

基于微型 PMU 的配电线路抗差参数辨识

薛安成¹, 徐飞阳¹, 游宏宇^{1,2}, 徐劲松¹, Kenneth E. Martin³, 毕天姝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. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 3. Electric Power Group, Pasadena, USA CA 91101)

摘要:微型相量测量单元装置为智能配电网提高可观性和可控性提供了基础。研究了基于微型相量测量单元的配电网线路参数抗差辨识方法:针对配电网三相运行不对称的情况,构建了基于相分量描述的配电线路三相 π 型等值模型,结合微型相量测量单元提供的多组线路两端电压、电流相量数据,提出了基于相分量模型的、适应配电网不对称运行的最小二乘线路参数辨识方法;并引入2种抗差方法,一种为基于Huber估计的抗差最小二乘法,另一种为基于中位数估计的抗差最小二乘法。在中性点经消弧线圈或小电阻接地系统中,所提方法仅需要线路两端的电压和电流相量即可在辨识线路相参数的同时获得线路正序和零序参数;在中性点不接地系统中,由于没有零序电流分量,当系统正常运行时所提方法可辨识线路正序参数。算例仿真验证了所提方法的有效性,并比较了2种抗差方法在辨识精度、计算耗时方面的优劣,结果表明,基于中位数估计的抗差最小二乘法的抗差性能更好,计算时间较短。

关键词:配电线路;微型PMU;抗差参数辨识;相分量法;最小二乘法;Huber估计;中位数估计;中性点接地方式

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.001

0 引言

智能配电网是实现新能源分散消纳、与用户互动的重要载体,是未来配电网的发展方向之一。可观和可控性是智能配电网的属性之一。然而,现有配电网存在结构复杂、量测配置不足等问题,导致其参数缺失,制约了配电网的可观和可控性。

针对智能配电网可观、可控要求的提升,国内外学者依据主网相量测量单元(PMU)^[1]的思路,开发了配电网微型PMU(μ PMU):美国Yilu Liu(刘奕路)院士团队研制了频率扰动录波器(FDR)^[2],美国加州大学伯克利分校研制了微型同步PMU^[3],美国伊利诺伊大学香槟分校研制了一种低成本、小型化的微型PMU^[4],国内山东大学研制了轻型相量测量装置(PMU Light)^[5],台湾大学研制了微型PMU^[6],上海交通大学研制了新型配电网线路PMU装置^[7],东北电力大学研制了配电网微型同步PMU^[8]。此外,国内的四方公司、南瑞继保也开发了相应的装置。微型PMU装置可装配在配电网中用于提供三相电压和电流幅值及其相角,测量精度高,为配电网的可控和可观性提供了新的技术手段。

配电线路是配电网的重要设备,其参数是智能配电网状态估计与分析、控制与故障处理的基础。同时,配电线路的运行环境一般较差,其参数在运行中易受老化等各方面的影响,和现有值(估计值或者离线测量值)差别较大,为了适应配电网的高度可观、可控要求,急需在线辨识配电线路的参数。值得注意的是,虽然输电网高压线路参数有较为成熟的获取方法,包括理论计算、离线测量^[9]、带电测量^[10]、一般在线辨识^[11]和在线PMU辨识测量^[12-13]等,但在配电线路在线参数辨识方面的相关研究较少。目前,国外已开展部分研究,如文献[14]采用集中 π 型线路模型,提出了一种利用电压有效值与功率的配电线路参数辨识方法,并考虑了误差补偿;文献[15]利用远程终端单元(RTU)数据,提出了一种基于卡尔曼滤波与递归算法的配电线路参数辨识方法;文献[16]提出了一种基于PMU数据的配电线路参数辨识方法与量测误差估计方法,但其忽略了线路的对地电容,该方法适用于架空线路,但对于电压电缆线路而言,其线路电容较大,不宜忽略;文献[17]提出了一种基于加权最小二乘LS(Least Squares)与线路两端PMU数据的配电线路相参数、序参数估计方法,但该方法受量测误差的影响较大。

微型PMU的研制为配电线路参数的在线辨识提供了新的途径。但配电网具有三相不平衡、运行状态复杂多变、通信基础薄弱、数据易受攻击等问题,这无疑增加了配电线路参数辨识的难度。鉴于此,本文开展基于微型PMU的配电网线路抗差参数辨识研究。具体地,提出了一种基于相分量模型的、适应不对称运行的配电线路参数辨识方案,通过获

收稿日期:2018-02-28;修回日期:2018-12-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902900);国家自然科学基金重大仪器研制项目(51627811);国家自然科学基金杰青基金资助项目(51725702)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902900), the National Major Scientific Instruments Development Foundation of China(51627811) and the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars(51725702)

取线路两端的电流和电压相量,实现对线路参数的辨识;引入了 2 种抗差方法,通过比较两者的辨识精度、计算耗时,择优选择基于中位数估计的抗差方法,实现对线路的抗差辨识。在中性点经消弧线圈或小电阻接地的配电系统中,本文所提方法可实现阻抗、导纳相参数以及正序、零序参数的辨识;在中性点不接地系统中,本文所提方法可实现线路正序参数的辨识。

1 配电线路参数辨识面临的挑战

目前,输电网高压线路参数已有较为成熟的获取方法。相比于高压输电网,配电网的量测较少、运行状态多变、运行环境较差。配电网线路参数辨识面临着诸多挑战,具体如下。

a. 配电网的量测条件差。

目前,高压输电网络配置了完备的量测系统(如数据采集与监视控制(SCADA)系统、广域测量系统(WAMS)),具备完全可观性。但长期以来,配电网量测的缺失极大程度地限制着其可观性。配电网的量测点少,主要依靠馈线终端(FTU)、开闭所终端(DTU)等提供的数据,所获取数据的时间间隔长且不同步^[14],这严重制约了配电网的可观性。而微型 PMU 将成为提升配电网可观性的解决方案。

b. 配电网三相不平衡。

引起配电网三相不平衡的因素有很多,如架空线路三相不换位引起的三相对地参数不对称,单相高压负载引起的三相线路电流不对称,配电网断线故障引起的断口两端电压不对称等。由于我国配电网广泛采用中性点非直接接地的运行方式,零序阻抗大,如果三相参数不对称,将产生中性点位移电压,较大的位移电压会影响配电网的正常运行^[18]。

采用高压输电线路常用的正序 π 型线路模型对配电网线路进行等值不可避免地会出现精度问题。综上,考虑到配电网线路参数不对称以及三相不对称的运行情况,本文采用了基于相分量描述的配电线路三相 π 型等值模型。

c. 配电线路电压相角差小,量测相对误差大。

配电线路具有短线路、多分支的特点,在低负荷情况下,配电线路两侧电压拉开相角较小,线路两端电压相角差可能低至 0.2° 以下;此外,随着光伏等分布式电源的接入,甚至可能出现潮流倒送现象。当线路两端电压相角差过小时,量测误差将导致量测数据的相对误差显著增大。

目前在高压输电线路参数辨识中,现有研究表明,量测量的偏差会对线路参数辨识产生影响。在进行 500 kV 典型输电线路参数辨识时,若电压相角存在 1% 的偏差,电抗 X 将变化 -15.771% ^[19]。

对于典型配电网线路参数辨识而言,在低负荷

条件下(两侧电压相角差为 0.2°),若微型 PMU 的角度量测误差小于等于 0.05° ,当线路单端电压相角偏差为 0.05° 时,采用文献[19]方法可得辨识值中的线路电阻 R 会产生 308.47% 的偏差,电抗 X 会产生 23.27% 的偏差,线路对地电纳 B 会产生 76.14% 的偏差。因此,当配电线路两端电压相角差过小时,量测误差将会严重影响参数辨识的精度。

d. 配电通信条件薄弱,数据易受到攻击。

配电网缺乏主网的专用光缆等通信条件,而是采用公网 2G 等无线方式传输 DTU 数据。上述通信条件薄弱,容易受到各类干扰的影响。同时,配电网通信数据的安全防护简单,相对容易受到攻击,从而使数据出现大偏差或错误^[20]。

2 配电网线路相分量模型及辨识方法

配电网具有三相运行不平衡的特征。配电网单回线路采用相分量描述的集中参数 π 型等值模型进行描述,其等值模型如图 1 所示。图中, $U_{K\phi}$ 、 $I_{K\phi}$ 分别为 $K(K=M, N)$ 端 $\phi(\phi=a, b, c)$ 相电压、电流相量; $Y_{\phi\phi}$ 、 $Z_{\phi\phi}$ ($\phi\phi=aa, bb, cc$) 分别为各相对地导纳和串联阻抗; $Y_{\phi\varphi}$ 、 $Z_{\phi\varphi}$ ($\phi\varphi=ab, bc, ac$) 分别为相间互导纳和互阻抗。

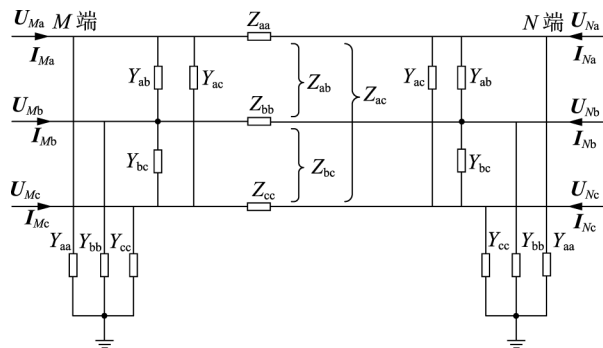


图 1 集中参数 π 型等值模型

Fig.1 π -type equivalent model using lumped parameter

若线路两端均装有微型 PMU,则可获得单时刻线路两端的电压及电流相量,可建立方程如下:

$$\begin{cases} Z(I_{Mabc} - Y_C U_{Mabc}) = U_{Mabc} - U_{Nabc} \\ Z(I_{Nabc} - Y_C U_{Nabc}) = U_{Nabc} - U_{Mabc} \end{cases} \quad (1)$$

$$Z = \begin{bmatrix} R_{11} + jX_{11} & R_{12} + jX_{12} & R_{13} + jX_{13} \\ R_{21} + jX_{21} & R_{22} + jX_{22} & R_{23} + jX_{23} \\ R_{31} + jX_{31} & R_{32} + jX_{32} & R_{33} + jX_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

$$Y_C = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} Y_{aa}+Y_{ab}+Y_{ac} & -Y_{ab} & -Y_{ac} \\ -Y_{ab} & Y_{bb}+Y_{ab}+Y_{bc} & -Y_{bc} \\ -Y_{ac} & -Y_{bc} & Y_{cc}+Y_{ac}+Y_{bc} \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{I}_{Kabc} = [\mathbf{I}_{Ka}, \mathbf{I}_{Kb}, \mathbf{I}_{Kc}]^T$ 、 $\mathbf{U}_{Kabc} = [\mathbf{U}_{Ka}, \mathbf{U}_{Kb}, \mathbf{U}_{Kc}]^T$ 分别为 K 端单时刻三相电流和电压相量值向量; $\mathbf{Z}$ 和 $\mathbf{Y}_C$ 分别为线路的阻抗矩阵和导纳矩阵。

式(1)可写成:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}(\mathbf{I}_{Mabc} - \mathbf{Y}_C \mathbf{U}_{Mabc}) = \mathbf{U}_{Mabc} - \mathbf{U}_{Nabc} \\ \mathbf{Z}(\mathbf{I}_{Nabc} - \mathbf{Y}_C \mathbf{U}_{Nabc}) = \mathbf{U}_{Nabc} - \mathbf{U}_{Mabc} \end{cases} \quad (2)$$

同时,令:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{Z}^{-1} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{14} & x_{15} & x_{16} \\ x_{17} & x_{18} & x_{19} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{Y}_C = \begin{bmatrix} x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{24} & x_{25} & x_{26} \\ x_{27} & x_{28} & x_{29} \end{bmatrix}$$

则需要辨识的参数为 $\mathbf{x} = [x_{11}, x_{12}, \dots, x_{19}, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{29}]^T$ 。在 k 时刻,式(2)可以写为如下矩阵形式:

$$\mathbf{A}_k \mathbf{x} = \mathbf{B}_k \quad (3)$$

其中, $\mathbf{A}_k$ 为由线路两端电压相量构成的 6×18 阶矩阵; $\mathbf{B}_k$ 为由线路两端电流相量构成的 6×1 阶矩阵。

需辨识的参数个数为 18, 单时刻可列写的方程数为 6 个。一组数据需 $n (n \geq 3)$ 个时刻的数据才能辨识得到结果。考虑多个时刻,则有:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{B} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_n]^T$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_n]^T$$

具体地,一组数据(每组包含 n 个时刻的不同数据)可列写为式(4)所示的线性方程,其中矩阵 $\mathbf{A}$ 的维度为 $6n \times 18 (n \geq 3)$, 矩阵 $\mathbf{B}$ 的维度为 $6n \times 1$, 具体的目标方程如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 & \mathbf{U}_3 & \mathbf{U}_4 & \mathbf{U}_5 & \mathbf{U}_6 \\ \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 & \mathbf{U}_3 & \mathbf{U}_4 & \mathbf{U}_5 & \mathbf{U}_6 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{19} \\ x_{21} \\ x_{22} \\ \vdots \\ x_{29} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Ma} \\ \mathbf{I}_{Mb} \\ \mathbf{I}_{Mc} \\ \mathbf{I}_{Na} \\ \mathbf{I}_{Nb} \\ \mathbf{I}_{Nc} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{Ma} - \mathbf{U}_{Na} & \mathbf{U}_{Mb} - \mathbf{U}_{Nb} & \mathbf{U}_{Mc} - \mathbf{U}_{Nc} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{U}_{Ma} - \mathbf{U}_{Na} & \mathbf{U}_{Mb} - \mathbf{U}_{Nb} & \mathbf{U}_{Mc} - \mathbf{U}_{Nc} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{U}_{Ma} - \mathbf{U}_{Na} & \mathbf{U}_{Mb} - \mathbf{U}_{Nb} & \mathbf{U}_{Mc} - \mathbf{U}_{Nc} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{Ma} & \mathbf{U}_{Mb} & \mathbf{U}_{Mc} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{U}_{Ma} & \mathbf{U}_{Mb} & \mathbf{U}_{Mc} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{U}_{Ma} & \mathbf{U}_{Mb} & \mathbf{U}_{Mc} \end{bmatrix}$$

3 抗差辨识方法

配电网的通信基础差,易受到干扰或恶意数据攻击,从而出现数据偏差较大或出现错误。在此情形下,准确辨识线路参数较为困难。因此,本节将介绍 2 种抗差辨识方法。

3.1 基于 Huber 估计的抗差最小二乘法

传统的最小二乘法等权看待每一组数据,当出现个别数据偏差较大时,最终的辨识结果将大幅度偏离真实值,使得算法的抗差性能较差。为了使得最小二乘法具有抗差性能,可引入权函数对不同的数据进行赋权:

$$J = \sum_{i=1}^{N_d} P_i v_i^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

其中, N_d 为量测方程数; v_i 为第 i 个量测的残差; P_i 为第 i 个量测的权重。

其参数估计结果的计算公式为:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{P}$ 为以 P_i 为对角元素的对角权重矩阵。

基于 Huber 估计的抗差最小二乘 HRLS (Huber estimation based Robust Least Squares) 法结合 Huber 估计的极值函数作为目标函数:

$$J = \sum_{i=1}^{N_d} \rho(v_i) \rightarrow \min \quad (8)$$

其中, $\rho(\cdot)$ 为 Huber 估计的极值函数^[21-22], 如式(9)所示。

$$\rho(v_i) = \begin{cases} \frac{v_i^2}{2} & |v_i| \leq k_0 \sigma_0 \\ k_0 \sigma_0 |v_i| - \frac{(k_0 \sigma_0)^2}{2} & |v_i| > k_0 \sigma_0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, σ_0 为量测误差的标准差; k_0 的取值范围一般为 1~2, 本文取为 1.5。

相应地, 其等价的权函数 ω 为:

$$\omega(v_i) = \begin{cases} 1 & |v_i| \leq k_0 \sigma_0 \\ \frac{k_0 \sigma_0 \text{sign}(v_i)}{v_i} = \frac{k_0 \sigma_0}{|v_i|} & |v_i| > k_0 \sigma_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\omega(v_i)$ 为第 i 个量测对应的权重, 即对角权矩阵 $\mathbf{P}$ 中的第 i 个对角元素。

式(9)、(10)表明, Huber 估计将量测数据分为 2 类:

a. 当量测残差不大于 $k_0 \sigma_0$ 时, 采取保权处理, 权值为 1, 使用最小二乘法计算;

b. 当量测残差大于 $k_0 \sigma_0$ 时, 采取降权处理, 其权重削弱不良数据对参数辨识的影响, 体现抗差能力。

3.2 基于中位数估计的抗差最小二乘法

中位数估计将数值集合分为上下数量相等的两部分, 然后取中间的数值作为估计。即先将样本数据 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ 按从小到大排列为 $\lambda_{(1)}, \lambda_{(2)}, \dots, \lambda_{(s)}$, 然后取中间值为估计。 λ_i 为第 i 个样本数据点; $\lambda_{(i)}$ 为重新排列后的第 i 个样本数据点; S 为样本数量, 当 S 为奇数时, 估计为排序后的最中间值, 当 S 为偶数时, 估计为排序后最中间 2 个数的均值。中位数的数学表达为:

$$m_{0.5} = \begin{cases} \lambda_{((S+1)/2)} & S \text{ 为奇数} \\ [\lambda_{(S/2)} + \lambda_{(S/2+1)}] / 2 & S \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $m_{0.5}$ 为样本中位数。

本文中, 每组微型 PMU 数据 (即每个时间断面内的数据) 可得出一个辨识结果, 对于基于多个时间断面的多个辨识结果, 采取基于中位数估计的抗差最小二乘 MRLS (Median estimation based Robust Least Squares) 法即可得到较为可信的辨识结果, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} R_{ii, \text{final}} = (R_{ii})_{0.5} \\ R_{ij, \text{final}} = (R_{ij})_{0.5} \\ X_{ii, \text{final}} = (X_{ii})_{0.5} \\ X_{ij, \text{final}} = (X_{ij})_{0.5} \\ Y_{ii, \text{final}} = (Y_{ii})_{0.5} \\ Y_{ij, \text{final}} = (Y_{ij})_{0.5} \end{cases} \quad i, j = a, b, c; i \neq j \quad (12)$$

其中, $R_{ii}, R_{ij}, X_{ii}, X_{ij}, Y_{ii}, Y_{ij}$ 为线路相参数; 下标 “final” 表示中位数估计的最终结果。

与传统最小二乘抗差方法相比, MRLS 法最大的优点在于以下 3 个方面:

a. 不受极端值 (个别坏数据) 的影响, 即当个别量测量存在较大的偏差时, 传统最小二乘抗差方法得出的参数辨识结果可能严重偏离实际值;

b. 有效降低了大部分量测量中的粗差对辨识

结果的影响^[13], 即可以避免至多 50% 的量测量存在的较大粗差或为坏数据时对参数辨识结果的影响, 使得结果依然靠近实际值;

c. 每个值先独立计算, 然后采用中位数估计, 这样计算量小、计算速度快。

与 HRLS 法相比, MRLS 法能够在取得较为接近的辨识结果的同时大幅缩短计算时间。

4 序分量提取以及中性点运行方式的影响

4.1 序分量的提取

基于相分量模型, 可辨识得到线路的阻抗和导纳相参数。然而, 在实际运行中, 调度部门需要线路序参数。因此需从辨识得到的相参数中获得线路的正序、零序参数。

由对称分量法可知, 3 个不对称的相量 $\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_b, \mathbf{F}_c$ 可以被唯一地分解成 3 组对称的相量: 正序分量 $\mathbf{F}_{a(1)}$, 负序分量 $\mathbf{F}_{a(2)}$, 零序分量 $\mathbf{F}_{a(0)}$ 。其关系为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{a(1)} \\ \mathbf{F}_{a(2)} \\ \mathbf{F}_{a(0)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, 算子 $a = e^{j120^\circ}$; $\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_b, \mathbf{F}_c$ 为三相电压相量或三相电流相量。式(13)可简记为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{F}_p \quad (14)$$

线路中三相电压降与三相电流满足式(15)。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{Ma} - \mathbf{U}_{Na} \\ \mathbf{U}_{Mb} - \mathbf{U}_{Nb} \\ \mathbf{U}_{Mc} - \mathbf{U}_{Nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Ma} \\ \mathbf{I}_{Mb} \\ \mathbf{I}_{Mc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

可简写为:

$$\Delta \mathbf{U}_{Mabc} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_{Mabc} \quad (16)$$

根据式(14), 替换为序分量, 得到:

$$\mathbf{T} \Delta \mathbf{U}_{a(1,2,0)} = \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{Ma(1,2,0)} \quad (17)$$

即:

$$\Delta \mathbf{U}_{a(1,2,0)} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{Ma(1,2,0)} = \mathbf{Z}_p \mathbf{I}_{Ma(1,2,0)} \quad (18)$$

易知 $\mathbf{Z}_p$ 即为序分量的阻抗矩阵, 即:

$$\mathbf{Z}_p = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T} = \begin{bmatrix} z_{a(1)} & & \\ & z_{a(2)} & \\ & & z_{a(0)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中, $z_{a(1)}, z_{a(2)}, z_{a(0)}$ 分别为 a 相正序、负序、零序阻抗。

因此可得到正序、零序阻抗参数如下:

$$\begin{cases} z_{a(1)} = \frac{x_{11} + x_{15} + x_{19}}{3} - \frac{x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{16} + x_{17} + x_{18}}{6} \\ z_{a(0)} = \frac{x_{11} + x_{15} + x_{19} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{16} + x_{17} + x_{18}}{3} \end{cases} \quad (20)$$

其中, $x_{11} \sim x_{19}$ 为待辨识参数列向量 $\mathbf{x}$ 中的元素, 即矩阵 $\mathbf{Z}^{-1}$ 中的元素。

同理, 对于导纳矩阵可推导得到:

$$\mathbf{Y}_{CP} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y}_C \mathbf{T} = \begin{bmatrix} y_{ca(1)} & & \\ & y_{ca(2)} & \\ & & y_{ca(0)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, $y_{ca(1)}$ 、 $y_{ca(2)}$ 、 $y_{ca(0)}$ 分别为 a 相正序、负序、零序导纳。

进而可得到正序、零序对地导纳参数为:

$$\begin{cases} y_{ca(1)} = 2 \left(\frac{x_{21} + x_{25} + x_{29}}{3} - \frac{x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{26} + x_{27} + x_{28}}{6} \right) \\ y_{ca(0)} = 2 \left(\frac{x_{11} + x_{15} + x_{19} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{16} + x_{17} + x_{18}}{3} \right) \end{cases} \quad (22)$$

由上述推导可知, 在通过相分量法辨识获得阻抗和导纳矩阵后, 即可由式 (20) 和 (22) 获得线路的正序和零序参数。

4.2 中性点运行方式对参数可辨识性的影响

由上述推导可知, 在通过相分量法辨识获得阻抗和导纳矩阵后, 即可由式 (20) 和 (22) 获得线路参数的正序和零序分量。

目前我国配电网中采用的接地方式主要有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点经小电阻接地。如果三相系统是三角形接法或者是没有中性线的星形接法, 则三相线电流之和总为 0, 不存在零序分量电流, 会影响参数的可辨识性。中性点接地方式对参数辨识的影响如表 1 所示。

表 1 中性点接地方式对参数辨识的影响

Table 1 Influence of neutral grounding mode on parameter identification

中性点接地方式	能否辨识		
	相参数	正序参数	零序参数
经消弧线圈或 小电阻接地	能	能	能
不接地	否	能	否

表 1 表明, 当配电网采用中性点经消弧线圈或小电阻接地时, 线路的相参数、正序参数和零序参数可辨识; 当中性点不接地时, 线路的正序参数可辨识, 线路的相参数和零序参数无法辨识, 这是因为当配电网采用不接地方式运行时, 电流的零序分量为 0, 导致式 (7) 中相应的矩阵奇异。

5 仿真验证及抗差方法比较

5.1 模型设置及稳态数据获取

利用 PSCAD 搭建如附录中图 A1 所示的配电系统, 该系统中 10 kV 电压等级的线路长度为 10 km, 线路末端接入不对称负荷, 相应的相参数和序参数

设定值如下: $R_{11} = 6.028 \ 7 \ \Omega$, $R_{12} = 3.293 \ 5 \ \Omega$, $X_{11} = 6.845 \ 8 \ \Omega$, $X_{12} = 3.656 \ 5 \ \Omega$, $Y_{11} = 1.500 \ 7 \times 10^{-5} \text{ S}$, $Y_{12} = -1.541 \ 5 \times 10^{-6} \text{ S}$, $R_0 = 12.615 \ 7 \ \Omega$, $X_0 = 14.158 \ 9 \ \Omega$, $B_0 = 2.384 \ 7 \times 10^{-5} \text{ S}$, $R_1 = 2.735 \ 2 \ \Omega$, $X_1 = 3.189 \ 3 \ \Omega$, $B_1 = 3.309 \ 6 \times 10^{-5} \text{ S}$ 。

通过调整线路末端的负荷可获得 6 组 (每组时长 10 s, 采样周期为 20 ms) 运行不对称时的稳态数据, 数据中包含的有效信息为线路两端三相电压、电流的幅值和相角。根据中性点运行方式, 本文设置了 4 个算例分别验证本文所提方法的正确性以及抗差性, 并比较 2 种抗差方法 (HRLS 法和 MRLS 法) 的抗差性能和效率。

5.2 正确性验证

验证 HRLS 法和 MRLS 法的正确性, 具体如下。

算例 1: 在中性点不接地系统对线路参数进行辨识, 辨识结果如表 2 所示。

表 2 中性点不接地系统的线路参数辨识结果

Table 2 Identification results of line parameters in neutral ungrounded system

辨识参数	HRLS 法的相对误差/%	MRLS 法的相对误差/%	辨识参数	HRLS 法的相对误差/%	MRLS 法的相对误差/%
R_{11}	—	—	R_0	—	—
R_{12}	—	—	X_0	—	—
X_{11}	—	—	B_0	—	—
X_{12}	—	—	R_1	0.000 10	0.000 59
Y_{11}	—	—	X_1	2.4×10^{-6}	0.000 14
Y_{12}	—	—	B_1	3.2×10^{-6}	0.000 30

表 2 表明, 当中性点不接地时, 本文所提方法可较准确地辨识配电线路的正序电阻、正序电抗和正序对地电纳参数, 其辨识值与设定值相近, 辨识结果较好, 但无法辨识各相参数和零序参数。

同时, 中性点经消弧线圈接地系统的参数辨识结果见附录中表 A1。结果表明: 在中性点经消弧线圈接地系统中, 参数辨识值与设定值相近, 本文所提方法可准确地辨识线路的相参数与序参数。中性点经小电阻接地系统的参数辨识情况类似, 限于篇幅不再赘述。

5.3 抗噪、抗差性能验证与比较

对比 HRLS 法和 MRLS 法这 2 种方法在低强度噪声、偏差情况下的抗噪能力、抗差能力和计算时间。

算例 2: 中性点经消弧线圈接地系统中, 在单侧 (M 侧) 的三相电压幅值中均加入强度为 2% 的噪声 (噪声整体呈随机分布, 且最大偏差为 2%), 以此模拟微型 PMU 数据中存在强噪声的情况。其中 M 侧 a 相电压幅值如图 2 所示 (图中电压幅值为标么值, 后同)。相应的参数辨识结果相对误差如附录中表 A1 所示。

附录中表 A1 所示结果表明, 在微型 PMU 的电

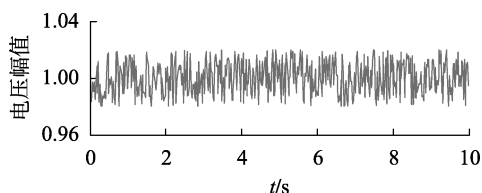


图 2 加入噪声时的 M 侧 a 相电压幅值

Fig.2 Phase-a voltage amplitude at side M with noise

压幅值数据存在噪声的情况下,HRLS 法、MRLS 法能够准确地辨识线路参数,相比于最小二乘法有更好的抵抗小量测误差的能力;此外,相比于 HRLS 法,MRLS 法的辨识精度较高,计算时间更短。

算例 3:中性点经消弧线圈接地系统中,在单侧(M 侧)的部分三相电压幅值数据中加入最大偏差为 10% 的偏差数据,且考虑三相电压幅值中均加入强度为 1% 的噪声(情形 1);在单侧(M 侧)的部分三相电流幅值数据中加入最大偏差为 10% 的偏差数据,且考虑三相电压幅值中均加入强度为 1% 的噪声(情形 2)。情形 1 的 a 相电压幅值、情形 2 的 a 相电流幅值如图 3 所示。2 种情形下参数辨识结果的相对误差见附录中表 A2。

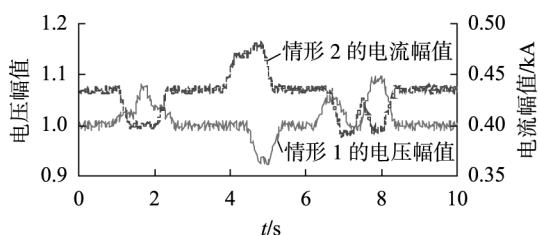


图 3 算例 3 中情形 1 的 a 相电压幅值、情形 2 的 a 相电流幅值

Fig.3 Phase-a voltage amplitude of Condition 1 and phase-a current amplitude of Condition 2 in Example 3

附录中表 A2 所示结果表明,在微型 PMU 的电压、电流幅值数据存在噪声、偏差的情况下,HRLS 法、MRLS 法能准确地辨识线路参数,相比于最小二乘法有更好的抵抗较大测量偏差的能力;MRLS 法的辨识结果整体优于 HRLS 法,且 MRLS 法的计算耗时远小于 HRLS 法;MRLS 法具有更好的抗差性能以及更低的时间复杂度。

5.4 极端情况下抗差性能测试比较

对 HRLS 法和 MRLS 法这 2 种抗差方法在极端情况下的抗噪能力、抗差能力进行测试比较。

算例 4:中性点经消弧线圈接地系统中,在电压幅值中加入坏数据。具体如下:在单侧(M 侧)的三相电压幅值中分别设置 20%、30%、40% 的数据置零(情形 1);在单侧(M 侧)的三相电压幅值中分别设置 20%、30%、40% 的数据置零,且考虑三相电压幅值中均加入强度为 1% 的噪声(情形 2)。情形 1、情形 2 下 2 种抗差方法的辨识结果分别见附录中表 A3 和表 A4。

附录中表 A3 所示结果表明,在不考虑噪声的情况下,在电压幅值中加入坏数据,当坏数据比例达到 40% 时,HRLS 法失效,其辨识结果失真;相反地,当坏数据比例为 20%、30%、40% 时,MRLS 法的辨识结果一致,均能够准确地辨识参数,不受坏数据的影响。另一方面,按照中位数估计理论,只要坏数据比例不超过 50%,MRLS 法可准确辨识参数。

附录中表 A4 所示结果表明,在数据中存在坏数据且加入噪声的情况下,当坏数据比例为 20%、30% 时,HRLS 法、MRLS 法均能抵御坏数据以及误差的影响,辨识结果较为准确;当坏数据比例达到 40% 时,HRLS 法失效,其辨识结果失真,MRLS 法的辨识结果较为准确。

算例 4 的辨识结果表明,HRLS 法在坏数据比例较大达到 40% 时无法进行准确的辨识,MRLS 法在仅有坏数据且不存在噪声的情况下的辨识结果极为准确;MRLS 法在存在噪声的情况下,相比于 HRLS 法在坏数据比例为 20%、30% 情况下的辨识结果略差,但其在坏数据比例达到 40% 时仍能准确辨识,适应性更好;此外,MRLS 法的计算耗时远小于 HRLS 法,具有更低的时间复杂度。因此,本文建议在线路参数辨识中优先采用 MRLS 法。

6 结论

本文结合微型 PMU 提供的配电线路的多组两端电压和电流三相相量数据,分别提出了基于 Huber 估计和中位数估计的适用于配电网三相运行不对称状态的配电线路抗差参数辨识方法,并比较了 2 种抗差方法的性能。所提方法基于相分量描述的配电线路三相 π 型等值模型和抗差方法。仿真结果表明,当配电网采用中性点经消弧线圈或小电阻接地方式时,所提方法可辨识线路的阻抗、导纳相参数,获得线路的正序和零序参数;当采用中性点不接地方式时,所提方法可准确辨识线路的正序参数。此外,仿真结果表明,MRLS 法的抗差性能、计算耗时和辨识结果精度均优于 HRLS 法,且其在极端情况下的适应性更强,具有更好的抗差能力以及更低的时间复杂度。因此,本文建议在线路参数辨识中优先采用 MRLS 法。

值得注意的是,本文针对配电网三相不平衡以及信号噪声数据易受攻击的特点提出了适用于基于相分量的配电线路抗差参数辨识方法。而配电网具有分支线路多、线路短、多回路互感耦合的特点,这些特点均会影响配电网的参数辨识结果。因此,如何利用有限的的数据,实现适用于多分支短线路并解决多回路互感耦合问题的配电网抗差辨识方法,将是下一步的研究重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. New York, USA: Springer, 2008: 93-105.
- [2] LIU Yilu. A US-wide power systems frequency monitoring network [C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2006: 159-166.
- [3] MEIER A V, CULLER D, MCEACHERN A, et al. Micro-synchrophasors for distribution systems[C]//2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington DC, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [4] PINTE B, QUINLAN M, REINHARD K. Low voltage micro-Phasor Measurement Unit (μ PMU) [C]//2015 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). Champaign, IL, USA: IEEE, 2015: 1-4.
- [5] 马庆法. 高精度电力系统轻型广域测量装置及系统[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- MA Qingfa. High accuracy light wide area measurement device and system of power system[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [6] LUO C C, LIU C W. Design and implementation of dual time synchronization signal for micro Phasor Measurement Unit (μ PMU) [C]//2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Taiwan, China: IEEE, 2016: 1-6.
- [7] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20.
- XIE Xiaolei, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Development of a new distribution network PMU device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 15-20.
- [8] 李江, 徐志临, 李国庆, 等. 配电网微型 PMU 与故障录波装置研究与开发[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 54-59.
- LI Jiang, XU Zhilin, LI Guoqing, et al. Research and development of micro PMU and fault wave recording device for distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 54-59.
- [9] 赵德奎. 架空输电线路工频参数测量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- ZHAO Dekui. Research on transmission line power frequency parameters[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [10] 胡志坚, 陈允平, 徐玮, 等. 基于微分方程的互感线路参数带电测量研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 28-33.
- HU Zhijian, CHEN Yunping, XU Wei, et al. Principles and realization of live line measurement of parameters of transmission lines with mutual inductance based on differential equations [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 28-33.
- [11] 曾兵, 吴文传, 张伯明. 基于 Karush-Kuhn-Tucker 最优条件的电网可疑参数辨识与估计[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 56-61.
- ZENG Bing, WU Wenchuan, ZHANG Boming. A method to identify and estimate network parameter errors based on Karush-Kuhn-Tucker condition[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 56-61.
- [12] 薛安成, 张兆阳, 毕天姝. 基于自适应抗差最小二乘的线路正序参数在线辨识方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 202-209.
- XUE Ancheng, ZHANG Zhaoyang, BI Tianshu. Online identification of transmission line positive-sequence parameters based on adaptive robust least squares[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 202-209.
- [13] 薛安成, 游宏宇, 苏大威, 等. 基于中位数估计和相分量模型的输电线路序参数在线抗差辨识[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 88-94.
- XUE Ancheng, YOU Hongyu, SU Dawei, et al. On-line robust identification of transmission line's sequence parameter based on median estimation and phase component model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 88-94.
- [14] PROSTEJOVSKY A M, GEHRKE O, KOSEK A M, et al. Distribution line parameter estimation under consideration of measurement tolerances[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 726-735.
- [15] PROSTEJOVSKY A M, GEHRKE O, KOSEK A M, et al. Recursive estimation of n-line parameters for electric power distribution grids [C]//Electrical Power and Energy Conference. Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2016: 1-6.
- [16] PEGORARO P A, CASTELLO P, MUSCASCAS C, et al. Handling instrument transformers and PMU errors for the estimation of line parameters in distribution grids[C]//IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems. Liverpool, UK: IEEE, 2017: 1-6.
- [17] VICOL B, GAVRILAŞ M, IVANOV O, et al. Synchrophasor measurement method for overhead line parameters estimation in MV distribution networks[C]//2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Bucharest, Romania: IEEE, 2014: 862-865.
- [18] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
- ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.
- [19] 丁蓝. 基于 PMU 的输电线路参数辨识与戴维南等值研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
- DING Lan. Study on parameter identification of transmission line and Thevenin equivalent based on PMU[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [20] PAL S, SIKDAR B, CHOW J. Classification and detection of PMU data manipulation attacks using transmission line parameters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5057-5066.
- [21] HUBER P J. Robust estimation of a location parameter[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1964, 35(1): 73-101.
- [22] 薛安成, 徐劲松, 苏大威, 等. 抗差输电线路正序参数辨识方法: CN107328996A[P]. 2017-11-07.

作者简介:



薛安成

薛安成 (1979—), 男, 江苏常熟人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为模型和数据驱动的电力系统稳定性分析与控制 (E-mail: acxue@ncepu.edu.cn);

徐飞阳 (1995—), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统参数辨识 (E-mail: xufeiyangxj@126.com);

游宏宇 (1994—), 男, 江西余干人, 硕士, 研究方向为电力系统参数辨识 (E-mail: 1120431980@qq.com);

Kenneth E. Martin (1947—), 男, 美国科罗拉多人, 注册专业工程师, 硕士, IEEE fellow, Electric Power Group 资深专家, IEEE/IEC 同步相量测量标准工作组主席, IEEE 电力系统中继委员会、中继通信小组委员会成员, 研究方向为同步相量测量技术及应用 (E-mail: martin@electricpowergroup.com)。

(下转第 43 页 continued on page 43)

电力系统及其自动化学报,2006,18(4):58-61.

LIU Junhua, FANG Gefei, LÜ Yanyan. Allocation of reactive compensation using sensitivity analysis approach[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(4):58-61.

- [17] 任新伟,徐建政.改进细菌群体趋药性算法在无功优化中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(5):81-85.

REN Xinwei, XU Jianzheng. Application of improved bacterial colony chemotaxis algorithm in reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(5):81-85.

作者简介:

朱瞳彤(1995—),女,安徽芜湖人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化规划(E-mail:xiaowo1822@sjtu.edu.cn);



朱瞳彤

顾洁(1971—),女,上海人,副教授,博士,主要研究方向为电力市场及电力系统优化规划(E-mail:gujie@sjtu.edu.cn);

金之俭(1965—),男,上海人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能电网技术、电力设备在线监测技术、超导应用技术(E-mail:zjjin@sjtu.edu.cn);

储琳琳(1978—),女,浙江海盐人,工程师,研究方向为负荷预测及电网规划(E-mail:chull@sina.com);

张宇俊(1975—),女,上海人,高级工程师,研究方向为电网规划(E-mail:zhangjy@sina.com)。

Intelligent harmonious collocation for reactive power compensation of distribution network combining planning and operation

ZHU Tongtong¹, GU Jie¹, JIN Zhijian¹, CHU Linlin², ZHANG Junyu²

(1. Research Center for Big Data Engineering and Technologies, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shinan Power Supply Company of SMPEC, Shanghai 200233, China)

Abstract: The spatial fast load segmentation method is adopted to establish the dynamic load model to remove the time complexity of spatial load, on this basis, a bi-level intelligent harmonious collocation model for reactive power compensation is built with the combination of planning and operation. The upper-level planning model optimizes the collocation of installation location, type and capacity of reactive power compensation equipments, while the lower-level operation model comprehensively considers different load scenarios to optimize the switching schemes of the equipments, which makes power system achieve hierarchical reactive power balance. The bi-level wind-driven algorithm is adopted to solve the model. The case results show that the proposed reactive power compensation scheme can obtain good compensation effect under different load scenarios, verifying the rationality and validity of the proposed model and algorithm.

Key words: reactive power harmonious collocation; bi-level optimization; hierarchical balance; dynamic load

(上接第7页 continued from page 7)

Robust parameter identification of distribution line based on micro PMU

XUE Ancheng¹, XU Feiyang¹, YOU Hongyu^{1,2}, XU Jingsong¹, Kenneth E. Martin³, BI Tianshu¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 3. Electric Power Group, Pasadena, CA 91101, USA)

Abstract: Micro PMU (Phasor Measurement Unit) provides the foundation for improving the observability and controllability of intelligent distribution network. A robust identification method for the distribution line parameters based on micro PMU is studied. Aiming at the asymmetric operation of three-phase distribution network, the three-phase π -type equivalent model of distribution lines based on phase component description is established, and then the line parameter identification method based on the LS (Least Squares) algorithm is proposed considering multiple sets of voltage and current phasor data at both ends of lines provided by micro PMUs, which is based on the phase component model and is suitable for asymmetrical operation of distribution network. And two robust estimation methods are introduced, one is HRLS (Huber estimation based Robust Least Squares) algorithm and the other is MRLS (Median estimation based Robust Least Squares) algorithm. In the system whose neutral point is grounded by arc suppression coil or low resistance, the proposed method only requires the voltage and current phasor at both ends of lines to identify the phase parameters and obtain the positive and zero sequence parameters of lines. In the neutral ungrounded system, the proposed methods can identify the positive sequence parameters of lines when the system is in normal operation since there is no zero sequence current component. The effectiveness of the proposed method is verified and the advantages and disadvantages of two robust methods in identification precision and computing time are compared by example simulation. Simulative results show that MRLS algorithm has better robust performance and less computing time.

Key words: distribution lines; micro PMU; robust parameter identification; phase components method; least squares algorithm; Huber estimation; median estimation; neutral grounding modes

附录

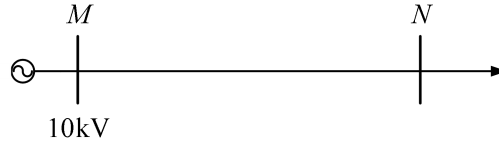


图 A1 10 kV 配电系统
Fig.A1 10 kV distribution system

表 A1 加入电压幅值噪声时参数辨识结果的相对误差（噪声强度为 2%）
Table A1 Relative errors of parameter identification results with noise in
voltage amplitude(noise intensity is 2%)

辨识参数	LS 法的相对误差/%	HRLS 法的相对误差/%	MRLS 法的相对误差/%
R_{11}	0.6578	0.4580	-0.0289
R_{12}	1.1101	0.7463	-0.0535
X_{11}	1.0902	0.3221	-0.1132
X_{12}	1.7644	0.5443	-0.1800
Y_{11}	-0.0634	0.0106	0.0112
Y_{12}	-0.2560	0.0388	0.0410
R_0	0.8804	0.6081	-0.0396
X_0	1.5349	0.4115	-0.1650
B_0	-0.0326	0.0079	0.0061
R_1	0.1442	0.1120	-0.0039
X_1	0.1032	0.1237	0.0034
B_1	-0.0745	0.0116	0.0131
平均误差/%	0.6426	0.2829	0.0550
计算时间/s	1.97	129.03	2.12

表 A2 算例 3 的情形 1 和情形 2 下参数辨识结果的相对误差
Table A2 Relative errors of parameter identification results of Condition 1 and 2 in Example 3

辨识参数	LS 法的相对误差/%		HRLS 法的相对误差/%		MRLS 法的相对误差/%	
	情形 1	情形 2	情形 1	情形 2	情形 1	情形 2
R_{11}	1.5210	-7.8859	1.6852	-2.2221	0.8277	-0.8147
R_{12}	2.7837	-15.3754	2.4061	-5.0401	1.1483	-0.9735
X_{11}	5.8876	5.3386	1.8370	6.5826	0.9116	1.2247
X_{12}	9.3496	9.3078	2.9624	11.5822	1.4597	2.1541
Y_{11}	-0.5257	-0.0997	-0.8917	-0.1231	-0.4656	-0.0230
Y_{12}	-1.9288	1.4038	-3.5355	1.7340	-1.8535	0.3245
R_0	2.0790	-11.7041	2.1553	-3.6070	1.0491	-0.9469
X_0	8.6182	7.3070	2.5815	9.0874	1.2824	1.6904
B_0	-0.3012	0.4956	-0.4522	0.6120	-0.2430	0.1154
R_1	0.2342	0.9196	0.6011	0.9718	0.3174	0.1819
X_1	-0.1737	0.9693	0.1844	1.0225	0.0884	0.1911
B_1	-0.6065	-0.3141	-1.0500	-0.3880	-0.5458	-0.0729
平均误差/%	2.8341	5.0934	1.6952	3.5811	0.8494	0.7261
计算时间/s	1.83	1.80	89.39	94.72	2.20	1.84

表 A3 算法 4 的情形 1 下参数辨识结果的相对误差
Table A3 Relative errors of parameter identification results of Condition 1 in Example 4

辨识参数	HRLS 法的相对误差/%			MRLS 法的相对误差/%
	20%	30%	40%	20%, 30%, 40%
R_{11}	0.0859	4.4914	-101.22	0.0003
R_{12}	0.1405	7.3775	-79.03	0.0002
X_{11}	0.0741	3.8539	-751.57	0.0001
X_{12}	0.1233	6.4281	-1354.03	-0.0001
Y_{11}	0.0004	0.0117	5.55	0.0002
Y_{12}	-0.0018	0.0444	35.53	-0.0027
R_0	0.1140	5.9777	-107.97	0.0002
X_0	0.0977	5.0870	-1155.72	0.0000
B_0	0.0006	0.0258	13.22	0.0001
R_1	0.0211	1.0636	-85.66	0.0006
X_1	0.0216	1.1166	145.54	0.0001
B_1	0.0004	0.0067	2.79	0.0003
平均误差/%	0.0568	2.9570	319.82	0.0004
计算时间/s	95.14	99.17	25.44	2.14

注：表头中的数据为设置的坏数据比例。

表 A4 算法 4 的情形 2 下参数辨识结果的相对误差
Table A3 Relative errors of parameter identification results of Condition 2 in Example 4

辨识参数	HRLS 法的相对误差/%			MRLS 法的相对误差/%		
	20%	30%	40%	20%	30%	40%
R_{11}	-0.0309	0.6919	-283.62	-0.5111	-0.8571	-1.3374
R_{12}	-0.0294	1.4325	-477.01	-0.7095	-1.1897	-1.8562
X_{11}	-0.0383	0.6226	-730.05	-0.5632	-0.9446	-1.4737
X_{12}	-0.0574	1.1432	-1364.11	-0.9020	-1.5129	-2.3603
Y_{11}	0.0286	-0.0235	-19.88	0.2907	0.4884	0.7642
Y_{12}	0.1102	-0.1084	-99.04	1.1591	1.9532	3.0659
R_0	-0.0354	1.0127	-396.30	-0.6480	-1.0867	-1.6955
X_0	-0.0545	0.8574	-1066.61	-0.7923	-1.3289	-2.0734
B_0	0.0178	0.0877	16.72	0.1509	0.2533	0.3956
R_1	-0.0205	-0.0481	-23.76	-0.1952	-0.3277	-0.5116
X_1	-0.0024	0.1015	17.04	-0.0544	-0.0914	-0.1427
B_1	0.0325	-0.0635	-33.06	0.3411	0.5731	0.8970
平均误差/%	0.0382	0.5161	377.27	0.5265	0.8839	1.3811
计算时间/s	110.33	94.44	22.47	1.94	2.34	2.00

注：表头中的数据为设置的坏数据比例。