

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

薛安成¹, 游宏宇¹, 苏大威², 徐劲松¹, 周健¹, 徐飞阳¹, 卢敏³, 王治华⁴, 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. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;

3. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007;

4. 国网上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 实测相量测量单元(PMU)数据中存在随机噪声和不良数据,造成线路正序和零序参数辨识精度降低,故而会导致状态估计合格率低等问题,从而影响电力系统调度运行。针对上述问题,提出了一种基于PMU数据、线路相分量模型和中位数估计的输电线路正序和零序参数在线抗差辨识方法。该方法仅需多次正常运行时三相不平衡下的线路双端PMU相电压、相电流测量数据,并利用相分量模型实现正序和零序参数同时辨识,利用中位数抗差减少数据量需求。具体地,建立了线路三相参数的 π 型等值相分量模型,基于最小二乘法推导了获得其参数的辨识方法;应用结合中位数估计的抗差最小二乘法进行辨识,该方法可避免极端值和大部分量测中粗差对辨识结果的影响;利用仿真及实测数据验证了所提方法的有效性以及算法的抗噪和抗差能力。

关键词: 在线参数辨识;相分量法;三相不平衡;中位数估计;序参数;输电线路

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.08.013

0 引言

输电线路工频参数是正确进行状态估计、继电保护整定计算、故障分析、网损计算等各种电力系统计算的基础,实践证明不准确的参数会影响状态估计合格率,从而影响电力系统的安全、稳定、可靠运行^[1-2]。

目前,线路参数测量方法大致可分为理论计算、离线停电测量和在线带电测量。理论计算通常基于Carson模型,利用线路几何均距、材料结构等物理参数,结合气温、地理位置等根据公式计算电抗、电阻、电纳。但是,理论计算通常只考虑到完全对称的情况,且无法考虑到实时温度、弧垂、避雷线等实际存在的问题,必然会导致该方法的结果和实际参数存在较大的差异^[3-4]。离线停电测量^[5-6]是在新建线路投运前或将已运行的线路停电后,采用外加电源,利用电压表、电流表等各种表计测量线路数据,经人工读取表值并结合相应的公式计算各个参数。该方法存在被测线路须停电、多回运行的平行线路无法测量互感等问题。带电测量则是在所有线路都不停电或不完全停电的情况下,采用同步采样的两端数据

进行测量。随着相量测量单元(PMU)设备的广泛安装,采用PMU数据实现不停电带电线路参数辨识的方法受到了极大关注。该方法和离线测量相比无需耗费大量人力物力,且可实现在线参数辨识。

目前,利用PMU数据进行线路参数辨识的研究主要关注于正序参数和零序参数的辨识,还有部分着重于研究同塔多回高压直流线路分布参数的辨识^[7]。正序参数辨识^[3,8-14]普遍是基于正序参数 π 型等值模型而获得的。特别地,为了减少噪声和偏差的影响,不同文献采用不同抗差方法提高精度。文献[3,8]结合Huber准则和多时刻数据叠加,提出了窗口滑动总体抗差最小二乘(LS)递推估计;文献[9]利用自适应IGG准则消除大偏差数据影响;文献[10]利用扩展型的卡尔曼滤波改进了原有最小二乘法;文献[11-12]结合数据采集和监控(SCADA)系统数据和PMU数据提高估计精度;文献[13]利用了统计学单点参数估计符合正态分布和统计学平均的方法;文献[14]采用一字型(简化的 π 型)模型,结合图论知识和不同时间断面多节点PMU数据提高支路电抗参数的辨识精度。

与正序参数辨识类似,零序参数辨识^[15-22]目前也普遍基于序参数 π 型等值模型获得。文献[15]采用线路两端同步的故障录波数据,并采用单时刻计算,从而在不同工况下分别辨识双回线正序参数和含互感的零序参数。文献[16]研究了采用PMU数据对双回耦合输电线路的零序分布参数和集中参数的计算方法。文献[17]重点研究了利用双端同

收稿日期:2017-06-26;修回日期:2018-05-08

基金项目:国家电网公司科技项目(DZ71-16-029);国家重大科研仪器研制项目(51627811)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (DZ71-16-029) and the National Major Scientific Instruments Development Foundation of China (51627811)

步数据辨识三回输电线路的零序分布参数。文献[18]从理论上分析推导了采用线路双端的 PMU 量测进行单回和双回输电线路零序参数的辨识方法,并利用自适应 IGG 抗差最小二乘(ARLS)法提高了辨识算法的精度。文献[19]提出了一种同杆架设多回线零序互感计算方法,提高了零序参数测量的工作效率。另一方面,与正序参数不同的是以往辨识零序参数的方法为:首先需获取足够大的零序分量,通常采用人工注入零序电流,或者依赖于故障时存在较大的零序分量;再通过干扰法^[2,20]、增量法^[2,21]、微分法^[22-23]、积分法^[23-24]等实现零序参数的最终辨识。文献[2]主要阐述了干扰法和增量法的模型及量测技术。文献[20-22,24]分别利用以上 4 种方法推导了同杆并架多回线零序参数的辨识过程,并分别实现了对东北电网 500 kV 线路、大连电网 500 kV 线路、西北电网 330 kV 线路以及宁夏电网 220 kV 线路的零序参数的带电测量。文献[23]深入研究了微分法和积分法,进而提高原有算法的精度。上述研究表明,较大的零序分量需采用各种方法获得,不易提取,且零序参数在线辨识较为困难。特别地,当提取的数据中零序分量较小时,量测误差可能会对辨识结果的精确性有较大的影响。

值得注意的是,输电线路可由多种模型来描述,除 π 型序分量模型外,还可由考虑三三相的相分量模型描述。与其他直接辨识序分量的方法相比,一方面,当输电线路三相不对称时,该方法可以辨识其各相参数;另一方面,一旦利用相分量模型和 PMU 相分量数据辨识出线路相参数,则可利用解耦获得线路正、负、零序参数,避免了零序分量过小而使零序参数难以辨识的问题。目前采用相分量模型进行线路序参数辨识的研究较少,文献[25]采用相分量模型辨识相参数,并以三相大规模不平衡为例仿真验证了其理论可行性。

本文进一步将相分量模型拓展到序参数辨识,采用相分量模型同时实现正序和零序参数辨识。鉴于现有抗噪声和偏差方法如 IGG 方法^[9,18]等,存在辨识参数较多时,获得精确结果所需样本数呈几何级数增加的问题,本文采用中位数抗差估计方法,一是解决数据数目要求,二是消除实测 PMU 相分量数据中存在噪声甚至不良数据造成的影响,在一定程度上避免了极端值和较多量测数据中存在粗差等对辨识结果的影响,最终获得更为准确的线路参数。同时,采用正常运行时三相不平衡情况下的线路双端 PMU 相分量数据实现线路正序和零序参数的辨识,可解决零序分量获取较难且在线辨识困难的问题。

1 采用相分量的序参数辨识方法

1.1 输电线相分量模型

对于单回输电线路,采用相分量描述时,其集中参数 π 型等值模型如图 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、相电流相量; $Y_{\phi\phi}$ 、 $Z_{\phi\phi}$ 分别为各相对地导纳、串联阻抗; $Y_{\phi\psi}$ 、 $Z_{\phi\psi}$ ($\phi\psi=ab, bc, ca$) 分别为相间互导纳、互阻抗。

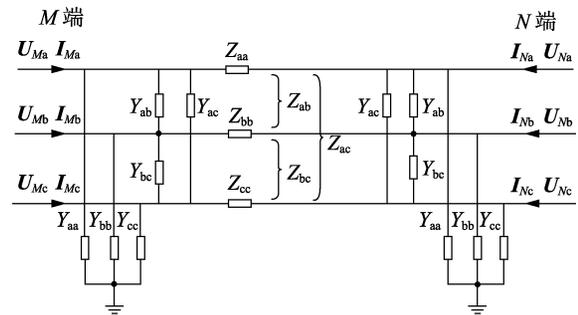


图 1 集中参数 π 型等值模型

Fig.1 π -type equivalent model using lumped parameter

图 1 所示线路的两端电压电流方程满足:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}(\mathbf{I}_{Mabc} - \mathbf{Y}_C \mathbf{U}_{Mabc}) = \mathbf{U}_{Mabc} - \mathbf{U}_{Nabc} \\ \mathbf{Z}(\mathbf{I}_{Nabc} - \mathbf{Y}_C \mathbf{U}_{Nabc}) = \mathbf{U}_{Nabc} - \mathbf{U}_{Mabc} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\mathbf{Y}_C = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} + Y_{ab} + Y_{ac} & -Y_{ab} & -Y_{ac} \\ -Y_{ab} & Y_{bb} + Y_{ab} + Y_{bc} & -Y_{bc} \\ -Y_{ac} & -Y_{bc} & Y_{cc} + Y_{ac} + Y_{bc} \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{I}_{Kabc} = [I_{Ka} \ I_{Kb} \ I_{Kc}]^T$ 、 $\mathbf{U}_{Kabc} = [U_{Ka} \ U_{Kb} \ U_{Kc}]^T$ 分别为 K 端三相电流、电压相量; \mathbf{Z} 、 \mathbf{Y}_C 分别为待辨识的线路阻抗矩阵、导纳矩阵。

进一步地,式(1)可改写为:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{U}_{Mabc} - \mathbf{U}_{Nabc}) + \mathbf{Y}_C \mathbf{U}_{Mabc} = \mathbf{I}_{Mabc} \\ \mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{U}_{Nabc} - \mathbf{U}_{Mabc}) + \mathbf{Y}_C \mathbf{U}_{Nabc} = \mathbf{I}_{Nabc} \end{cases} \quad (2)$$

同时,令:

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{Z}^{-1} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{14} & x_{15} & x_{16} \\ x_{17} & x_{18} & x_{19} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_2 = \mathbf{Y}_C = \begin{bmatrix} x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{24} & x_{25} & x_{26} \\ x_{27} & x_{28} & x_{29} \end{bmatrix}$$

相应地,在 k 时刻,待辨识的参数 $\mathbf{x} = [x_{11} \ x_{12} \ \cdots \ x_{19} \ x_{21} \ x_{22} \ \cdots \ x_{29}]^T$ 满足如下线性方程:

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

其中, \mathbf{A}_k 为 k 时刻电压、电流相量构成的 6×18 维矩阵; \mathbf{B}_k 为 k 时刻两端电压降形成的 6×1 维矩阵。

考虑多个时刻,则有:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{B} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix}$$

具体地,一组数据(每组包含 n 个时刻的不同数据)可列写为如式(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 $6n \times 1$,具体目标方程如附录所示。由此可知,对于利用测量值获取线路参数 \mathbf{x} ,可采用的目标函数为:

$$J = \|\mathbf{Ax} - \mathbf{B}\|^2 = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{v}_i\|^2 \quad (5)$$

如果采用传统最小二乘法进行求解,则其参数辨识结果为:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (6)$$

1.2 序分量的获取

由对称分量法可知,3个不对称分量 $\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_b, \mathbf{F}_c$ 可以唯一分解成为3个对称的分量 $\mathbf{F}_{a(1)}, \mathbf{F}_{a(2)}, \mathbf{F}_{a(0)}$,即正序、负序和零序分量。其关系为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{a(1)} \\ \mathbf{F}_{a(2)} \\ \mathbf{F}_{a(0)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,算子 $\alpha = e^{j120^\circ}$; $\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_b, \mathbf{F}_c$ 为三相电压相量或三相电流相量; $\mathbf{F}_{a(1)}, \mathbf{F}_{a(2)}, \mathbf{F}_{a(0)}$ 分别为 a 相电压或电流正序分量、负序分量、零序分量。式(7)可简化为:

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{TF}_s \quad (8)$$

其中, \mathbf{F}_p 为包含三相电压相量或电流相量的向量; \mathbf{T} 为对称分量法的变换矩阵; \mathbf{F}_s 为包含 a 相电压或电流正序分量、负序分量、零序分量的向量。

设线路各相自感阻抗均为 z_s ,互感阻抗均为 z_m ,根据电路理论,线路中三相电压降与三相电流满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{Ma} - \mathbf{U}_{Na} \\ \mathbf{U}_{Mb} - \mathbf{U}_{Nb} \\ \mathbf{U}_{Mc} - \mathbf{U}_{Nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{Ma} \\ \mathbf{I}_{Mb} \\ \mathbf{I}_{Mc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)可简写为:

$$\Delta \mathbf{U}_{abc} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_{Mabc} \quad (10)$$

根据式(7),将三相电压降和三相电流替换为序分量,得到:

$$\mathbf{T} \Delta \mathbf{U}_{a(1,2,0)} = \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{Ma(1,2,0)} \quad (11)$$

式(11)可改写为:

$$\Delta \mathbf{U}_{a(1,2,0)} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T} \mathbf{I}_{Ma(1,2,0)} = \mathbf{Z}_p \mathbf{I}_{Ma(1,2,0)} \quad (12)$$

易知, \mathbf{Z}_p 为序分量的阻抗矩阵,即:

$$\mathbf{Z}_p = \begin{bmatrix} z_{a(1)} & & \\ & z_{a(2)} & \\ & & z_{a(0)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

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

可由式(14)得到正、零序阻抗参数。

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

同理,对于导纳矩阵,假设对地导纳均为 y_s ,互导纳为 y_m ,可得:

$$\mathbf{Y}_{Cp} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{Y}_C \mathbf{T} = \begin{bmatrix} y_{ca(1)} & & \\ & y_{ca(2)} & \\ & & y_{ca(0)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

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

可由式(16)得到正、零序对地导纳参数。

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

由式(14)和(16)可知,通过相分量法得到的阻抗和导纳矩阵中,可以利用对称分量法得到正序和零序分量。

1.3 三相不平衡数据

相分量模型式(2)中,需辨识的参数为18个。然而,式(2)仅包含6个方程,为了保证矩阵 \mathbf{A} 的非奇异性,至少需要3个不同时刻的双端 PMU 数据 ($n > 3$)。另外,为了保证 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 非奇异,至少要求3个时刻具有不同的不平衡度。

对于三相不平衡数据,国家标准(GB/T 15543—2008)规定,电压三相不平衡的程度用电压负序分量幅值与正序分量幅值的比值百分比表示,即不平衡度 ε 的标准定义如下:

$$\varepsilon = \frac{F^-}{F^+} \times 100\% \quad (17)$$

其中, F^- 为负序分量幅值; F^+ 为正序分量幅值。电网稳态运行时,公共连接点不平衡度满足:负序电压不平衡度不超过2%,短时不超过4%。

在实际电网运行时,由于不同的时段负荷的类型及大小不同(如凌晨、中午和下午等甚至不同季节),故可在3个(或多个)时间段采样实测数据,即可以获得不平衡情况不同的 PMU 数据。

2 中位数抗差估计方法

中位数可将数值集合分为上下数量相等的两部

分。首先将样本数据 $(\lambda_1 \sim \lambda_n)$ 按从小到大排列 $(\lambda_{(1)} \sim \lambda_{(n)})$,如果数据数量 n 为奇数,则中位数即为排序后的最中间的值,如果数据数量 n 为偶数,则中位数为排序后的最中间 2 个数的均值。即:

$$m_{0.5} = \begin{cases} \lambda_{((n+1)/2)} & n \text{ 为奇数} \\ \frac{\lambda_{(n/2)} + \lambda_{(n/2+1)}}{2} & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $m_{0.5}$ 为样本中位数; $\lambda_{(i)}$ 为重新排列后的第 i 个样本数据点。

本文中,每组 PMU 相分量数据(即每个时间窗内)可得出一个辨识结果,基于多个时间窗的多个辨识结果采取中位数的抗差方法即可得到较为可信的最终辨识结果,即:

$$\begin{cases} z_{a(1),\text{final}} = (z_{a(1)})_{0.5} \\ z_{a(0),\text{final}} = (z_{a(0)})_{0.5} \\ y_{ca(1),\text{final}} = (y_{ca(1)})_{0.5} \\ y_{ca(0),\text{final}} = (y_{ca(0)})_{0.5} \end{cases} \quad (19)$$

与其他的传统最小二乘抗差方法相比,该抗差方法最大的优点在于以下 2 点:不受极端值(个别坏数据)的影响,当个别量测量存在较大偏差时,采用传统最小二乘法得到的参数辨识结果可能会严重偏离实际值;有效降低大部分量测量中的粗差对辨识结果的影响,即可以避免至多 50% 的量测量存在较大粗差或为坏数据时对参数辨识结果的影响,使得结果依然接近实际值。

3 本文方法的优点

a. 传统方法多采用稳态 PMU 数据,仅实现正序参数辨识。本文采用稳态 PMU 数据,可同时实现正序和零序参数辨识。

b. 采用相分量模型,可以在系统不对称运行时实现测量。

c. 现有零序参数辨识方法需要利用断线或者故障数据获得很大的零序分量,而本文方法只需要不平衡数据稳态数据即可辨识。

d. 现有抗差方法,如文献[7,16]中的 IGG 抗差方法在辨识参数个数较多时(如本文未知量个数为 18 个),辨识矩阵为一个多维度问题(本文中矩阵 A 为 36 维),需要大量样本,即要求数据较多才能获得合理结果。而本文采用的中位数抗差方法的样本要求比自适应 IGG 抗差方法少。

4 仿真分析

4.1 模型设置及稳态数据获取

在 PSCAD 中搭建如图 2 所示的系统。该系统包含长 200 km 的 500 kV 单回输电线路,负荷 1 和负荷 2 均采用恒定阻抗模型。仿真中保持负荷 1 不

变,只改变负荷 2 的三相电抗参数,使得每次电压不平衡度均小于 2%(在国家标准范围内),获得了 6 次(每次 11 s)电流不平衡时的 PMU 相分量量测数据(采样周期为 20 ms),每次数据的电流的不平衡情况不同,数据中包含的有效信息包括线路两端三相电压、电流的幅值和相角,本文取 6 次稳态数据中稳态后的 500 组数据进行辨识。



图 2 500 kV 单回线系统图

Fig.2 System diagram of 500 kV single-circuit line

采用相分量法辨识阻抗矩阵 Z 和导纳矩阵 Y_C ,即:

$$Z = \begin{bmatrix} R_{11} + jX_{11} & R_{12} + jX_{12} & R_{31} + jX_{31} \\ R_{21} + jX_{21} & R_{22} + jX_{22} & R_{23} + jX_{23} \\ R_{31} + jX_{31} & R_{32} + jX_{32} & R_{33} + jX_{33} \end{bmatrix}$$

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

各相参数设定值如表 1 所示。

表 1 各相参数设定值

Table 1 Set value of phase parameter

参数	设定值	参数	设定值
R_{ii}	22.056 8 Ω	X_{ij}	48.401 2 Ω
R_{ij}	18.493 6 Ω	Y_{ii}	3.242×10^{-4} S
X_{ii}	111.177 2 Ω	Y_{ij}	$-4.137 4 \times 10^{-5}$ S

解耦后的正序及零序参数($z_{a(1)} = R_1 + jX_1$, $y_{ca(1)} = jB_1$, $z_{a(0)} = R_0 + jX_0$, $y_{ca(0)} = jB_0$)的设定值如表 2 所示。

表 2 各序参数设定值

Table 2 Set value of sequence parameter

参数	设定值	参数	设定值
R_0	59.044 0 Ω	R_1	3.563 2 Ω
X_0	207.979 6 Ω	X_1	62.777 3 Ω
B_0	$4.829 1 \times 10^{-4}$ S	B_1	$7.311 4 \times 10^{-4}$ S

4.2 仿真结果

在获取的稳态数据中,采用中位数抗差最小二乘(MRLS)法来验证该抗差算法的有效性、抗差性能及不同不平衡度的影响。主要包括:加入不同等级(0.1%、0.2%)的噪声的影响,存在坏数据的情况的影响,调整负荷三相不平衡度的影响。

本文辨识结果中相参数以 R_{11} 、 X_{11} 、 Y_{11} 为例,序参数包含正序、零序所有参数。

仿真 1:分析加入不同等级(0.1%、0.2%)噪声

的影响。无噪声下采用 MRLS 法的辨识结果如表 3 所示。仅在单侧三相电压幅值中分别加入强度为 0.1% 和 0.2% 的噪声(噪声整体呈现随机分布,且最大偏差为 0.1% 和 0.2%)下 MRLS 法辨识结果如表 4 所示。

表 3 辨识结果及相对误差

Table 3 Identification results and relative errors

辨识参数	参数设定值	MRLS 辨识值	MRLS 相对误差/%
R_{11}	22.056 8	22.064 2	0.032 7
X_{11}	111.177 2	111.179 4	0.002 0
Y_{11}	3.242×10^{-4}	3.242×10^{-4}	0.004 5
R_0	59.044 0	59.056 6	0.021 4
R_1	3.563 2	3.567 5	0.120 2
X_0	207.979 6	207.983 8	0.002 0
X_1	62.777 3	62.777 3	0.002 1
B_0	4.829×10^{-4}	4.829×10^{-4}	0.002 1
B_1	7.311×10^{-4}	7.311×10^{-4}	0.005 0

注: R_{11} 、 X_{11} 、 R_1 、 X_1 、 R_0 、 X_0 的单位为 Ω , Y_{11} 、 B_1 、 B_0 的单位为 S, 后同。

表 4 在电压幅值中加入不同强度噪声后辨识结果相对误差

Table 4 Relative errors of identification results under different intensity noise in voltage amplitude

辨识参数	参数设定值	相对误差/%	
		0.1%	0.2%
R_{11}	22.056 8	-0.936 0	-2.310 9
X_{11}	111.177 2	0.235 6	0.544 4
Y_{11}	3.242×10^{-4}	-0.021 9	-0.059 0
R_0	59.044 0	0.330 0	0.494 5
R_1	3.563 2	-7.494 8	-14.097
X_0	207.979 6	0.123 3	0.124 2
X_1	62.777 3	0.129 5	0.199 9
B_0	4.829×10^{-4}	-0.023 8	-0.023 1
B_1	7.311×10^{-4}	-0.011 8	-0.019 0

表 3 结果表明,当双端 PMU 数据中不存在量测误差时,辨识值与设定值相近,辨识结果较好,验证了基于中位数抗差最小二乘的相分量法的有效性。表 4 结果表明,当单侧 PMU 数据的三相电压幅值存在较小的量测误差时,MRLS 能较为准确地辨识线路的相参数及正、零序参数,其中正序电阻偏差较大。

仿真 2:分析 PMU 数据中存在坏数据的影响。在单侧三相电压幅值均加入强度为 0.2% 的噪声的基础上,再给前 100 组数据的三相电压幅值中加入 -100% 的偏差。并同时采用传统最小二乘法、ARLS 法和 MRLS 法进行辨识。

表 5 为数据中存在坏数据情况下采用多种抗差方法的辨识结果及相对误差。

表 5 结果表明,当单侧 PMU 数据的三相电压幅值存在较坏数据时,利用最小二乘法的参数辨识结果很差,偏离设计值较远,而与采用 ARLS 法辨识结果相比,采用 MRLS 法辨识结果中电阻及电抗与设定值更相近,相对误差更小,辨识结果更为准确。

表 5 辨识结果及相对误差

Table 5 Identification results and relative errors

辨识参数	参数设定值	相对误差/%		
		LS 法	ARLS 法	MRLS 法
R_{11}	22.056 8	398.320 4	-2.118 0	-1.718 1
X_{11}	111.177 2	17.962 1	2.483 7	0.950 1
Y_{11}	3.242×10^{-4}	-2.642 1	-0.115 8	0.107 1
R_0	59.044 0	-36.526 7	0.471 9	-0.439 5
R_1	3.563 2	2 760.067	-23.419	-15.376 9
X_0	207.979 6	-3.593 4	0.504 9	0.570 2
X_1	62.777 3	17.941 3	1.334 8	0.742 2
B_0	4.829×10^{-4}	-1.001 6	-0.032 7	-0.029 1
B_1	7.311×10^{-4}	-3.885 4	-0.031 9	-0.025 6

仿真 3:调整负荷 2 的三相电抗参数,得到不同电压不平衡度下的 PMU 数据,采用 MRLS 法进行辨识。表 6 为不同不平衡度下的 PMU 数据采用 MRLS 法的辨识结果的相对误差。

表 6 不同电压不平衡度下辨识结果相对误差

Table 6 Relative errors of identification results under different three-phase voltage unbalanced degrees

辨识参数	相对误差/%			
	0.5%	1%	1.5%	2%
R_{11}	0.030 9	0.031 5	0.030 9	0.030 9
X_{11}	0.001 9	0.002 1	0.002 0	0.002 1
Y_{11}	0.004 1	0.004 4	0.004 0	0.003 8
R_0	0.020 6	0.020 6	0.020 5	0.020 5
R_1	0.118 9	0.122 2	0.119 5	0.119 5
X_0	0.002 1	0.002 1	0.002 1	0.002 2
X_1	0.001 9	0.002 0	0.002 0	0.002 0
B_0	0.002 0	0.002 0	0.002 0	0.002 0
B_1	0.004 5	0.005 1	0.004 6	0.004 7

表 6 结果表明,若 PMU 数据量测数据中不存在量测误差时,不同电压不平衡度对 MRLS 法辨识的结果影响不大。

上述结果验证了 MRLS 法在辨识输电线路方法中的正确性,并且在多种情形下,MRLS 法均能给出相对准确的辨识结果,抗差效果比最小二乘法及 ARLS 法更强,具有更好地抵御较小量测误差和不良数据影响的能力。

5 实测 PMU 算例分析

采用某电网 500 kV 单回输电线路稳态运行数据(采样周期为 40 ms),提取了多次不同时间段的 PMU 数据,利用 MRLS 法可得正、零序参数辨识结果如表 7 所示。鉴于运行参数真值未知,所以本文采用实测算例辨识结果与离线测量值进行比较偏差。表 7 结果表明,MRLS 法获得的电抗和对地电纳的辨识结果与离线测量值偏差均不大,在工程可接受范围内,而电阻辨识结果相对偏差较大,但从电力系统状态估计角度分析,电抗比电阻的辨识精度更为重要,故本文所提的辨识算法能够有效辨识电抗与对地电纳,具有重要的工程应用价值。

表 7 正、零序参数辨识结果和相对误差

Table 7 Identification results and relative errors of positive- and zero-sequence parameter

辨识参数	离线测量值	辨识值	相对误差/%
R_1	2.893 5	3.378 9	16.78
X_1	10.534 9	10.073 5	-4.38
B_1	$9.925 7 \times 10^{-5}$	$9.734 6 \times 10^{-5}$	-1.93
R_0	18.376 5	16.408 4	-10.71
X_0	31.358 3	30.182 4	-3.75
B_0	$6.426 4 \times 10^{-5}$	$6.278 0 \times 10^{-5}$	-2.31

6 结论

本文采用电网正常运行时多次三相不平衡情况下的线路 PMU 相分量数据,提出了一种基于相分量法的输电线路在线辨识正序和零序参数的方法,并结合中位数估计实现抗差估计,该方法可将较多的大偏差的辨识结果剔除,并可以有效地抵抗随机噪声的影响,实现抗差辨识。仿真结果表明该方法能够通过采用在线双端 PMU 相分量稳态数据对线路参数进行较好的辨识,并且验证了抗差方法可以在不同程度上较好地减小 PMU 数据中量测误差的影响并具有较强的抵御部分较坏数据影响的抗差能力,使得最终辨识值更为可信。但是事实上,输电线路正常运行情况下,三相不平衡度较小,故如何保证获取到足够多的线性无关的数据,是本文所提方法在实际应用中还需要进一步解决的问题,笔者在未来的研究工作中将会着重展开对该问题的讨论。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 黄梓华. 基于 PMU 的高压输电线路零序参数在线辨识[D]. 北京:华北电力大学,2016.
HUANG Zihua. Online zero sequence parameter identification of high voltage transmission line based on PMU[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [2] 胡志坚,程小敏. 输电线路零序阻抗参数测量方法[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(3):25-29.
HU Zhijian, CHENG Xiaomin. Measurement methods of zero-sequence impedance parameters for transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(3): 25-29.
- [3] 丁蓝. 基于 PMU 的输电线路参数辨识与戴维南等效研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
DING Lan. Study on parameter identification of transmission line and Thevenin equivalent based on PMU[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [4] 王育飞,徐兴,薛花. 考虑雷线影响的同塔多回输电线路不平衡度衡量新方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):107-112.
WANG Yufei, XU Xing, XUE Hua. Measuring unbalance degree of multi-circuit transmission line with consideration of lightning conductor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 107-112.
- [5] 范琦,穆钢,王克英. 基于同步相量测量的线路参数在线测量的实验研究[J]. 东北电力学院学报,2002,22(4):1-11.
FAN Qi, MU Gang, WANG Keying. Research and exploit for power

- system transfer capability analysis and decision [J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 22(4):1-11.
- [6] 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.
- [7] 邓军,肖遥,郝艳捧. 新型同塔双回高压直流输电线路分布参数测量方法及工程应用[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):154-158.
DENG Jun, XIAO Yao, HAO Yanpeng. Measuring of distributed parameter and its application for dual-loop HVDC transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 154-158.
- [8] 毕天姝,丁蓝,张道农. 基于窗口滑动总体最小二乘法的输电线路参数辨识[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(2):10-15.
BI Tianshu, DING Lan, ZHANG Daonong. Transmission line parameters identification based on moving-window TLS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(2): 10-15.
- [9] 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.
- [10] EDUARD J, PAVEL H, PETR J. Transmission line identification using PMUs[C] // IEEE International Conference on Environment & Electrical Engineering. Rome, Italy: IEEE, 2011: 1-4.
- [11] 李钦,项凤雏,颜伟,等. 基于 SCADA 及 PMU 多时段量测信息的独立线路参数估计方法[J]. 电网技术,2011,35(2):105-109.
LI Qin, XIANG Fengchu, YAN Wei, et al. An approach to estimate parameters of single transmission line based on multi-interval information measured by SCADA and phasor measurement units[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 105-109.
- [12] CASTILLO M R M, BRETAS N G, LONDON J B A. Parameter errors and gross errors detection, identification and correction[J]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2012, 59(5):1-12.
- [13] 王茂海,鲍捷,齐霞,等. 基于 PMU 实测数据的输电线路参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):25-27.
WANG Maohai, BAO Jie, QI Xia, et al. Online estimation of transmission line parameters based on PMU measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 25-27.
- [14] 柴书慧,李书敏,何桦. 基于 PMU 及多时间断面的输电网参数估计[J]. 电力系统自动化,2009,34(11):49-52.
CHAI Jinghui, LI Shumin, HE Hua. Parameter estimation based on PMU and multi-cases of SCADA for electricity transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 34(11): 49-52.
- [15] 韦恒,周岷,王毅. 基于故障录波装置的双回输电线路参数在线测量方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):138-142.
WEI Heng, ZHOU Di, WANG Yi. Online parameter measurement of double-circuit transmission lines based on fault recorder[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 138-142.
- [16] 梁志瑞,宫瑞邦,牛胜锁,等. 双回路输电线路的零序参数在线测量[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):70-74.
LIANG Zhirui, GONG Ruibang, NIU Shengsuo, et al. Online measuring of zero-sequence parameters for coupled double-circuit transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 70-74.

- [17] 武长青. 基于双端同步信息的输电线路工频参数在线测量 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
WU Changqing. Power frequency parameter online measurement of transmission line base on synchronous data of both ends [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [18] 薛安成, 周健, 黄梓华, 等. 输电线路零序参数的在线自适应 IGG 抗差辨识方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3923-3929.
XUE Ancheng, ZHOU Jian, HUANG Zihua, et al. Zero sequence parameters identification of transmission lines based on adaptive IGG robust least square method [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3923-3929.
- [19] 许扬, 陆于平, 袁宇波. 一种同杆架设多回线路简化零序互感计算算法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 94-99.
XU Yang, LU Yuping, YUAN Yubo. Calculation of zero-sequence mutual inductance for multi-circuit parallel transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 94-99.
- [20] 洪珠琴, 章碧波, 金涌涛. 架空输电线路零序参数干扰法的研究与实现 [J]. 高压电器, 2006, 42(1): 35-37.
HONG Zhuqin, ZHANG Bibo, JIN Yongtao. Study and realization of zero-sequence parameters interference of overhead transmission lines [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 35-37.
- [21] 钟洲文, 胡志坚, 洪珠琴. 大连电网 500 kV 互感线路参数带电测量 [J]. 东北电力技术, 2005, 26(7): 1-4.
ZHONG Zhouwen, HU Zhijian, HONG Zhuqin. Live line measurement to parameters of Dalian 500 kV transmission lines with mutual inductance [J]. Northeast Electric Power Technology, 2005, 26(7): 1-4.
- [22] 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.
- [23] 徐玮. 输电线路参数测量及谐波分析系统 (参数测量部分) 研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
XU Wei. Research on parameter measurement of transmission line and harmonics analysis system (the part of parameter measurement of transmission line) [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [24] 胡宁, 胡志坚, 郑罡. 基于全球定位系统与积分方程的互感线路零序参数带电测量 [J]. 电网技术, 2005, 29(16): 76-80.
HU Ning, HU Zhijian, ZHENG Gang. Live line parameter measurement of transmission lines with mutual inductance based on GPS technology and integral equations [J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 76-80.
- [25] WU Z. Synchronized phasor measurement units applications in three-phase power system [D]. Blacksburg, USA: Virginia Poly Technic Institute and State University, 2013.

作者简介:



薛安成

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

游宏宇 (1994—), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统参数辨识;

徐劲松 (1992—), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统参数辨识。

On-line robust identification of transmission line's sequence parameter based on median estimation and phase component model

XUE Ancheng¹, YOU Hongyu¹, SU Dawei², XU Jingsong¹, ZHOU Jian¹, XU Feiyang¹,
LU Min³, WANG Zhihua⁴, BI Tianshu¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Jiangsu Power Supply Company, Nanjing 210024, China; 3. State Grid Zhejiang Power Supply Company, Hangzhou 310007, China; 4. State Grid Shanghai Power Supply Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The noise and biased data in the field PMU (Phase Measurement Unit) data may reduce the identification accuracy of positive- and zero-sequence parameters, which may result in low qualification rate of state estimation that can negatively impact the operation of the electric power system. A robust identification method based on PMU data, the phase component method and median robust estimation is proposed for the line sequence parameter estimation, which is to address these problems. The proposed method employs the PMU phase voltage and current data at both terminals of the transmission line at different time under three-phase unbalance, the phase component model to simultaneously identify the positive- and zero-sequence parameter, and the median estimation to reduce the demand of data. The π -type equivalent phase component model for the transmission line is established, and the phase parameter identification method is derived based on least square method. Furthermore, to alleviate the impacts of extreme value and gross data of most measurement, the median estimation is applied in the robust least square method. Finally, the effectiveness, the anti-noise ability and robustness of the proposed method are verified by the simulation and the field PMU data.

Key words: on-line parameter identification; phase components method; three-phase unbalance; median estimation; sequence parameter; transmission line

附录

$$\begin{bmatrix}
 \dot{U}_{Ma} - \dot{U}_{Na} & \dot{U}_{Mb} - \dot{U}_{Nb} & \dot{U}_{Mc} - \dot{U}_{Nc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Ma} & \dot{U}_{Mb} & \dot{U}_{Mc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Ma} - \dot{U}_{Na} & \dot{U}_{Mb} - \dot{U}_{Nb} & \dot{U}_{Mc} - \dot{U}_{Nc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Ma} & \dot{U}_{Mb} & \dot{U}_{Mc} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Ma} - \dot{U}_{Na} & \dot{U}_{Mb} - \dot{U}_{Nb} & \dot{U}_{Mc} - \dot{U}_{Nc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Ma} & \dot{U}_{Mb} & \dot{U}_{Mc} \\
 \dot{U}_{Na} - \dot{U}_{Ma} & \dot{U}_{Nb} - \dot{U}_{Mb} & \dot{U}_{Nc} - \dot{U}_{Mc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Na} & \dot{U}_{Nb} & \dot{U}_{Nc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Na} - \dot{U}_{Ma} & \dot{U}_{Nb} - \dot{U}_{Mb} & \dot{U}_{Nc} - \dot{U}_{Mc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Na} & \dot{U}_{Nb} & \dot{U}_{Nc} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Na} - \dot{U}_{Ma} & \dot{U}_{Nb} - \dot{U}_{Mb} & \dot{U}_{Nc} - \dot{U}_{Mc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{U}_{Na} & \dot{U}_{Nb} & \dot{U}_{Nc} \\
 \vdots & \vdots
 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix}
 x_{11} \\
 x_{12} \\
 \vdots \\
 x_{19} \\
 x_{21} \\
 x_{22} \\
 \vdots \\
 x_{29}
 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
 \dot{I}_{Ma} \\
 \dot{I}_{Mb} \\
 \dot{I}_{Mc} \\
 \dot{I}_{Na} \\
 \dot{I}_{Nb} \\
 \dot{I}_{Nc} \\
 \vdots
 \end{bmatrix}$$