and data correction of PMU data under GPS spoofing attack[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(6):1240-1249.
- [34] FAN X, DU L, DUAN D. Synchrophasor data correction under GPS spoofing attack: a state estimation-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(5): 4538-4546.
- [35] RISBUD P, GATSIS N, TAHA A. Vulnerability analysis of smart grids to GPS spoofing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(4):3535-3548.
- [36] XUE A, XU F, MARTIN K, et al. Robust identification method for transmission line parameters that considers PMU phase angle error[J]. IEEE Access, 2020, 8: 86962-86971.
- [37] DOBAKSHARI A S, TERZIJA V, AZIZI S. Online Non-iterative estimation of transmission line and transformer parameters by SCADA data[J]. IEEE Transactions on Power System, 2021,36(3):2632-2641.